U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

# DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE-RADAR PARA AÇÕES DINÂMICAS E IMPLEMENTAÇÃO DE AMORTECEDOR DE LÍQUIDO SINTONIZADO (TLD) PARA MITIGAÇÃO DAS VIBRAÇÕES

**LUÍS MANUEL REIS FERREIRA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel de Menezes e Carneiro de Barros

Coorientador: Eng.º Hélder Sepúlveda da Costa

JULHO DE 2019

**MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2018/2019**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mailto:miec@fe.up.pt

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ mailto:miec@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A Deus, aos meus pais, irmã e cunhado

*Whether you think you can, or you think you can't–you're right.*

*Henry Ford*

## Agradecimentos

Agradecimentos ao orientador desta dissertação; Professor Rui Carneiro de Barros, pelo seu esforço sem limites, orientação, aconselhamento e apoio constante.

Ao Eng.º Hélder Costa, pela coorientação, apoio e acolhimento na Metalogalva S.A., ao Eng.º José de Barros, pela paciência e disponibilidade, e à Metalogalva S.A. pela disponibilização das instalações e vários elementos cedidos.

Ao professor Abel Henriques pelo acolhimento integração e aconselhamento na FEUP.

A todos os professores com quem tive oportunidade de aprender neste período de tempo curto, mas muito produtivo no MIEC, secção de Estruturas que facilmente consigo nomear de memória:

Professora Elsa Caetano - Estruturas Metálicas e Mistas.

Professor Rui Calçada e Professor Humberto Varum - Dinâmica de Estruturas e Engenharia Sísmica.

Professor Mário Pimentel e Professor Nelson Vila Pouca – Betão II e Fundações e Estruturas de Suporte.

Professor Álvaro Azevedo – Análise Avançada de Estruturas e Professor Miguel Castro – Análise Avançada de Estruturas e Teoria de Estruturas II.

Professor Pedro Pacheco – Pontes, e Professor Filipe Magalhães – Pontes e Teoria de Estruturas II.

Professor Pedro Costa – Fundações e Estruturas de Suporte.

Agradeço ao Eng.º Hugo Guimarães pela sua disponibilidade em vir à FEUP para me esclarecer e partilhar a experiência que teve quando elaborou uma dissertação similar à minha; ao Eng.º Fábio Paiva pela ajuda na análise do trabalho que realizei e elementos cedidos; a todos os colegas que tive oportunidade de conhecer e especialmente com os que tive oportunidade de trabalhar.

Agradecimento especial ao Professor Ferreira Gomes, da UBI, pela inspiração e apoio constante.

Agradecimