



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM SISTEMA DE ELEVAÇÃO, SOB AÇÃO SÍSMICA

EMANUEL FERNANDO DINIS MAIO

outubro de 2023

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM SISTEMA DE ELEVAÇÃO, SOB AÇÃO SÍSMICA

Emanuel Fernando Dinis Maio

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM SISTEMA DE ELEVAÇÃO, SOB AÇÃO SÍSMICA

Emanuel Fernando Dinis Maio, 1140757

Construções Mecânicas

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do ex. Professor Dr. Jorge Fonseca Justo.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

Aproveito estas linhas para manifestar o meu agradecimento especial à minha esposa Elisabete Maio e ao meu filho Dinis Maio, pelo apoio incondicional na conciliação entre a vida familiar, estudo e trabalho. Vocês merecem todo o meu apreço e respeito!

O meu agradecimento ao Sr. Prof. Doutor Jorge Fonseca Justo, pelo apoio incondicional, a partilha de conhecimento e orientação, que permitiu adquirir novos conhecimentos.

Gostaria de agradecer à direção da empresa Schmitt-Elevadores, na pessoa do Sr. Dr. Miguel Franco, por aceitar o desafio e ao Sr. Eng. Alexander Iken pela disponibilidade e apoio em reunião de apresentação de um caso de estudo interno, assim como a partilha de informação para possibilitar a realização deste estudo.

Agradeço também ao Sr. Rui Mendes, a disponibilidade de informação e apoio prestado.

O meu agradecimento ao colega Rafael Cunha, pela disponibilidade e apoio.

Por último gostaria de agradecer aos meus amigos e colegas que me acompanharam no meu percurso académico.

página propositadamente em branco

RESUMO

Com o presente relatório, pretende-se estudar o comportamento de um sistema de elevação, quando sujeito a uma atividade sísmica ou terramoto, cuja instalação é usualmente encontrada em qualquer tipo de edifício. Embora o elevador não seja considerado um equipamento estrutural, a presença deste tipo de equipamento em qualquer edifício público é bastante assídua e de extrema importância na gestão de transporte vertical de pessoas e cargas. Precisamente pelo facto de transportar pessoas, faz com que este tipo de equipamento seja considerado especial, pelo que desde meados do século XX, a resposta do seu comportamento perante uma atividade sísmica é objeto de estudo. Para uma melhor introdução do tema, este relatório está dividido numa parte de contextualização, onde muito superficialmente, são abordadas variantes com influência na resposta final do equipamento. Cada uma destas variantes, tem a sua importância na realização de projeto, sendo necessário ter em atenção os requisitos fundamentais de construção de edifícios e legislação em vigor, assim como ter em atenção a tipologia do terreno e respetiva distribuição no território nacional, as diferentes ondas de propagação de uma atividade sísmica, a tipologia de edifício e respetivos meios de transporte vertical. É efetuada uma introdução básica aos diferentes meios de transporte vertical, abordando particularmente os diferentes tipos de elevadores. Para demonstrar a importância da necessidade do estudo, são mencionadas algumas catástrofes naturais, nomeadamente atividade sísmica. Num capítulo dedicado ao estado de arte e revisão bibliográfica, inicialmente são analisados alguns artigos especificamente direcionados para o registo das consequências reais que uma atividade sísmica tem na sociedade, particularmente nos efeitos secundários da operacionalidade em elevadores. Numa segunda fase deste capítulo, é direcionada a atenção para a análise de artigos, cujos temas são especialmente focados no estudo experimental e desenvolvimento de novas propostas para a melhoria contínua da resposta dos elevadores à atividade sísmica, sendo identificadas algumas anomalias e apresentadas algumas soluções de melhoria de segurança. Num capítulo especificamente dedicado à análise do comportamento do elevador em condições sísmicas, através de cálculo analítico baseado na legislação, são calculados os esforços gerados no equipamento e posterior comparação com os limites legais para validação do elevador numa determinada categoria sísmica. É também dedicado um capítulo para o estudo do comportamento do elevador através da análise computacional com o método de elementos finitos. Finalmente são analisados e comparados os resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE

Sismo; Terramoto; Elevador; Contrapeso.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

With this report, it is intended to study the behavior of a lifting system, when subjected to a seismic activity or earthquake, whose installation is usually found in any type of building. Although the elevator is not considered a structural equipment, the presence of this type of equipment in any public building is quite assiduous and of extreme importance in the management of vertical transport of people and cargo. Precisely because it transports people, it makes this type of equipment special, so that since the mid-twentieth century, the response of its behavior to a seismic activity is the object of study. For a better introduction of the topic, this report is divided into a contextualization part, where very superficially, variants with influence on the final response of the equipment are addressed. Each of these variants has its importance in the realization of the project, being necessary to consider the fundamental requirements of construction of buildings and legislation in force, as well as to take into account the typology of the land and its distribution in the national territory, the different waves of propagation of a seismic activity, the typology of building and its means of vertical transport. A basic introduction is made to the different means of vertical transport, addressing the different types of lifts. To demonstrate the importance of the need for the study, some natural disasters, namely seismic activity, are mentioned. In a chapter dedicated to the state of the art and bibliographic review, initially some articles are analyzed specifically aimed at recording the real consequences that a seismic activity has on society, particularly in the secondary effects of the operability in elevators. In a second phase of this chapter, attention is directed to the analysis of articles, whose themes are especially focused on the experimental study and development of new proposals for the continuous improvement of the response of elevators to seismic activity, being identified some anomalies and presented some solutions for safety improvement. In a chapter specifically dedicated to the analysis of the behavior of the elevator in seismic conditions, through analytical calculation based on the legislation, the efforts generated in the equipment are calculated and then compared with the legal limits for validation of the elevator in each seismic category. A chapter is also devoted to the study of elevator behavior through computational analysis with the finite element method. Finally, the results obtained are analyzed and compared.

KEYWORDS

Seismic; Earthquake; Elevator; Counterweight.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XV
1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Objetivos	21
1.2. Metodologia	21
1.3. Contextualização	21
1.3.1. Ação sísmica.....	22
1.3.2. Requisitos fundamentais de edifícios ou estruturas.....	24
1.3.3. Condições de terreno e ação sísmica.....	25
1.3.4. Classificação e zonamento sísmico	29
1.3.4.1. Portugal Continental	29
1.3.4.2. Arquipélago da Madeira.....	30
1.3.4.3. Arquipélago dos Açores - Grupo Ocidental.....	30
1.3.4.4. Arquipélago dos Açores - Grupo Central.....	30
1.3.4.5. Arquipélago dos Açores - Grupo Oriental	31
1.3.5. Eventos sísmicos e consequências.....	31
1.3.5.1. Terramoto de Seattle – EUA.....	32
1.3.5.2. Terramoto de Christchurch – Nova Zelândia	32
1.3.5.3. Sismo e Tsunami de Tohoku - Japão	33
1.3.5.4. Terramoto de Lisboa	34
2. EQUIPAMENTOS DE ELEVAÇÃO	35
2.1. Tipos de equipamentos.....	35
2.1.1. Elevadores Elétricos	35
2.1.1.1. Elevador tradicional com casa de máquina.....	36
2.1.1.2. Elevador sem casa de máquina <i>AOM</i>	37
2.1.2. Elevadores Hidráulicos.....	38
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	39
3.1. Efeitos da ação sísmica em elevadores	39
3.2. Análise de casos Artigos	39
3.2.1. Cidade de Van, Turquia	39
3.2.2. Chia-Yi, Tailândia.....	43
3.2.3. Resposta de um sistema estrutura-elevador	44
3.2.4. Resposta sísmica do sistema guias-contrapeso	48
3.2.5. Outros artigos científicos	49
4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À AÇÃO SÍSMICA EN 81-77	52
4.1. Classificação sísmica de elevadores	52

4.2. Medidas preventivas	53
4.3. Descrição do elevador	55
4.4. Especificações técnicas.....	56
4.5. Avaliação à ação sísmica Categoria 1	57
4.5.1. Relação da taxa de carga.....	57
4.5.2. Massa da carga nominal.....	58
4.5.3. Sistema de guias Características	58
4.5.4. Cabina Cálculo dimensional	59
4.5.4.1. Encurvadura	59
4.5.4.2. Forças sísmicas geradas.....	59
4.5.4.3. Forças de flexão.....	60
4.5.4.1. Tensões de flexão	61
4.5.4.2. Tensão de compressão.....	61
4.5.4.3. Tensão de encurvadura	62
4.5.4.4. Tensões combinadas	63
4.5.4.5. Tensão de curvatura na flange	63
4.5.4.6. Flecha admissível.....	64
4.5.5. Contrapeso Cálculo dimensional.....	67
4.5.5.1. Encurvadura	67
4.5.5.2. Forças sísmicas geradas.....	67
4.5.5.3. Forças de flexão.....	68
4.5.5.4. Tensões de Flexão	68
4.5.5.5. Tensão de compressão.....	69
4.5.5.6. Tensão de encurvadura	69
4.5.5.7. Tensões combinadas	69
4.5.5.8. Tensão de curvatura na flange	70
4.5.5.9. Flecha admissível.....	70
4.5.5.10. Resultado Cálculo sísmico	72
5. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À AÇÃO SÍSMICA MEF.....	73
5.1. Análise computacional	74
5.1.1. Preparação da geometria.....	74
5.1.1.1. Modelação das guias.....	76
5.1.1.2. Modelação da cabina	77
5.1.1.1. Modelação do contrapeso	78
5.1.1.2. Modelação do grupo de tração	79
5.1.2. Definição de contactos.....	80
5.1.3. Definição da malha (“Mesh”).....	82
5.1.4. Critérios de análise.....	83
5.1.4.1. Apoios.....	83
5.1.4.2. Aceleração	83
5.2. Avaliação de resultados.....	84

5.2.1. Análise 1 Modelo global “ <i>Frictionless</i> ”	84
5.2.2. Análise 2 Modelo global “ <i>Bonded</i> ”	85
5.2.2.1. Análise com solicitação em (x)	85
5.2.2.2. Análise com solicitação em (y)	91
5.2.3. Análise 3 Modelo simplificado_1	96
5.2.4. Análise 4 Modelo simplificado_2	99
5.2.4.1. Análise com solicitação em (x)	102
5.2.4.2. Análise com solicitação em (z)	104
5.2.5. Análise 5 Modelo global “ <i>Frictionless_2</i> ”	106
5.2.5.1. Análise com solicitação em (y)	106
6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	110
6.1. Resumo de resultados	110
6.2. Cálculo analítico <i>versus</i> MEF	112
6.3. Conclusões finais	113
6.4. Limitações e propostas para trabalhos futuros.....	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Aceleração Sísmica (Adaptado - [9])	23
Figura 2 - Representação de ondas sísmicas (Adaptado - [10])	23
Figura 3 - Forma do espectro de resposta elástica (Adaptado - [1]).....	26
Figura 4 - Espectros de resposta elástica de tipo 1, Terrenos dos tipos A a E (5% de amortecimento) (Adaptado [1])	28
Figura 5 - Espectros de resposta elástica de tipo 2, Terrenos dos tipos A a E (5% de amortecimento) (Adaptado [1])	28
Figura 6 - Zonamento Sísmico Portugal Continental (Adaptado - [1])	29
Figura 7 - Zonamento Sísmico - Arquipélago da Madeira (Adaptado - [1])	30
Figura 8 - Zonamento Sísmico - Arquipélago dos Açores - Grupo Ocidental (Adaptado - [1])	30
Figura 9 - Zonamento Sísmico - Arquipélago dos Açores - Grupo Central (Adaptado - [1])	30
Figura 10 - Zonamento Sísmico - Arquipélago dos Açores - Grupo Oriental (Adaptado - [1]).....	31
Figura 11 - Estatística anual de atividade sísmica mundial (Adaptado - [13])	31
Figura 12 - Terramoto de Seattle (Adaptado - [15]).....	32
Figura 13 - Terramoto de Christchurch - edifício Pyne Gould Guinness (Adaptado - [11])	33
Figura 14 - Vista aérea de Sendai (Adaptado - [16])	33
Figura 15 – Localização provável do epicentro do terramoto de Lisboa (Adaptado - [17]).....	34
Figura 16 - Elevador elétrico tradicional (Adaptado - [18]).....	36
Figura 17 - Representação de elevador AOM - ISI2040-4 (Adaptado - [18])	37
Figura 18 - Representação de elevador hidráulico (ação direta) (Adaptado - [18])	38
Figura 19 – Dano nas roçadeiras e descarrilamento do contrapeso (Adaptado - [22]	41
Figura 20 - Descarrilamento do contrapeso e colisão com cabina (Adaptado - [22].....	41
Figura 21 – Dano nas roçadeiras do contrapeso (Adaptado - [22]	41
Figura 22 - Descarrilamento do contrapeso e colisão com cabina (Adaptado - [22].....	41
Figura 23 - Empeno da estrutura do contrapeso (Adaptado - [22]).....	41
Figura 24 - Empeno da estrutura do contrapeso com deslocação de pesos (Adaptado - [22]).....	41
Figura 25 - Empeno da guia (Adaptado - [22]	42
Figura 26 - Empeno da fixação (Adaptado - [22]).....	42
Figura 27 - Queda de pesos em cima da cabina (Adaptado - [22]	42
Figura 28 - Queda de blocos em cima da cabina (Adaptado - [22]	42
Figura 29 - Subsistema contrapeso e conjunto de guias (Adaptado - [25])	44
Figura 30 - Contacto não-linear (Adaptado - [25]).....	45
Figura 31 - Detalhe da ligação entre roçadeira de contrapeso e guia (Adaptado - [25]).....	45
Figura 32 - Conjunto de rodas (Adaptado - [27])	48
Figura 33 - Representação do conjunto guia- contrapeso (Adaptado - [26])	51
Figura 34 – Representação de sistema de amortecedor dinâmico (Adaptado – [22])	51
Figura 35 - Modelo do elevador em análise.....	55
Figura 36 - Representação esquemática de parâmetros (Adaptado - [5]).....	57
Figura 37 - Representação de eixos da guia e forças (Adaptado [5]).....	60
Figura 38 - Distribuição de carga na cabina (caso geral) – (Adaptado - [34])	60
Figura 39 - Representação da guia perfil em " T " - (Adaptado - [20]).....	63
Figura 40 - Posição normal do sistema de retenção, (Adaptado -[5])	65

Figura 41 - Comprimento mínimo da sobreposição, durante atividade sísmica (Adaptado -[5])... 65	65
Figura 42 - Elemento bidirecional 73	73
Figura 43 - Elemento tridimensional 73	73
Figura 44 - Disposição das etapas no Workbench 74	74
Figura 45 - Parametrização das características dos materiais 75	75
Figura 46 - Ligação entre caixas no Workbench..... 76	76
Figura 47 - Alteração de geometria..... 76	76
Figura 48 - Pormenor de montagem da guia 76	76
Figura 49 - Representação das massas pontuais Carga nominal e portas de cabina 78	78
Figura 50 – Contrapeso 78	78
Figura 51 - Máquina de tração 79	79
Figura 52 - Roda de desvio 79	79
Figura 53 - Terminais normalizados 79	79
Figura 54 - Pormenor de cabina antes do ensaio..... 84	84
Figura 55 - Pormenor de cabina após início do ensaio 84	84
Figura 56 - Pormenor de contrapeso antes do ensaio 84	84
Figura 57 - Pormenor de contrapeso após início do ensaio..... 84	84
Figura 58 - Imagem global após ensaio 84	84
Figura 59 - Distribuição de deformações – $a_d(x)$ – Ligação Bonded 85	85
Figura 60 - Pormenor com local de deformação zona de suporte da roçadeira – $a_d(x)$ - Bonded.. 86	86
Figura 61 - Deformações no sistema de guias – $a_d(x)$ – Ligação Bonded 86	86
Figura 62 - Pormenor de deformação na fixação das guias à parede – $a_d(x)$ 87	87
Figura 63 - Deformação direcional na guia de contrapeso – $a_d(x)$ 87	87
Figura 64 - Pormenor de tensão equivalente na bucha e fixação – $a_d(x)$ 88	88
Figura 65 - Pormenor das tensões equivalentes na guia de cabina – $a_d(x)$ 89	89
Figura 66 - Distribuição de tensões – $a_d(x)$ - Bonded 89	89
Figura 67 - Pontos de tensão no contrapeso – $a_d(x)$ 90	90
Figura 68 - Distribuição de deformações – $a_d(y)$ 91	91
Figura 69 - Ponto de deformação direcional máxima na cabina – $a_d(y)$ 91	91
Figura 70 – Ponto de deformação direcional máxima nas guias – $a_d(y)$ 92	92
Figura 71 - Ponte de deformação total máxima – $a_d(y)$ 92	92
Figura 72 - Pormenor com valor de deformação na guia – $a_d(y)$ 93	93
Figura 73 - Deformações instaladas no contrapeso – $a_d(y)$ 93	93
Figura 74 - Ponto de máxima tensão - Bucha na fixação à parede – $a_d(y)$ 94	94
Figura 75 - Pormenor de tensão máxima na fixação das guias à parede – $a_d(y)$ 94	94
Figura 76 - Pontos de tensão na zona do contrapeso – $a_d(y)$ 95	95
Figura 77 - Distribuição de tensão no equipamento – $a_d(y)$ 95	95
Figura 78 - Representação da malha - modelo simplificado 96	96
Figura 79 - Representação da malha - modelo simplificado 97	97
Figura 80 - Representação da força aplicada 97	97
Figura 81 - Resultado após ensaio..... 98	98
Figura 82 - Estrutura simplificada_2 99	99
Figura 83 - Contacto entre aresta da guia e superfície da roçadeira 100	100
Figura 84 - Parametrização do contacto frictionless Face – Face 100	100
Figura 85 – Ponto de massa 101	101

Figura 86 – Aceleração da gravidade – Condição de funcionamento relativo ao tempo	102
Figura 87 - Aceleração horizontal $a_d(x)$ – Condição de funcionamento relativo ao tempo	102
Figura 88 - Representação das condições de ensaio	103
Figura 89 - Resultado da simulação frictionless com $a_d(x)$	103
Figura 90 - Evolução da deformação relativo ao tempo com $a_d(x)$	104
Figura 91 - Aceleração horizontal $a_d(z)$ – Condição de funcionamento relativo ao tempo	104
Figura 92 - Resultado da simulação frictionless com $a_d(z)$	105
Figura 93 - Evolução da deformação relativo ao tempo com $a_d(z)$	105
Figura 94 - Distribuição geral de deformações – $a_d(y)$ - Ligação Frictionless	106
Figura 95 - Deformações no sistema de guias – $a_d(y)$ – Ligação Frictionless	107
Figura 96 - Pormenor de deformação da guia de cabina – $a_d(y)$ - Frictionless.....	107
Figura 97 - Tensão equivalente máxima - Ligação entre cabo e roda de tração	108
Figura 98 - Distribuição de tensões – $a_d(y)$ – Frictionless.....	108
Figura 99 - Pormenor de tensão equivalente na bucha e fixação – $a_d(y)$	109
Figura 100 - Pormenor das tensões equivalentes nas guias contrapeso - Frictionless $a_d(y)$	109

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de terreno (Quadro 3.1 - Adaptado, [1])	25
Tabela 2 - Parâmetros dos espectros de resposta elástica de tipo 1.....	27
Tabela 3 - Parâmetros dos espectros de resposta elástica de tipo 2.....	27
Tabela 4 - Parâmetros dos espectros de resposta elástica verticais.....	29
Tabela 5 - Aceleração máxima de referência a_{gR} (m/s ²) por zona sísmica - (Quadro NA. I - Adaptado - [1]).....	29
Tabela 6 - Magnitude vs nº de réplicas entre 23 e 30 de outubro 2011 (Adaptado - [22]).....	39
Tabela 7 - Resumo da análise do caso de estudo.....	40
Tabela 8 - Estatística de danos em elevadores (Adaptado - [24]).....	43
Tabela 9 - Resumo de danos	44
Tabela 10 - Categorias sísmicas de elevadores (Tabela A.1 – Adaptado [5]).....	52
Tabela 11 Valores de q_a para elementos não estruturais (Quadro 4.4 - Adaptado [1])	53
Tabela 12 - Medidas preventivas para pontos de contacto (Adaptado - [5]).....	54
Tabela 13 - Característica do elevador em análise.....	56
Tabela 14 - Valores e Características das guias.....	58
Tabela 15 – Lista de polinómios para categorias de aço com resultado (w) para guia de cabina - (Adaptado - [34]).....	59
Tabela 16 - Coeficientes de impacto - (Adaptado - [19])	62
Tabela 17 - Coeficientes de segurança – (Adaptado [19])	64
Tabela 18 - Tensão máxima permitida com coeficiente segurança 1,8 – ((Adaptado [19])	64
Tabela 19 - Resumo de resultados para as guias de cabina.....	66
Tabela 20 – Lista de polinómios para categorias de aço com resultado (w) para guia de contrapeso - (Adaptado - [34]).....	67
Tabela 21 - Resumo de resultados para as guias de contrapeso	71
Tabela 22 - Resumo dos cálculos de guias de cabina.....	72
Tabela 23 - Resumo dos cálculos de guias de contrapeso	72
Tabela 24 - Distribuição de massas	77
Tabela 25 - Tipos de contactos.....	80
Tabela 26 – Resumo dos contactos utilizados	81
Tabela 27 - Características da malha.....	82
Tabela 28 - Identificação das acelerações por análise	83
Tabela 29 – Resumo de resultados	110

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
AOM	<i>Aufzug ohne Maschinenraum</i> - (Elevador sem Casa de Máquina)
EC8	Eurocódigo 8
MEF	Método de elementos finitos

Lista de Símbolos

m	Massa	kg
T	Temperatura	°C
km	Quilómetro	$m \times 10^3$
V_p	Velocidade da onda P	m/s
V_s	Velocidade da onda S	m/s
K	Módulo de incompressibilidade	--
N_{SPT}	Número de pancadas do ensaio de penetração dinâmica	--
P_{NCR}	Probabilidade de excedência de referência em 50 anos	--
T_{NCR}	Período de retorno de referência para requisito de não ocorrência	--
P_{DLR}	Probabilidade de excedência	--
T_{DLR}	Período de retorno	--
S	Coeficiente do solo	--
η	Aceleração horizontal do projeto	m/s^2
a_g	Valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A	m/s^2
a_{vg}	Valor de cálculo da aceleração à superfície do terreno na direção vertical	m/s^2
$g; g_n$	Aceleração da gravidade (9,81)	m/s^2
S_a	Coeficiente sísmico para equipamento não-estrutural	--
γ_a	Coeficiente de importância para equipamentos não-estruturais	--
q_a	Coeficiente de comportamento para equipamentos não-estruturais	--
α	Rácio entre a aceleração horizontal do projeto e a gravidade ($\alpha = a_g/g$)	--
z	Altura do elemento não-estrutural acima do nível da ação sísmica	m
H	Altura do edifício desde o nível do solo	m
ξ	Amortecimento viscoso da estrutura	%
μ_0	Rigidez do material	--
δ_0	Densidade do material	--
$V_{s,30}$	Velocidade média da propagação de onda S nos 30 m superiores ao perfil do solo	m/s
h_i	Espessura	m

v_i	Velocidade das ondas de corte	m/s
$X(t), Y(t)$	Deslocamento modal da estrutura no eixo correspondente	m
$\dot{X}(t), \dot{Y}(t)$	Velocidade modal, no eixo correspondente	m/s
$\ddot{X}(t), \ddot{Y}(t)$	Aceleração modal, no eixo correspondente	m/s ²
$\ddot{X}_0(t), \ddot{Y}_0(t)$	Aceleração de base	m/s ²
$\omega_{x,i}, \omega_{y,i}$	Frequência natural	rad/s
$\Gamma_{x,i}, \Gamma_{y,i}$	Fator de participação modal da excitação dinâmica	--
ζ_s	Taxa da viscosidade de amortecimento da estrutura	--
\ddot{U}, \ddot{V}	Aceleração do solo em caso de terremoto	m/s ²
C	Fator de escala	--
$x_z(t), y_z(t)$	Deslocamentos relativos da estrutura	m
$\dot{x}_z(t), \dot{y}_z(t)$	Velocidades relativas da estrutura	m/s
$R_{x,i}, R_{y,i}$	Reações	N
j	Valor para a posição de contacto das roçadeiras	unidade
x_j, y_j	Deslocamento do contrapeso em relação ao plano	m
a_x, a_j	Folga das roçadeiras	m
$\delta_{x,j}, \delta_{y,j}$	Flexibilidade dos elementos de contactos	--
$\delta_{\hat{x},j}, \delta_{\hat{y},j}$	Flexibilidade elástica da guia, considerada como viga contínua	--
$EI, EI_x, 2EI_y$	Rigidez da guia à flexão	Pa
H	Distância entre fixações das guias	m
\bar{z}_j	Posição relativa das roçadeiras ao longo da guia em um determinado intervalo	m
z_j	Posição das massas - m_1 ($j=1$) e m_2 ($j=2$)	m
z_0	Posição inicial da massa superior ao nível do topo da caixa	m
v_t	Velocidade vertical do contrapeso	m/s
n	Número de vãos abaixo do atual	unidade
ζ_s	Taxa de amortecimento contacto/elemento	--
$\dot{x}_z(t), \dot{y}_z(t)$	Aceleração relativa	m/s ²
μ	Coeficiente de fricção de Coulomb	--
$\phi_{x,i}(z), \phi_{y,i}(z)$	Formas dos modos	--
$Se(T)$	Espectro de resposta elástica horizontal da aceleração à superfície do terreno	m/s ²

S_{ve}	Espectro de resposta elástica vertical da aceleração à superfície do terreno	m/s^2
T	Período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade	s
T_B	Limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante	s
T_C	Limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante	s
T_D	Valor que define no espectro o início dos ramos de deslocamento constante	s
T_a	Período fundamental de vibração do elemento não-estrutural	s
T_1	Período fundamental de vibração do edifício	s
Q_{SE}	Massa da carga nominal suspensa	kg
k_{SE}	Coefficiente de carga	--
Q	Carga nominal	kg
P	Massa da cabina em vazio (incluindo componentes, parte dos cabos de suspensão e cabos ou correntes de compensação)	kg
P_{EC}	Massa da cabina em vazio (ignorando a massa dos cabos de suspensão e cabos ou correntes de compensação)	kg
F_{SE}	Forças sísmicas geradas pela massa da cabina	N
F_p	Forças de impulso de todas as fixações numa guia (devido ao assentamento normal do edifício)	N
M_g	Massa total de uma linha de guias	kg
F_x	Força exercida na guia pela roçadeira ou dispositivo de retenção, no eixo (x)	N
F_y	Força exercida na guia pela roçadeira ou dispositivo de retenção, no eixo (y)	N
F_V	Força vertical	N
σ_c	Tensão de compressão	Pa
σ_k	Tensão de encurvadura	Pa
σ_f	Tensão de flexão	Pa
σ_{fc}	Tensão combinada de flexão e compressão	Pa
σ_{fk}	Tensão combinada de flexão encurvadura	Pa
σ_F	Tensão de curvatura na flange	Pa

δ_x, δ_y	Flecha direção (x) ou (y)	m
W_{cwt}	Massa do contrapeso	kg
T_{susp}	Tipo de suspensão	--
K_{SE}	Fator de carga sísmica	--
K_2	Fator de impacto	--
K_3	Carga adicional do fator de impacto – aceleração inicial	--
A	Área	m ²
ρ	Massa específica	kg/m
W_{xx}, W_{yy}	Módulo da secção	m ³
I	Raio de giração	m
R_m	Resistência à tração	Pa
σ_{adm}	Tensão máxima admissível	Pa
f	Altura da base da guia	m
C	Espessura do pé da guia	m
l	Comprimento da roçadeira	m
b	Largura da roçadeira	m
h_2	Altura do trilho	m
I_{xx}, I_{yy}	Momento de inércia polar	m ⁴
E	Módulo de elasticidade	Pa
λ	Coefficiente de encurvadura Esbelteza	--
ω	Ómega Método ómega	--

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é efetuada uma introdução geral, passando por abordar o tema em assunto e contextualizar a importância e necessidade de estudo, devido às consequências que tem em todo o mundo, assim como definir os objetivos e metodologias utilizadas na realização deste estudo.

1.1. Objetivos

Este trabalho, tem como objetivo analisar o comportamento de um sistema de elevador, quando sujeito a uma ação sísmica, pois embora considerado “um elemento não estrutural “ [1], aquando da realização do projeto de estabilidade da estrutura de num edifício, existem algumas particularidades na sua estrutura que carecem de especial atenção.

Tratando-se de um sistema complexo, com um comportamento dinâmico, e sabendo que na maioria dos casos, as deformações significativas ocorrem essencialmente em alguns grupos funcionais do sistema de um elevador, analisar-se-á o comportamento de alguns elementos críticos, tais como cargas suspensas e respetivos elementos de guia, por forma a tentar identificar eventuais pontos críticos, analisar dados e apresentar soluções para a melhoria contínua dos componentes identificados.

Desta forma, espera-se contribuir para o desenvolvimento de um produto com melhores características, que cumpra as exigências da legislação em vigor, com um comportamento mais previsível e mais seguro, quando sujeito a eventuais vibrações provocadas por ação sísmica.

1.2. Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho, obedece a uma metodologia de pesquisa bibliográfica sobre o tema, recorrendo à pesquisa de artigos em estudos da especialidade e plataformas de referência, tais como “*Web of Science*” [2] e “*B-ON*” [3], recorrendo também a repositórios como o “*Google Académico*” [4] passando pela posterior leitura e análise de artigos publicados e relacionados com os efeitos da ação sísmica em edifícios.

Como base de orientação e direcionando o foco especialmente para o comportamento dos elevadores, recorreu-se à consulta da legislação em vigor, nomeadamente a EN NP 81-77, [5].

1.3. Contextualização

Com o decorrer dos tempos e sob efeito da análise dos resultados obtidos das inúmeras catástrofes sísmicas ocorridas em todo o mundo, despoletou-se a necessidade de encontrar um conjunto de soluções, de modo a orientar os engenheiros e projetistas a desenvolverem os seus produtos, por forma a minimizar o impacto nos edifícios, quando sujeitos a tal evento. Conscientes desta realidade, esta preocupação levou ao desenvolvimento de normas internacionais específicas, sendo adotadas por inúmeros países e transposta para legislação nacional, como por exemplo a NP EN 1988-1 (Eurocódigo 8 – Parte 1 – EC8-1),[1].

Citando a norma NP EN 1998-1, “O Eurocódigo 8, aplica-se ao desenvolvimento de projeto e à construção de edifícios e outras obras de engenharia civil que, em caso de ocorrência de sismo, visa

assegurar a proteção de vidas humanas, limitar os danos e garantir a operacionalidade de edifícios”,[1].

Para que o estudo seja mais bem entendido, a contextualização foi dividida em alguns subcapítulos, sendo que no primeiro, apresenta-se um breve resumo sobre a ação sísmica, passando pela decomposição nos diferentes tipos de onda e formas de propagação.

No segundo subcapítulo, apresentam-se os requisitos fundamentais para a construção de edifícios ou estruturas, cujas regras estão devidamente regulamentadas de acordo com a NP EN1998-1 – Eurocódigo 8, [1].

No terceiro subcapítulo é efetuada uma breve descrição sobre a natureza do terreno e os fatores que influenciam a propagação das ondas sísmicas, assim como a atribuição de categorias ao tipo de terreno e as respetivas velocidades de propagação das ondas de corte. São apresentadas as zonas sísmicas em Portugal e respetiva caracterização relativamente à ação sísmica.

No quarto subcapítulo, é efetuada a classificação dos terrenos relativamente à ação sísmica e identificação do zonamento em todo o território nacional.

No quinto subcapítulo, são apresentadas algumas ocorrências sísmicas a nível mundial, relatando algumas das possíveis consequências para a superfície terrestre e restantes estruturas.

1.3.1. Ação sísmica

A ação sísmica é um fenómeno que ocorre quando existe uma libertação súbita de energia acumulada na crosta terrestre, proveniente das tensões acumuladas com a movimentação das placas tectónicas. A quantidade de energia libertada é medida e registada pelos observatórios nacionais, em escalas numéricas que quantificam a magnitude da atividade sísmica, tal como a “escala de *Mercalli*” criada em 1902 por Giuseppe Mercalli [6]. Existem outras escalas sendo a mais conhecida a “escala de *Richter*”, desenvolvida na década dos anos 30 do século XX por Charles Francis Richter e Beno Gutenberg [7] ou a “MMS – (*Escala Sismológica de Magnitude de Momento*)”, desenvolvida por Thomas C. Hanks e Hiroo Kanamori [8], sendo implementada em 1979.

Tratando-se de escalas logarítmicas de base 10, que quantificam as amplitudes sísmicas do maior deslocamento medidas pelos sismógrafos, no entanto a MMS, corrige alguns erros existentes nas intensidades muito altas, existentes na escala de *Richter*, não limitando assim a escala a um único número tendencial máximo. Os eventos sísmicos são registados e comparados num gráfico com um sistema de eixos que mede a amplitude das ondas durante o tempo de manifestação, sendo que inicia no valor de magnitude (0), correspondente à ausência de atividade e à medida que a atividade sísmica é iniciada e registada, o valor da magnitude vai alterando, não existindo limite para o valor máximo.

Na Figura 1, está representado um registo de uma ação sísmica, sendo que a linha vermelha indica a “onda P” que ocorre com o início do sismo e a linha verde representa o início da “onda S”, com efeitos mais destrutivos.

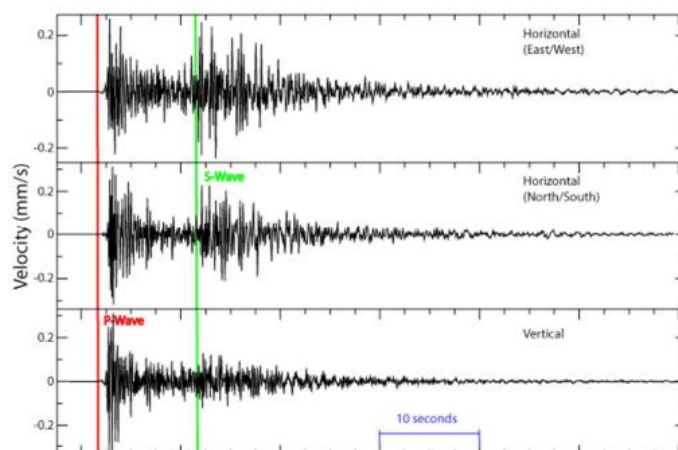


Figura 1 - Aceleração Sísmica (Adaptado - [9])

Dependendo do epicentro, os eventos com magnitude abaixo do valor (3) são quase imperceptíveis, considerados de baixa magnitude e na maioria dos casos não apresentam grande ameaça para estruturas, no entanto, as atividades sísmicas com magnitude superior a (6), são considerados fortes, sentidos por toda a população. Acima da magnitude (7), geralmente representam uma séria ameaça para as infraestruturas e podem representar perigo severo ou catastrófico se atingirem magnitudes mais elevadas.

A atividade sísmica é dividida em dois tipos de ondas, sendo divididas em ondas internas ou de corpo, cuja propagação se dá no interior da Terra ou ondas de superfície, que se propagam imediatamente na superfície terrestre, conforme representado na Figura 2.

As ondas internas, são ainda divididas em duas categorias, sendo classificadas por “ondas P” ou primárias e “ondas S” ou secundárias.

Como o próprio nome indica, as “ondas P” tem maior velocidade de propagação e são as primeiras a se fazerem sentir. São ondas longitudinais que provocam o efeito de vibração do terreno paralelo à direção da onda. Por sua vez, as “ondas S” possuem características diferentes, são mais lentas do que as “ondas P”, propagam-se apenas em corpos sólidos, transversalmente à direção da onda “P” e apresentam características de corte com maior capacidade destrutiva do que as “ondas P”.

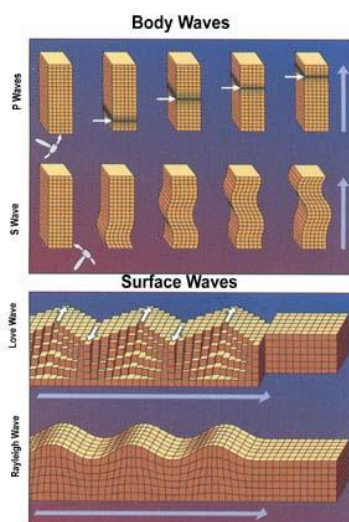


Figura 2 - Representação de ondas sísmicas (Adaptado - [10])

As ondas de superfície, podem ser divididas em dois tipos e denominam-se como “ondas de *Rayleigh*” e “ondas *Love*”. Estes tipos de ondas, apresentam uma configuração igual ao comportamento das ondas de vibração, semelhante ao contacto de algum objeto com a superfície da água, propagam-se de um modo mais lento que as ondas internas e devido à sua baixa frequência, maior amplitude e maior duração, podem ser mais destrutivas.

As “ondas de *Rayleigh*” foram previstas por John William Strutt “Lord Rayleigh” [11] em 1885, apresentam velocidade de propagação mais lenta do que as ondas internas e são resultantes da interferência de “ondas P” e “ondas S”. Estas ondas apresentam uma forma de propagação em forma de órbita elíptica e a sua amplitude perde rapidamente intensidade com a profundidade.

As “ondas *Love*”, foram descobertas por Augustus Love [12] em 1911, que desenvolveu um modelo matemático para caracterizar este tipo de ondas. São mais rápidas do que as “ondas de *Rayleigh*”, mas apresentam características muito particulares pois resultam da interferência de duas “ondas S”, as suas propriedades de corte horizontal do solo, são particularmente destrutivas.

A velocidade das ondas sísmicas pode ser calculada através das seguintes expressões:

$$V_p = \sqrt{\frac{(K + \frac{4\mu_0}{3})}{\delta_0}} \quad (1)$$

Onde:

V_p = Velocidade da onda P

K = Módulo de incompressibilidade

μ_0 = Rigidez do material

δ_0 = Densidade do material

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu_0}{\delta_0}} \quad (2)$$

Onde:

V_s = Velocidade da onda S

1.3.2. Requisitos fundamentais de edifícios ou estruturas

As estruturas construídas em regiões sísmicas, devem obedecer a um conjunto de requisitos, dispostos no EC8-1, pelo que citando. “deverão ser projetadas e construídas de forma a cumprir requisitos de não ocorrência de colapso e de limitação de danos”, [1].

No requisito de não ocorrência de colapso, e citando o Eurocódigo 8, “as estruturas devem ser projetadas e construídas de modo a resistir à ação sísmica, mantendo a sua integridade estrutural e uma capacidade resistente residual após o sismo. A ação sísmica deve ser calculada a partir da ação sísmica de referência associadas a uma probabilidade de excedência P_{NCR} , em 50 anos ou a um período de referência T_{NCR} com valores tabelados por país, sendo que os valores nacionais recomendados são: $P_{NCR}= 10\%$ e $T_{NCR}=475$ anos”, [1].

No requisito de limitação de danos, e citando o EC8-1, “as estruturas devem ser projetadas e construídas de forma a resistir a uma ação sísmica, cuja probabilidade de ocorrência seja maior do que a da ação sísmica de cálculo, sem ocorrência de danos e de limitações de utilização, cujos custos não sejam desproporcionalmente elevados, quando comparados com os da própria estrutura. A ação sísmica a considerar, no requisito de limitação de danos tem uma probabilidade de excedência P_{DLR} , em 10 anos ou a um período de retorno T_{DLR} , com valores tabelados por país, sendo que os valores nacionais recomendados são: $P_{DLR} = 10\%$ e $T_{DLR} = 95$ anos”, [1].

Para além dos requisitos acima referidos, as estruturas também devem obedecer a critérios de conformidade, tais como estados limites últimos, estados de limitação de danos, condições específicas de projeto, fundações com rigidez adequada, assim como cumprir o plano de garantia de qualidade, disposto na NP EN 1998-1.

1.3.3. Condições de terreno e ação sísmica

A natureza do terreno onde será construído o edifício, deve ser alvo de estudos e caracterização geotécnica, de modo a ser possível classificar os terrenos.

De acordo com o ponto 3.1.2, da NP EN 1998-1, existem quatro formas possíveis para classificar um terreno, sendo que no ponto 3.1.2 (1) da NP EN 1998-1, “os terrenos são classificados pelos tipos A, B, C, D e E, descritos por perfis estratigráficos e pelos parâmetros apresentados na Tabela 1, sendo que os valores poderão ser utilizados para ter em conta o fator da influência das condições locais do terreno na ação sísmica”, [1].

Tabela 1 - Tipos de terreno (Quadro 3.1 - Retirado, [1])

Tipo de terreno	Descrição do perfil estratigráfico	Parâmetros		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (pancadas/30 cm)	c_u (kPa)
A	Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material mais fraco à superfície	> 800	–	–
B	Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade	360 – 800	> 50	> 250
C	Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixo (cascalho) ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Depósitos de solos não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura	< 180	< 15	< 70
E	Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial com valores de v_s do tipo C ou D e uma espessura entre cerca de 5 m e 20 m, situado sobre um estrato mais rígido com $v_s > 800$ m/s			
S_1	Depósitos constituídos ou contendo um estrato com pelo menos 10 m de espessura de argilas ou siltes moles com um elevado índice de plasticidade ($PI > 40$) e um elevado teor em água	< 100 (indicativo)	–	10 - 20
S_2	Depósitos de solos com potencial de liquefação, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terreno não incluído nos tipos A – E ou S_1			

Conforme descrito no ponto 3.1.2 (2), “o terreno deverá ser classificado de acordo com o valor da velocidade média das ondas de corte, $V_{s,30}$, e só em caso de indisponibilidade deste valor, deve ser utilizado o valor N_{SPT} ”, [1].

No ponto 3.1.2 (3) da NP EN 1998-1, é apresentada a expressão que deve ser utilizada para cálculo da velocidade média das ondas de corte.

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad (3)$$

Onde:

h_i = espessura (em metros)

v_i = velocidade das ondas de corte (para distorção igual ou inferior a 10^{-5}) da “i”-ésima formação ou camada, num total de N existente nos 30 m superiores.

No ponto 3.1.2 (4), observa-se que “para os locais onde se verificam condições de terreno especiais, do tipo S_1 ou S_2 , deverão ser efetuados estudos específicos para caracterização dos terrenos, com foco especial no terreno tipo S_2 , que poderá apresentar possibilidade de rotura do terreno, quando sujeito à ação sísmica”, [1].

No entanto, no processo de cálculo de uma estrutura há que ter em conta vários fatores e passando a citar a NP EN 1998-1, “o esquema de classificação de terrenos, que tem que ter em conta a geologia profunda a utilizar num país, pode ser especificado no Anexo Nacional, incluindo parâmetros S , T_B , T_C e T_D , cujo movimento sísmico num determinado ponto da superfície do terreno, pode ser representado por um espectro de resposta elástica da aceleração à superfície do terreno, conforme a Figura 3, geralmente designado apenas por espectros de resposta elástica horizontais ou verticais”, [1].

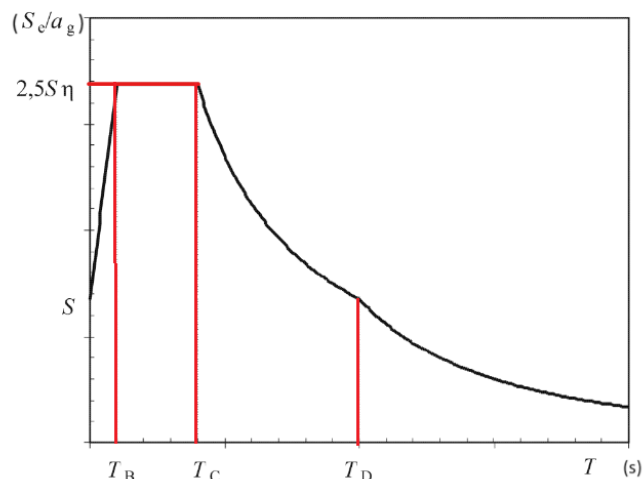


Figura 3 - Forma do espectro de resposta elástica (Adaptado - [1])

Para efeitos de cálculo, os valores dos componentes do espectro de resposta elástica horizontal da ação sísmica de uma estrutura, podem ser obtidos através das seguintes expressões:

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \left[1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (4)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (5)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_B}{T} \right] \quad (6)$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \quad (7)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{(5 + \xi)}} \geq 0,55 \quad (8)$$

Onde:

S = Espectro da resposta elástica

a_g = valor de cálculo da aceleração à superfície do terreno na direção horizontal

η = coeficiente de correção do amortecimento

ξ = amortecimento viscoso (em percentagem)

O tipo de terreno influencia a forma do espectro da resposta elástica, pelo que, consoante o tipo de terreno e de acordo com a Tabela 2 e Tabela 3, os valores dos períodos T_B , T_C , T_D e S dos espectros da resposta elástica podem ser assumidos conforme representado na Figura 4 e Figura 5, apenas válidos para terrenos dos tipos de A a E (de acordo com a Tabela 1). Para os casos de terrenos dos tipos S_1 e S_2 , os valores de T_B , T_C , T_D e S , devem ser obtidos através de estudos especiais.

Tabela 2 - Parâmetros dos espectros de resposta elástica de tipo 1

(Quadro 3.2 - Adaptado [1])

Tipo de terreno	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Tabela 3 - Parâmetros dos espectros de resposta elástica de tipo 2

(Quadro 3.3 - Adaptado - [1])

Tipo de terreno	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,05	0,25	1,2
B	1,35	0,05	0,25	1,2
C	1,5	0,10	0,25	1,2
D	1,8	0,10	0,30	1,2
E	1,6	0,05	0,25	1,2

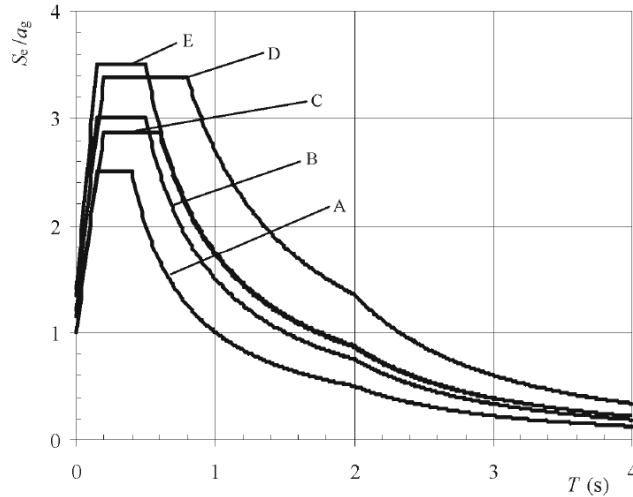


Figura 4 - Espectros de resposta elástica de tipo 1, Terrenos dos tipos A a E (5% de amortecimento) (Adaptado [1])

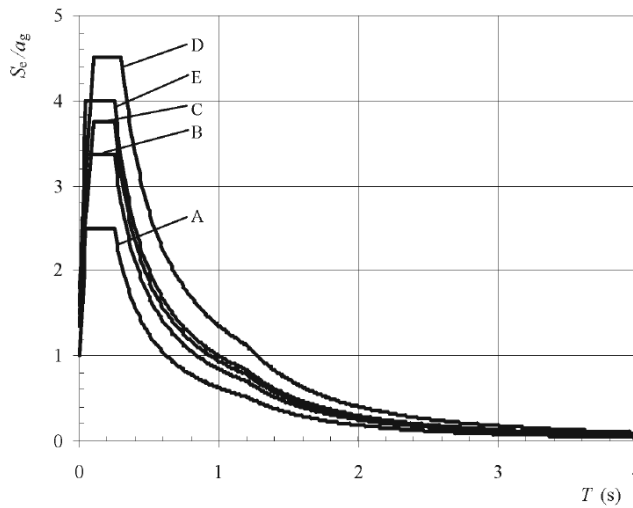


Figura 5 - Espectros de resposta elástica de tipo 2, Terrenos dos tipos A a E (5% de amortecimento) (Adaptado [1])

Por sua vez, tendo por base os dados da Tabela 4, os valores dos componentes do espectro de resposta elástica vertical da ação sísmica de uma estrutura, podem ser obtidos através das seguintes expressões:

$$0 \leq T \leq T_B : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3,0 - 1) \right] \quad (9)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \quad (10)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (11)$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \quad (12)$$

Onde:

S_{ve} = Espectro da resposta elástica vertical

a_{vg} = valor de cálculo da aceleração à superfície do terreno na direção vertical

Tabela 4 - Parâmetros dos espectros de resposta elástica verticais

(Quadro 3.4 - Adaptado [1])

Espectro	a_{vg}/a_g	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
Tipo 1	0,90	0,05	0,15	1,0
Tipo 2	0,45	0,05	0,15	1,0

1.3.4. Classificação e zonamento sísmico

Os territórios devem ser caracterizados pelas autoridades nacionais e divididos em zonas sísmicas, consoante as particularidades do terreno, sendo que esta caracterização obedece a um conjunto fatores e conjugação de cálculos descritos na NP EN 1998-1.

De acordo com o Anexo Nacional da NP EN 1998-1, “para o território nacional, podem ser utilizados os valores de aceleração máxima de referência (a_{gR}) da Tabela 5, correspondente a cada zona sísmica. O zonamento sísmico para Portugal Continental, para o Arquipélago da Madeira e para o Arquipélago dos Açores” [1], é caracterizado conforme as: Figura 6 a Figura 10.

Tabela 5 - Aceleração máxima de referência a_{gR} (m/s^2) por zona sísmica - (Quadro NA. 1 - Adaptado - [1])

Acção sísmica Tipo 1		Acção sísmica Tipo 2	
Zona Sísmica	a_{gR} (m/s^2)	Zona Sísmica	a_{gR} (m/s^2)
1.1	2,5	2.1	2,5
1.2	2,0	2.2	2,0
1.3	1,5	2.3	1,7
1.4	1,0	2.4	1,1
1.5	0,6	2.5	0,8
1.6	0,35	–	–

1.3.4.1. Portugal Continental

Em Portugal Continental e dada a natureza do terreno, devem ser considerados ambos os tipos de acção sísmica (Tipo 1 e Tipo 2).

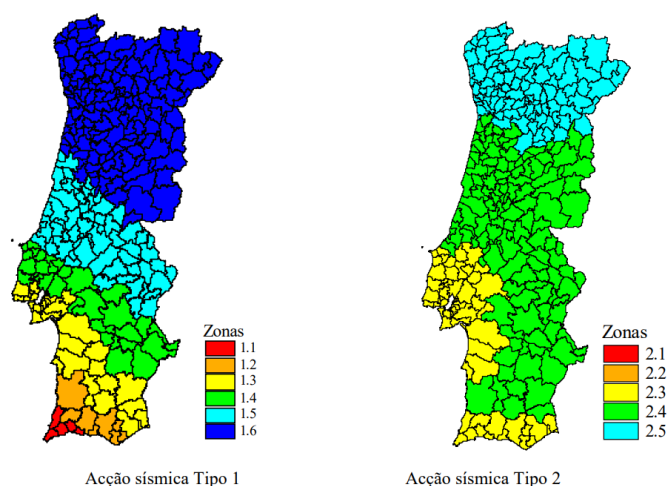


Figura 6 - Zonamento Sísmico Portugal Continental (Adaptado - [1])

1.3.4.2. Arquipélago da Madeira

No arquipélago da Madeira, deve ser considerada apenas a ação sísmica do Tipo 1.

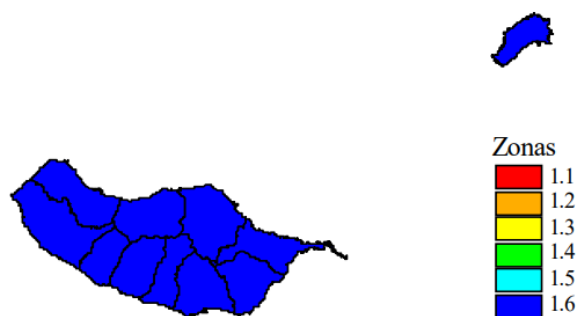


Figura 7 - Zonamento Sísmico - Arquipélago da Madeira (Adaptado - [1])

1.3.4.3. Arquipélago dos Açores - Grupo Ocidental

Considerando a natureza do terreno, em todo o arquipélago dos Açores, deve ser considerada a ação sísmica do Tipo 2.

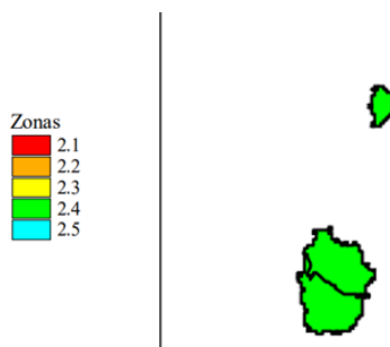


Figura 8 - Zonamento Sísmico - Arquipélago dos Açores - Grupo Ocidental (Adaptado - [1])

1.3.4.4. Arquipélago dos Açores - Grupo Central



Figura 9 - Zonamento Sísmico - Arquipélago dos Açores - Grupo Central (Adaptado - [1])

1.3.4.5. Arquipélago dos Açores - Grupo Oriental

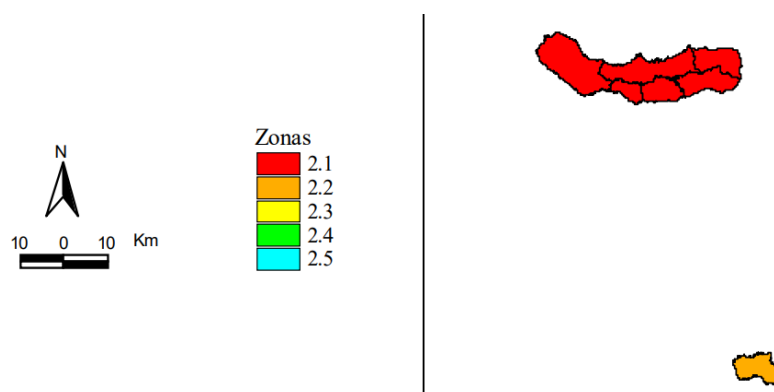


Figura 10 - Zonamento Sísmico - Arquipélago dos Açores - Grupo Oriental (Adaptado - [1])

1.3.5. Eventos sísmicos e consequências

Devido à sua natureza, a frequência e local de ocorrência de eventos sísmicos é altamente imprevisível, no entanto as consequências deste tipo de atividade podem ser devastadoras. Monitorizando e classificando as atividades passadas, é possível quantificar as ocorrências anuais e apresentar algumas estatísticas sobre a magnitude dos sismos ocorridos em todo o mundo.

Através do gráfico apresentado na Figura 11, é possível efetuar uma relação entre a quantidade de sismos ocorridos e a quantidade de energia libertada, permitindo também analisar o posicionamento de eventos ou catástrofes naturais ocorridas.

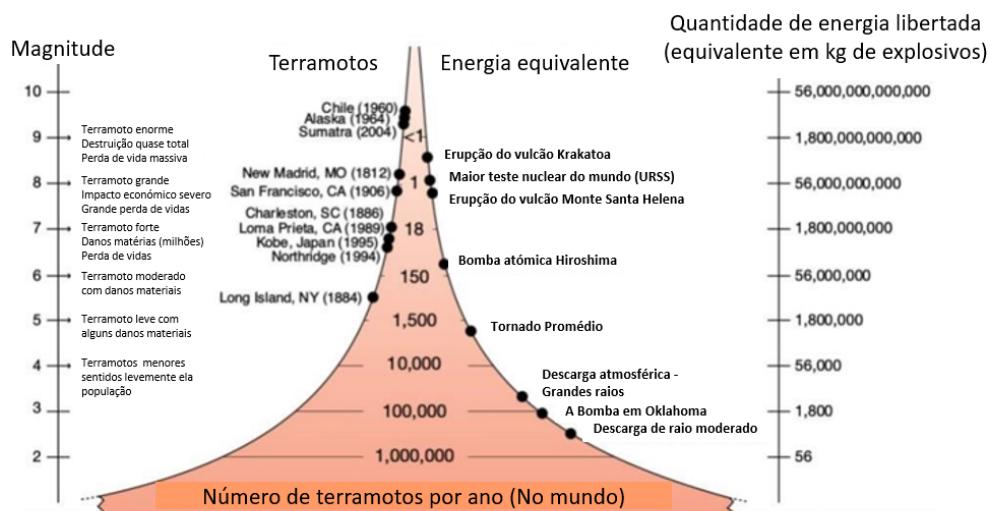


Figura 11 - Estatística anual de atividade sísmica mundial (Adaptado - [13])

Como é de conhecimento geral, através do gráfico apresentado, é possível verificar que sismos de baixo magnitude são bastante frequentes, representando a maioria dos eventos ocorridos na crosta terrestre, no entanto, existem alguns fenómenos que ocorrem com rara frequência, mas que libertam uma quantidade de energia tão elevada e significativa que merecem uma análise cuidada e a melhor das atenções.

Nos seguintes subcapítulos, apresentam-se alguns casos cuja atividade sísmica se manifestou de forma intensa, provocando a perda de vidas e elevados danos materiais. Os casos apresentados não apresentam qualquer particularidade especial que se destaque dos demais que têm ocorrido ao longo do tempo, pretendendo-se apenas apresentar a variedade de consequências diretas ou indiretas que podem resultar da atividade sísmica, nomeadamente o desencadeamento de outras catástrofes naturais. Como resultado deste estudo, espera-se que seja possível desenvolver métodos de modo a encontrar soluções construtivas para minimizar o seu impacto em qualquer infraestrutura projetada, especialmente nas estruturas em que delas dependa a segurança da vida humana.

1.3.5.1. Terramoto de Seattle – EUA

O terramoto de Seattle, ocorreu em 28 de fevereiro de 2001 e foi uma das maiores atividades sísmicas registadas no estado de Washington. Manifestou uma magnitude de (6,8) na “escala MMS” e durou aproximadamente 45 segundos. O epicentro ocorreu na Ilha de Anderson, cerca de 18 km a nordeste de Olympia. Conforme é possível verificar na Figura 12, este evento foi suficiente para provocar estragos significativos em infraestruturas e edifícios, no valor de 15,3 mil milhões de dólares. De acordo com o estudo efetuado por uma equipa da UW- (Universidade de *Washington*) [14], registou-se pelos menos uma morte e cerca de 400 feridos, os danos registaram-se nos mais variados tipos de construção, tais como edifícios e infraestruturas e foi necessário evacuar milhares de pessoas, de edifícios de construção em altura.



Figura 12 - Terramoto de Seattle (Adaptado - [15])

1.3.5.2. Terramoto de Christchurch – Nova Zelândia

O terramoto de Christchurch, ocorreu a 4 de setembro de 2010, manifestou uma magnitude de (7,1), com epicentro a cerca de 40 km a oeste de Christchurch e a 10 km de profundidade. Neste evento, ocorreram múltiplos terramotos, sendo registado um com magnitude (5,8) cerca de 5 segundos antes da atividade principal, sendo precedido de várias réplicas que atingiram uma magnitude máxima de (6,3), levando ao colapso de vários edifícios conforme a Figura 13.



Figura 13 - Terramoto de Christchurch - edifício Pyne Gould Guinness (Adaptado - [11])

1.3.5.3. Sismo e Tsunami de Tohoku - Japão

A catástrofe de *Tohoku*, aconteceu a 11 de março de 2011 e apresentou uma magnitude de (9,1) na “escala MMS”. O epicentro deu-se ao largo da costa do Japão, a 24,4 km de profundidade, despoletou os mecanismos de alerta de *tsunami*, levando à evacuação das populações da linha costeira de cerca 20 países. Este sismo provocou também um tsunami com ondas de dez metros de altura, atingindo diversos países, sendo que no Japão, estas ondas atingiram locais a cerca de 10 km da costa, levando á inundação de *Sendai*, provocando a destruição de infraestruturas como rodovias, linhas ferroviárias, uma barragem e inundação do aeroporto, conforme se pode verificar na Figura 14.

Nesta combinação de eventos, embora a existência de rígidas medidas de segurança, devido a estar construída apenas a dez metros acima do nível médio do mar, o muro de proteção com pouco mais de cinco metros de altura não conseguiu conter reter o movimento da água e não foi suficiente para evitar um dos maiores acidentes nucleares. Nesta catástrofe registaram-se mais de 15.894 mortes e no mínimo 2.500 pessoas desaparecidas.



Figura 14 - Vista aérea de Sendai (Adaptado - [16])

1.3.5.4. Terramoto de Lisboa

O terramoto de Lisboa, foi dos eventos mais catastróficos que atingiram o nosso país e aconteceu a 1 de novembro de 1755, revelando-se como um dos mais mortíferos da história. Estima-se que se manifestou com uma magnitude de entre (8,7) e (9) na “escala de *Richter*” seguido de um tsunami, cujas ondas poderão ter atingido uma altura estimada de cerca de 20 metros que provocou a morte de cerca de 10 000 pessoas.

Devido à pouca tecnologia da altura e à fraca qualidade de dados, estima-se seu epicentro tenha tido origem no mar, entre 150 e 500 km da costa, conforme representado na Figura 15, o que levou à destruição da cidade de Lisboa, no entanto foram também atingidas várias regiões de Portugal, tais como a costa algarvia e a zona de Setúbal.



Figura 15 – Localização provável do epicentro do terramoto de Lisboa (Adaptado - [17])

2. EQUIPAMENTOS DE ELEVAÇÃO

Neste capítulo é efetuada uma breve descrição sobre os tipos de equipamentos de elevação existentes e respetiva legislação. O presente trabalho tem o apoio e colaboração da empresa Schmitt-Elevadores [18], empresa pertencente ao grupo alemão *Schmitt und Sohn* [9], fundado em 1861 e com representação em vários países europeus. Dedicar-se ao desenvolvimento, fabrico, montagem e prestação de serviços de assistência e manutenção a elevadores.

2.1. Tipos de equipamentos

Existem vários tipos de equipamentos de elevação, no entanto podem ser agrupados em algumas categorias. Numa classificação muito grosseira, quando os equipamentos estão destinados ao transporte de pessoas e bens, são designados como ascensores, quando os equipamentos se destinam exclusivamente ao transporte de cargas, são designados como monta-cargas, no entanto, existem outros tipos de equipamentos de elevação, tais como escadas mecânicas, tapetes rolantes, gôndolas ou funiculares.

No caso específico dos ascensores ou monta-cargas, ainda se podem classificar os equipamentos em dois grandes grupos, sendo do tipo “elétrico” ou do tipo “hidráulico”, cada grupo com particularidades e regulamentação específica.

Atualmente, os equipamentos de elevação fabricados e instalados, devem obedecer à legislação em vigor, nomeadamente as normas “EN NP 81-20:2017” [19] e “EN NP 81-70:2009” [20], que definem as regras de segurança para o fabrico e instalação de elevadores. A “Parte 20” incide especificamente para ascensores de passageiros e de passageiros e carga, e a “Parte 70” dedica-se particularmente à acessibilidade aos ascensores para pessoas, incluindo pessoas com deficiência.

2.1.1. Elevadores Elétricos

Devido à tipologia da construção da maioria dos edifícios, este tipo de elevador é o mais utilizado. São equipamentos que apresentam uma construção muito simples, que na maioria dos casos, recorrendo a um conjunto de cabos de aço, consiste num sistema de suspensão direta de dois elementos, sendo estes a cabina e a massa de equilíbrio ou contrapeso. O movimento aplicado ao sistema é efetuado por um motor com roda de aderência.

Muito resumidamente, o elevador é dividido em algumas partes designadas por grupos funcionais, sendo a cabina o órgão destinado a receber as pessoas e cargas a transportar, o contrapeso é uma estrutura em aço, preenchida com diversos elementos que podem ser em betão armado ou barras de aço, que funciona como massa de equilíbrio do sistema de elevação e possibilita a aderência dos cabos de suspensão na roda da máquina de tração. A caixa ou poço é o local onde se deslocam a cabina e o contrapeso, estando limitada pelo fundo do poço, paredes da caixa e teto do poço. A casa de máquina, é uma área técnica destinada a alojar o grupo funcional de tração e comando, pode estar posicionada diretamente por cima da caixa ou apresentar outra configuração, tal como disposição lateral ao topo ou fundo da caixa.

2.1.1.1. Elevador tradicional com casa de máquina

Na maioria dos casos é utilizado o elevador tradicional, em que a configuração da casa de máquina é diretamente por cima da caixa, recorrendo a uma suspensão (1:1). Neste tipo de suspensão a velocidade da cabina e do contrapeso é igual à velocidade tangencial na roda de tração, mas pode ser utilizada outra tipologia tal como (2:1) ou qualquer combinação, permitindo assim otimizar o projeto para velocidades superiores.

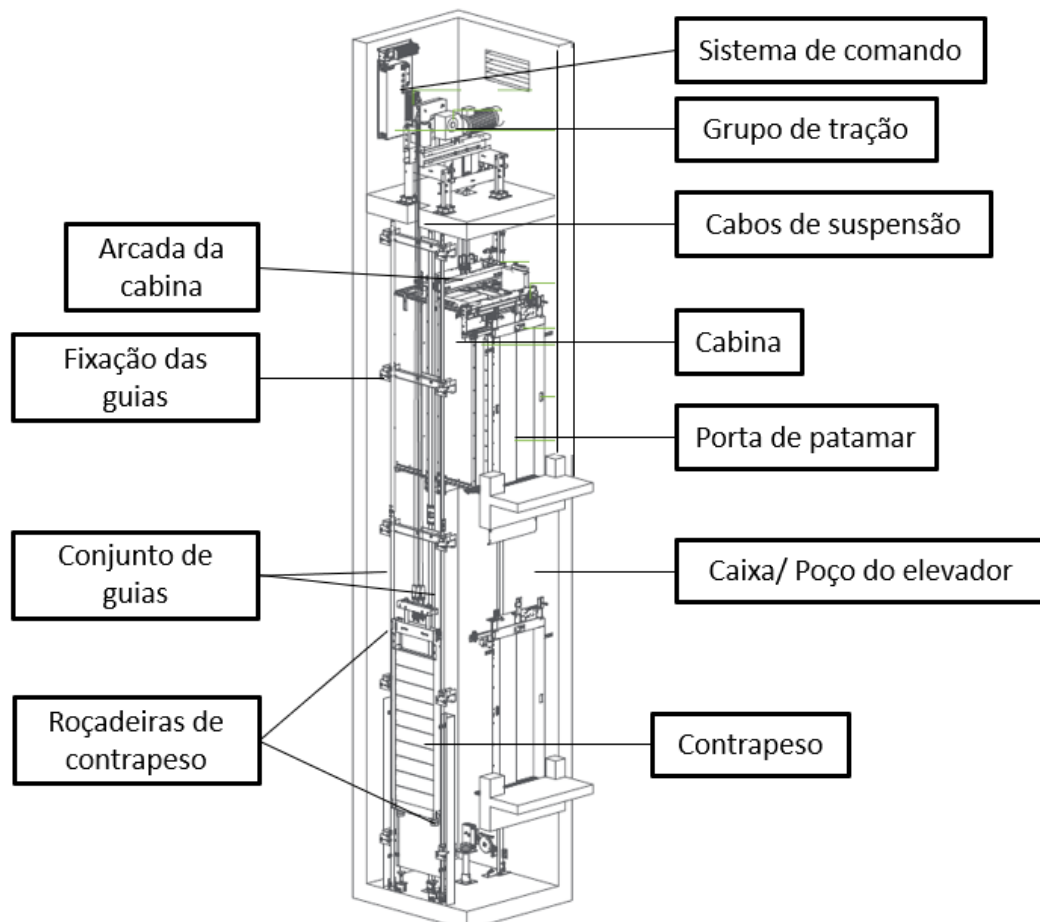


Figura 16 - Elevador elétrico tradicional (Adaptado - [18])

2.1.1.2. Elevador sem casa de máquina | AOM

Com a evolução do tempo surgiram novas exigências de projeto, houve necessidade de desenvolver modelos de elevadores que cumprissem os requisitos de projeto, mas para que tal acontecesse haveria a exigência de apresentar contramedidas e respectivas análises de risco para o desvio da legislação em vigor.

Desta forma, são desenvolvidos os elevadores sem casa de máquina ou AOM. Trata-se de elevadores elétricos sem área técnica especialmente dedicada à casa de máquina, sendo que a respetiva área é transferida para a caixa ou para o patamar de circulação do edifício.

Este modelo de elevador é bastante solicitado para edifícios de média estatura, em média até dez pisos, sendo que, neste tipo de projeto os elevadores elétricos tradicionais passaram a ser utilizados com muito menos frequência.

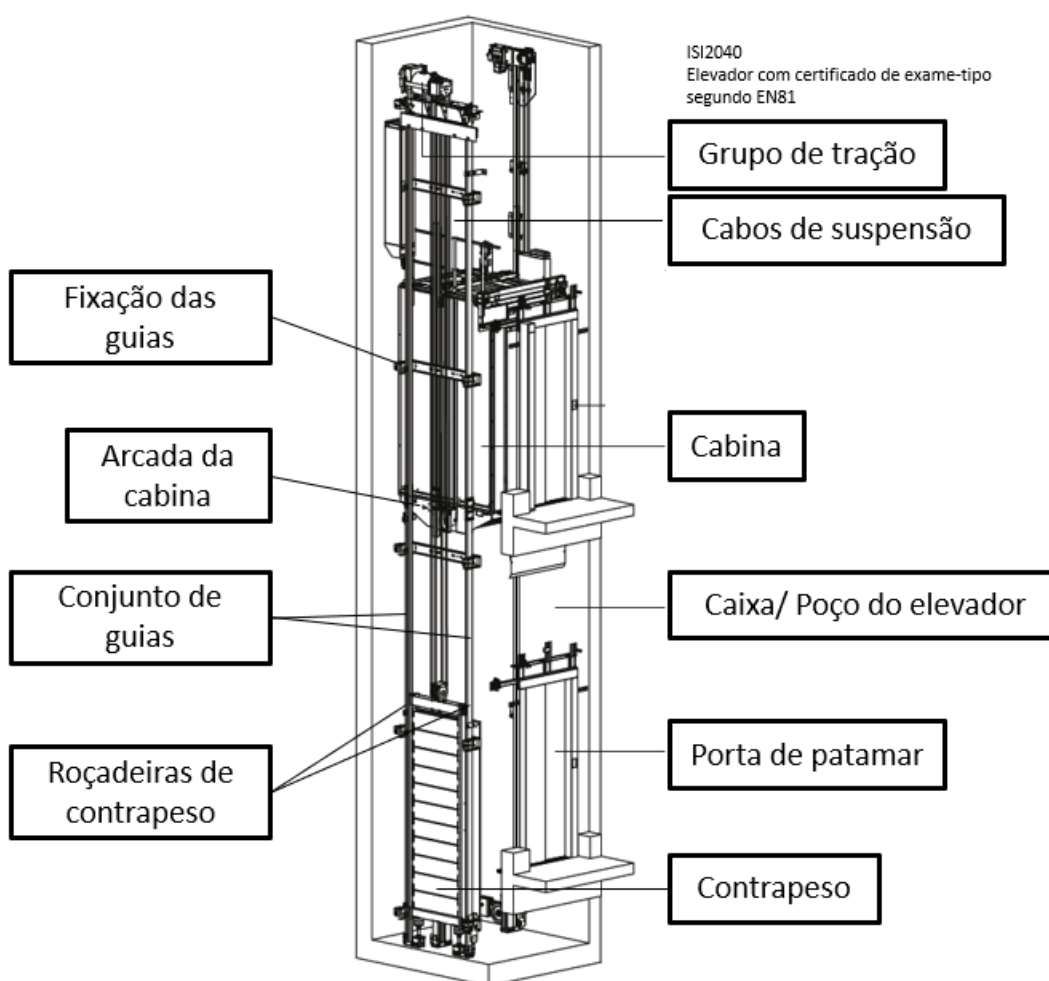


Figura 17 - Representação de elevador AOM - ISI2040-4 (Adaptado - [18])

2.1.2. Elevadores Hidráulicos

Os elevadores hidráulicos, consistem na utilização de um conjunto motor-bomba montado num reservatório para armazenamento de óleo, que é utilizado como fluido de trabalho para transmitir pressão a um cilindro que está ligado direta ou indiretamente à cabina do elevador. No caso dos elevadores hidráulicos de ação direta, o pistão está ligado diretamente à estrutura que suporta a cabina e no caso dos elevadores hidráulicos de ação indireta, a cabina do elevador está suspensa por cabos de aço.

De um modo geral, os elevadores hidráulicos apresentam velocidades mais reduzidas no que se refere à deslocação da cabina, no entanto apresentam outras características sendo bastante utilizado quando se pretende deslocar cargas elevadas ou de grandes dimensões.

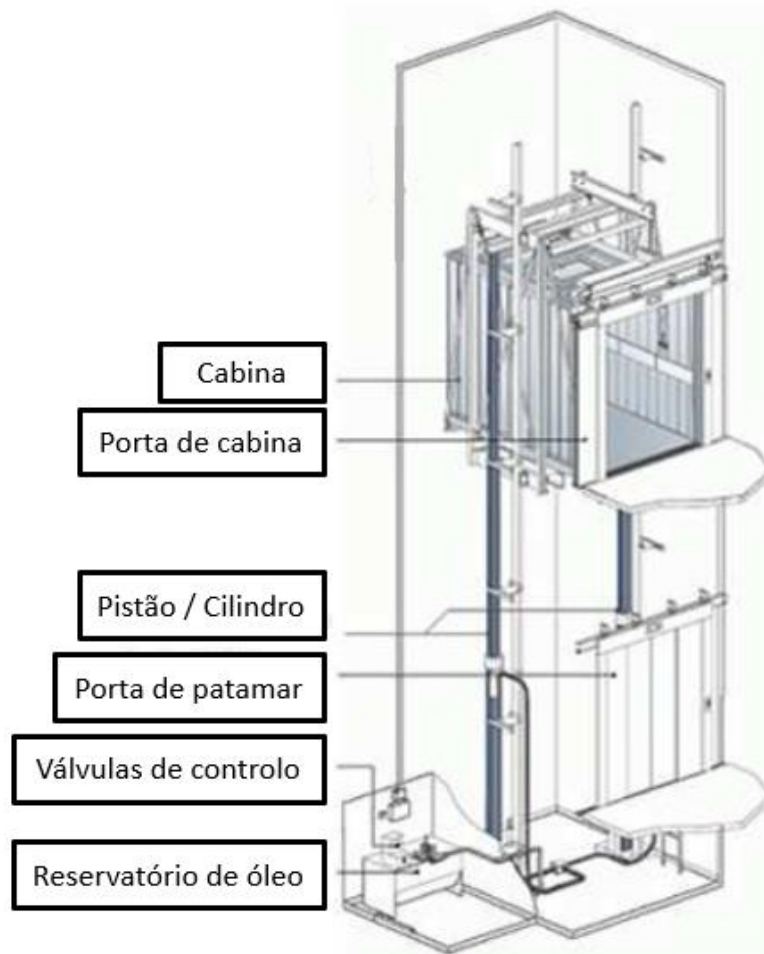


Figura 18 - Representação de elevador hidráulico (ação direta) (Adaptado - [18])

Dependendo do tipo de elevador e respetivas características, a resposta a uma atividade sísmica será manifestamente diferente, apresentando distintos pontos de fragilidade, no entanto nos estudos elaborados, verifica-se que a maior vulnerabilidade está nas cargas suspensas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Efeitos da ação sísmica em elevadores

Conforme descrito no subcapítulo da ação sísmica (1.3.1), a magnitude de um sismo pode atingir valores, em que a amplitude de vibrações transmitida aos edifícios pode atingir níveis para além dos valores máximos dimensionados em projeto, que poderão originar o colapso do edifício e respetivos equipamentos ou estruturas de elevação. Nos casos em que a ação sísmica não é tão expressiva nem destrutiva, não significa que não existam consequências indiretas. O efeito das vibrações tem influência nos equipamentos instalados no edifício, quer estejam simplesmente em contacto com as superfícies ou estejam diretamente ligados à estrutura.

Especificamente em estruturas como elevadores, embora considerados como elementos ou equipamentos não estruturais, como estão diretamente ligados à estrutura do edifício e pelo simples facto de transportarem pessoas, são tratados como equipamentos ou estruturas especiais, sendo alvo de legislação própria como a norma EN81-77 [5], que define as regras de segurança para a construção e instalação de elevadores, sujeitos a condições sísmicas.

Dependendo do tipo de elevador e suas características, tais como a capacidade de carga ou o número de pisos, assim como a velocidade de deslocamento que influenciará o tipo de guias a utilizar e respetivas ligações ao edifício, a resposta do equipamento quando sujeito à ação sísmica será bastante diferente. Mediante essa resposta, a ação sísmica pode levar ao descarrilamento dos órgãos em suspensão, nomeadamente a cabina e o contrapeso.

3.2. Análise de casos | Artigos

3.2.1. Cidade de Van, Turquia

Num estudo realizado pelo professor Cevat Erdem Imrak [21], intitulado como “*A survey for the Effect of 2011 Van earthquakes on elevators*” [22], foi efetuado um levantamento exaustivo das consequências de uma sequência de terremotos na província de Van, na Turquia.

Conforme se pode analisar na Tabela 6, o caso em análise é bastante particular, pois a atividade sísmica reproduziu-se entre os dias 23 e 30 de outubro de 2011 e foram registadas cerca de 1503 réplicas. A primeira atividade sísmica ocorreu em 23 de outubro, manifestou-se com uma magnitude (7,2), com epicentro na aldeia de *Tabanlı*, a cerca de 20 km de profundidade e levou à morte de 220 pessoas e cerca de 1090 desaparecidos.

Tabela 6 - Magnitude vs nº de réplicas entre 23 e 30 de outubro 2011 (Adaptado - [22])

Magnitude	Número de réplicas
2 a 3	556
3 a 4	832
4 a 5	108
5 a 6	7

De seguida, em 9 de novembro de 2011, a região foi novamente atingida por outra atividade sísmica com magnitude (5,6), a uma profundidade de cerca de 16 km, provocou a morte de cerca de 40 pessoas e centenas de feridos.

As sequências dos dois eventos sísmicos provocaram a morte a 604 pessoas e cerca de 4.152 feridos, assim como a destruição de pelos menos 11.232 edifícios.

Após esta catástrofe, o professor C.E. Imrak e a sua equipa efetuaram um levantamento exaustivo [22], registando os danos provocados em diversas regiões, passando pela visita aleatória a edifícios com elevadores instalados, acompanhados por uma empresa local de manutenção de elevadores.

Como resultado, é apresentado o resumo da Tabela 7:

Tabela 7 - Resumo da análise do caso de estudo

Observação	Muito	Pouco	Nenhum
Instalação de sistemas de deteção de ação sísmica			X
Cabos de suspensão saltarem da roda de tração		X	
Cabos de suspensão interlaçados nas fixações das guias		X	
Queda de barras do contrapeso para cima da cabina	X		
Deslocamento do sistema chassis e máquina de tração			X
Descarrilamento do contrapeso (elev. Elétricos e AOM)	X		
Empeno da estrutura do contrapeso		X	
Danos nas fixações das guias de cabina e contrapeso	X		
Danos nas roçadeiras de guiamento	X		
Danos gerais em elevadores hidráulicos			X
Danos em portas de patamar manuais (tipo batente)			X
Danos em portas de patamar automáticas (tipo deslizante abertura central)	X		

Nas imagens seguintes (Fig.19 – 28), é apresentado o registo fotográfico do estado dos equipamentos, após a ação sísmica.

Descarrilamento do contrapeso



Figura 19 – Dano nas roçadeiras e descarrilamento do contrapeso (Adaptado - [22])



Figura 20 - Descarrilamento do contrapeso e colisão com cabina (Adaptado - [22])



Figura 21 – Dano nas roçadeiras do contrapeso (Adaptado - [22])



Figura 22 - Descarrilamento do contrapeso e colisão com cabina (Adaptado - [22])

Empeno de estrutura do contrapeso



Figura 23 - Empeno da estrutura do contrapeso (Adaptado - [22])



Figura 24 - Empeno da estrutura do contrapeso com deslocação de pesos (Adaptado - [22])

Empeno de fixações das guias

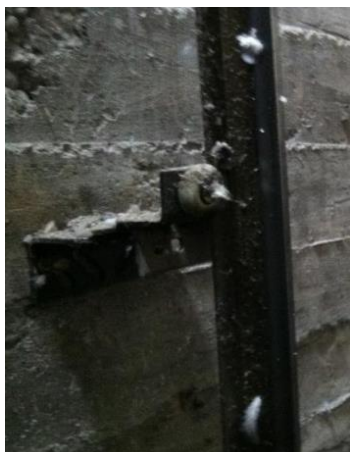


Figura 25 - Empeno da guia (Adaptado - [22])



Figura 26 - Empeno da fixação (Adaptado - [22])

Queda de pesos do contrapeso em cima da cabina



Figura 27 - Queda de pesos em cima da cabina
(Adaptado - [22])



Figura 28 - Queda de blocos em cima da cabina
(Adaptado - [22])

Através do resumo apresentado, é possível concluir que a maioria dos danos é originado direta ou indiretamente nas cargas suspensas, nomeadamente a cabina e contrapeso. Foi também possível concluir que no caso dos elevadores em que a caixa do poço é de betão armado, verificou-se que a construção protegeu os aros das portas de patamar, evitando assim o dano das portas e contribuíram para o fortalecimento do edifício em geral.

3.2.2. Chia-Yi, Tailândia

Num estudo realizado por George C. Yao [23], intitulado por “*Seismic Performance of Passenger Elevators in Taiwan*” [24], foram analisados dois grandes terremotos que ocorreram em 1999, na Tailândia. O primeiro evento, denominado como 921 *Chi-Chi*, com epicentro a cerca de 55 km, manifestou-se com uma magnitude de (ML= 7,3), o segundo terremoto denominado como 1022 *Mn-Shong*, com epicentro a cerca de 10km, manifestou-se com uma magnitude de (ML= 6,4).

Os danos provocados por este desastre foram elevados e registaram-se problemas em várias áreas, desde inacessibilidade a pisos superiores em edifícios em altura, até a hospitais com dificuldade no transporte vertical de pacientes.

Com uma população de cerca de 260.000 habitantes, o critério de escolha da cidade de Chia-Yi foi o facto de ser uma cidade suficientemente grande e não ter sofrido danos estruturais graves, mas que reunia um número suficiente de elevadores para o estudo.

Foram elaboradas entrevistas a empresas de manutenção local, sendo registados os comentários conforme apresentado na Tabela 8. de modo a permitir a posterior análise.

Tabela 8 - Estatística de danos em elevadores (Adaptado - [24])

Descrição	Terramoto 921	Terramoto 1022
	% total de danos	% total de danos
Dano nas roçadeiras de contrapeso	7,9	7,7
Dano nas guias de contrapeso	1,4	2,8
Descarrilamento do contrapeso	40,2	66,3
Dano nos cabos de suspensão	5,2	0,0
Entrelaçamento do cabo de aço do limitador de velocidade	18,2	7,7
Dano no limitador de velocidade	2,1	1,1
Danos no sistema de extração da caixa	8,6	4,2
Cabo no cadeado de compensação	2,1	0,0
Número total de elevadores com danos	291	285

Dos cerca 1.600 elevadores existentes na cidade de Chai-Yi, perto de 20% apresentaram algum dano após a ocorrência das atividades sísmicas em análise. Da informação reunida, chegaram à conclusão que a maioria dos problemas ocorreu de forma direta ou indireta nas cargas suspensas, sendo o descarrilamento do contrapeso o problema com maior incidência em cerca de 40% dos casos. Verificou-se também que a maioria das ocorrências registadas, foram em prédios com 7, 10 e 12 andares.

3.2.3. Resposta de um sistema estrutura-elevador

Num estudo realizado por F. Segal, A. Rutenberg e R. Levy, intitulado por “*Earthquake response of structure-elevator system*” [25], são analisados alguns eventos sísmicos ocorridos em várias partes do mundo, para demonstrar a vulnerabilidade dos sistemas de elevação, mesmo quando sujeitos a um terramoto moderado.

Conforme inumerado no resumo da Tabela 9, os danos demonstram a necessidade de direcionar esforços em desenvolver técnicas para melhorar a resistência do contrapeso.

Tabela 9 - Resumo de danos

Descrição	São Fernando	Miyagi	Whittier
	1971 - EUA	1978 - Japão	Narrows 1987 - EUA
Descarrilamento do contrapeso	X	X	X
Dano nas fixações das guias	X		
Colisão entre contrapeso e cabina		X	X

Como o contrapeso é conduzido nas guias através de um sistema de roçadeiras ou conjunto de rodas, não existe um contacto rígido, pelo que nestes modelos são usados contactos não lineares. Por outro lado, sendo este subconjunto a massa mais pesada do sistema de elevação, quando sujeito a um evento sísmico, é o subsistema que mais contribui para a deformação dos componentes, razão pela qual é o foco de maior análise.

Para tal, são utilizadas técnicas computacionais com recurso a modelos dinâmicos desenvolvidos para representar um elevador com o sistema de suspensão e as respetivas cargas, sendo que o contrapeso é representado como duas massas (m_1 e m_2) localizadas nas extremidades e alinhadas com o conjunto de roçadeiras, conforme representado na Figura 29.

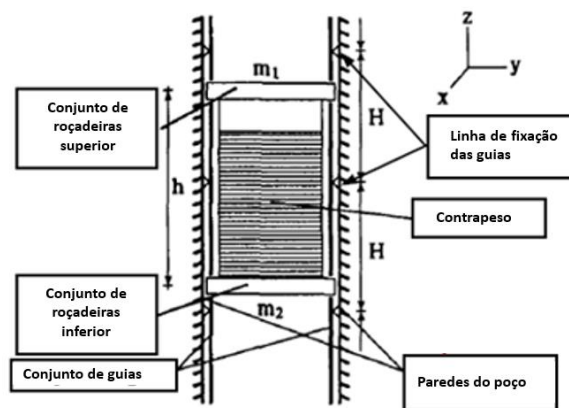


Figura 29 - Subsistema contrapeso e conjunto de guias (Adaptado - [25])

As guias são ligadas rigidamente à parede do poço do elevador através das respetivas fixações das guias, sendo distribuídas em intervalos equidistantes, pelo que desta forma compartilham os mesmos deslocamentos horizontais que a estrutura do edifício.

No caso em análise, os autores pretendem contribuir para o desenvolvimento de novas soluções, incrementando à formulação existente, a variável da velocidade vertical, pelo que na modelação computacional, o conjunto de guias é considerado elemento de rigidez variável e a interação entre conjunto de guias e contrapeso é classificada um elemento de contacto não-linear, com folgas, amortecimento viscoso e atrito de Coulomb, conforme demonstrado na Figura 30.

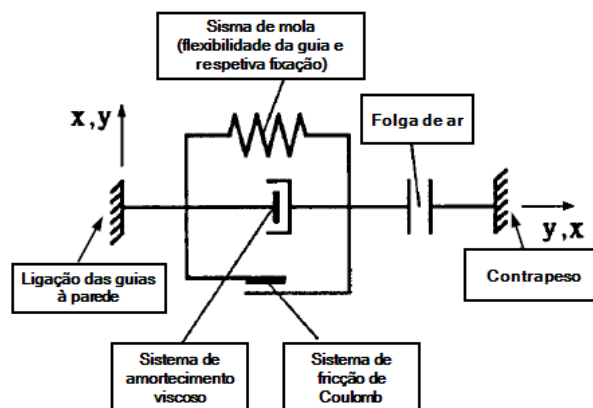


Figura 30 - Contacto não-linear (Adaptado - [25])

Sendo o elevador um sistema complexo e dinâmico, composto por cargas suspensas, este estudo é direccionado apenas para o subconjunto contrapeso e respetivas guias, podendo ser alargado ao subconjunto cabina e respetivas guias, desde que efetuadas algumas modificações na formulação.

Na Figura 31, é representada a ligação entre o contrapeso e a guia, sendo que a_x e a_y representam as folgas no sistema de eixos (x,y) considerado.

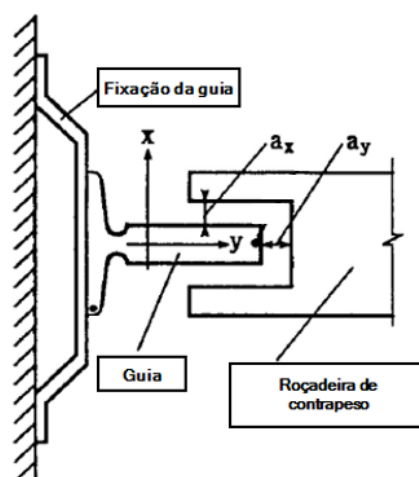


Figura 31 - Detalhe da ligação entre roçadeira de contrapeso e guia (Adaptado - [25])

Neste caso, para o cálculo da resistência à flexão de ambas as guias, é assumido que o movimento é na direção (x) , e para o individual, é considerado que o movimento é na direção (y) , sendo utilizadas as equações gerais de movimento:

$$\ddot{X}_i(t) + 2\zeta_s \omega_{x,i} \dot{X}_i(t) + \omega_{x,i}^2 X_i(t) = -\Gamma_{x,i} \ddot{X}_0(t) \quad (13)$$

$$\ddot{Y}_i(t) + 2\zeta_s \omega_{y,i} \dot{Y}_i(t) + \omega_{y,i}^2 Y_i(t) = -\Gamma_{y,i} \ddot{Y}_0(t) \quad (14)$$

Para o cálculo da aceleração de base, são consideradas as seguintes expressões:

$$\ddot{X}_0(t) = C\ddot{U}(t) \quad (15)$$

$$\dot{Y}_0(t) = C\dot{V}(t) \quad (16)$$

De modo a obter o deslocamento horizontal e a velocidade vertical da estrutura em qualquer posição do eixo (z), são utilizadas técnicas de sobreposição modal, recorrendo às seguintes expressões:

$$x_z(t) = \sum_i \phi_{x,i}(z)X_i(t) \quad (17)$$

$$y_z(t) = \sum_i \phi_{y,i}(z)Y_i(t) \quad (18)$$

$$\dot{x}_z(t) = \sum_i \phi_{x,i}(z)\dot{X}_i(t) \quad (19)$$

$$\dot{y}_z(t) = \sum_i \phi_{y,i}(z)\dot{Y}_i(t) \quad (20)$$

Em situação de terramoto, a amplitude do movimento horizontal do edifício varia consoante o nível do piso, atingindo o valor máximo no piso extremo superior, que por sua vez afeta o contrapeso, pois em funcionamento normal o seu movimento é na vertical.

De modo a facilitar o estudo, assumem que o deslocamento horizontal das fixações é síncrono e o movimento é igual ao das fixações no topo do edifício. Como as tensões nas guias são muito reduzidas, quando comparadas com a flecha da própria estrutura, as mesmas são desprezadas.

São desenvolvidos métodos numéricos e realizadas análises aos dados obtidos, de modo a permitir determinar a resposta do sistema de elevação quando sujeito à ação sísmica. Como a massa do contrapeso é considerada como distribuída em duas massas independentes (m_1 e m_2) e localizadas na zona das roçadeiras, as reações são calculadas pelas seguintes expressões:

$$R_{x,j} = \frac{1}{2\delta_{x,j}} [\sin(x_j - x_z)] (|x_j - x_z| - \alpha_x) [1 + \sin(|x_j - x_z| - \alpha_x)] \quad (21)$$

$$R_{y,j} = \frac{1}{2\delta_{y,j}} [\sin(y_j - y_z)] (|y_j - y_z| - \alpha_y) [1 + \sin(|y_j - y_z| - \alpha_y)] \quad (22)$$

Onde:

$j = 1,2$ - Valor para a posição de contacto das roçadeiras

Sendo que a flexibilidade dos elementos de contacto, pode ser calculada pela expressão:

$$\delta_{x,j} = \delta_{x,0} + \delta_{\hat{x},j} \quad (23)$$

$$\delta_{y,j} = \delta_{y,0} + \delta_{\hat{y},j} \quad (24)$$

E a flexibilidade elástica da guia, pode ser calculada pela expressão:

$$\delta_y = \bar{z}_j^2 (1 - \bar{z}_j)^2 \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{4} + \frac{\bar{z}_j(1 + \bar{z}_j)}{1 + \sqrt{3}} \right] \cdot \frac{H^3}{3EI} \quad (25)$$

Para calcular a posição relativa das roçadeiras, são utilizadas as seguintes expressões:

$$\bar{z} = \frac{z_j}{H} - n \quad (26)$$

$$z_1 = z_1 + v_t \quad (27)$$

$$z_2 = z_1 - h \quad (28)$$

Devido à reduzida relação entre a massa da guia correspondente ao vão entre fixações e a massa total do contrapeso, que está na ordem dos 3%, para efeitos deste estudo, a mesma foi desprezada.

Tratando-se de um modelo teórico, a interação de movimentos das guias e contrapeso no plano (x,y) , pode ser representado pelas equações gerais de movimento (29) e (30), pelo que num modelo real devem ser considerados parâmetros como o acoplamento de rigidez através da continuidade das guias e o acoplamento de massa pois o contrapeso pode rodar como um corpo rígido alterando o seu momento de inércia:

$$\ddot{x}_j + \frac{\zeta_c}{\sqrt{m_j} \delta_{x,j}} (\dot{x}_j - \dot{x}_z) [1 + \sin(|x_j - x_z| - \alpha_x)] + \mu \frac{|R_{y,j}|}{m_j} \sin(|\dot{x}_j - \dot{x}_z|) + \frac{R_{x,j}}{m_j} = -\ddot{X}_0(t) \quad (29)$$

$$\ddot{y}_j + \frac{\zeta_c}{\sqrt{m_j} \delta_{y,j}} (\dot{y}_j - \dot{y}_z) [1 + \sin(|y_j - y_z| - \alpha_y)] + \mu \frac{|R_{x,j}|}{m_j} \sin(|\dot{y}_j - \dot{y}_z|) + \frac{R_{y,j}}{m_j} = -\ddot{Y}_0(t) \quad (30)$$

Considerando seis modos de flexão nos dois eixos horizontais da estrutura (x,y) e assumindo quatro graus de liberdade para o contrapeso, através da simulação computacional num programa codificado em FORTRAN, utiliza-se o método iterativo *Runge-Kutta*, para integrar 20 equações diferenciais de primeira ordem.

Desta forma, podem ser obtidas informações como a tensão máxima aplicada nas guias, forças resultantes da interação entre o contrapeso e o respetivo conjunto de guia, assim como deflexões elásticas relativas.

Como resultado do estudo, é comprovado que as forças de contacto e as tensões desenvolvidas no conjunto de guias dependem da massa do contrapeso, da distância entre fixações das guias, propriedades dos materiais utilizados e respetivas secções transversais das guias e obviamente das características da atividade sísmica, tais como a aceleração vertical e amplitude. Comprova-se também que a imprevisibilidade do contacto dinâmico entre o contrapeso e as guias representa um risco para o elevador.

Esta informação é crucial para a elaboração do projeto, nomeadamente a avaliação das tensões para o dimensionamento das guias, a estimativa da flecha máxima para evitar descarrilamentos e as forças de interação para determinar os detalhes do contrapeso e respetivas roçadeiras.

3.2.4. Resposta sísmica do sistema guias-contrapeso

Num estudo realizado por MP. Singh, LE. Suarez e Rildova, intitulado por “*Seismic response of rail-counterweight systems in elevators*” [26], é reconhecido que em situação de atividade sísmica, o sistema contrapeso e o conjunto de guias com as respetivas fixações, é o subsistema de um elevador mais suscetível aos movimentos impostos e por consequência o que apresenta maior preocupação.

Para além de reduzir os custos com reparações é também muito importante manter a operacionalidade dos elevadores em instalações estratégicas, tais como hospitais ou até mesmo edifícios estratégicos para coordenação de operação, em caso de atividade sísmica. Para manter o contrapeso guiado no conjunto de guias, podem ser utilizados dois tipos de conjuntos de guiamento, sendo denominados por conjunto de roçadeiras ou conjunto de rodas.

O conjunto de roçadeiras é utilizado para elevadores com velocidade baixa ou média, sendo que para elevadores com médias ou altas velocidades são utilizados os conjuntos de rodas, pois devido ao reduzido atrito entre a roda e a guia, a viagem é mais confortável.

O presente artigo é dedicado ao estudo do comportamento de um contrapeso equipado com um conjunto de rodas para guiamento, cujo exemplo do sistema é representado na Figura 32.



Figura 32 - Conjunto de rodas (Adaptado - [27])

O conjunto de rodas pode apresentar mais do que três rodas, no entanto, de modo a absorver vibrações, compensar oscilações e manter o contacto entre a roda e a guia, cada subconjunto é montado com um sistema de mola individual.

Sabendo que nos estudos realizados anteriormente, apenas era efetuada uma análise do comportamento do contrapeso no plano do sistema contrapeso-guias, tendo havido uma tentativa de análise com a introdução de contacto não-linear, no caso em análise são consideradas as ações não-lineares nos componentes flexíveis e o efeito dos movimentos do edifício, conforme Figura 33.

Para tal e de modo a tentar tornar o modelo o mais realista possível, são considerados parâmetros como as características do material do contrapeso, características de flexibilidade das guias, conjunto de rodas e fixações das guias, consideração da não uniformidade do movimento de entrada das fixações na estrutura do contrapeso e finalmente são também consideradas as acelerações introduzidas no sistema provenientes da atividade sísmica.

Como o contrapeso é o subconjunto com maior massa suspensa, em caso de atividade sísmica é também o que representa a maior força de inércia, sendo foco de maior atenção devido ao potencial em provocar deformação nos restantes componentes, nomeadamente as guias e respetivas fixações.

Neste estudo, os autores consideram o subconjunto contrapeso como um bloco rígido único e sendo os efeitos resultantes do sistema de suspensão, de segunda ordem, são desprezados das equações de movimento.

No modelo analítico, recorrendo ao *software* MATLAB® [28], para estudo dos efeitos de cálculo das tensões instaladas, são analisadas as respostas que sejam no plano e as respostas fora do plano do contrapeso, coeficiente de flexibilidade do subconjunto contrapeso, considerando a flexibilidade das guias, das respetivas fixações, molas e material das rodas do conjunto de rodas de guiamento.

Como resultado deste estudo, pretende-se desenvolver um modelo analítico linear, capaz de auxiliar o cálculo do comportamento do subconjunto contrapeso, dentro e fora do plano, de modo a permitir facilitar o projeto do conjunto de guias e respetivas fixações.

3.2.5. Outros artigos científicos

***“Seismic protection of counterweight-rails in elevators buildings”*, [26]**

Neste artigo é abordada a possibilidade de utilização de um dispositivo de massa como amortecedor dinâmico, conforme representado na Figura 34.

Segundo os autores, a utilização do conjunto de rodas com sistema de amortecimento e uma parte da massa do contrapeso com um amortecedor de massa calibrado, contribuem para a redução da resposta do contrapeso em caso de ação sísmica e desta forma reduzir as tensões instaladas nas guias.

A utilização desta técnica provou ser limitada ao controlo do movimento do contrapeso no plano, sendo observada uma redução de cerca 20%, no entanto demonstrou ser prejudicial ao movimento fora do plano. Esta solução pode ser melhorada, provocando uma redução de 50% das tensões nas guias, quando alterada para uma solução de condução controlada da massa do contrapeso.

***“Non-linear seismic response of the rail-counterweight system in elevators in buildings”*, [29]**

Este artigo é dedicado ao estudo do comportamento do sistema conjunto de guias e respetivo contrapeso, quando o edifício está sujeito à ação sísmica, analisando os efeitos não-lineares conforme representado na Figura 33.

Segundo os autores, “a não-linearidade do sistema podem ocorrer devido: (1) imprevisibilidade da deformação das rodas do sistema de guiamento, (2) deformação das guias e respetivas fixações, (3) rotura ou deformação das molas do conjunto de rodas para guiamento do contrapeso, (4) redução da folga entre as chapas de restrição de movimento e (5) redução da folga entre guias, devido ao deslocamento das fixações.”

Neste estudo é direcionada a especial atenção para a análise da situação (4), onde a redução da folga permite o contacto entre a chapa de restrição e aguia, transformando assim em contacto rígido.

Como consequência da comparação de resultados entre situações de contactos lineares e não-lineares, os autores identificam as folgas máximas para a montagem das placas de restrição, assim como folgas máximas entre o aro do contrapeso e o conjunto de guias. Devido à implementação das soluções encontradas, em caso de ação sísmica, o resultado das tensões instaladas no sistema reduz o efeito do aumento proporcional às excitações de entrada.

“Dynamics and Control of Elevators with Large Gaps and Rubber Dampers”,[30]

Neste artigo é utilizada uma técnica que consiste em aumentar a folga entre os pesos do contrapeso e a respetiva estrutura, no entanto verifica-se que em caso de atividade sísmica, embora numa primeira fase, exista uma redução das forças transmitidas, as mesmas podem amplificar como resultado do contacto dinâmico entre os pesos e a estrutura, sendo catastrófico para o elevador.

Segundo os autores, através da utilização de borrachas que servem como amortecedores passivos, é possível reduzir as cargas em cerca de 84%, sem que haja alterações estruturais significativas, sendo recomendável a utilização desta solução em edifícios estratégicos, como hospitais.

“Mechanical model and seismic study of the roller guide-rail assembly in the counterweight system of elevators”,[31]; [32]

Neste artigo os autores concentram a atenção para o subconjunto guia de contrapeso e conjunto de rodas para guiamento, que pode ser resumido ao sistema simplificado de duas molas em série, representando assim a resposta não-linear dentro e fora do plano do modelo.

Durante o estudo paramétrico, verifica-se que a tensão de aperto da mola helicoidal tem influência na resposta do sistema, quando sujeito a atividade sísmica, sendo necessário aplicar uma pré-tensão específica na mola helicoidal, assim como a importância da folga do prato de retenção.

A solução proposta permite efetuar o cálculo separado da resposta das guias e do conjunto de rodas de contrapeso, facilitando assim a elaboração do projeto não só do conjunto contrapeso, mas também do conjunto da cabina para transporte de passageiros.

“Seismic analysis of the rail-counterweight system in elevators considering the stiffness of rail brackets”,[33]

Neste artigo, é analisada a proposta da introdução de um novo parâmetro, denominado como rácio de rigidez do conjunto guias de contrapeso e respetivas fixações aos pisos do edifício, pois as guias de contrapeso são tratadas como uma viga contínua simplesmente apoiada. O estudo consiste na variação da taxa de rigidez do conjunto e análise do comportamento do sistema relativamente à atividade sísmica.

Sabendo que a tensão nas guias de fixação e respetivas fixação depende diretamente da característica das atividade sísmica e da distância entre fixações, o estudo revela que não existe alteração significativa no uso desta técnica em situações em que a taxa de rigidez do conjunto é inferior a (4), no entanto verifica-se que a taxa de rigidez tem influência na tensão máxima, nos casos em que a razão da rigidez é superior a (4), registando-se assim uma redução na deformação das fixações de cerca 10%

“Structural dynamics of elevator counterweight systems and evaluation of passive constraint”, [30]

Neste artigo, é analisada a importância da ligação na flange de união das guias, assim como a resposta dinâmica do subconjunto contrapeso e respectivas guias de fixação. A ligação intermédia é de extrema importância, pois previne o deslocamento relativo das guias que, em caso de ocorrência provocaria o descarrilamento do contrapeso.

A utilização do método de elementos finitos e um programa informático “NADFEF”, permitiu comprovar que através da excitação da estrutura do contrapeso, o número de contactos consecutivos aumentou quando a frequência diminuiu, revelando que a carga dinâmica de contacto é bastante superior ao projetado, havendo assim oportunidade para melhorar o sistema.

Deste modo, é comprovado que a implementação da ligação intermédia na união das guias apresentou vantagens face ao modelo analisado, com uma redução da carga dinâmica na ordem dos 40%.

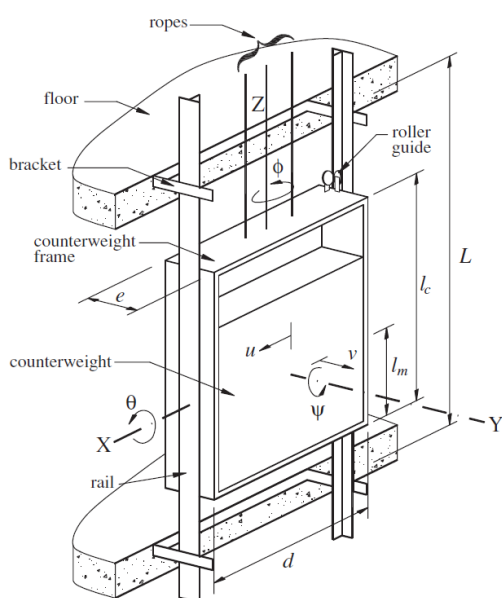


Figura 33 - Representação do conjunto guia-contrapeso
(Adaptado - [26])

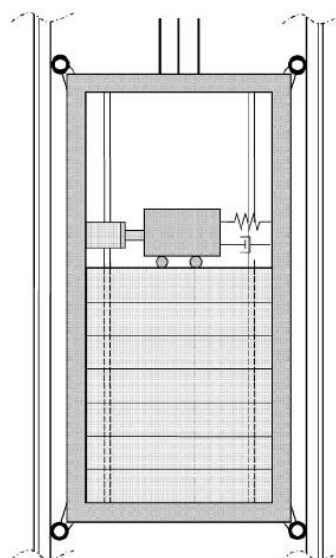


Figura 34 - Representação de sistema de amortecedor dinâmico
(Adaptado - [22])

4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À AÇÃO SÍSMICA | EN 81-77

4.1. Classificação sísmica de elevadores

Conforme descrito anteriormente no subcapítulo (1.3.3), para efeitos de dimensionamento, é necessário ter em atenção algumas particularidades. Durante a realização do projeto e cumprimento dos requisitos obrigatórios para equipamentos sujeitos à ação sísmica, é necessário considerar o fator denominado por aceleração do projeto (a_d). Consoante a resposta de um sistema de elevador, quando sujeito a uma atividade sísmica, é atribuída uma categoria, conforme o demonstrado na Tabela 10.

Este fator, consiste na aceleração horizontal a usar no cálculo dos esforços atuantes no sistema de elevador, resultantes da ação sísmica, cujo valor varia em função da aceleração do solo, comportamento do terreno, coeficiente de importância do equipamento e outros parâmetros fornecidos pelo projetista do edifício.

No entanto, pela razão do sistema de elevador ser considerado um equipamento não estrutural, os valores do coeficiente sísmico do espectro de resposta elástica (S_a) e da aceleração horizontal do projeto (a_d), podem ser calculados através das equações (31) e (32), sendo que o valor de (S_a) não deve tomar valores inferiores a ($\alpha * S$):

$$S_a = \alpha * S * \left[\frac{3 * \left(1 + \frac{z}{H}\right)}{1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1}\right)^2} - 0,5 \right] \quad (31)$$

$$a_d = S_a * \left(\frac{\gamma_a}{q_a}\right) * g \quad (32)$$

$$\alpha = \left(\frac{a_g}{g}\right) \quad (33)$$

Onde:

S_a = Coeficiente sísmico aplicável a equipamento não estrutural

S = Coeficiente de solo

Tabela 10 - Categorias sísmicas de elevadores (Tabela A.1 – Adaptado [5])

Aceleração horizontal (m/s ²)	Categoria sísmica	Comentário
$a_d \leq 1$	0	Os requisitos da EN 81-20 e EN81-50 são adequados, portanto, nenhuma ação é necessária
$1 < a_d \leq 2,5$	1	Necessárias pequenas ações corretivas
$2,5 < a_d \leq 4$	2	Necessárias ações corretivas médias
$a_d > 4$	3	Necessárias ações corretivas substanciais

Conforme se pode observar na Tabela 10, dependendo da categoria sísmica atribuída ao sistema de elevador, pode ser necessário aplicar ações corretivas ao projeto, cujas recomendações estão devidamente especificadas nas normas NP EN81-20, [19] e NP EN 81-50, [34].

De acordo com a NP EN 81-77 [5], o coeficiente de importância para os equipamentos não estruturais, especificamente o sistema de elevador, deve tomar valor de ($\gamma_a=1$) e os valores do coeficiente de comportamento deve tomar o valor de ($q_a=2$), conforme apresentado na Tabela 11:

Tabela 11 Valores de q_a para elementos não estruturais (Quadro 4.4 - Adaptado [1])

Tipo de elemento não estrutural	q_a
Parapeitos ou ornamentos em consola Sinalizações e painéis publicitários Chaminés, mastros e depósitos sobre pilares, com comportamento de consola não contraventada ao longo de mais de metade da sua altura total	1,0
Paredes exteriores e interiores Divisórias e fachadas Chaminés, mastros e depósitos sobre pilares, com comportamento de consola não contraventada ao longo de menos de metade da sua altura total, ou contraventados ou espiados à estrutura ao nível ou acima do seu centro de gravidade Elementos de fixação de armários e estantes apoiados em pavimentos Elementos de fixação de tectos falsos e de acessórios de iluminação	2,0

4.2. Medidas preventivas

O sistema do elevador é um conjunto de subsistemas dinamicamente independentes, pelo que para minimizar eventuais acidentes em caso de atividade sísmica, dependendo da sua categoria sísmica, cada subsistema deve estar equipado com componentes ou mecanismos de retenção.

Tais componentes ou mecanismos, podem variar desde simples soluções como a aplicação de cabos de aço de proteção aplicados nos cantos das fixações para evitar danificar os cabos elétricos de manobra instalados na caixa do elevador, ou o uso de sistemas de retenção nas diversas rodas para evitar que os cabos de suspensão saltem dos gornes ou até mesmo a utilização de sistemas eletrónicos complexos com sensores para detetar as ondas primárias da atividade sísmica, de modo a enviar sinais ao comando eletrónico do elevador, para controlo e imobilização do mesmo.

Para elevadores nas categorias sísmicas (2) e (3), é também necessário utilizar roçadeiras ou sistemas de retenção que mantenham estes subconjuntos dentro do sistema de guias, de modo a evitar o descarrilamento da cabina ou do contrapeso. Conforme recomendado no Anexo C da norma EN 81-77 [5], os elevadores de categoria sísmica (3) devem estar preparados com dispositivos para deteção das ondas primárias.

Se não houver indicação contrária, as medidas preventivas apresentadas na Tabela 12, devem ser aplicadas em elevadores das categorias sísmicas (1), (2) e (3).

Tabela 12 - Medidas preventivas para pontos de contacto (Adaptado - [5])

Altura do poço	Distância horizontal entre pontos críticos e componentes do elevador	Componentes do elevador	Medidas de proteção	Observações
≤ 20 m			Não é necessário	
> 20 m ≤ 60 m	< 900 mm	Cabos de manobra	Instalar medidas de proteção, por exemplo, um fio de proteção no canto do suporte da guia ou outros pontos críticos perto dos cabos de manobra	Necessário se a distância entre laço do cabo de manobra e qualquer ponto crítico, for inferior a 900 mm
	< 750 mm	Cadeado(s) de compensação Cado(s) de compensação Cabo de aço do limitador de velocidade de contrapeso	Instalar medidas de proteção, por exemplo, um fio de proteção no canto do suporte da guia ou outros pontos críticos	Percurso total
	< 500 mm	Cabo de aço do limitador de velocidade da cabina	Instalar medidas de proteção, por exemplo, um fio de proteção no canto do suporte da guia ou outros pontos críticos	Percurso total
	< 300 mm	Cabos de suspensão	Instalar medidas de proteção, por exemplo, um fio de proteção no canto do suporte da guia ou outros pontos críticos	Percurso total
> 60 m	Proteger todos os pontos críticos independentemente da distância	Cabos de manobra Cadeado(s) de compensação Cado(s) de compensação Cabo de aço do limitador de velocidade de contrapeso Cabo de aço do limitador de velocidade da cabina Cabos de suspensão	Instalar medidas de proteção, por exemplo, um fio de proteção no canto do suporte da guia ou outros pontos críticos	Percurso total

4.3. Descrição do elevador

Quando sujeito a atividade sísmica, a resposta do sistema do elevador varia em função do modelo do elevador em análise e, mediante as suas características, o resultado da análise pode apresentar valores díspares. Conforme mencionado em capítulos anteriores, as cargas suspensas do conjunto cabina e do conjunto contrapeso são as massas que mais contribuem para a deformação das guias.

Para o desenvolvimento do presente estudo, tem-se por base de apoio, um relatório elaborado pela Schmitt-Elevadores [18], cujo modelo de elevador em análise é o modelo de elevador sem casa de máquina desenvolvido pela própria empresa, designado por AOM4R com 1000 kg de capacidade de carga útil.

Este modelo de elevador, apresenta algumas particularidades especiais, nomeadamente a posição da máquina de tração que é montada numa estrutura no topo da caixa sendo apoiada no conjunto de guias. A estrutura de apoio da cabina, designada como arcada, apresenta uma construção em “L” que permite configurar a cabina com três acessos, no entanto o peso do conjunto arcada e cabina provoca esforços de momento fletor nas guias de cabina.

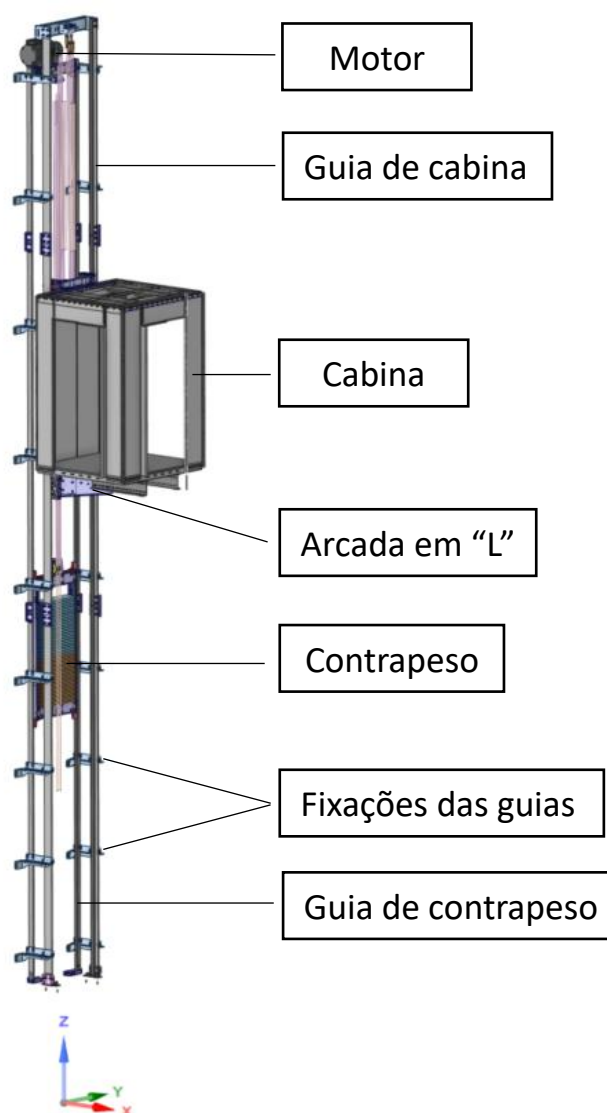


Figura 35 - Modelo do elevador em análise

4.4. Especificações técnicas

Para iniciar o processo de cálculo, é necessário conhecer as especificações técnicas do equipamento, nomeadamente a capacidade de carga, dimensões da cabina, massa dos subconjuntos relevantes, dimensões das guias, distâncias entre fixações, diâmetro das rodas de desvio e número de cabos.

Na Tabela 13 estão representados os parâmetros importantes para a elaboração do cálculo.

Tabela 13 - Característica do elevador em análise

Modelo	AOM4R	--
Capacidade de carga (Q)	1000	kg
Número de pessoas	13	unidade
Massa da cabina (P_{EC})	1300	kg
Massa da carga nominal suspensa (Q_{SE})	400	kg
Massa do contrapeso (W_{cwt})	1800	kg
Relação de equilíbrio do contrapeso	50	%
Largura útil da cabina	1600	mm
Altura útil da cabina	2200	mm
Profundidade útil da cabina	1500	mm
Tipo suspensão (T_{susp})	2:1	--
Diâmetro das rodas	200/210	mm
Número de cabos	5	unidade
Perfil da guia de cabina	T125/82/16	--
Perfil da guia de contrapeso	T75/62/10	--
Relação de equilíbrio do contrapeso	50	%
Comprimento total das guias	12920	mm
Distância máxima entre fixações	1750	mm
Distância entre guias de cabina	798	mm
Distância entre guias de contrapeso	840	mm
Fator de carga sísmica (K_{SE} : 0,4=Pessoas; 0,8 Outros)	0,4	--
Fator de impacto (k_2)	1,2	--
Carga adicional do fator de impacto- aceleração inicial (k_3)	1,2	--

4.5. Avaliação à ação sísmica | Categoria 1

4.5.1. Relação da taxa de carga

De acordo com a NP EN 81-77 [5], de modo a poder efetuar um estudo pormenorizado para prever o comportamento do equipamento quando sujeito a ação sísmica, é necessário calcular os esforços a que os elementos mais relevantes estão sujeitos, nomeadamente os esforços que provocam a flecha atuante no sistema de guias. Tais esforços são o resultado da combinação do movimento das cargas suspensas, tendo em consideração o impacto da aceleração do projeto (a_d). Para efeitos de cálculo sísmico, a presente análise é efetuada considerando uma aceleração horizontal máxima ($a_d=2,5 \text{ m/s}^2$), que corresponde à categoria 1, conforme exposto na Tabela 10.

De modo a facilitar a compreensão do processo de cálculo dos esforços gerados pela atividade sísmica, na Figura 36 são identificados os pontos de contacto entre roçadeiras e as guias, assim como as cotas relevantes ao cálculo. É necessário ter em atenção à distribuição de massas da cabina e do contrapeso, sendo que a taxa de carga nas roçadeiras ou sistema de retenção, deve ser assumido o maior valor calculado através das expressões (34):

$$\text{Máximo} \begin{cases} X_{SE} = \frac{Z_{SE}}{h} \\ X_{SE} = \frac{h-Z_{SE}}{h} \end{cases} * 100\% \quad (34)$$

- **Cabina:** Máximo $\begin{cases} X_{SE} = \frac{1277}{2655} * 100 = 48,09 \% \\ X_{SE} = \frac{2655-1277}{2655} * 100 = 51,90 \% \end{cases}$
- **Contrapeso:** Máximo $\begin{cases} X_{SE} = \frac{1065}{2012} * 100 = 52,93 \% \\ X_{SE} = \frac{2012-1277}{2012} * 100 = 47,07 \% \end{cases}$

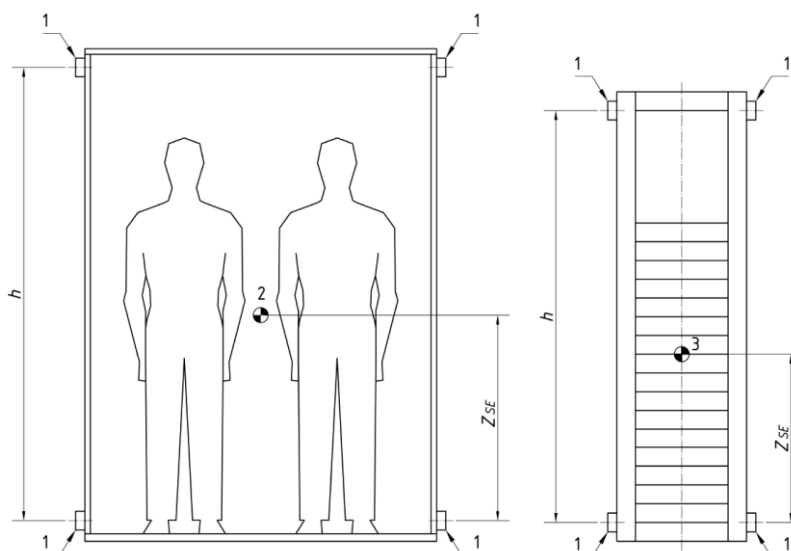


Figura 36 - Representação esquemática de parâmetros (Adaptado - [5])

Onde:

1 – Roçadeira ou sistema de retenção

2 – Centro de gravidade da cabina (considerando a massa Q_{SE})

3 – Centro de gravidade do contrapeso

h – Distância entre roçadeiras ou sistema de retenção

Z_{SE} – Distância entre o ponto da roçadeira inferior e o centro de gravidade

4.5.2. Massa da carga nominal

Para a avaliação da massa da carga nominal suspensa (Q_{SE}), deve ser considerada a carga nominal (Q) e o coeficiente de carga (k_{SE}) correspondente ao tipo de equipamento em análise [($k_{SE}=0,4$) para elevadores de passageiros e ($k_{SE}=0,8$) para monta-cargas de mercadorias], sendo que o valor pode ser calculado através da expressão (35):

$$Q_{SE} = k_{SE} \cdot Q \Leftrightarrow \quad (35)$$

$$Q_{SE} = 0,4 \cdot 1000$$

4.5.3. Sistema de guias | Características

O sistema de guias deve estar preparado para suportar os esforços gerados pela aceleração horizontal do projeto (a_d) manifestada durante a atividade sísmica. As guias devem apresentar rigidez suficiente e deflexões máximas de modo que, em conjunto com os sistemas de retenção, seja possível manter a cabina e o contrapeso encarrilados.

Para tal, durante a elaboração do projeto de dimensionamento, devem ser seguidas as recomendações da EN 81-20, [19] e da EN 81-50, [34].

Na Tabela 14, são apresentados os valores importantes para a elaboração do cálculo das guias:

Tabela 14 - Valores e Características das guias

Designação	Símbolo	Guia de Cabina	Guia de Contrapeso	Unidade
Tipo de guia	--	T125/82/16	T75/62/10	mm
Material base	--	S275JR	S275R	--
Área da secção	A	2282	1091	mm ²
Massa específica	ρ	17,91	8,56	kg/m
Módulo da secção	W_{xx}	26160	9290	mm ³
	W_{yy}	25460	7060	mm ³
Raio de giração	i	26,4	15,6	mm
Resistência à tração	R_m	440	440	MPa
Tensão máxima	σ_{adm}	244	240	MPa
Altura da base	f	12	9	mm
Espessura do pé	c	10	8	mm
Comprimento roçadeira	l	140	100	mm
Largura da roçadeira	b	22	25	mm
Momento estático de 2ª ordem	I_{xx}	1510000	402900	mm ⁴
	I_{yy}	1591000	264700	mm ⁴
Altura do trilho	h_2	82	62	mm
Módulo de elasticidade	E	210	210	GPa

4.5.4. Cabina | Cálculo dimensional

4.5.4.1. Encurvadura

Para o cálculo das tensões de encurvadura, deve ser utilizado o método “ómega”, que consiste no cálculo de interpolação de valores de (λ) através da expressão (37), tomando por base de cálculo o resultado do cálculo do coeficiente de esbelteza, através da expressão (36) e os polinómios correspondentes conforme apresentação na Tabela 15, onde ($l_k=L$):

$$\lambda = \frac{l_k}{i} \Leftrightarrow \quad (36)$$

$$\lambda = \frac{1750}{26,4}$$

Tabela 15 – Lista de polinómios para categorias de aço com resultado (ω) para guia de cabina - (Adaptado - [34])

Esbelteza (λ) para aço com resistência à tração - $R_m \leq 370$ N/mm ²	Polinómios	(ω)
$20 \leq \lambda \leq 60$	$\omega = 0,00012920 \lambda^{1,89} + 1$	--
$60 < \lambda \leq 85$	$\omega = 0,00004627 \lambda^{2,14} + 1$	1,37
$85 < \lambda \leq 115$	$\omega = 0,00001711 \lambda^{2,35} + 1,04$	--
$115 < \lambda \leq 250$	$\omega = 0,00016887 \lambda^{2,00}$	--
Esbelteza (λ) para aço com resistência à tração - $R_m \leq 520$ N/mm ²	Polinómios	(ω)
$20 \leq \lambda \leq 50$	$\omega = 0,00008240 \lambda^{2,06} + 1,021$	--
$50 < \lambda \leq 70$	$\omega = 0,00001898 \lambda^{2,41} + 1,05$	1,51
$70 < \lambda \leq 89$	$\omega = 0,00002447 \lambda^{2,36} + 1,03$	--
$20 < \lambda \leq 250$	$\omega = 0,00025330 \lambda^{2,00}$	--



Assim, para aço com resistência à tração (R_m) entre 370 e 520 [N/mm²], o valor “ómega” é obtido através da expressão (38):

$$\omega_R = \left[\frac{\omega_{520} - \omega_{370}}{520 - 370} (R_m - 370) \right] + \omega_{370} \Leftrightarrow \quad (37)$$

$$\omega_R = \left[\frac{1,51 - 1,37}{520 - 370} (440 - 370) \right] + 1,37 \Leftrightarrow \omega_R = 1,44$$

4.5.4.2. Forças sísmicas geradas

De modo a avaliar as forças sísmicas geradas pela massa da cabina (F_{SE}), quando sujeitas à aceleração horizontal do projeto ($a_d = 2,5$ m/s²), deve ser considerada a massa da carga nominal suspensa (Q) e massa da cabina em vazio (P_{EC}), devendo utilizar a expressão (38):

$$F_{SE} = a_d (P_{EC} + k_{SE} \cdot Q) \Leftrightarrow \quad (38)$$

$$F_{SE} = 2,5 \cdot (1300 + 0,4 \cdot 1000)$$

4.5.4.3. Forças de flexão

Quando o edifício é sujeito ao movimento causado pela atividade sísmica, são geradas forças de flexão no sistema de guias. De acordo com a NP EN 81-50 [34], é necessária avaliação da flexão em relação aos eixos (x) e (y), conforme representado na Figura 37.

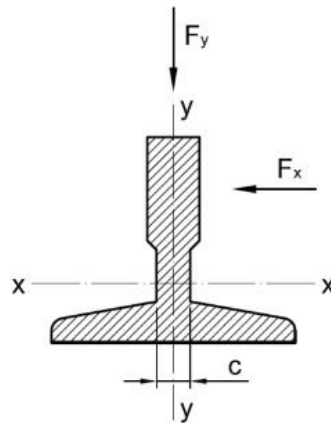


Figura 37 - Representação de eixos da guia e forças (Adaptado [5])

Na Figura 38 apresenta-se o esquema geral das dimensões relevantes para elaboração dos cálculos das forças geradas pela ação sísmica.

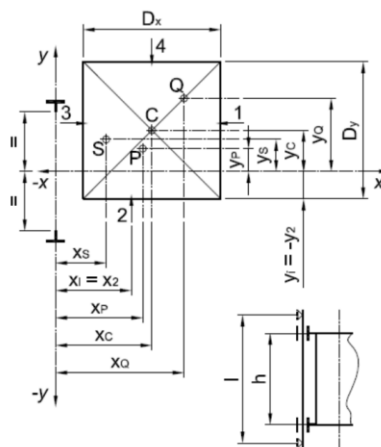


Figura 38 - Distribuição de carga na cabina (caso geral) – (Adaptado - [34])

Onde:

C – Centro da cabina

D_x, D_y – Dimensão na direção (x) e (y)

h – Distância entre roçadeiras ou sistema de retenção

l – Distância entre fixações

n – Número de guias

Q – Carga nominal suspensa

S – Posição do sistema de suspensão da cabina

x_c, y_c – Posição do centro da cabina relativo ao centro das guias

x_i, y_i – Posição da porta de cabina $i=1,2,3$ ou 4

x_p, y_p – Posição da massa da cabina relativo ao centro das guias

x_o, y_o – Posição da carga nominal relativo ao centro das guias

x_s, y_s – Posição do sistema de suspensão relativo ao centro das guias

De acordo com a NP EN 81-77 [5], em situações de atividade sísmica, na realização dos cálculos, a massa da cabina ($P_{EC} + Q_{SE}$) deve ser multiplicada pelo fator de impacto ($k_2=1,2$), sendo que os valores das forças podem ser obtidos através das expressões (39) e (40):

- **Força de flexão relativa ao eixo (y):**

$$F_x = \frac{k_2 \cdot g [Q_{SE} (x_Q - x_s) + P_{EC} (x_p - x_s)]}{n \cdot h} + \frac{a_x (P_{EC} + Q_{SE}) X_{SE}}{n} \Leftrightarrow \quad (39)$$

$$F_x = \frac{1,2 \cdot 9,81 \cdot [400 \cdot (0,987 - 0,11) + 1300 \cdot (0,987 - 0,11)]}{2 \cdot 2,655} + \frac{2,5 \cdot (1300 + 400) \cdot 0,519}{2}$$

- **Força de flexão relativa ao eixo (x):**

$$F_y = \frac{k_2 \cdot g [Q_{SE} (y_Q - y_s) + P_{EC} (y_p - y_s)]}{\frac{n}{2} \cdot h} + \frac{a_y (P_{EC} + Q_{SE}) X_{SE}}{\frac{n}{2}} \Leftrightarrow \quad (40)$$

$$F_y = \frac{1,2 \cdot 9,81 \cdot [400 \cdot (0,8 - 0) + 1300 \cdot (0,8 - 0)]}{\frac{2}{2} \cdot 2,655} + \frac{2,5 \cdot (1300 + 400) \cdot 0,519}{\frac{2}{2}}$$

4.5.4.1. Tensões de flexão

Para calcular as tensões de flexão existentes nas guias, são utilizadas as forças horizontais perpendiculares ao plano, devendo ser calculadas através da expressão (41) e (42):

- **Tensão de flexão relativa ao eixo (x):**

$$\sigma_x = \frac{3 \cdot F_y \cdot l}{16 \cdot W_{xx}} \Leftrightarrow \quad (41)$$

$$\sigma_x = \frac{3 \cdot 8235,856 \cdot 1750}{16 \cdot 26160}$$

- **Tensão de flexão relativa ao eixo (y):**

$$\sigma_y = \frac{3 \cdot F_x \cdot l}{16 \cdot W_{yy}} \Leftrightarrow \quad (42)$$

$$\sigma_y = \frac{3 \cdot 4408,125 \cdot 1750}{16 \cdot 25460}$$

4.5.4.2. Tensão de compressão

De acordo com a EN 81-20 [19], para o cálculo das tensões de compressão nas guias, é necessário calcular a força vertical resultante da combinação de um coeficiente de impacto (k_1), as cargas envolvidas (P_{EC} e Q), as componentes físicas envolvidas, nomeadamente a massa específica (ρ) e a aceleração da gravidade (g), assim como a força (F_p) exercida na guia resultante da passagem pelas respetivas fixações, este efeito é devido ao assentamento normal do edifício ou devido às contrações do betão.

A força (F_p) é o resultado da multiplicação entre o número de fixações existentes e a força exercida pelos grampos de fixação da guia, por cada unidade de fixação, no entanto, para cursos inferiores a 40 metros, esta força pode ser ignorada, logo ($F_p=0$).

- **Força vertical:**

$$F_v = \frac{k_1 g_n (P_{EC}+Q)}{n} + (\rho g_n) + F_p \Leftrightarrow \quad (43)$$

$$F_v = \frac{5 \cdot 9,81 \cdot (1300+1000)}{9} + (17,91 \cdot 9,81)$$

- **Tensão de compressão:**

$$\sigma_c = \frac{[F_v+k_3 (P_{EC}+Q)]}{A} \Leftrightarrow \quad (44)$$

$$\sigma_c = \frac{[12710,697 + 1,2 \cdot (1300+1000)]}{2282}$$

Na Tabela 16, podem ser consultados os valores de referência para o coeficiente de impacto (k_1).

Tabela 16 - Coeficientes de impacto - (Adaptado - [19])

Impacto por	Coefficiente de impacto	Valor
Atuação de um paraquedas de ação instantânea outro que não de roletes	k_1	5
Atuação de um paraquedas de ação instantânea de roletes ou de um dispositivo de cunha com amortecedor de acumulação de energia ou de um amortecedor de acumulação de energia		3
Atuação de um paraquedas de ação progressiva, ou de um dispositivo de cunha, ou de um dispositivo de cunha com amortecedor de dissipação de energia, ou de um amortecedor de dissipação de energia		2
Válvula de rotura		2
Funcionamento	k_2	1,2
Equipamentos auxiliares fixos às guias e outros cenários operacionais	k_3	(...) ^a
^{a)} O valor tem de ser determinado pelo fabricante em função de cada caso em concreto.		

4.5.4.3. Tensão de encurvadura

Finalmente, e de acordo com a EN 81-50 [34], é possível determinar a tensão de encurvadura através da seguinte expressão:

$$\sigma_k = \frac{[F_v+k_3 (P_{EC}+Q)] \omega_R}{A} \Leftrightarrow \quad (45)$$

$$\sigma_k = \frac{(12710,697 + 1,2 \cdot 2300) \cdot 1,44}{2282}$$

4.5.4.4. Tensões combinadas

Mais uma vez, recorrendo à norma de suporte, de acordo com a EN 81-50 [34], a tensão de flexão, as tensões combinadas de flexão e compressão e, tensão de flexão e encurvadura, devem ser avaliadas através das seguintes expressões:

- **Tensão de flexão:**

$$\sigma = \sigma_f = \sigma_x + \sigma_y \Leftrightarrow \quad (46)$$

$$\sigma_f = 103,302 + 55,291$$

- **Tensão de flexão e compressão:**

$$\sigma_{fc} = \sigma_f + \sigma_c \Leftrightarrow \quad (47)$$

$$\sigma_{fc} = 158,593 + 6,779$$

- **Tensão de flexão e encurvadura:**

$$\sigma_{fk} = \sigma_k + 0,9 \cdot \sigma_f \Leftrightarrow \quad (48)$$

$$\sigma_{fk} = 7,312 + 0,9 \cdot 158,593$$

4.5.4.5. Tensão de curvatura na flange

De igual forma, como as guias não são elementos contínuos, deve ser analisada a tensão na zona da flange de união de guias. Para os casos em que se utilizam roçadeiras e guias de perfil em forma de "T" conforme ilustração na Figura 39, deve ser utilizada a seguinte expressão:

$$\sigma_F = \frac{F_x \left(h_1 - \frac{b}{2} - f \right) \cdot 6}{c^2 \cdot [l + 2 \cdot (h_1 - f)]} \Leftrightarrow \quad (49)$$

$$\sigma_F = \frac{4408,125 \cdot (82 - 11 - 12) \cdot 6}{10^2 \cdot [140 + 2 \cdot (82 - 12)]}$$

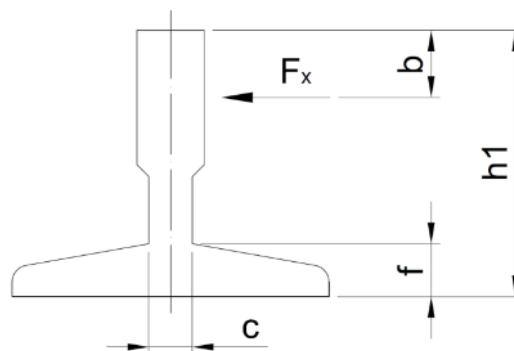


Figura 39 - Representação da guia perfil em "T" - (Adaptado - [20])

4.5.4.6. Flecha admissível

Nos casos de equipamentos sem sistema de retenção nas guias, devem ser seguidas as recomendações de acordo com a EN 81-20,[19]. Tais recomendações são para que, como o elevador é equipado com um sistema paraquedas, considerando a carga e as forças geradas pelo equipamento, inclusive as forças geradas pela aceleração horizontal do projeto (a_d), a flecha máxima admissível em ambas as direções (x) e (y), para as guias de cabina seja de ($\delta_{perm}= 5$ mm) e para as guias de contrapeso seja de ($\delta_{perm}= 10$ mm).

Para as situações em que os elevadores são equipados com sistemas de retenção, devem ser cumpridas as recomendações da EN 81-77, [5]:

1. A flecha máxima deve ser medida considerando a flecha da guia, a flecha do conjunto de fixações e o afastamento do entre guias;
2. Na direção (y), a flecha máxima admissível permitida nas guias deve ser tal que, durante um terramoto, o comprimento da sobreposição entre a alma da guia e o dispositivo de retenção, seja igual ou superior a 5 mm, conforme representado na Figura 41;
3. Para as guias normalizadas, o valor da tensão admissível (σ_{perm}) deve cumprir o requisito do fator de segurança dispostos na Tabela 17 e na Tabela 18;
4. A flecha máxima permitida nas guias de cabina, deve ser analisada para ambas as direções (x) e (y), através das expressões (50) e (51), no entanto a flecha máxima não pode ser superior a 40 mm;

Tabela 17 - Coeficientes de segurança – (Adaptado [19])

Casos de carga	Alongamento (A_5)	Coefficiente de segurança
Manobra normal e carga/descarga	$A_5 > 12 \%$	2,25
	$8 \% \leq A_5 \leq 12 \%$	3,75
Atuação de dispositivo de segurança	$A_5 > 12 \%$	1,8
	$8 \% \leq A_5 \leq 12 \%$	3,0

Para o caso em estudo é utilizado o coeficiente de segurança 1,8, sendo que a tensão admissível a utilizar é ($\sigma_{perm}= 244$ MPa), conforme Tabela 18.

Tabela 18 - Tensão máxima permitida com coeficiente segurança 1,8 – ((Adaptado [19])

Rm (Tensile strength of guide rail) (N/mm ²)	370	440	520
σ_{perm} (Permissible stresses) (N/mm ²)	205	244	290

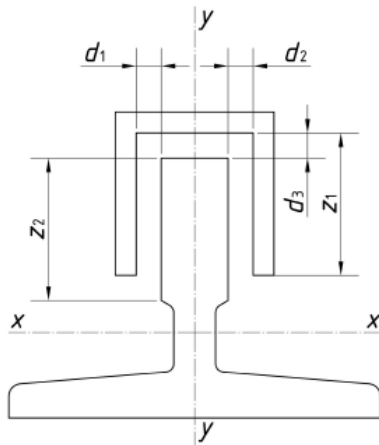


Figura 40 - Posição normal do sistema de retenção, (Adaptado -[5])

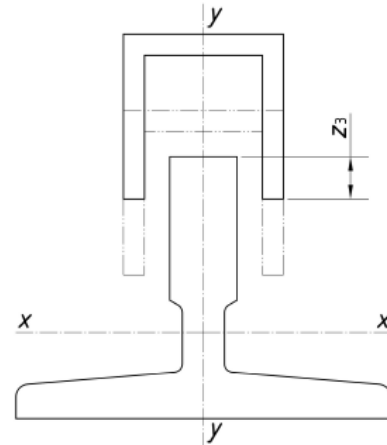


Figura 41 - Comprimento mínimo da sobreposição, durante atividade sísmica (Adaptado -[5])

Assumindo que a aba da roçadeira de cabina (z_1) tem 20 mm e a aba da roçadeira de contrapeso (z_2) tem 25 mm, a folga linear (d_3) existente entre as roçadeiras e as guias é de 1 mm, através dos seguintes cálculos é possível identificar qual o valor da flecha máxima admissível para ambas as direções (x) e (y):

- Flecha admissível em (y):

$$\delta_{perm(y)} = z_1 - 2d_3 - 5 \Leftrightarrow \quad (50)$$

$$\delta_{perm(y)} = 20 - 2 \cdot 1 - 5$$

- Flecha em (y):

$$\delta_y = 0,7 \cdot \frac{F_y \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_x} \Leftrightarrow \quad (51)$$

$$\delta_y = 0,7 \cdot \frac{8235,856 \cdot 1750^3}{48 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 151 \cdot 10^4}$$

- Flecha admissível em (x):

$$\delta_{perm(x)} = z_1 - 2d_3 - 5 \Leftrightarrow$$

$$\delta_{perm(x)} = 20 - 2 \cdot 1 - 5$$

- Flecha em (x):

$$\delta_x = 0,7 \cdot \frac{F_x \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_y} \Leftrightarrow$$

$$\delta_x = 0,7 \cdot \frac{4408,125 \cdot 1750^3}{48 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 159,1 \cdot 10^4}$$

Na Tabela 19 apresentam-se os resultados dos cálculos para as guias de cabina:

Tabela 19 - Resumo de resultados para as guias de cabina

Coeficiente de esbelteza	λ	66,29	--
Massa da carga nominal suspensa	Q_{SE}	400	kg
Força sísmica gerada	F_{SE}	4250	N
Força de flexão relativa ao eixo (y)	F_x	4408,125	N
Força de flexão relativa ao eixo (x)	F_y	8235,856	N
Tensão de flexão relativa ao eixo (x)	σ_x	103,302	MPa
Tensão de flexão relativa ao eixo (y)	σ_y	55,291	MPa
Força vertical	F_V	12710,697	N
Tensão de compressão	σ_c	6,779	MPa
Tensão de encurvadura	σ_k	7,312	MPa
Tensão de flexão	σ_f	158,593	MPa
Tensão combinada (flexão e compressão)	σ_{fc}	165,372	MPa
Tensão combinada (flexão e encurvadura)	σ_{fk}	150,046	MPa
Tensão de curvatura na flange	σ_F	55,731	MPa
Flecha admissível em (y)	$\delta_{perm(y)}$	13	mm
Flecha em (y)	δ_y	2,029	mm
Flecha admissível em (x)	$\delta_{perm(x)}$	13	mm
Flecha em (x)	δ_x	1,03	mm

4.5.5. Contrapeso | Cálculo dimensional

4.5.5.1. Encurvadura


Para o cálculo das tensões de encurvadura nas guias de contrapeso, utiliza-se o mesmo método “ômega”, tomando por base o novo valor do coeficiente de esbelteza (λ) e usando a expressão (36):

$$\lambda = \frac{l_k}{i} \Leftrightarrow$$

$$\lambda = \frac{1750}{15,6}$$

Tabela 20 – Lista de polinômios para categorias de aço com resultado (ω) para guia de contrapeso - (Adaptado - [34])

Esbelteza (λ) para aço com resistência à tração - $R_m \leq 370 \text{ N/mm}^2$	Polinômios	(ω)
$20 \leq \lambda \leq 60$	$\omega = 0,00012920 \lambda^{1,89} + 1$	--
$60 < \lambda \leq 85$	$\omega = 0,00004627 \lambda^{2,14} + 1$	--
$85 < \lambda \leq 115$	$\omega = 0,00001711 \lambda^{2,35} + 1,04$	--
$115 < \lambda \leq 250$	$\omega = 0,00016887 \lambda^{2,00}$	2,16
Esbelteza (λ) para aço com resistência à tração - $R_m \leq 520 \text{ N/mm}^2$	Polinômios	(ω)
$20 \leq \lambda \leq 50$	$\omega = 0,00008240 \lambda^{2,06} + 1,021$	--
$50 < \lambda \leq 70$	$\omega = 0,00001898 \lambda^{2,41} + 1,05$	--
$70 < \lambda \leq 89$	$\omega = 0,00002447 \lambda^{2,36} + 1,03$	--
$20 < \lambda \leq 250$	$\omega = 0,00025330 \lambda^{2,00}$	3,18



Novamente, para aço com resistência à tração (R_m) entre 370 e 520 [N/mm²], o valor “ômega” é obtido através da expressão (37):

$$\omega_R = \left[\frac{\omega_{520} - \omega_{370}}{520 - 370} (R_m - 370) \right] + \omega_{370} \Leftrightarrow$$

$$\omega_R = \left[\frac{3,18 - 2,16}{520 - 370} \cdot (440 - 370) \right] + 2,16 \Leftrightarrow \omega_R = 2,636$$

4.5.5.2. Forças sísmicas geradas

De forma semelhante para avaliar as forças sísmicas geradas pela massa do contrapeso (F_{SE}), quando sujeitas à aceleração do projeto (a_d), para além de serem considerados os valores da carga nominal (Q) e da massa da cabina em vazio (P_{EC}), deve ser também considerado o coeficiente relacionado com a massa do contrapeso (q), devendo utilizar a expressão (52):

$$F_{SE} = a_d (P_{EC} + q Q) \Leftrightarrow \quad (52)$$

$$F_{SE} = 2,5 \cdot (1300 + 0,5 \cdot 1000)$$

4.5.5.3. Forças de flexão

Com um processo de cálculo semelhante ao utilizado para determinar as forças de flexão na guia de cabina e utilizando as expressões (53) e (54), é possível obter os valores correspondentes à guia de contrapeso:

- **Força de flexão relativa ao eixo (y)**

$$F_x = \frac{k_2 g (P_{EC}+q Q) e_x D_x}{n h} + \frac{a_x (P_{EC}+q Q) X_{SE}}{n} \Leftrightarrow \quad (53)$$

$$F_x = \frac{1,2 \cdot 9,81 \cdot (1300+0,5 \cdot 1000) \cdot 0,08 \cdot 0,15}{2 \cdot 2,012} + \frac{2,5 \cdot (1300+0,5 \cdot 1000) \cdot 0,5293}{2}$$

- **Força de flexão relativa ao eixo (x)**

$$F_y = \frac{k_2 g (P_{EC}+q Q) e_y D_y}{\frac{n}{2} h} + \frac{a_y (P_{EC}+q Q) X_{SE}}{\frac{n}{2}} \Leftrightarrow \quad (54)$$

$$F_y = \frac{1,2 \cdot 9,81 \cdot (1300+0,5 \cdot 1000) \cdot 0,075 \cdot 0,8}{\frac{2}{2} \cdot 2,012} + \frac{2,5 \cdot (1300+0,5 \cdot 1000) \cdot 0,5293}{\frac{2}{2}}$$

Onde:

e_x – é 10% de excentricidade do ponto de atuação da massa em relação ao centro de gravidade na direção (x)

e_y – é 5% de excentricidade do ponto de atuação da massa em relação ao centro de gravidade na direção (y)

D_x – Dimensão do contrapeso na direção (x)

D_y – Dimensão do contrapeso na direção (y)

4.5.5.4. Tensões de Flexão

No cálculo das tensões de flexão existentes nas guias de contrapeso, repete-se o processo, sendo utilizadas as forças horizontais perpendiculares ao plano, e calculadas através da expressão (41) e (42):

- **Tensão de flexão relativa ao eixo (x):**

$$\sigma_x = \frac{3 \cdot F_y \cdot l}{16 \cdot W_{xx}} \Leftrightarrow$$

$$\sigma_x = \frac{3 \cdot 1254,115 \cdot 1750}{16 \cdot 9290}$$

- **Tensão de flexão relativa ao eixo (y):**

$$\sigma_y = \frac{3 \cdot F_x \cdot l}{16 \cdot W_{yy}} \Leftrightarrow$$

$$\sigma_y = \frac{3 \cdot 3013,747 \cdot 1750}{16 \cdot 7060}$$

4.5.5.5. Tensão de compressão

Através da expressão (55) calcula-se a tensão de compressão, continuando a assumir ($F_p=0$) para cursos inferiores a 40 metros:

- **Força vertical:**

$$F_v = \frac{k_1 g_n M_{cwt}}{n} + (\rho g_n) + F_p \Leftrightarrow \quad (55)$$

$$F_v = \frac{5 \cdot 9,81 \cdot 1800}{9} + (8,56 \cdot 9,81)$$

- **Tensão de compressão:**

$$\sigma_c = \frac{F_v + k_3 M_{cwt}}{A} \Leftrightarrow \quad (56)$$

$$\sigma_c = \frac{9893,974 + 1,2 \cdot 1800}{1091}$$

4.5.5.6. Tensão de encurvadura

Finalmente, através da seguinte expressão (45), é possível determinar a tensão de encurvadura:

$$\sigma_k = \frac{[F_v + k_3 P_{cwt}) \omega_R}{A} \Leftrightarrow$$

$$\sigma_k = \frac{(9893,974 + 1,2 \cdot 1800) \cdot 2,636}{1091}$$

4.5.5.7. Tensões combinadas

Repetindo o processo, a tensão de flexão, as tensões combinadas de flexão e compressão e, tensões de flexão e encurvadura são calculadas através das seguintes expressões:

- **Tensão de flexão:**

$$\sigma = \sigma_f = \sigma_x + \sigma_y \Leftrightarrow$$

$$\sigma_f = 44,296 + 140,069$$

- **Tensão de flexão e compressão:**

$$\sigma_{fc} = \sigma_f + \sigma_c \Leftrightarrow$$

$$\sigma_{fc} = 184,365 + 11,049$$

- **Tensão de flexão e encurvadura:**

$$\sigma_{fk} = \sigma_k + 0,9 \cdot \sigma_f \Leftrightarrow$$

$$\sigma_{fk} = 29,124 + 0,9 \cdot 184,365$$

4.5.5.8. Tensão de curvatura na flange

De igual forma, deve ser analisada a tensão na zona da flange de união de guias de contrapeso, utilizando a expressão (49):

$$\sigma_F = \frac{F_x \left(h_1 - \frac{b}{2} - f \right) \cdot 6}{c^2 \cdot [l + 2 \cdot (h_1 - f)]} \Leftrightarrow$$

$$\sigma_F = \frac{1254,115 \cdot (62 - 12,5 - 9) \cdot 6}{8^2 \cdot [100 + 2 \cdot (62 - 9)]}$$

4.5.5.9. Flecha admissível

Num processo semelhante ao efetuado para as guias de cabina, deve ser avaliada a flecha em ambas as direções (x) e (y), através das seguintes expressões (50) e (51):

- Flecha admissível em (y):

$$\delta_{perm(y)} = Z_1 - 2d_3 - 5 \Leftrightarrow$$

$$\delta_{perm(y)} = 25 - 2 \cdot 1 - 5$$

- Flecha em (y):

$$\delta_y = 0,7 \cdot \frac{F_y \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_x} \Leftrightarrow$$

$$\delta_y = 0,7 \cdot \frac{1254,115 \cdot 1750^3}{48 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 402,9 \cdot 10^3}$$

- Flecha admissível em (x):

$$\delta_{perm(x)} = Z_1 - 2d_3 - 5 \Leftrightarrow$$

$$\delta_{perm(x)} = 25 - 2 \cdot 1 - 5$$

- Flecha em (x):

$$\delta_x = 0,7 \cdot \frac{F_x \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_y} \Leftrightarrow$$

$$\delta_x = 0,7 \cdot \frac{3013,747 \cdot 1750^3}{48 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 264,7 \cdot 10^3}$$

Na Tabela 21 apresentam-se os resultados dos cálculos para as guias de contrapeso:

Tabela 21 - Resumo de resultados para as guias de contrapeso

Coeficiente de esbelteza	λ	112,1729	--
Massa da carga nominal suspensa	Q_{SE}	400	kg
Força sísmica gerada	F_{SE}	4500	N
Força de flexão relativa ao eixo (y)	F_x	1254,115	N
Força de flexão relativa ao eixo (x)	F_y	3013,747	N
Tensão de flexão relativa ao eixo (x)	σ_x	44,296	MPa
Tensão de flexão relativa ao eixo (y)	σ_y	140,069	MPa
Força vertical	F_V	9893,974	N
Tensão de compressão	σ_c	11,049	MPa
Tensão de encurvadura	σ_k	29,124	MPa
Tensão de flexão	σ_f	184,365	MPa
Tensão combinada (flexão e compressão)	σ_{fc}	195,414	MPa
Tensão combinada (flexão e encurvadura)	σ_{fk}	213,484	MPa
Tensão de curvatura na flange	σ_F	23,115	MPa
Flecha admissível em (y)	$\delta_{perm(y)}$	18	mm
Flecha em (y)	δ_y	1,159	mm
Flecha admissível em (x)	$\delta_{perm(x)}$	18	mm
Flecha em (x)	δ_x	4,237	mm

4.5.5.10. Resultado | Cálculo sísmico

Como forma de análise e validação de dados, apresenta-se na Tabela 22 um resumo dos cálculos das tensões e flecha, efetuando a comparação com os máximos admissíveis.

Tabela 22 - Resumo dos cálculos de guias de cabina

Cabina		σ_{eff}		σ_{adm}	
Tensão de flexão	σ_f	159 MPa	≤	244 MPa	OK
Tensão de flexão e compressão	σ_{fc}	165 MPa	≤	244 MPa	OK
Tensão de flexão e encurvadura	σ_{fk}	150 MPa	≤	244 MPa	OK
Tensão de encurvadura	σ_k	7,31 MPa	≤	244 MPa	OK
Tensão de curvatura na flange	σ_F	55,7 MPa	≤	244 MPa	OK
		δ_{eff}		δ_{adm}	
Flecha em (y)	$\delta_{(y)}$	2,03 mm	≤	13 mm	OK
Flecha em (x)	$\delta_{(x)}$	1,03 mm	≤	13 mm	OK

Novamente, para facilitar a análise e validação de dados, na Tabela 23, apresenta-se um resumo dos cálculos relativos às guias de contrapeso.

Tabela 23 - Resumo dos cálculos de guias de contrapeso

Contrapeso		σ_{eff}		σ_{adm}	
Tensão de flexão	σ_f	184 MPa	≤	244 MPa	OK
Tensão de flexão e compressão	σ_{fc}	195 MPa	≤	244 MPa	OK
Tensão de flexão e encurvadura	σ_{fk}	214 MPa	≤	244 MPa	OK
Tensão de encurvadura	σ_k	29,1 MPa	≤	244 MPa	OK
Tensão de curvatura na flange	σ_F	23,1 MPa	≤	244 MPa	OK
		δ_{eff}		δ_{adm}	
Flecha em (y)	$\delta_{(y)}$	1,16 mm	≤	18 mm	OK
Flecha em (x)	$\delta_{(x)}$	4,24 mm	≤	18 mm	OK

No decorrer da análise aos resultados obtidos, verifica-se que todos os esforços calculados, estão abaixo do máximo admissível, **validando assim o equipamento para a categoria sísmica 1.**

5. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À AÇÃO SÍSMICA | MEF

Neste capítulo é descrito o procedimento de preparação do modelo para análise computacional, mediante a utilização do software de análise “Ansys®”.

Considerando o reduzido conhecimento do programa, a complexidade do modelo de elevador em estudo, o computador disponível para a análise, com apenas capacidade de memória RAM-32 Gb e principalmente devido à tipologia da maior parte dos componentes, optou-se por classificar os componentes como elementos de casca “shell”.

Esta opção apresenta vantagens na altura da elaboração da malha, pois processa o elemento em análise como plano bidimensional, sendo que apresenta menor número de “nós” para análise, conforme se pode verificar através da comparação entre a Figura 42 e a Figura 43.

Numa primeira abordagem ao problema, este tipo de malha apresenta valores fiáveis e orientativos, no entanto para uma avaliação mais pormenorizada deve ser escolhido outro tipo de configuração, nomeadamente elementos sólidos.

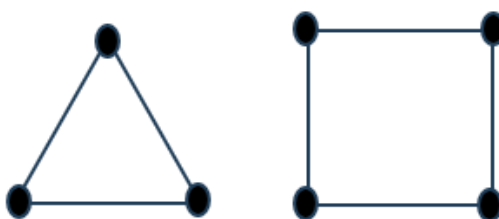


Figura 42 - Elemento bidirecional

Caso se optasse por uma análise em elementos sólidos, como a elaboração da malha é um elemento tridimensional, obriga a que o computador tenha maior disponibilidade de memória, sabendo à partida que o tempo de análise é mais demorado.

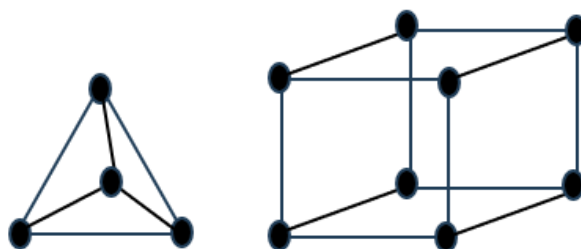


Figura 43 - Elemento tridimensional

5.1. Análise computacional

Nesta secção é efetuada uma descrição pormenorizada sobre o procedimento e decisões adotadas.

5.1.1. Preparação da geometria

Para a presente análise, foi disponibilizado pela empresa Schmitt-Elevadores [18], um modelo básico de um elevador com quatro pisos e um curso de 8930 mm, sendo que a distância máxima entre linhas de fixação corresponde a 1750 mm. De modo a facilitar a execução e ligação da malha, a geometria é ligeiramente alterada e adaptada em conformidade, mas sem comprometer a funcionalidade dos componentes. Para preparação do modelo geométrico, é utilizado o módulo de edição de desenho “SpaceClaim”, extensão do software “Ansys®”, destinado ao tratamento e preparação da geometria para a análise.

Na mesa de trabalho do “Ansys®” designada por “Workbench”, é representado a divisão do modelo assim como a sequência das diversas etapas para se atingir o resultado, conforme representado na Figura 44. Como o “Workbench” é a plataforma base do trabalho, está ligado a todos os módulos de ensaio disponíveis no “Ansys®”.

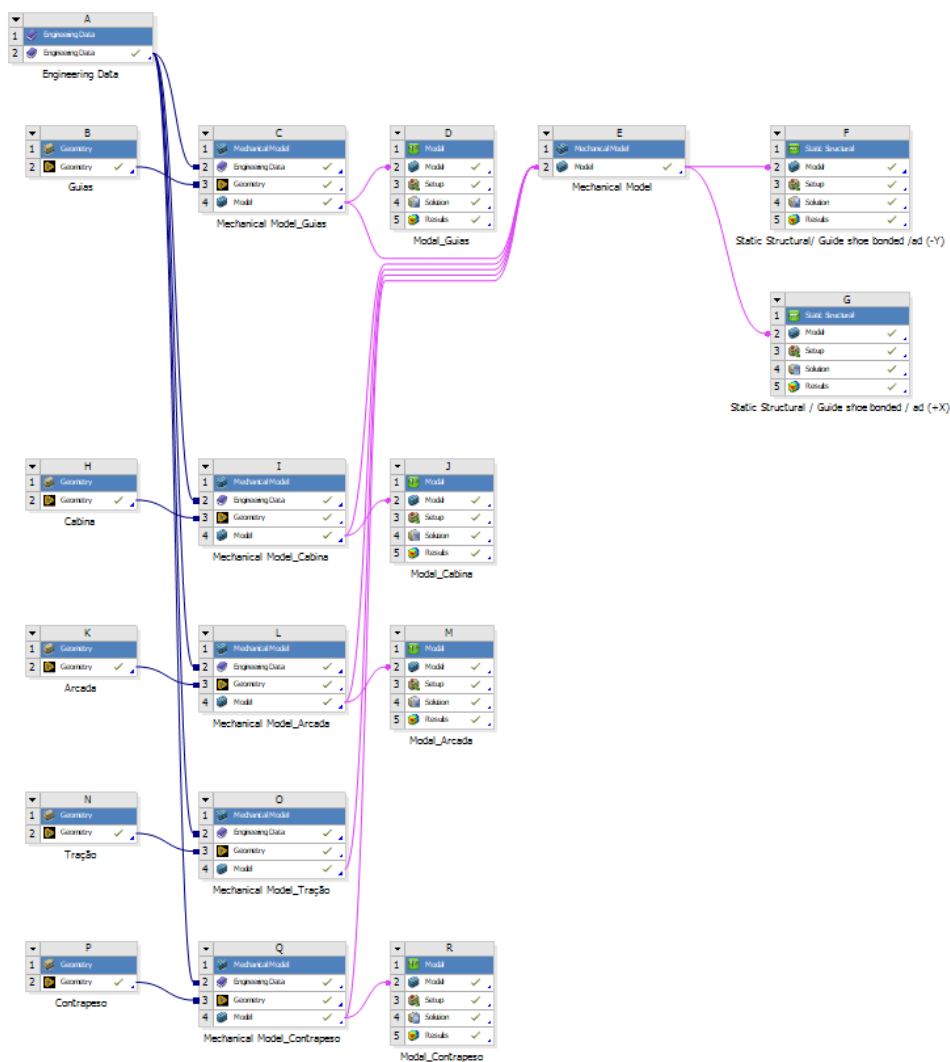


Figura 44 - Disposição das etapas no Workbench

O modelo é dividido em cinco subconjuntos, nomeadamente as guias, a cabina, a arcada, o sistema de tração e o contrapeso. Cada submodelo é tratado individualmente, sendo importada a geometria correspondente.

A mesa de trabalho “*Workbench*” é uma página em branco, havendo a possibilidade de configuração da mesa de trabalho conforme as necessidades do ensaio, sendo que na Figura 45 está representado o método adotado para a preparação para o problema em análise:

1. Criação da caixa para definição e parametrização das características dos materiais utilizados;
2. Criação da caixa correspondente à geometria do modelo, sendo que é nesta caixa que é efetuada a importação do modelo geométrico;
3. Criação da caixa do módulo “*Mechanical*”, destinado à parametrização da malha e definição do tipo de ligação entre os componentes existentes no subconjunto;
4. Criação da caixa para análise modal individual do subconjunto;
5. Criação de nova caixa do módulo “*Mechanical*”, destinado interligação dos subconjuntos;
6. Criação de duas caixas para análise estática, nomeadamente análise independente dos efeitos da aceleração na direção (x) e na direção (y);
7. Interligação entre caixas para análise do modelo;
8. Réplica do processo para os restantes subconjuntos.

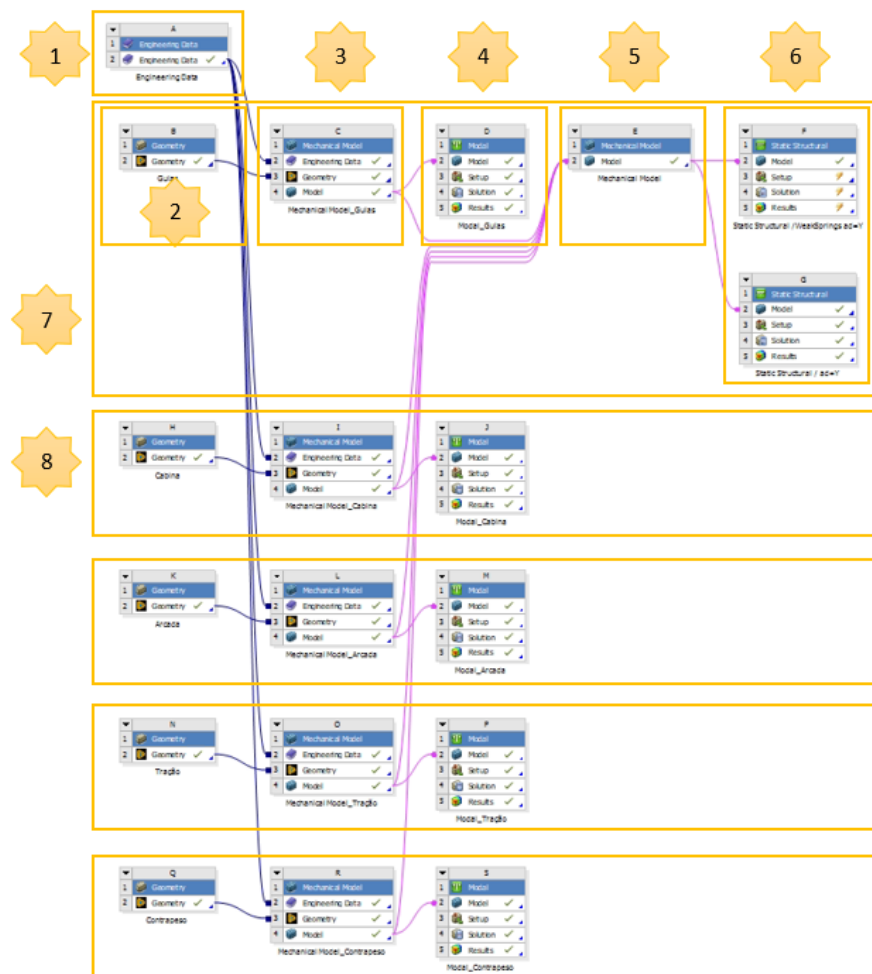


Figura 45 - Parametrização das características dos materiais

A interligação entre caixas é efetuada através do arrastamento entre células com a mesma designação, sendo representada com uma linha, conforme Figura 46. Esta ligação é crucial para que o modelo em análise mantenha as características inicialmente definidas

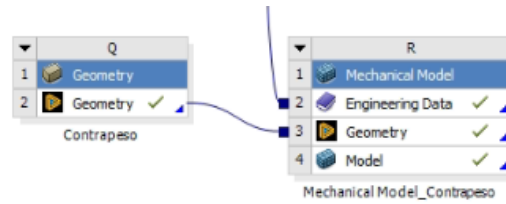


Figura 46 - Ligação entre caixas no Workbench

5.1.1.1. Modelação das guias

A estrutura do conjunto de guias é o modelo que carece de maior análise, pois devido à sua disposição com montagem vertical ao longo da altura do edifício, em caso de atividade sísmica, é o subconjunto que apresenta maior deformação.

Utilizando o “SpaceClaim”, são efetuadas algumas alterações à geometria das guias e respetivas fixações, sendo propositadamente suprimidos alguns componentes para facilitar a execução da malha e posterior análise. Um dos elementos suprimidos são as flanges de união das guias conforme representado na Figura 47, pois devido à configuração de montagem e entalhe existente nos topos das guias, ver Figura 48, nesta fase da análise podem ser ignorados.

Devido às restrições de movimento impostas pelos grampos ao sistema de guias, não permite deslocamento no plano (xy), são eliminados desta análise e substituídos por uma ligação “bonded” entre a base plana das guias e as respetivas fixações, ver Figura 47.

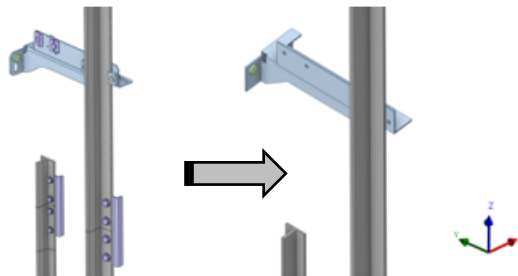


Figura 47 - Alteração de geometria

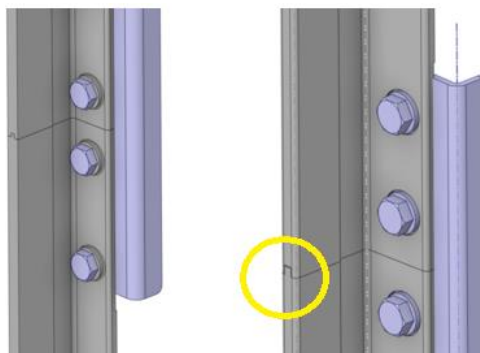


Figura 48 - Pormenor de montagem da guia

5.1.1.2. Modelação da cabina

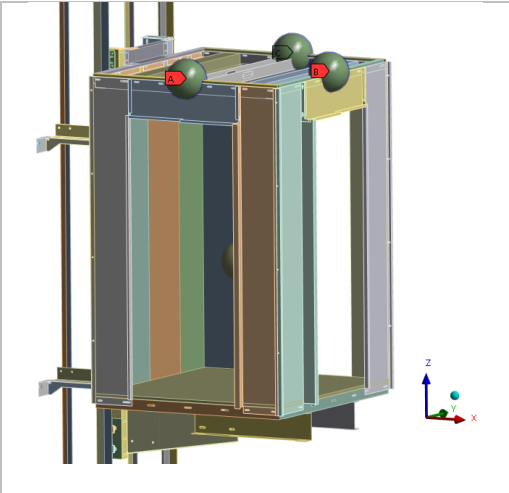
A massa suspensa tem uma influência bastante significativa nos esforços e deformações gerados, principalmente neste tipo de elevador, porque o centro de massa da cabina está desviado do eixo de suporte nas guias, o que gera esforços de momento.

No modelo disponibilizado verifica-se que a estrutura da cabina apresenta uma configuração complexa, pois é uma cabina com três acessos. Esta configuração é interessante de analisar, porque o peso da estrutura e respetivos acessórios das portas de cabina, tem uma influência bastante significativa no peso total da cabina, pelo que o projeto em estudo será o caso mais desfavorável.

O modelo da cabina, é simplificado de modo a facilitar o processo de execução de malha, tendo sido eliminados elementos móveis, tais como as portas de cabina que não influenciam a rigidez da cabina, no entanto, o seu peso e a massa dos restantes componentes elétricos é considerado na massa total da cabina de modo a representar a carga real existente.

Os painéis de cabina contribuem para a rigidez à torção da cabina, pelo que a sua influência não pode ser ignorada, sendo distribuídas conforme Tabela 24.

Tabela 24 - Distribuição de massas

	Designação	Massa [kg]	Rácio [%]	Tipo de representação
	Estrutura (Arcada)	625	48,08	Distribuição uniforme
	Cabina	318	24,46	Distribuição uniforme
	Portas	3 x 119	27,46	Carga pontual
	Σ (Soma)	1300	100	

Tratando-se de um elevador para transporte de passageiros, o valor da massa da carga nominal (Q) é multiplicado pelo coeficiente de carga ($k_{SE}=0,4$), de acordo com a norma EN81.50 [34], sendo distribuída uniformemente.

Para representação do centro de massa da carga nominal suspensa (Q_{SE}), o centro de gravidade corresponde aproximadamente ao centro de gravidade de uma pessoa de estatura média, situado à altura da anca, estando posicionada a cerca de 90 cm de altura do pavimento da cabina.

Na simulação sísmica, a carga útil é classificada como massa pontual, conforme representado na Figura 49, parametrizada com um comportamento de ligação pontual e definida como “deformável”.

A massa pontual da carga nominal, é ligada ao pavimento, compensando a reação de momento gerado, através das expressões (40) e (41), representadas no tema de cálculo de guias.

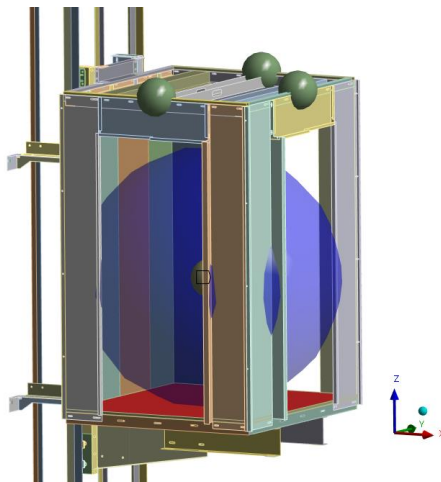


Figura 49 - Representação das massas pontuais | Carga nominal e portas de cabina

5.1.1.1. Modelação do contrapeso

O contrapeso é constituído por uma estrutura fechada, em chapa de aço, sendo preenchido com barras de aço, barras de chumbo, elementos em betão armado ou a combinação de ambos, de acordo com o espaço disponível e a relação de quantidades, por forma a configurar a massa necessária para garantir o equilíbrio de cargas exigido a cada caso, considerando as regras de construção e respetivas recomendações descritas na norma EN81-77,[5].

O modelo é representado detalhadamente, considerando o preenchimento com a quantidade de barras necessárias para o equilíbrio de cargas, relacionado com a carga a transportar, sendo que o empilhamento unitário das barras permite avaliar o comportamento do contrapeso e respetivos pesos, quando o modelo é sujeito à ação sísmica.

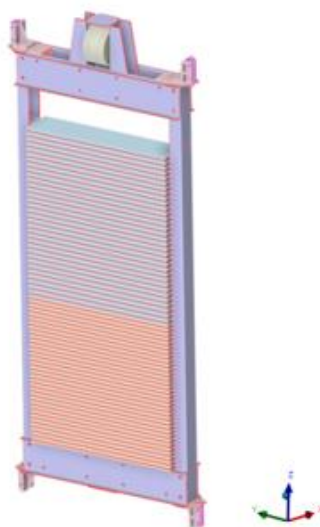


Figura 50 – Contrapeso

5.1.1.2. Modelação do grupo de tração

Nesta análise, por questões de simplificação no agrupamento e ligação dos subconjuntos, o grupo de tração é composto pela máquina de tração, os cabos de suspensão e são também consideradas as rodas de desvio montadas na arcada de cabina e no contrapeso. Para otimização da malha, a máquina que não carece de análise, é representada por um sólido, conforme Figura 51.

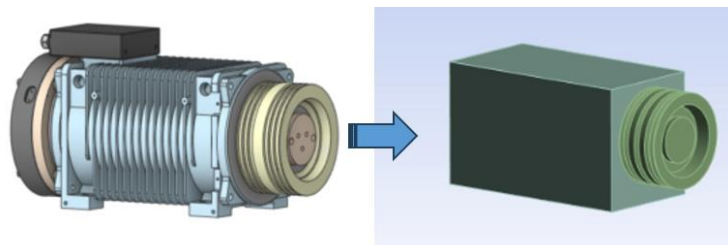


Figura 51 - Máquina de tração

De modo a facilitar a execução da malha, a geometria das rodas de desvio é ligeiramente alterada, eliminando os pormenores da furação para alojamento dos rolamentos e os raios de concordância existentes nas arestas dos gornes. Os rolamentos são substituídos por casquilhos sólidos, conforme representado na Figura 52.

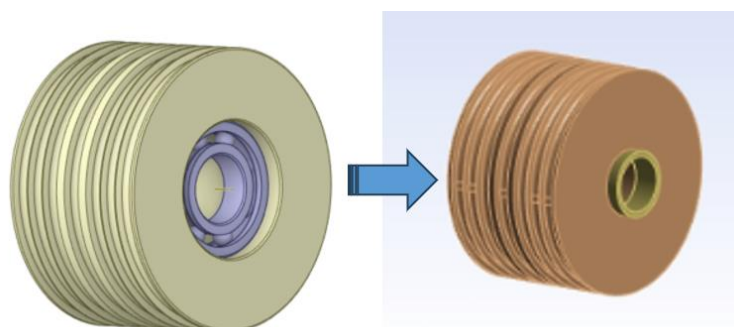


Figura 52 - Roda de desvio

Os cabos de suspensão são fixos na estrutura através de uns terminais normalizados, conforme Figura 53. Como a análise não está focada no comportamento deste componente, os terminais são eliminados e a extremidade do cabo é diretamente ligada à estrutura através de uma ligação "bonded".

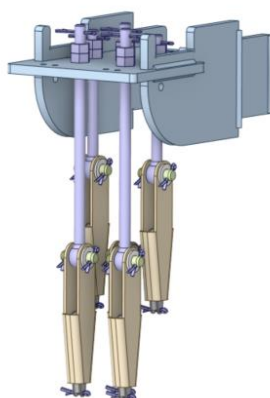


Figura 53 - Terminais normalizados

5.1.2. Definição de contactos

Nos programas de análise de elementos finitos estão disponíveis vários tipos de contactos para representarem a realidade do projeto, pelo que devem ser utilizados mediante as restrições que se pretende impor ao modelo.

No programa de análise utilizado existem cinco tipos de contactos, cuja designação e respetivas funcionalidades estão representados na Tabela 25.

Tabela 25 - Tipos de contactos

Designação	Tipo de comportamento		
	Separação	Penetração	Deslize
Ligado (<i>Bonded</i>)	Não	Não	Não
Sem separação (<i>No Separation</i>)	Não	Não	Sim, ($\mu=0$)
Sem fricção (<i>Frictionless</i>)	Sim	Não	Sim, ($\mu=0$)
Elevada rugosidade (<i>Rough</i>)	Sim	Não	Não, ($\mu=\infty$)
Com fricção <i>Frictional</i>	Sim	Não	Sim, ($F_{sliding} > F_{friction}$)

A maior parte dos componentes são analisados como elementos de casca “*shell*”, pelo que é utilizada uma técnica de criação de um plano intermédio que representa o objeto selecionado.

Este plano é configurado a meio da geometria “*midsurface*”, e com a utilização desta técnica na maioria dos objetos e tratando-se de um projeto bastante complexo, para selecionar os contactos entre as peças, é escolhida a função para efetuar automaticamente os contactos entre geometrias.

Devido à predefinição do programa, todas as ligações automáticas são realizadas do tipo “*bonded*”, pelo que deve ser efetuada a alteração do tipo de contacto, consoante a necessidade do projeto.

Na Tabela 26 está representada a tipologia dos contactos utilizados nos diferentes componentes e respetivas interligações. Foram testados vários modelos com características em tudo semelhantes, no entanto a única diferença incide nos tipos de contactos utilizados e respetiva parametrização.

Tabela 26 – Resumo dos contactos utilizados

		Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5
Componente	Configuração	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo
		Global	Global	Simplificado1	Simplificado2	Global
		Tipo de contacto	Tipo de contacto	Tipo de contacto	Tipo de contacto	Tipo de contacto
Bucha de fixação à parede	Controlado pelo programa	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>
Ligações aparafusadas	Controlado pelo programa	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>
Fixação dos cabos de suspensão	MPC	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>
Cabos de suspensão	Controlado pelo programa	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>
Veios das rodas de desvio	Controlado pelo programa	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Ligado <i>Bonded</i>
Rodas de desvio / mancal	Controlado pelo programa	Sem separação <i>No Separation</i>	Sem separação <i>No Separation</i>	Sem separação <i>No Separation</i>	Sem separação <i>No Separation</i>	Sem separação <i>No Separation</i>
Pesos do contrapeso	Controlado pelo programa	Sem separação <i>No Separation</i>	Sem separação <i>No Separation</i>	Sem separação <i>No Separation</i>	Sem separação <i>No Separation</i>	Sem separação <i>No Separation</i>
Roçadeiras / guias	Controlado pelo programa	Sem atrito <i>Frictionless</i>	Ligado <i>Bonded</i>	Sem atrito <i>Frictionless</i>	Sem atrito <i>Frictionless</i> Parâmetros adicionais	Sem atrito <i>Frictionless</i> Parâmetros adicionais
Resultado da simulação		Concluído, mas com penetração de materiais	Concluído, mas não reflete a realidade	Concluído, mas com penetração de materiais.	Concluído com sucesso	Concluído com sucesso

5.1.3. Definição da malha (“Mesh”)

O programa permite escolher entre três opções, sendo a opção malha “controlada pelo programa”, malha do tipo “linear” ou malha do tipo “quadrática”.

Na maioria dos componentes, a execução da malha é gerada através da opção “controlada pelo programa”, no entanto devido à necessidade de maior atenção no comportamento das guias, a execução da malha é forçada a cumprir determinados requisitos, nomeadamente o tamanho do elemento e a execução de uma malha do tipo “quadrática”.

Na Tabela 27, é representado um resumo das características da malha utilizada:

Tabela 27 - Características da malha

Subconjunto	Tipo de malha	Tamanho [mm]	Nós [unidade]	Elementos [unidade]
Guias	2ª ordem (quadrática)	15	359745	135652
Cabina	Controlada pelo programa	30	124478	121113
Cabina (pavimento)	Controlada pelo programa	250		
Arcada	Controlada pelo programa	12,87	170223	126791
Tração	Controlada pelo programa	--	483564	217226
Contrapeso	Controlada pelo programa	18,35	167791	120633

5.1.4. Critérios de análise

Neste subcapítulo são descritas as condições impostas para efetuar a análise, nomeadamente a definição de apoios do modelo e forças externas que influenciam o comportamento do equipamento.

5.1.4.1. Apoios

Como o elevador desta análise é montado num edifício e fixo às paredes do caixa, todas as fixações das guias são ligadas à parede através de buchas. Os elementos que representam as buchas de fixação à parede são configurados como apoios fixos, opção “*fixed support*”.

Na base das guias, sendo o ponto de contacto entre as guias e o pavimento do poço, é também considerada esta tipologia de ligação.

5.1.4.2. Aceleração

Para efeitos de comparação com os cálculos analíticos efetuados, é imposta uma aceleração horizontal em diferentes direções, nomeadamente segundo a direção (x) e segundo a direção (y). No entanto, a aceleração vertical imposta pela aceleração da gravidade (g) não pode ser ignorada.

Para que a análise seja bem executada e de modo a considerar todas as condições impostas, é parametrizado o período em que cada aceleração atua. Cada um destes períodos é designado por “*step*”, pelo que na Tabela 28 está representado o período de atuação para cada caso da análise.

Tabela 28 - Identificação das acelerações por análise

Análise 1 $a_d = a_x$				
Step	Período [s]	Condição externa imposta	Unidade [m/s ²]	Sentido
1	0 – 0,2	Aceleração da gravidade	9,81	Z= -g
2	0,2 – 2	Aceleração da gravidade	9,81	Z= -g
	0,2 - 2	Aceleração horizontal	2,5	X= a_d
Análise 2 $a_d = a_y$				
Step	Período [s]	Condição externa imposta	Unidade [m/s ²]	Sentido da aceleração
1	0 – 0,2	Aceleração da gravidade	9,81	Z= -g
2	0,2 – 2	Aceleração da gravidade	9,81	Z= -g
	0,2 – 2	Aceleração horizontal	2,5	Y= - a_d

5.2. Avaliação de resultados

5.2.1. Análise 1 | Modelo global “Frictionless”

No seguimento das configurações conforme mencionado na Tabela 25, procedeu-se à simulação computacional. Rapidamente se percebeu que o modelo não convergia e apresentava erros devido a deslize entre superfícies “sliding”. Para solucionar este problema foi ativada uma opção do software denominada por “weak springs”, que consiste na introdução de molas de rigidez muito baixa para manter as superfícies estabilizadas durante o ensaio.

Com esta solução já foi possível obter um resultado, mas não o resultado esperado, pois quando é imposta a aceleração horizontal, as roçadeiras deslizam na guia na direção da aceleração. Apesar da combinação de restrições, com contactos do tipo “frictionless” nas superfícies do plano (yz) e contacto do tipo “no separation” nas superfícies do plano (xz), não foi possível evitar este erro.

Nas imagens seguintes (fig.54 a 58) é possível avaliar o tipo de comportamento que o modelo apresentava.

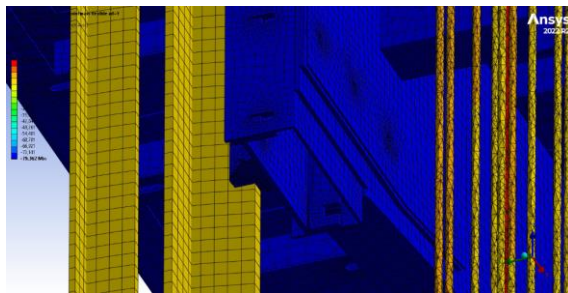


Figura 54 - Pormenor de cabina antes do ensaio

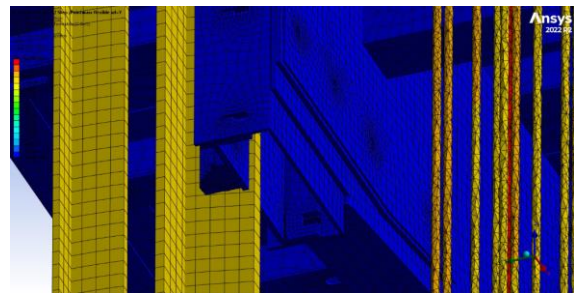


Figura 55 - Pormenor de cabina após início do ensaio

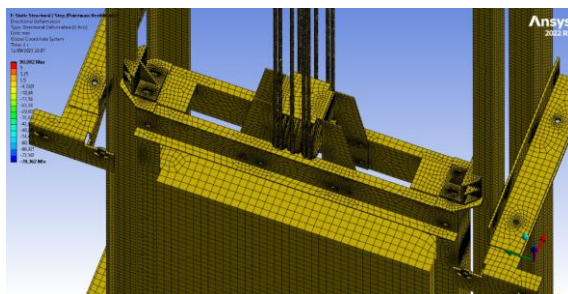


Figura 56 - Pormenor de contrapeso antes do ensaio

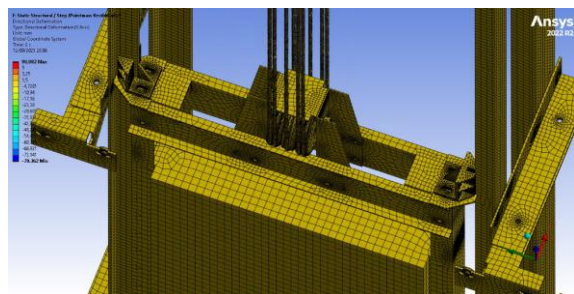


Figura 57 - Pormenor de contrapeso após início do ensaio

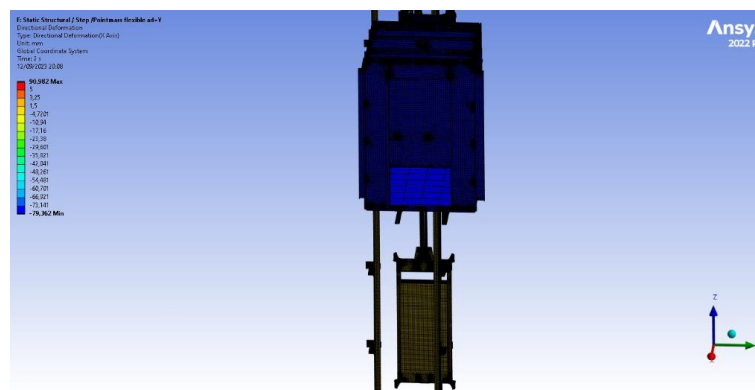


Figura 58 - Imagem global após ensaio

5.2.2. Análise 2 | Modelo global “Bonded”

No seguimento das configurações conforme mencionado anteriormente, devido à análise com contacto “*frictionless*” não ter sido possível obter uma solução, foram alteradas as configuradas dos contactos e redefinidas como contactos “*bonded*”. Apesar de não refletir o que se passa na realidade, com esta escolha conseguiu-se obter uma solução.

5.2.2.1. Análise com solicitação em (x)

Nos temas seguintes, apresenta-se a análise de resultados obtidos quando imposta uma aceleração horizontal na direção (x):

- **Deformação**

Na Figura 59 verifica-se a influência da aceleração horizontal, sendo que o valor máximo absoluto da deformação direcional está situado na parte inferior da cabina, aproximadamente [1,05 mm]. Esta deformação ocorre na base da arcada da cabina, na zona de suporte da roçadeira, conforme se pode avaliar na Figura 60.

Verifica-se também que existe uma deformação nas guias de cabina com valor muito baixo aproximadamente [0,09 mm],

É de salientar a existência de uma deformação aproximada de [0,34 mm], situada na parte superior da cabina, justificável devido ao facto de estar a ser aplicado um ponto de massa de [119 kg], correspondente ao peso da porta de cabina.

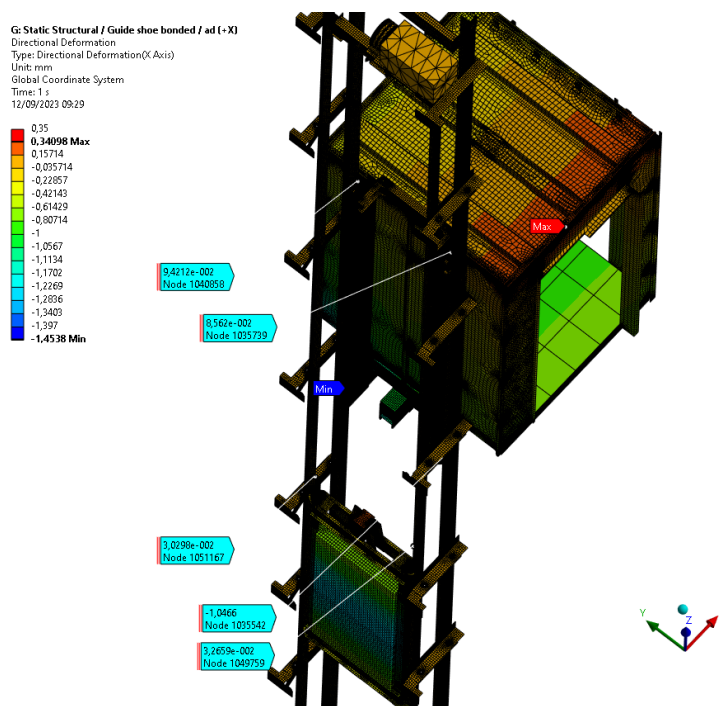


Figura 59 - Distribuição de deformações – ad (x) – Ligação Bonded

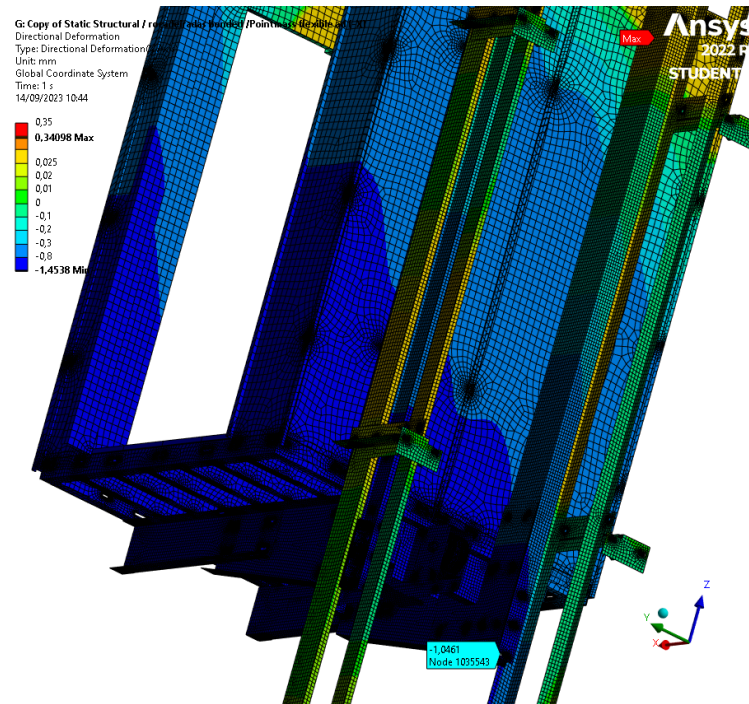


Figura 60 - Pormenor com local de deformação zona de suporte da roçadeira – $a_d(x)$ - Bonded

Analisando unicamente o sistema de guias, na Figura 61 verifica-se que o valor máximo absoluto da deformação direcional está situado abaixo da fixação que recebe os esforços da parte inferior da cabina, aproximadamente [1,05 mm]. Nas guias de contrapeso a deformação é simétrica relativamente ao eixo vertical, no entanto apresenta maior valor na zona das roçadeiras inferiores.

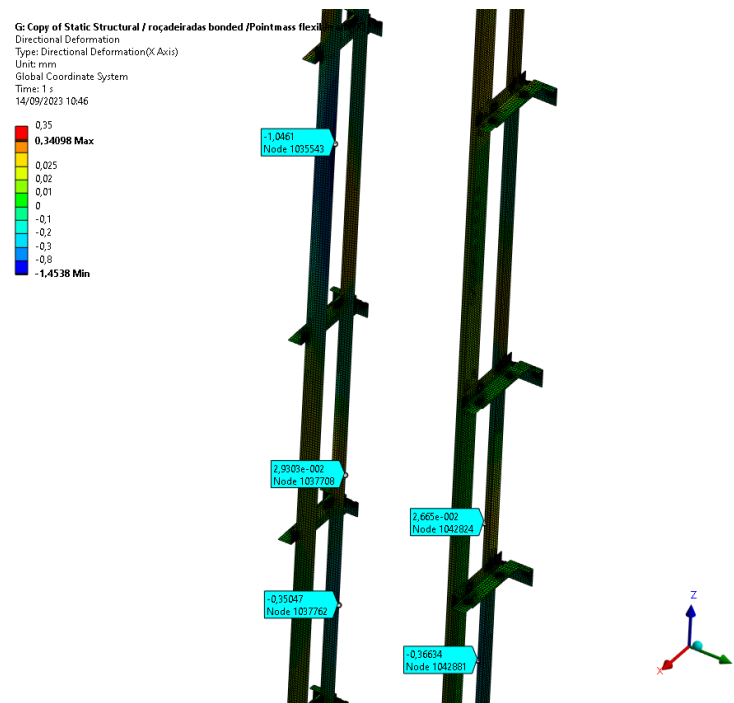


Figura 61 - Deformações no sistema de guias – $a_d(x)$ – Ligação Bonded

Nas fixações das guias não são registados valores de relevância, pois quando imposta uma aceleração na direção (x), o perfil da fixação trabalha num modo de tração e compressão e apresenta muito bom comportamento de resistência mecânica.

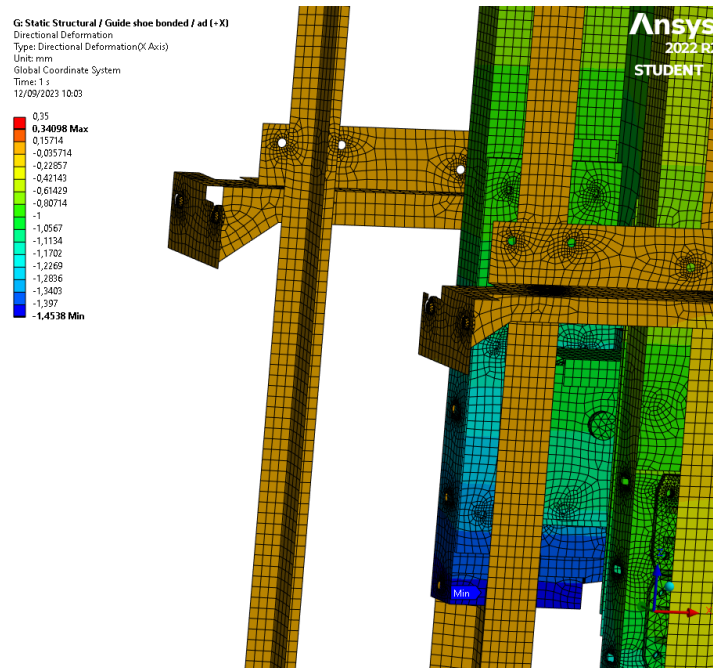


Figura 62 - Pormenor de deformação na fixação das guias à parede – $a_d(x)$

As guias de contrapeso, apresentam deformação direcional com valores máximos muito reduzidos de aproximadamente [0,37 mm] localizados na parte inferior devido ao centro de massa do contrapeso se encontrar deslocado.

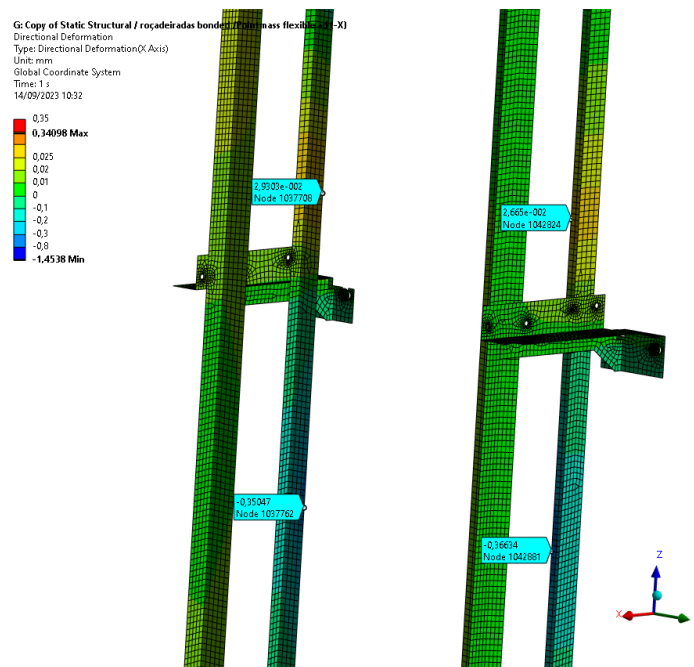


Figura 63 - Deformação direcional na guia de contrapeso – $ad=(x)$

Os valores obtidos devem de ser alvo de análise cuidada e reavaliação, pois o contacto “bonded” simula a união entre peças e confere rigidez ao sistema, certamente tem influência no resultado.

- **Tensão equivalente (von-Mises)**

A tensão máxima equivalente atingida, verifica-se que está situada na bucha de fixação à parede, atingindo o valor aproximado [276 MPa], conforme Figura 64. Esta situação merece melhor análise, pois durante a análise foi considerada a bucha como elemento de ligação e o valor obtido é muito elevado.

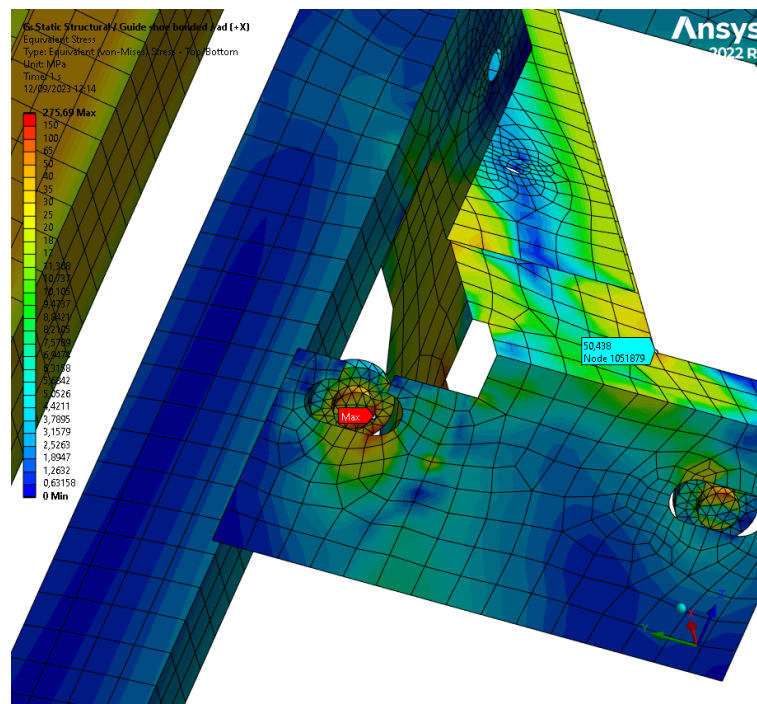


Figura 64 - Pormenor de tensão equivalente na bucha e fixação – σ_d (x)

Como estamos a utilizar uma ligação das guias às roçadeiras, do tipo “bonded”, neste ensaio está a provocar apenas um esforço de tração, mas na realidade com o deslocamento da cabina na direção positiva de (y), devido às folgas existentes, ao diferente valor de rigidez dos materiais e como os componentes deslizam sem atrito, os esforços transmitidos são combinados e poderão ser obtidos resultados diferentes.

Na realidade esta ligação não depende apenas da qualidade do material da bucha, mas também da qualidade da parede de suporte. Neste caso e devido ao valor, deve ser equacionada a utilização de buchas com fixação de agente químico.

Relativamente aos valores das tensões instaladas na restante estrutura em análise, não são observados valores preocupantes, sendo que o máximo atingido na aba da guia é aproximadamente [108 MPa], situado na área de ligação da roçadeira inferior na zona de união à fixação da guia de cabina, conforme se pode analisar na Figura 65.

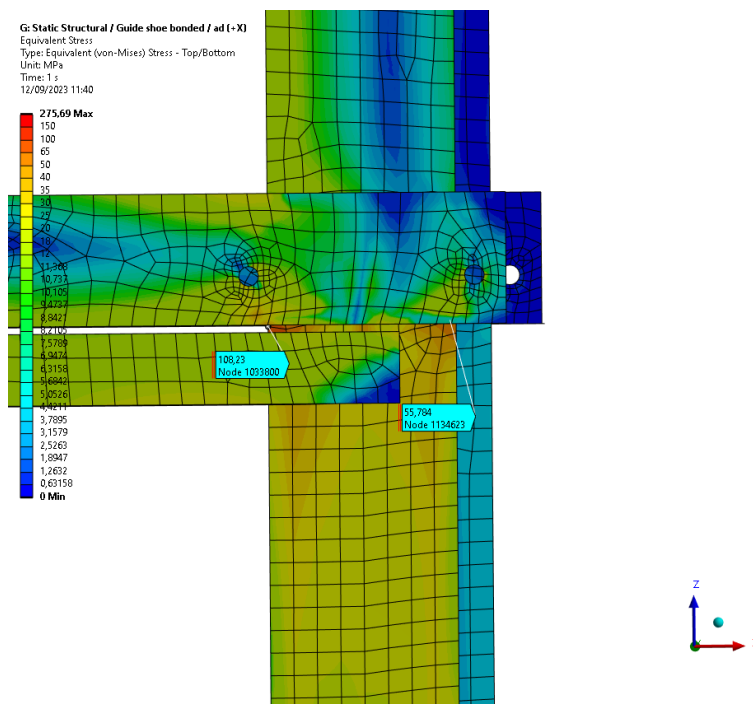


Figura 65 - Pormenor das tensões equivalentes na guia de cabina – $a_d(x)$

Na Figura 66 estão representadas a distribuição de tensões equivalentes instaladas nas guias. A guia de cabina apresenta uma tensão máxima aproximada de [53 MPa], localizada na zona inferior da arcada e as guias de contrapeso o valor máximo obtido é aproximadamente [38 MPa], também situado na zona da roçadeira inferior.

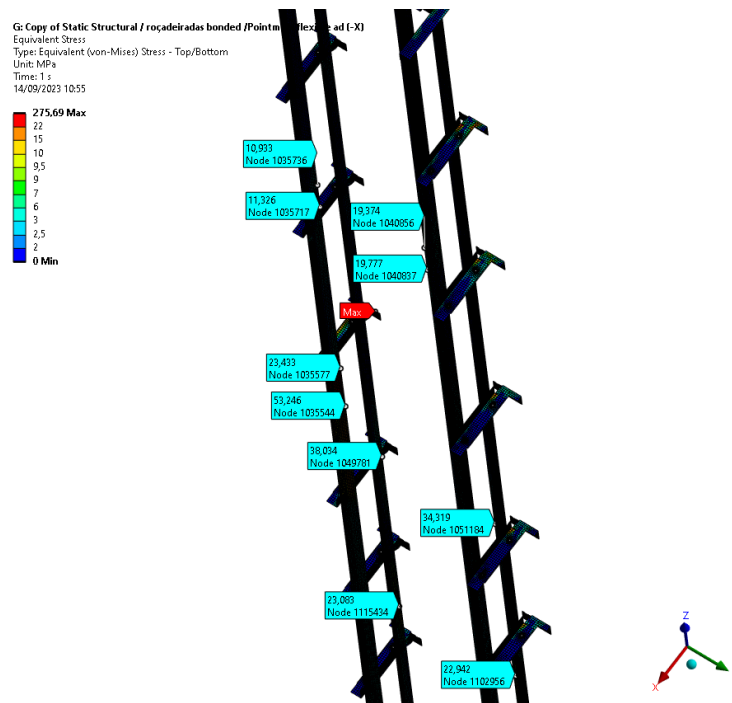


Figura 66 - Distribuição de tensões – $a_d(x)$ - Bonded

O contrapeso não apresenta pontos de preocupação, sendo que o valor máximo obtido é aproximadamente [89,4 MPa], situado numa aresta de um perfil do contrapeso que serve para pousar nas molas. Esta tensão observada não carece de grande atenção, pois acredita-se tratar de um ponto de concentração de tensões que só existe devido à alteração da geometria para execução da malha.

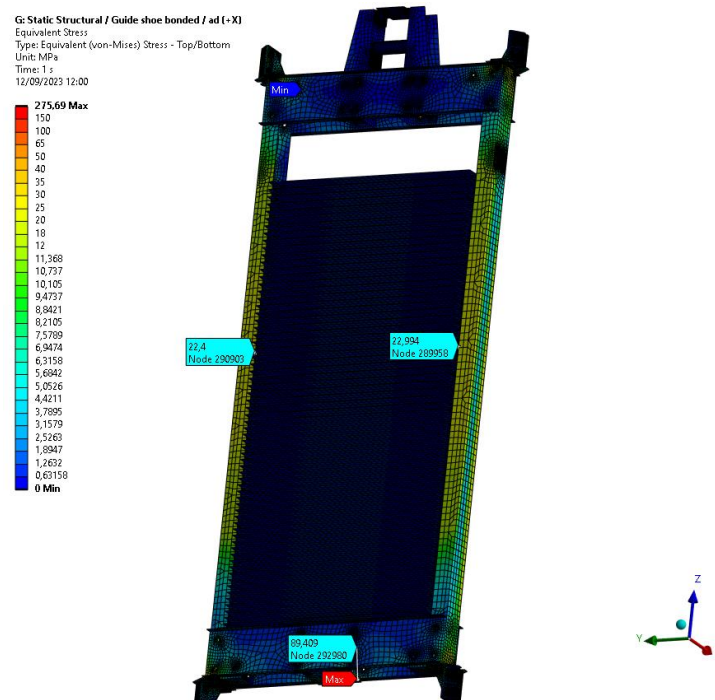


Figura 67 - Pontos de tensão no contrapeso – $a_d(x)$

5.2.2.2. Análise com solicitação em (y)

De igual modo, nos apresentam-se os resultados obtidos para a análise quando imposta uma aceleração horizontal na direção (y):

- **Deformação**

Na Figura 68 apresenta-se uma vista onde é possível analisar de uma forma geral as deformações distribuídas pelo equipamento.

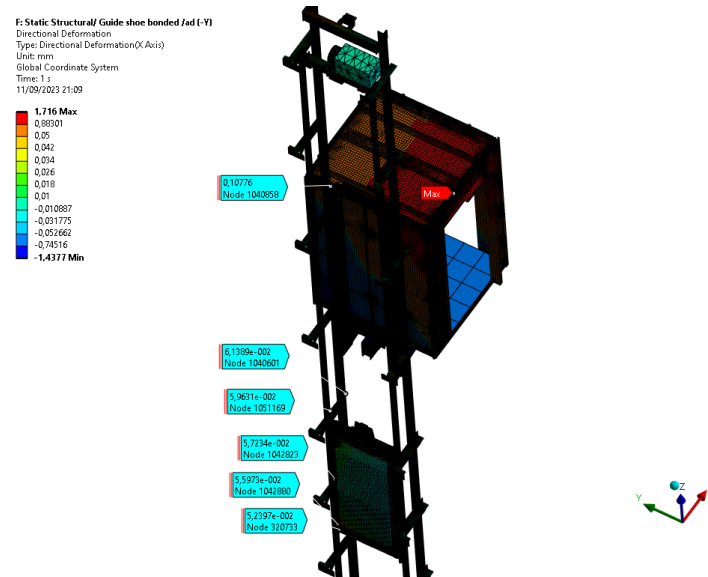


Figura 68 - Distribuição de deformações – a_d (y)

Com aceleração em (y), a deformação máxima direcional do modelo analisado está situada na parte superior da cabina, cujo valor aproximado é de [1,72 mm], conforme imagem Figura 69.

O local desta deformação é justificável devido ao facto de estar a ser aplicado um ponto de massa de [119 kg], correspondente ao peso da porta de cabina. Este valor tem de ser alvo de análise cuidada e reavaliação, pois o tipo de ligação “bonded” utilizado entre as roçadeiras e as guias, poderá ter influência relevante.

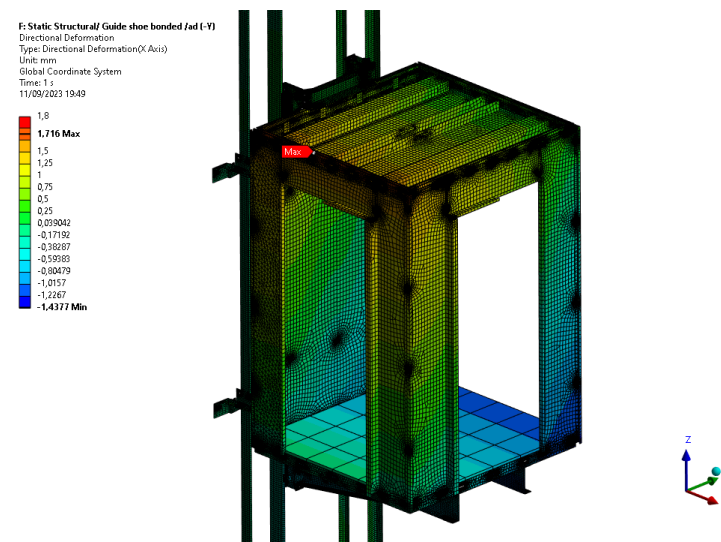


Figura 69 - Ponto de deformação direcional máxima na cabina – a_d (y)

Analisando unicamente as guias, verifica-se que o valor máximo atingido é de [0,11 mm], situado na zona acima da roçadeira superior da cabina. Esta posição pode ser justificada devido à existência da aplicação de três pontos de carga, situados no teto da cabina, pois embora exista uma carga pontual no pavimento da cabina, o facto de existirem as três massas suportadas no topo da cabina, provoca o efeito de alavanca, adicionado um momento ao modelo.

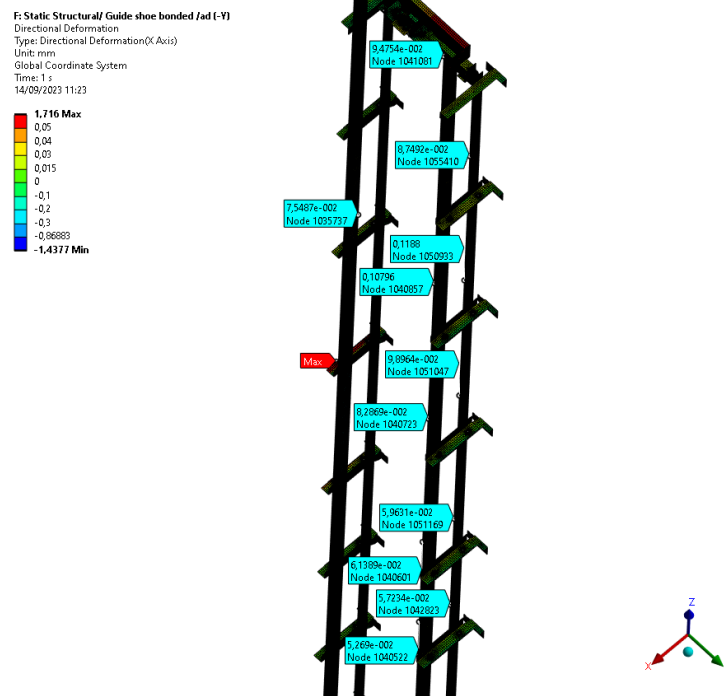


Figura 70 – Ponto de deformação direccional máxima nas guias – $a_d (y)$

Na Figura 71 verifica-se que a deformação máxima total do equipamento está localizada na parte superior da cabina, atingindo o valor aproximado de [4,53 mm] e na aba da guia um valor aproximado [1,61 mm].

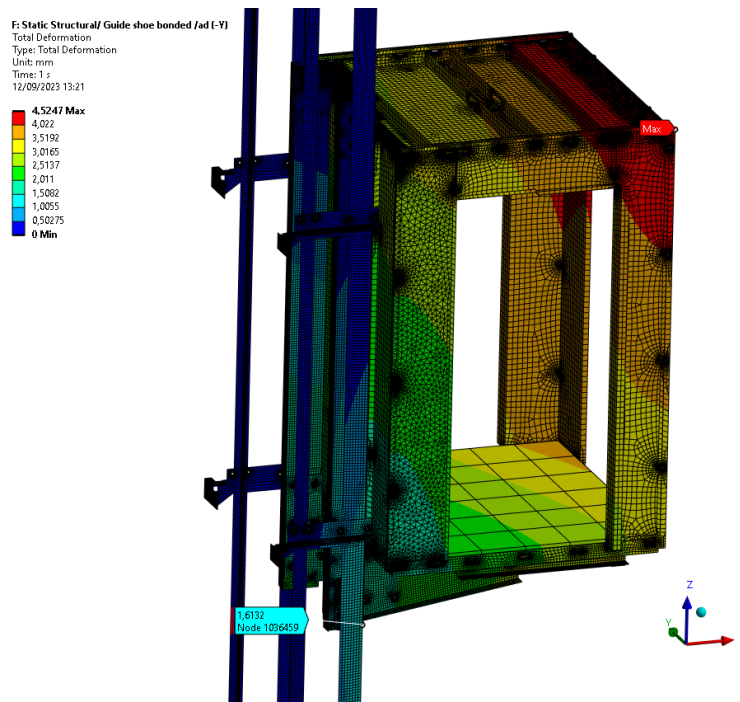


Figura 71 - Ponte de deformação total máxima – $a_d (y)$

Na Figura 72 é possível verificar em pormenor o ponto de deformação máximo registado na aba da guia.

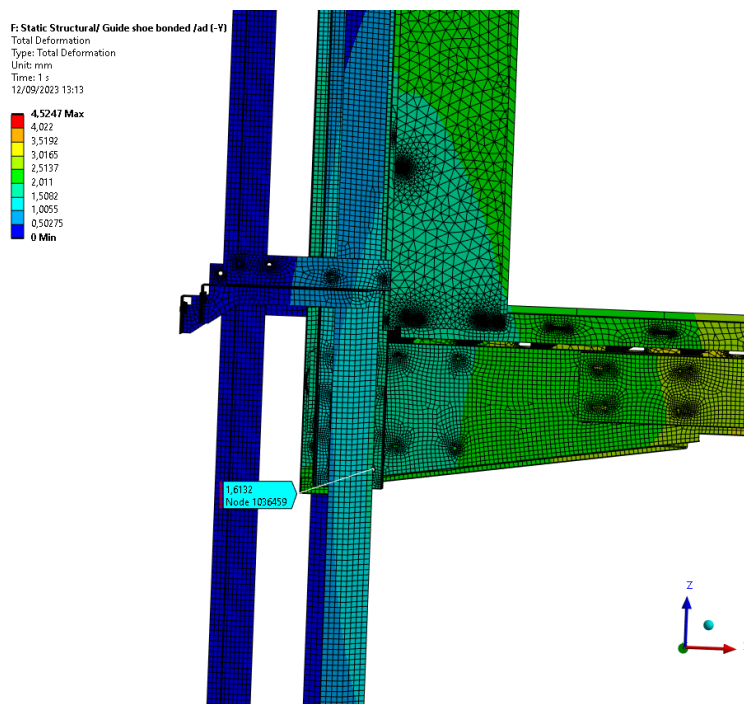


Figura 72 - Pormenor com valor de deformação na guia – $a_d (y)$

A deformação direcional máxima ocorrida na área de interferência do contrapeso, verifica-se na zona imediatamente acima da roçadeira superior, sendo que a deformação ocorre também na guia de cabina. Esta situação é devido à fixação conjunta de ambas as guias (contrapeso e cabina).

O valor máximo atingido é na guia de cabina, no entanto o valor de deformação nas guias de cabina e contrapeso é similar nos quatro pontos de contacto com a guia, cerca de [0,06 mm]. Embora seja um valor bastante reduzido, é de referenciar que se trata de deformação em que a ligação das roçadeiras às guias é do tipo “bonded”.

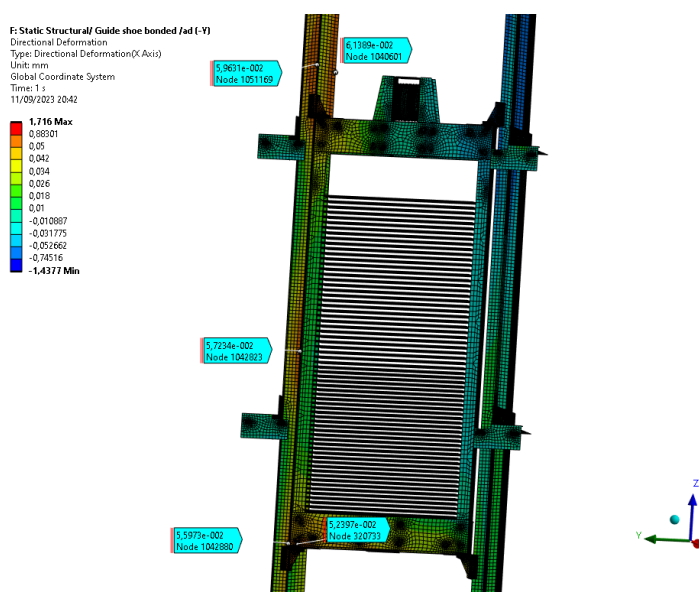


Figura 73 - Deformações instaladas no contrapeso – $a_d (y)$

- **Tensão equivalente (von-Mises)**

Relativamente à tensão máxima atingida, verifica-se que também está situada na bucha de fixação à parede, atingindo um valor muito superior à tensão de rotura do material. Esta situação requer atenção e merece melhor análise, pois como estamos a utilizar uma ligação das guias com as roçadeiras, do tipo “bonded”, poderá estar a provocar um esforço corte puro o que na realidade não existe. No caso de deslocamento da cabina, na direção positiva de (y), os componentes deslizam sem atrito, sendo que a força será exercida apenas na guia que impede o deslocamento da cabina.

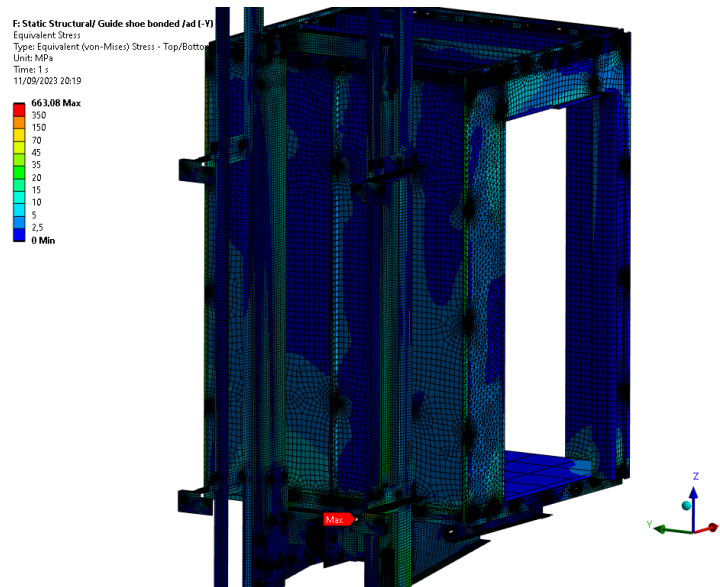


Figura 74 - Ponto de máxima tensão - Bucha na fixação à parede – $a_d (y)$

Na Figura 75 verifica-se o ponto onde a tensão máxima é atingida. O ponto mais sensível situa-se num ponto de concentração de tensões atingindo [320 MPa], provocado com a alteração da geometria para simplificar a malha. Este ponto merece atenção para que a geometria original não seja alterada e mantenha um raio de concordância para reduzir a concentração de tensões.

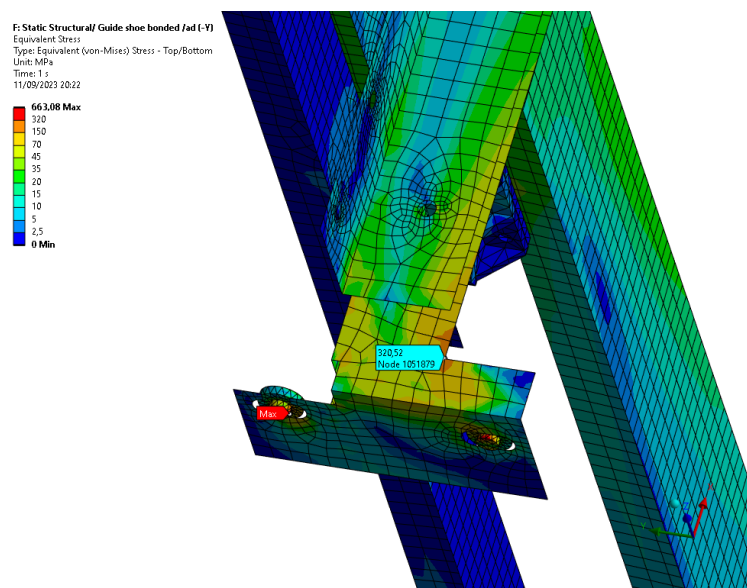


Figura 75 - Pormenor de tensão máxima na fixação das guias à parede – $a_d (y)$

A tensão máxima atingida nas guias de contrapeso, verifica-se na inferior do contrapeso. A diferença de valor entre a tensão máxima registada na roçadeira esquerda e na roçadeira direita, deve-se ao facto de, com o tipo de ligação “bonded”, uma guia está a trabalhar à compressão e a outra está a trabalhar á tração, apresentando assim cerca de [26,2 MPa] e [20,8 MPa] respetivamente. Na parte superior do contrapeso é regista uma menor tensão, justificável pelo centro de massa do contrapeso estar mais deslocado para a parte inferior.

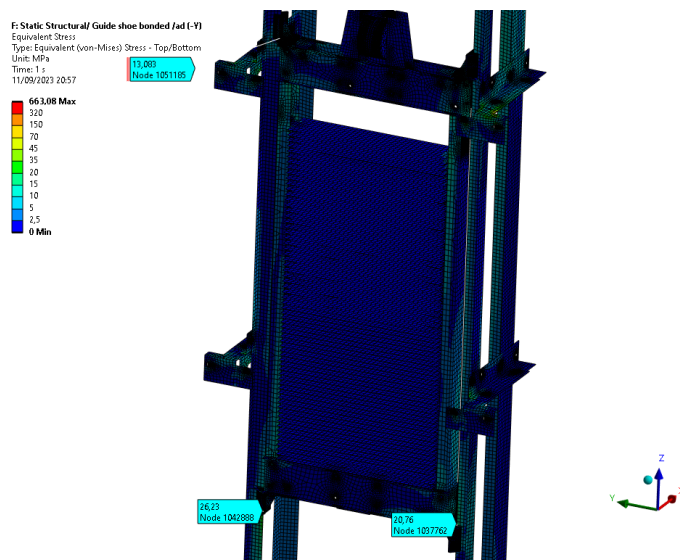


Figura 76 - Pontos de tensão na zona do contrapeso – a_d (y)

Na Figura 77 é possível avaliar a distribuição de tensões no equipamento, sendo o valor máximo atingido na parte superior da cabina com aproximadamente [60 MPa]. De um modo geral as tensões instaladas nas guias não são preocupantes, apenas deve ser alvo de especial atenção o desenho da fixação.

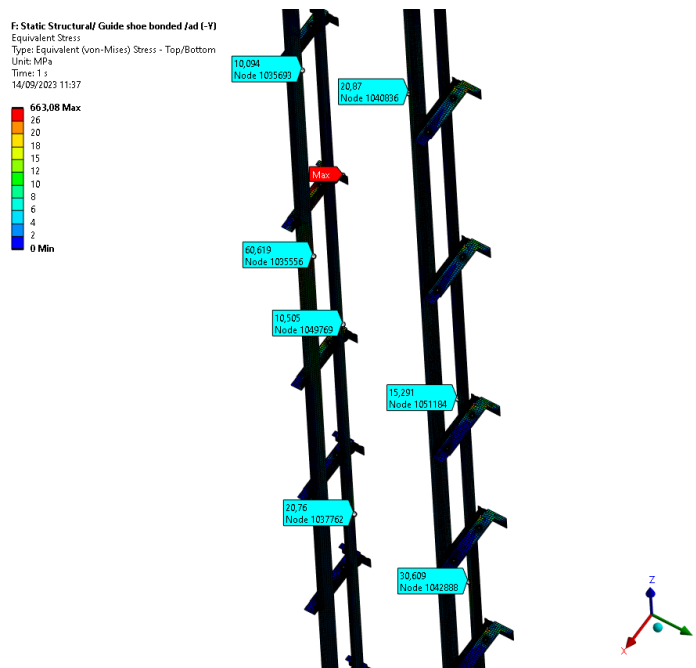


Figura 77 - Distribuição de tensão no equipamento – a_d (y)

5.2.3. Análise 3 | Modelo simplificado_1

Face à dificuldade encontrada, elaborou-se uma réplica do modelo simplificado representando apenas as peças com problemas de ligação, nomeadamente a guia e a roçadeira. Com esta simplificação, é possível efetuar várias análises, simulando as condições pretendidas e obter resultados muito rapidamente.

Numa tentativa de resolução do problema são consideradas as seguintes condições:

1. A malha do elemento sólido é mais refinada do que a malha do elemento de casca, conforme Figura 78;
2. Consideram-se contactos do tipo “no separation”, sendo selecionada a aresta do plano do elemento de casca “shell”, classificadas como “contact” e a superfície do sólido é selecionada como alvo “target”, conforme representado na Figura 79;
3. Para estabilizar o modelo são selecionadas as superfícies paralelas de ambos objetos e atribuídos contactos do tipo “no separation”;
4. A aba da guia é imobilizada através da função “fixed support”;
5. É aplicada uma força à face do sólido, conforme Figura 80.

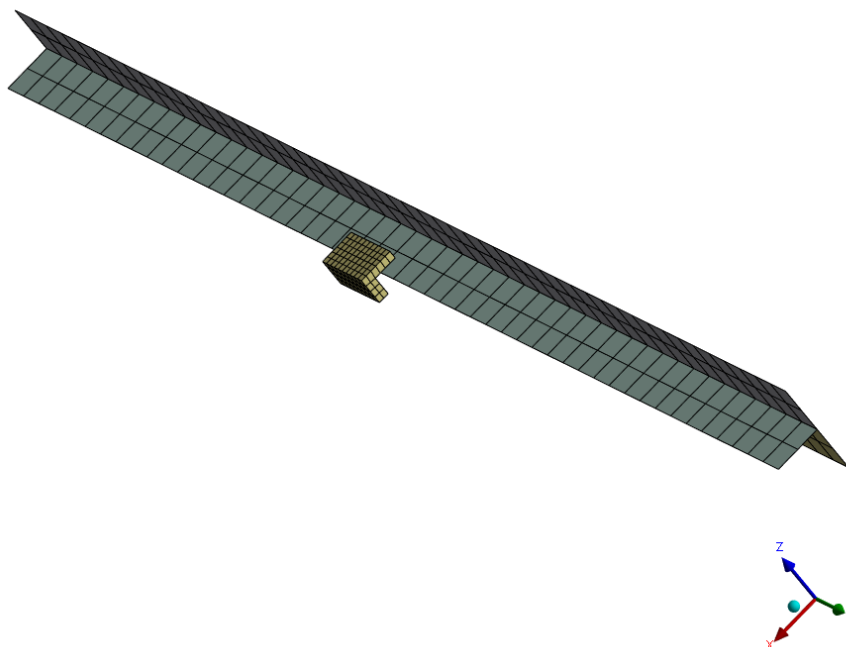


Figura 78 - Representação da malha - modelo simplificado

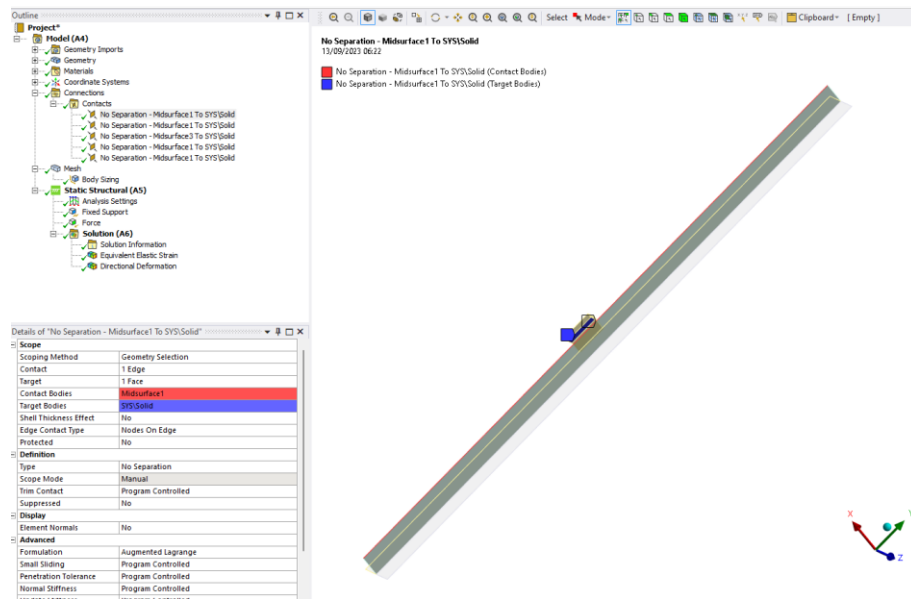


Figura 79 - Representação da malha - modelo simplificado

A: Static Structural
Force
Time: 1, s
13/09/2023 06:19

Force: 50, N
Components: -50,0,0, N

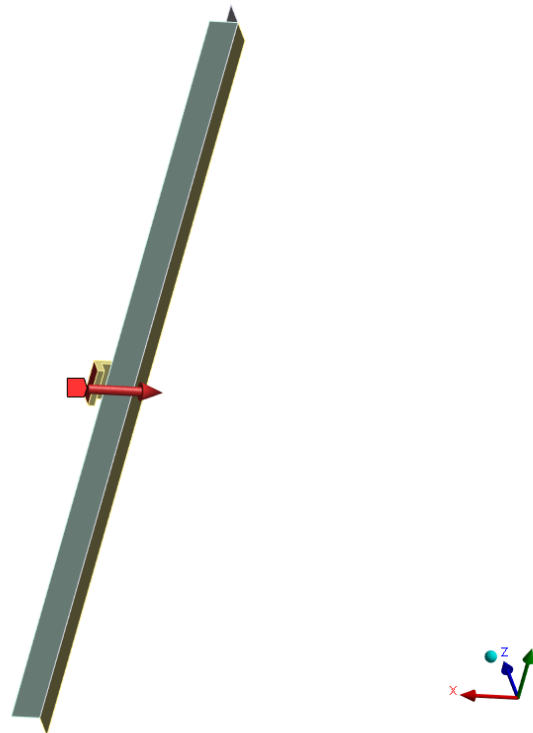


Figura 80 - Representação da força aplicada

Como resultado, verifica-se a dificuldade em fazer este tipo de restrições e evitar a colisão entre superfícies e consecutiva penetração ou trespassse.

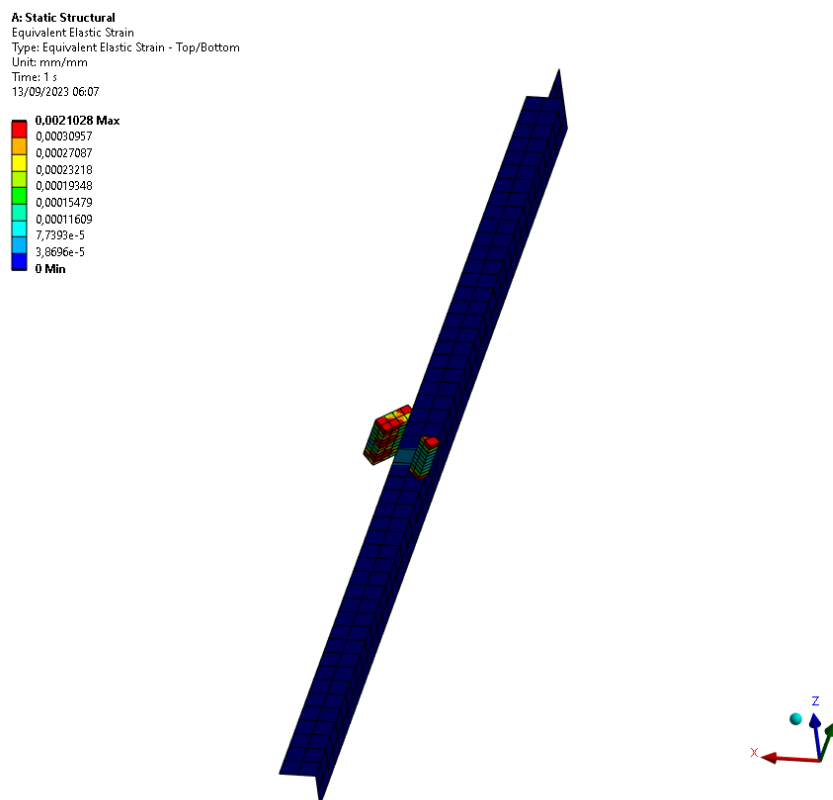


Figura 81 - Resultado após ensaio

Esta análise revela-se insuficiente para ultrapassar os problemas encontrados, sendo necessário proceder evoluir para o estudo de uma nova solução

5.2.4. Análise 4 | Modelo simplificado_2

Sabendo que o problema incide no contacto entre as roçadeiras da cabina e a respetiva guia, conforme identificado na análise 1 realizada no subcapítulo (5.2.1), procede-se à avaliação pormenorizada deste contacto, de modo a encontrar uma solução. Nesta simulação a estrutura é alterada conforme se pode verificar na Figura 82.

Desta vez o modelo é mais próximo da realidade e, embora não seja um modelo à escala, permite efetuar o estudo, cujo objetivo é resolver o problema de contacto.

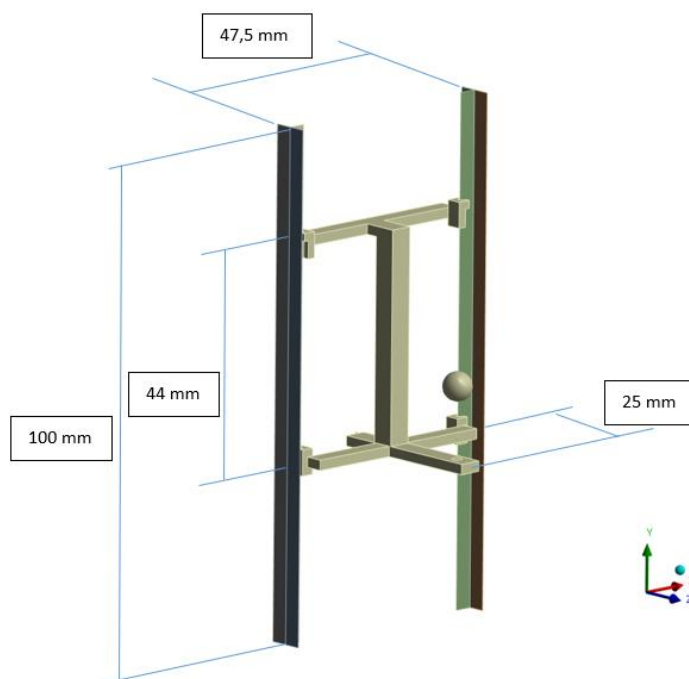


Figura 82 - Estrutura simplificada_2

Paralelamente, é também efetuada a mudança ao tipo de contactos usados sendo novamente classificados como “*frictionless*”, mas modificada a parametrização das superfícies de contacto, sendo utilizada a parametrização adicional para configuração do contacto, nomeadamente:

- Contacto entre aresta do plano intermédio da guia “*shell*” e a face da roçadeira, conforme Figura 84:
 - *Shell Thickness Effect: Yes;*
 - *Edge Contact Type: Line Segments;*
 - *Formulation: Normal Lagrange;*
 - *Stabilization Damping Factor: 0,1;*
 - *Pinball Region: Radius 10 mm.*

Devido a conflitos com a configuração de alguns “nós” da malha comuns a várias ligações, nesta simulação as guias são sempre classificadas como “target” e as roçadeiras sempre o “contact”. É também criado um plano na superfície da roçadeira para evitar utilização dos “nós” coincidentes com as outras faces, conforme se pode verificar na Figura 83.

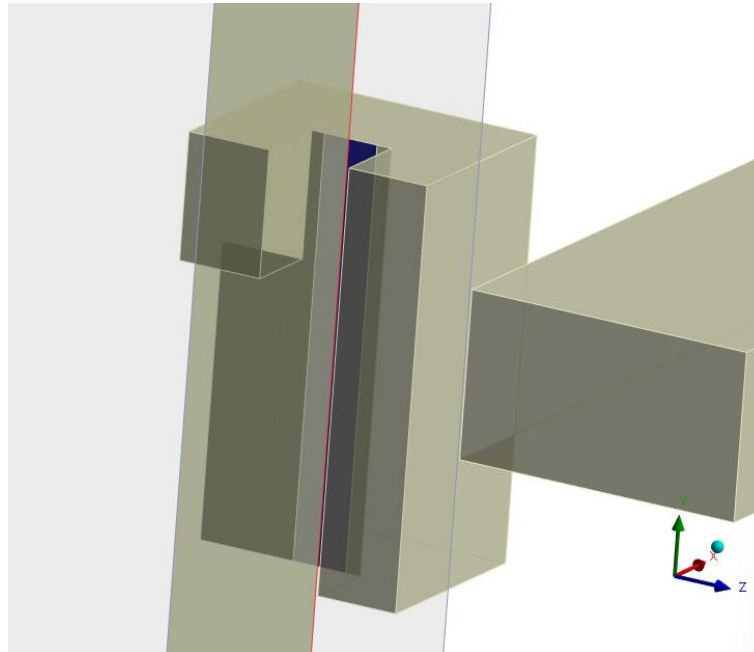


Figura 83 - Contacto entre aresta da guia e superfície da roçadeira

De modo a evitar a penetração de elementos nas faces da roçadeira que estão em contacto com a guia, na opção de controlo designada por “Time step controls” é ativada a opção “Predict for impact”, conforme Figura 84.

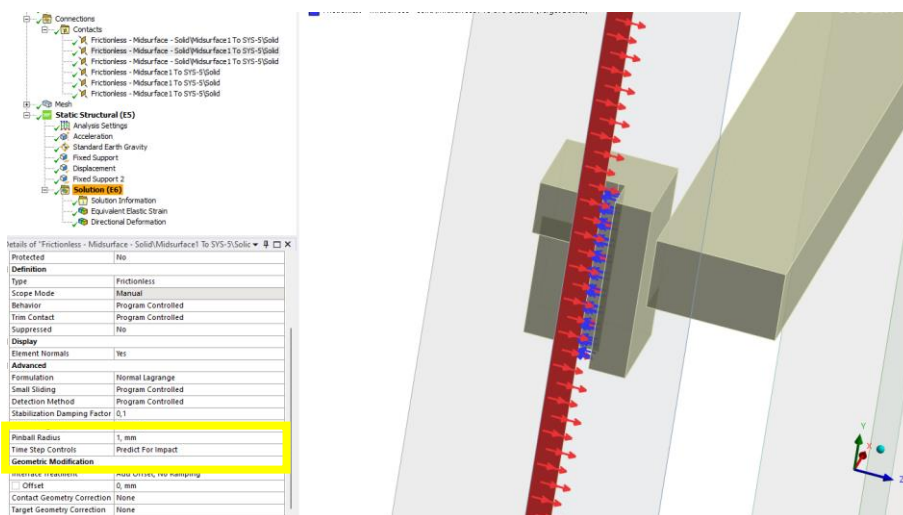


Figura 84 - Parametrização do contacto frictionless Face – Face

O resultado da parametrização deste tipo de contacto segue a seguinte configuração:

- Contacto entre face da guia e a face da roçadeira:
 - *Shell Thickness Effect: Yes;*
 - *Edge Contact Type: Line Segments;*
 - *Formulation: Normal Lagrange;*
 - *Stabilization Damping Factor: 0,1;*
 - *Time step controls: Predict for impact;*
 - *Pinball Region: Radius 1 mm.*

De modo a simular a carga útil da cabina é aplicada um ponto de massa na estrutura, conforme se pode observar na Figura 85. O ponto de massa aplicada tem uma massa de 130 kg e é aplicado desviado do eixo das guias, de modo a provocar deslocamento do centro de massa do conjunto.

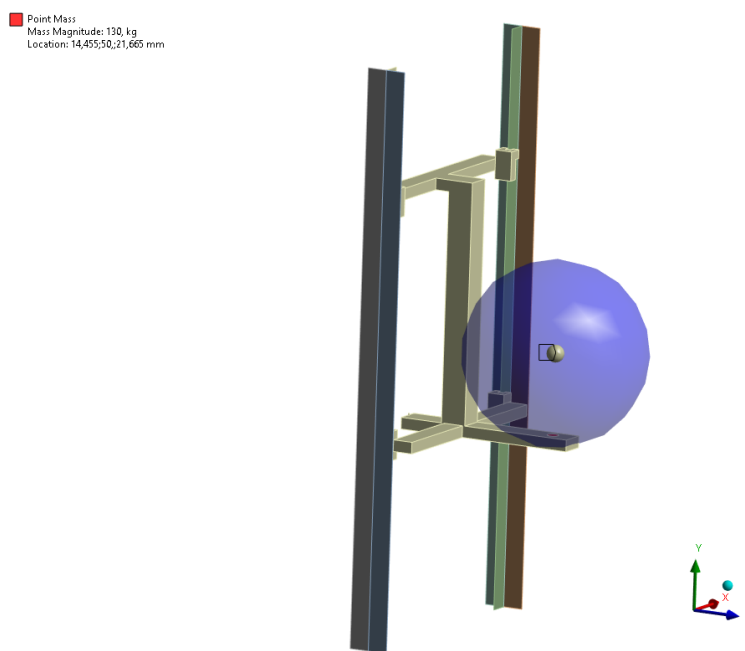


Figura 85 – Ponto de massa

As guias foram fixas nas extremidades com um “fixed support” e acrescentado um deslocamento para simular o alongamento dos cabos de suspensão, sendo limitado a [5 mm] no eixo (y). Sabe-se que este deslocamento é exagerado em relação à escala do que se passa na realidade, mas desta forma em caso de erro de contacto entre as superfícies, o mesmo é amplificado

5.2.4.1. Análise com solicitação em (x)

Para realização da simulação é acrescentada a aceleração da gravidade e a aceleração horizontal na direção (x). Durante o primeiro passo “step” [de 0 a 0,2 s], apenas atua a aceleração da gravidade e no segundo “step” [de 0,2 a 2 s], é também imposta a aceleração horizontal, havendo a combinação de condições, conforme representado na Figura 86e Figura 87.

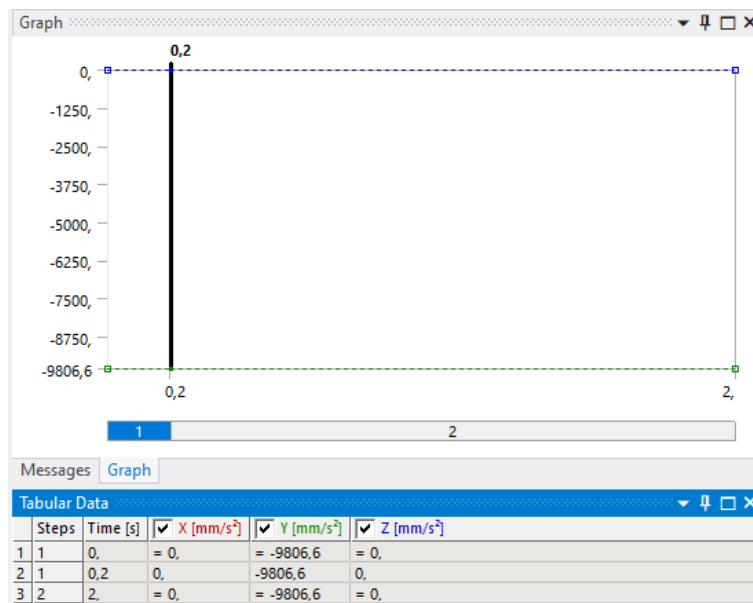


Figura 86 – Aceleração da gravidade – Condição de funcionamento relativo ao tempo

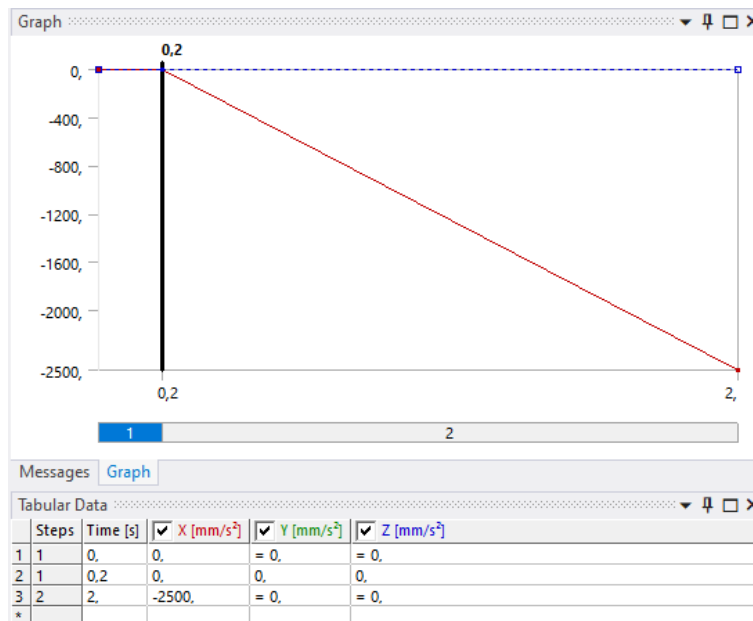


Figura 87 - Aceleração horizontal $a_d=(x)$ – Condição de funcionamento relativo ao tempo

Conforme se pode verificar na Figura 88, estão representadas as condições impostas para a realização do ensaio.

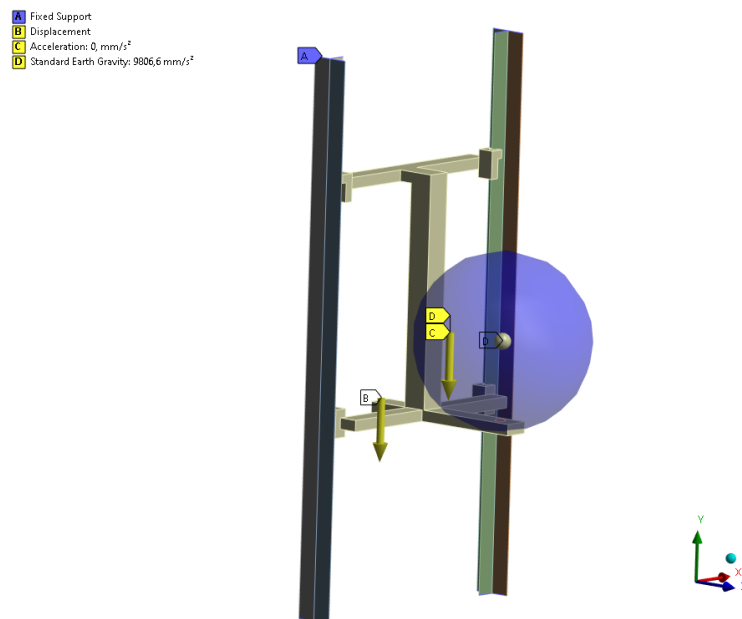


Figura 88 - Representação das condições de ensaio

Após efetuada análise verifica-se que as configurações dos contactos escolhidas parecem representar o movimento esperado conforme Figura 89. A estrutura desloca-se na direção pretendida e apresenta a deformação esperada.

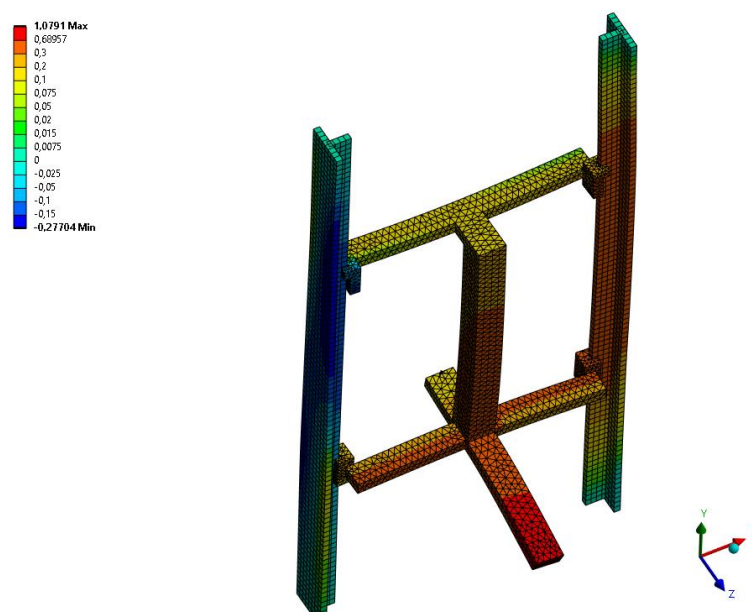


Figura 89 - Resultado da simulação frictionless com $a_d=(x)$

Na Figura 90 é possível avaliar o comportamento da estrutura no decorrer da análise. A evolução da deformação é contínua, significando que durante o ensaio o contacto entre peças é regular e controlado.

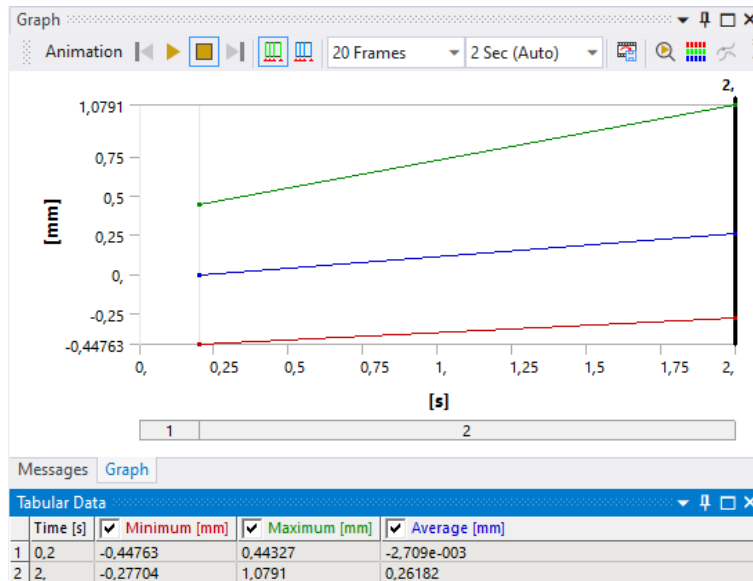


Figura 90 - Evolução da deformação relativo ao tempo com $a_d=(x)$

5.2.4.2. Análise com solicitação em (z)

Para validação da solução encontrada, o processo é repetido, mas desta vez com a aceleração horizontal na direção (z) conforme Figura 91.

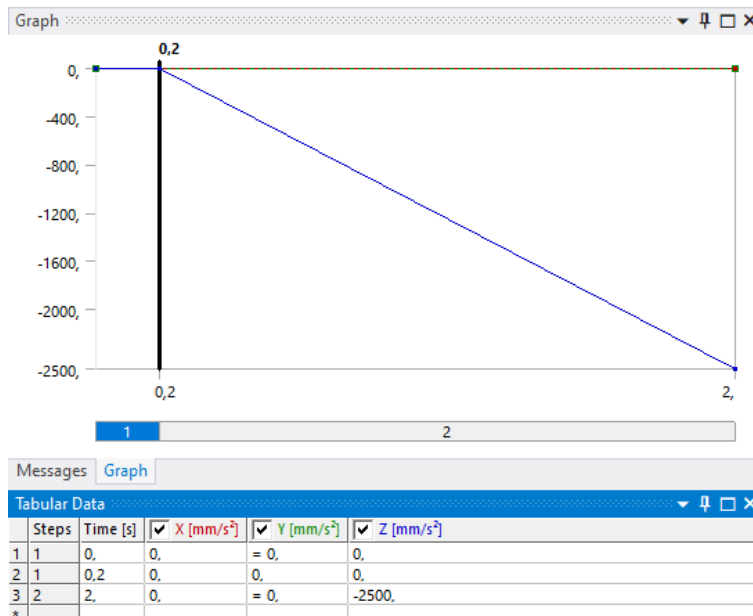


Figura 91 - Aceleração horizontal $a_d=(z)$ – Condição de funcionamento relativo ao tempo

Mais uma vez, analisando a Figura 92 verifica-se que a estrutura apresenta um comportamento estável e a deformação esperada, sendo mantido o contacto entre os vários elementos.

Conforme se pode avaliar na Figura 93 a evolução da deformação é contínua, significando que durante o ensaio o contacto entre peças é regular e controlado.

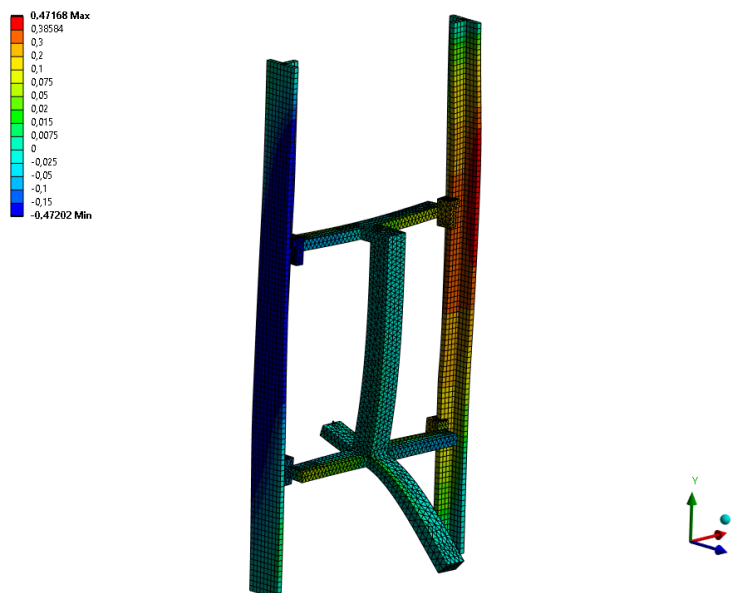


Figura 92 - Resultado da simulação frictionless com $a_d=(z)$

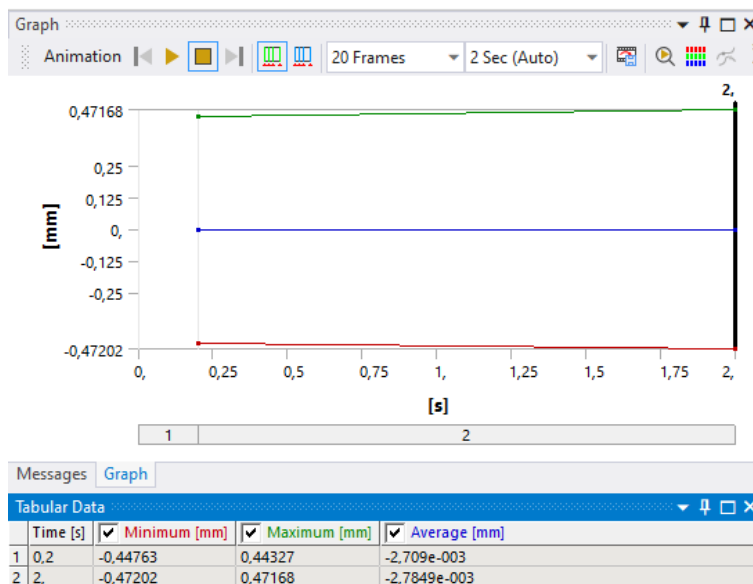


Figura 93 - Evolução da deformação relativo ao tempo com $a_d=(z)$

O resultado obtido com esta análise é bastante satisfatório, sendo que permite validar a solução encontrada de modo a replicar o processo para o modelo global.

5.2.5. Análise 5 | Modelo global “Frictionless_2”

Perante o sucesso do resultado obtido na simulação 4, procede-se à alteração e parametrização dos contactos no modelo global. No entanto, infelizmente a simulação aborta o cálculo e emite uma mensagem de erro com a necessidade de maior capacidade de memória do computador.

Sabendo que o algoritmo “Normal Lagrange” usado na análise 4 apresenta um resultado mais preciso, sendo usado em simulações cuja tolerância de penetração entre superfícies é exigente, numa tentativa de resolução do problema de memória insuficiente, é efetuada uma alteração para “Program Controled”. Por predefinição, o “Program controled” usa o algoritmo “Augmented Lagrange” que é menos exigente, apresenta menor recorrência de erros de convergência e supostamente mais rápido na apresentação de resultados.

Com esta alteração, o software consegue resolver o problema e apresenta resultados aceitáveis. Sabendo que para o modelo de elevador em ensaio, a aceleração em (y) é a mais desfavorável e que reproduz maiores esforços nas guias, devido à escassez de tempo, apenas esta análise é efetuada.

5.2.5.1. Análise com solicitação em (y)

Neste subcapítulo, apresenta-se a análise de resultados obtidos quando imposta uma aceleração horizontal na direção (y):

- **Deformação**

Na Figura 94 verifica-se a influência da aceleração horizontal, sendo que o valor máximo absoluto da deformação direcional está situado nos cabos de suspensão, aproximadamente [97 mm]. Este valor deve ser ignorado, pois trata-se de uma deformação de cabos de aço que na realidade não existe. A justificação deste registo na análise deve-se à existência de diferentes comprimentos de cabo no desenho geométrico, que após aplicação da aceleração da gravidade, o alongamento dos cinco cabos é diferente e o resultado dessa diferença reflete-se na análise. É também registada uma deformação no teto da cabina aproximadamente [11 mm], justificada pelo facto de ser uma zona de fixação da porta de cabina.

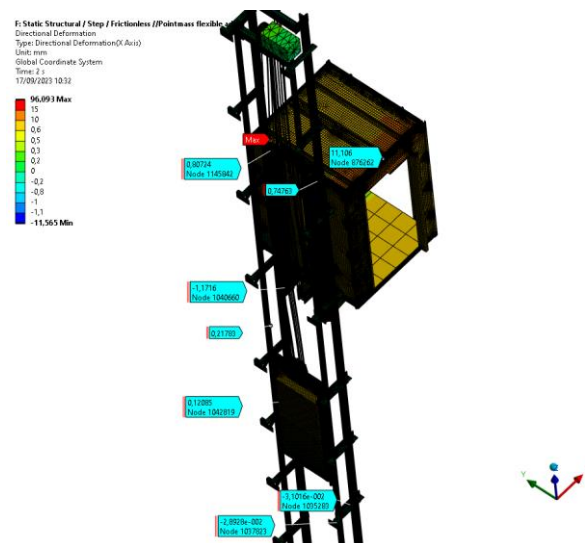


Figura 94 - Distribuição geral de deformações – ad (y) - Ligaçao Frictionless

Na Figura 95 apenas são apresentadas as deformações instaladas no conjunto de guias, sendo que o valor máximo absoluto da deformação direcional está situado abaixo da fixação que recebe os esforços da parte inferior da cabina, aproximadamente [1,17 mm]. Nas guias de contrapeso a deformação máxima registada é aproximadamente [0,21 mm].

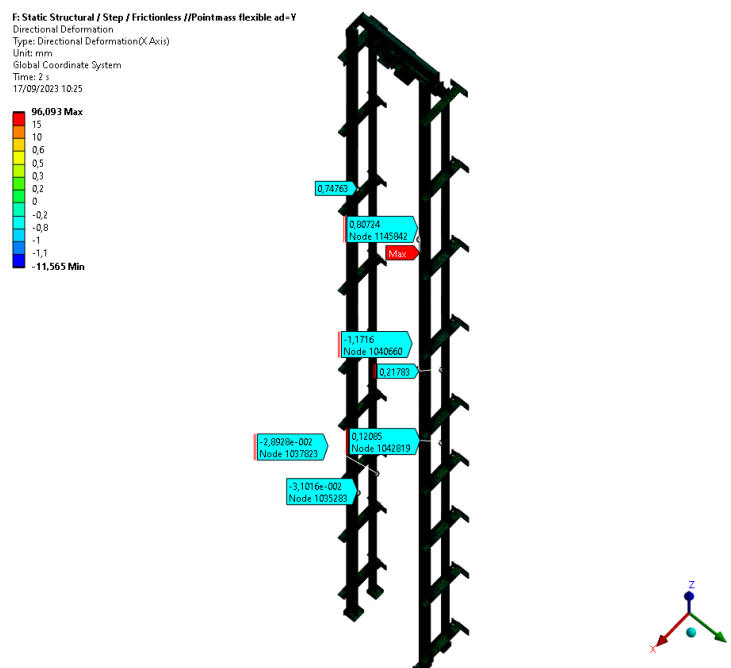


Figura 95 - Deformações no sistema de guias – $a_d(y)$ – Ligação Frictionless

Na Figura 96 é possível verificar em pormenor a zona onde é atingido o maior valor de deformação da guia de cabina.

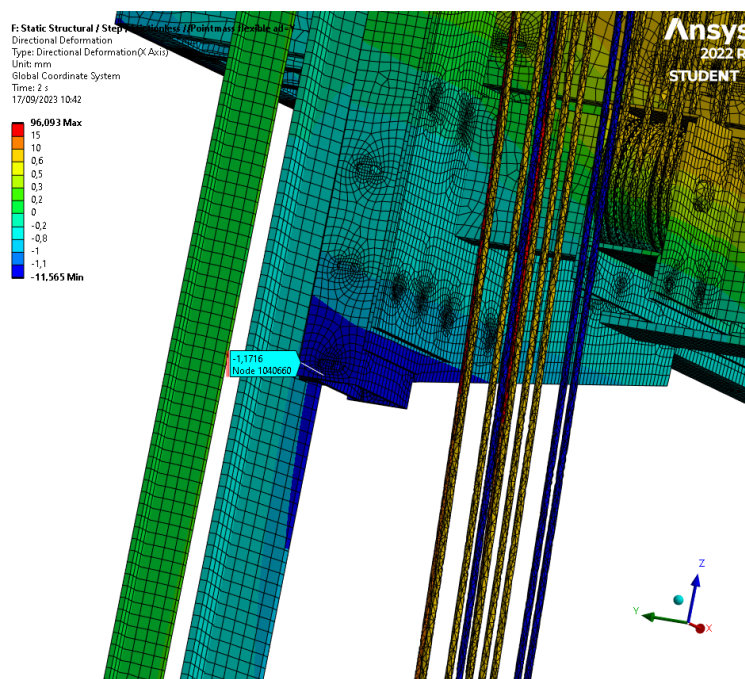


Figura 96 - Pormenor de deformação da guia de cabina – $a_d(y)$ - Frictionless

- **Tensão equivalente (von-Mises)**

O valor máximo atingido da tensão equivalente, verifica-se que está situada na ligação do cabo de aço e a roda de tração com valor [12,4 GPa], conforme se pode verificar na Figura 97. Este valor não deve ser considerado, pois devido a diferenças no comprimento da geometria dos cabos de aço e para facilitar o cálculo, foi utilizada uma ligação do tipo “bonded”, mas na realidade a ligação existente é do tipo “Friction”.

Consciente desta situação e como esta ligação não influencia o comportamento das guias, nesta análise o contacto entre superfícies é considerado “bonded”, sendo que para avaliações futuras esta ligação deve ser corrigida e objeto de melhor análise.

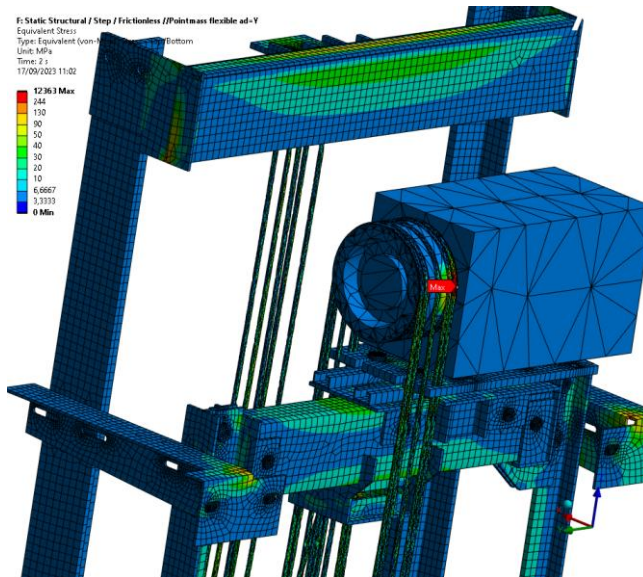


Figura 97 - Tensão equivalente máxima - Ligação entre cabo e roda de tração

O valor máximo da tensão equivalente no conjunto de guias é registado nas guias de cabina, com valor aproximado de [82 MPa] e nas guias de cabina aproximadamente de [37 MPa].

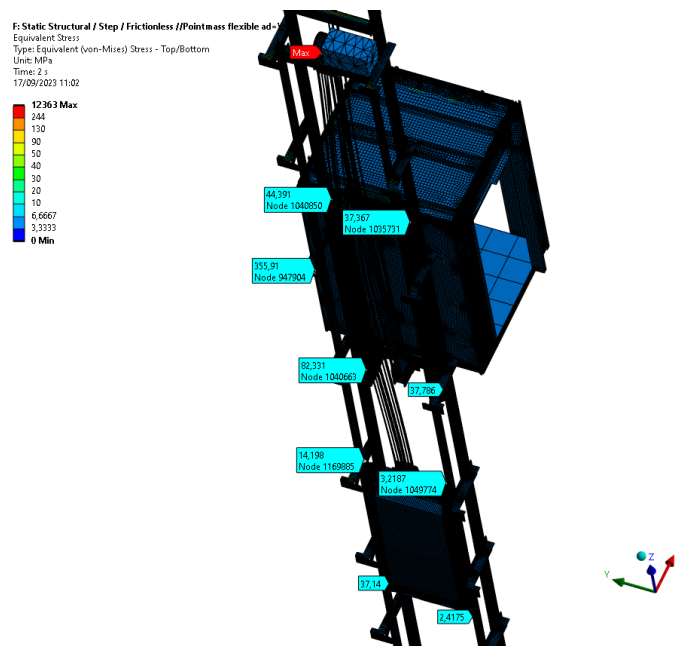


Figura 98 - Distribuição de tensões – ad(y) – Frictionless

Na Figura 99 apresenta-se em pormenor a fixação das guias e respetiva bucha. É registado o valor aproximado de [356 MPa] sendo necessário efetuar um estudo pormenorizado nesta ligação à parede. Quando comparado com o valor máximo de [663 MPa] registado no ensaio com o tipo de ligação “bonded” (Figura 75), verifica-se uma redução significativa. Esta comparação de valores ilustra a influência que o tipo de contacto usado pode ter nos resultados.

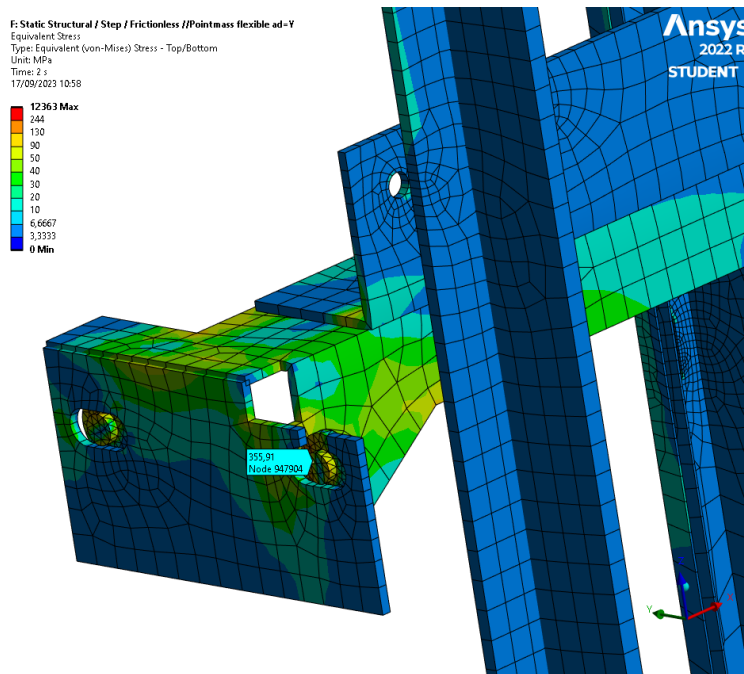


Figura 99 - Pormenor de tensão equivalente na bucha e fixação – ad (y)

Na Figura 100 apresentam-se os valores da tensão equivalente instalada nas guias de contrapeso. O pormenor da diferença de valores relativamente ao eixo vertical justifica-se devido ao sentido da aceleração horizontal imposta, pois apenas uma guia apresenta resistência ao deslocamento do contrapeso, comprovando assim a assertividade na escolha do tipo de contacto “frictionless”.

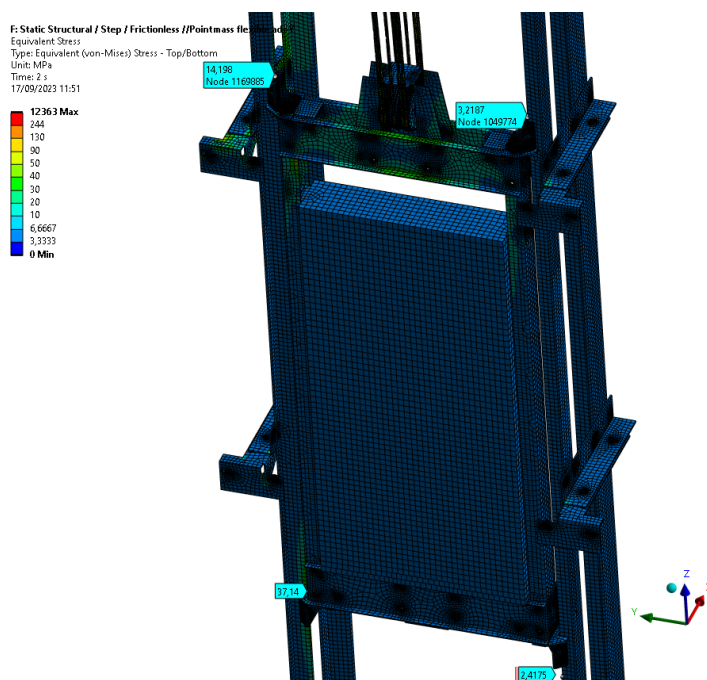


Figura 100 - Pormenor das tensões equivalentes nas guias contrapeso - Frictionless ad(y)

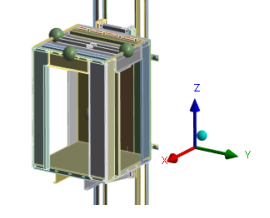
6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Este capítulo dedica-se à apresentação e avaliação do resumo de resultados obtidos, assim como comentários finais e recomendações para trabalhos futuros.

6.1. Resumo de resultados

Como os resultados obtidos em cada análise foram apresentados no decorrer da descrição dos mesmos, neste tema apresenta-se uma tabela com o resumo dos resultados:

Tabela 29 – Resumo de resultados

	<i>Cálculo analítico</i>	<i>Cálculo MEF "Bonded"</i>	<i>Cálculo MEF "Frictionless"</i>	σ_{adm}
Cabina				
Com $a_d(x)$	$\sigma_x \approx 103 \text{ MPa}$	$\sigma_{eq}^{VM} \approx 53 \text{ MPa}$	<i>Não realizado</i>	$\sigma_{adm} \approx 244 \text{ MPa}$
Com $a_d(y)$	$\sigma_y \approx 55 \text{ MPa}$	$\sigma_{eq}^{VM} \approx 38 \text{ MPa}$	$\sigma_{eq}^{VM} \approx 82 \text{ MPa}$	
Com $a_d(x)$	$\delta_{(x)} \approx 2,03 \text{ mm}$	$\delta_{(x)} \approx 1,05 \text{ mm}$	<i>Não realizado</i>	$\delta_{adm} \approx 13 \text{ mm}$
Com $a_d(y)$	$\delta_{(y)} \approx 1,03 \text{ mm}$	$\delta_{(y)} \approx 0,11 \text{ mm}$	$\delta_{(y)} \approx 1,17 \text{ mm}$	
Contrapeso				
Com $a_d(x)$	$\sigma_x \approx 44 \text{ MPa}$	$\sigma_{eq}^{VM} \approx 60 \text{ MPa}$	<i>Não realizado</i>	$\sigma_{adm} \approx 244 \text{ MPa}$
Com $a_d(y)$	$\sigma_y \approx 140 \text{ MPa}$	$\sigma_{eq}^{VM} \approx 31 \text{ MPa}$	$\sigma_{eq}^{VM} \approx 37 \text{ MPa}$	
Com $a_d(x)$	$\delta_{(x)} \approx 1,16 \text{ mm}$	$\delta_{(x)} \approx 0,37 \text{ mm}$	<i>Não realizado</i>	$\delta_{adm} \approx 18 \text{ mm}$
Com $a_d(y)$	$\delta_{(y)} \approx 4,24 \text{ mm}$	$\delta_{(y)} \approx 0,12 \text{ mm}$	$\delta_{(y)} \approx 0,21 \text{ mm}$	

Conforme se pode analisar na Tabela 29, quando comparados os resultados da análise MEF com contacto do tipo "bonded" e os resultados do tipo "frictionless", comprova-se que a escolha do tipo de contacto pode ter bastante influência na altura de validação de soluções.

De salientar que nos resultados obtidos através da simulação com contacto "bonded", como as superfícies estão ligadas, não está a refletir os efeitos da aceleração da gravidade. Desta forma, a comparação entre resultados apenas pode ser efetuada entre o cálculo analítico e o cálculo MEF "frictionless".

Como o cálculo analítico representa os esforços máximos aplicados nas guias, considerando o contacto pontual apenas na guia em análise, segundo as direções normais (x) e (y), para se efetuar a comparação é necessário calcular a tensão equivalente segundo o critério de *von-Mises*.

Considerando ($\sigma_z=0$), ($\sigma_x= \sigma_1$) e ($\sigma_y= \sigma_2$);

$$\sigma_{eq}^{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2} \Leftrightarrow \quad (57)$$

- **Guias de cabina:**

$$\begin{aligned} \sigma_{eq}^{VM} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(103,3 - 55)^2} \Leftrightarrow \\ \sigma_{eq}^{VM} &= 54,44 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- **Guias de contrapeso:**

$$\begin{aligned} \sigma_{eq}^{VM} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(140 - 44)^2} \Leftrightarrow \\ \sigma_{eq}^{VM} &= 67,88 \text{ MPa} \end{aligned}$$

A tensão equivalente apresenta algumas diferenças, aproximadamente [30 MPa]. Esta diferença pode ser justificada por várias razões, nomeadamente devido a que no cálculo analítico a força é calculada considerando o meio vão da maior distância entre fixações, cujo valor é de [1750 mm], sendo que na simulação do cálculo *MEF* a posição da roçadeira não se encontra a meio vão que representaria [875 mm], mas encontra-se aproximadamente entre [550 mm] e [650 mm] da fixação. Tais desvios podem ser devido a folgas existentes no modelo, ausência dos fatores de carga (k_2) e (X_{SE}), que são aplicados à aceleração horizontal e à aceleração da gravidade.

Relativamente às deformações, é verificado um grande desvio tendo como justificação provável a ausência de folgas entre guias e roçadeiras.

6.2. Cálculo analítico *versus* MEF

A elaboração do cálculo analítico é bastante importante, pois permite enquadrar o modelo na legislação em vigor e construir uma base de dados para comparação crítica dos resultados obtidos através do cálculo computacional *MEF*. Este modelo de cálculo pode ser automatizado mediante a compilação dos dados numa folha de cálculo, permitindo assim apresentar resultados rapidamente.

A abordagem computacional *MEF*, permite efetuar outro tipo de análise, mais visual e dinâmica. Uma das vantagens é permitir efetuar várias simulações alterando rapidamente a geometria ou a posição dos elementos em análise, permitindo assim encontrar soluções sem destruição de protótipos, reduzindo os custos do desenvolvimento.

No entanto, quanto maior a complexidade do modelo, maior a necessidade de disponibilidade de computador com maior capacidade de análise. Para além das particularidades anteriormente mencionadas, este tipo de análise apresenta um maior custo, não só devido à máquina de análise e respetivo *software*, mas também associado à necessidade de especialização técnica dos intervenientes.

A utilização de ambas abordagens é de grande importância porque os resultados obtidos complementam-se, enriquecendo a informação reunida de modo a melhorar a qualidade do projeto.

6.3. Conclusões finais

Neste trabalho são apresentadas duas abordagens para analisar o comportamento de um elevador, quando sujeito à atividade sísmica. A primeira abordagem corresponde ao cálculo analítico de acordo com a legislação em vigor (NP EN 81-77) e a segunda recorre ao método dos elementos finitos, tendo-se utilizado o *software Ansys*[®]. Com este trabalho pretende-se contribuir para o desenvolvimento de metodologias para aplicação do cálculo pelo método de elementos finitos que permitam obter resultados com valores semelhantes ao cálculo analítico.

Atualmente, para a atribuição da categoria sísmica a um elevador, apenas é exigida a avaliação através do cálculo analítico de acordo com a legislação em vigor. Este estudo tem particular interesse pois, à semelhança do que se passa noutros setores, com a evolução das metodologias de certificação de equipamentos, a validação através da análise do comportamento do equipamento via *software* de cálculo de elementos finitos poderá tornar-se numa opção válida para ensaio equivalente de homologação e classificação das respetivas categorias sísmicas.

Sabendo que o comportamento do elevador depende da resposta à ação sísmica do edifício onde está instalado, a atribuição da categoria sísmica ao elevador está diretamente ligada à importância em manter a operacionalidade do edifício após uma atividade sísmica. Como exemplo destacam-se os casos de um hospital ou de um edifício de comando da proteção civil, em que se considera ser mais importante manter a operacionalidade do que num edifício de habitação.

Como o critério da atribuição da categoria sísmica depende do resultado do cálculo analítico descrito na legislação em vigor, dedicou-se um capítulo para a demonstração do respetivo cálculo. Para tal, foram consideradas as características do equipamento em estudo para avaliar a sua resposta a uma aceleração horizontal ($a_d = 2,5 \text{ m/s}^2$), correspondente à categoria sísmica (1).

O modelo de elevador escolhido apresenta características particulares, nomeadamente o facto de ser um equipamento sem casa de máquina e o desenho da estrutura de suporte da cabina em forma de "L" pois, para além do facto da massa a deslocar se encontrar descentrada do centro das guias, disponibiliza três paredes da cabina para equipar com portas de acesso, permitindo assim e caso seja pretendido, dar outra dinâmica ao edifício. Devido às características mencionadas, trata-se do caso mais crítico quando à análise de comportamento deste tipo de elevador, relativamente à ação sísmica.

Na análise feita através do *software* de elementos finitos, devido à complexidade do modelo em estudo, optou-se por dividir o modelo em cinco subconjuntos, nomeadamente o conjunto de guias, a cabina, a arcada, o sistema de tração e o contrapeso. Cada subconjunto foi trabalhado separadamente, sendo que numa primeira fase foi definida a tipologia de contactos entre as diferentes superfícies e de seguida foi efetuada uma análise modal, não para obter as frequências naturais, mas para identificar eventuais problemas de ligação entre componentes.

Posteriormente os subconjuntos foram reunidos num único grupo de modo a criar um modelo global. Foi atribuída a tipologia de contactos de interação entre as superfícies para permitir efetuar uma análise estática. Para efetuar o cálculo foram impostas as condições de ensaio definidas na legislação em vigor, nomeadamente a aceleração vertical ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) e a aceleração horizontal ($a_d = 2,5 \text{ m/s}^2$).

Foram efetuadas várias abordagens comparativas e, devido à existência de problemas relacionados com a configuração de contactos entre um elemento de casca e um elemento sólido, foi necessário recorrer a modelos simplificados. Esta estratégia foi decidida para reduzir o tempo de cálculo e centrar o foco na resolução do problema identificado, de modo a obter rapidamente o resultado das análises efetuadas. A elaboração dos modelos simplificados permitiu definir o tipo de contacto adequado para o modelo em análise e replicar com sucesso para o modelo global.

Considera-se que está definido um exemplo do processo a adotar para efetuar a análise do comportamento de um sistema de elevação, quando sujeito à ação sísmica.

De salientar que na análise estática efetuada ao modelo global, os fatores de compensação (k_2) e (X_{SE}), usados nas equações (40) e (41) do cálculo analítico, majoradas à aceleração da gravidade e à aceleração horizontal do projeto, não foram considerados.

Como foi efetuada apenas a análise estática, existem alguns esforços que não foram avaliados, como por exemplo os efeitos da encurvadura. Para tal, seria necessário efetuar diferentes simulações específicas ao modelo completo, como por exemplo uma análise em que se considerasse o efeito da encurvadura. No entanto, devido à escassez de tempo não foi possível implementar.

Este estudo revelou-se bastante interessante, enriquecedor e gratificante pois, apesar das dificuldades encontradas, os problemas foram ultrapassados de modo a ser possível documentar um exemplo do procedimento com os passos a seguir para a implementação do processo de análise, permitindo assim replicar nova análise ou continuidade do trabalho.

Devido às consequências da atividade sísmica, os artigos analisados revelam o interesse mundial em estudar este tipo de matéria, pelo que apresentam várias abordagens e foco em pontos específicos de interesse para o estudo pormenorizado, com o objetivo de melhorar o comportamento do produto.

Um tema sobre o estudo do comportamento de qualquer estrutura, quando sujeita à ação sísmica é bastante complexo e de grande interesse, pois o resultado das análises pode contribuir para melhorias estruturais do projeto e prevenir eventuais situações de colapso.

Com a complexidade do modelo em análise e os recursos disponíveis, conclui-se que os resultados obtidos são satisfatórios, mas meramente indicativos, pois trata-se de uma metodologia de análise ainda em desenvolvimento.

6.4. Limitações e propostas para trabalhos futuros

A estratégia adotada relativamente à escolha do tipo elemento para modelar as guias, revelou dificuldades acrescidas, pois ao modelar as guias com elementos de casca, evidenciou a necessidade de um melhor conhecimento do *software* para parametrizar o contacto entre roçadeiras e as guias. No entanto, tratando-se de um trabalho exploratório, considero que os objetivos foram atingidos.

De modo a materializar a complexidade e dimensão do modelo, para esta análise foram utilizados 1 305 801 nós e 585 763 elementos. Este tipo de problema ultrapassa em muito, o limite de uma licença de estudante, cujo limite é cerca de 124.000 (nós e elementos), não sendo possível efetuar qualquer simulação. A licença de estudante é suficiente para o processamento da geometria, preparação dos contactos do modelo e elaboração da malha, no entanto para o processamento avançado e análise foi necessário recorrer ao computador do ISEP com licença académica instalada. Este processo envolveu autorizações para acesso remoto e por vezes alguns problemas técnicos em comunicar com o computador remoto.

Perante diversos problemas relacionados com contactos durante as análises do modelo global, através de um modelo de complexidade inferior foi possível definir a metodologia e configuração dos contactos, obtendo um resultado da análise, possibilitando assim implementar a metodologia ao modelo mais complexo.

Verificou-se que a capacidade da máquina é reduzida e para a análise de um problema complexo como é o caso, a demora na apresentação de resultados é bastante longa, pois cada análise estática realizada ao modelo global demorou entre 10 e 14 horas, sendo que em alguns casos abortava a análise com erro de memória insuficiente. Em conjunto com a limitação do computador e as dificuldades acima mencionadas, considera-se que o objetivo final da análise foi atingido.

Este estudo não está terminado, pretendendo-se continuar com a metodologia de simulação computacional com análise pelo método dos elementos finito. Acredita-se que com um conhecimento mais consolidado e domínio do *software* é possível identificar pontos críticos e apresentar possíveis melhorias de projeto, de modo a aumentar a previsibilidade da resposta deste tipo de equipamento, principalmente quando sujeito à atividade sísmica e, desta forma, melhorar a segurança deste tipo de equipamentos.

Como recomendações para a realização de trabalhos futuros, apresentam-se algumas sugestões:

- Modelação das guias com elementos sólidos;
- Implementação dos fatores de compensação para a aceleração da gravidade e da aceleração;
- Modelação dos cabos de suspensão com elementos de viga;
- Considerar o contacto entre cabos de suspensão e roda de tração como “*friction*”;
- Abordar a análise do modelo via plano simétrico para a aceleração na direção horizontal transversal, mas dada a assimetria do modelo, avaliar a parte mais crítica e comparar com o modelo completo;
- Analisar o comportamento do elevador em várias posições (piso inferior, piso superior, posicionamento efetivo a meio vão da guia).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CEN, “NP EN 1998-1: Eurocódigo 8 – Projecto de Estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios,” *Inst. Port. da Qual.*, p. 210, 2010.
- [2] “Web of Science.” <https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search> (accessed Nov. 03, 2022).
- [3] “B-ON.” <https://www.b-on.pt/> (accessed Nov. 03, 2022).
- [4] “Google Académico.” <https://scholar.google.com.br/schhp?hl=pt-PT> (accessed Nov. 01, 2022).
- [5] E. Version, “Safety rules for the construction and installations of lifts-Particular applications for passenger and goods passenger lifts-Part 77: Lifts subject to seismic conditions,” 2018.
- [6] G. Mercalli, “Giuseppe Mercalli”, [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Mercalli (accessed Nov. 03, 2022).
- [7] B. Gutenberg and C. F. Richter, “Magnitude and Energy of Earthquakes,” *Science (80-.)*, vol. 83, no. 2147, pp. 183–185, Feb. 1936, doi: 10.1126/science.83.2147.183.
- [8] T. C. Hanks and H. Kanamori, “A moment magnitude scale,” in *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 1979, vol. 84, no. B5. doi: 10.1029/JB084iB05p02348.
- [9] “Schmitt und Sohn.” <https://www.schmitt-aufzuege.de/> (accessed Nov. 08, 2022).
- [10] “Seismic wave”, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Seismic_wave
- [11] J. W. Strutt, “Lord Rayleigh,” in *IEEE Ultrasonics Symposium, 2005.*, 2005, vol. 1, pp. 261–264.
- [12] E. A. Milne, “Augustus Edward Hough Love, 1863-1940.” The Royal Society London, 1941.
- [13] “Seismic Knowledge”, [Online]. Available: <https://sites.ipleiria.pt/seismicknowledge/tag/escala-de-magnitudes/> (accessed Nov. 15, 2022).
- [14] R. Ludwin, G. Thomas, B. Steele, P. Arduino, D. Booth, and K. Troost, “THE NISQUALLY EARTHQUAKE OF PRELIMINARY RECONNAISSANCE REPORT Nisqually Earthquake Clearinghouse Group University of Washington,” *Group*, no. FEBRUARY, 2001.
- [15] “Nisqually earthquaku 2001”, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/2001_Nisqually_earthquake (accessed Nov. 16, 2022).
- [16] “Tohoku Earthquake”, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/2011_Tohoku_earthquake_and_tsunami (accessed Nov. 16, 2022).
- [17] “Terramoto de Lisboa”, [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sismo_de_Lisboa_de_1755 (accessed Nov. 17, 2022).
- [18] “Schmitt-Elevadores Lda.” <https://www.schmitt-elevadores.com/> (accessed Nov. 18, 2022).
- [19] CT 63 (DGEG), “NP EN 81-20:2017 - Regras de segurança para a construção e instalação de elevadores. Parte 20: Ascensores de passageiros e de passageiros e carga,” 2017.
- [20] CT 63 (DGEG), “NP EN 81-70:2009 - Regras de segurança para o fabrico e instalação de elevadores. Parte 70: Acessibilidade aos ascensores para pessoas, incluindo pessoas com deficiência.” 2009.
- [21] “Prof. Cevat Erdem Imrak.” [Online]. Available: <https://scholar.google.com/citations?user=o6lkHh4AAAAJ&hl=tr> (accessed Nov. 23, 2022).
- [22] C. E. İmrak, “A survey for the effect of 2011 Van earthquakes on elevators Prepared by,” 2012.
- [23] “George C. Yao.” <https://researchoutput.ncku.edu.tw/en/persons/george-c-yao>
- [24] G. C. Yao, “Seismic Performance of Passenger Elevators in Taiwan,” 2001.
- [25] F. Segal, A. Rutenberg, and R. Levy, “Earthquake response of structure-elevator system,” *J. Struct. Eng.*, vol. 122, no. 6, pp. 607–616, Jun. 1996, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:6(607).
- [26] M. P. Singh, L. E. Suarez, and L. Rildova, “Seismic response of rail-counterweight systems in elevators,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 31, no. 2, 2002, doi: 10.1002/eqe.109.
- [27] “ELSCO.” <https://elscoguides.com/> (accessed Dec. 14, 2022).
- [28] “MATLAB”, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed Dec. 19, 2022).
- [29] M. P. Singh, Rildova, and L. E. Suarez, “Non-linear seismic response of the rail-counterweight system in elevators in buildings,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 33, no. 2, 2004, doi: 10.1002/eqe.347.
- [30] H. S. TZOU and A. J. SCHIFF, “DYNAMICS AND CONTROL OF ELEVATORS WITH LARGE GAPS AND RUBBER DAMPERS,” *J. Struct. Eng.*, vol. 115, no. 11, pp. 2753–2771, Nov. 1989, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:11(2753).
- [31] X. Wang, S. Gunay, and W. Lu, “Mechanical model and seismic study of the roller guide-rail

- assembly in the counterweight system of elevators,” *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, vol. 50, no. 2, pp. 518–537, 2021, doi: 10.1002/eqe.3344.
- [32] T. Y. YANG, H. KULLEGOWDA, R. K. KAPANIA, and A. J. SCHIFF, “DYNAMIC-RESPONSE ANALYSIS OF ELEVATOR MODEL,” *J. Struct. Eng.*, vol. 109, no. 5, pp. 1194–1210, 1983, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1983)109:5(1194).
- [33] X. Wang, S. Gunay, and W. Lu, “Seismic analysis of the rail-counterweight system in elevators considering the stiffness of rail brackets,” *Adv. Struct. Eng.*, vol. 24, no. 5, pp. 1040–1053, 2021, doi: 10.1177/1369433220974777.
- [34] E. Standard, “NP EN 81-50 - Regras de segurança para a construção e instalação de elevadores. Parte 50: Regras de projeto, cálculos, exames e testes de componentes de elevador,” 2014.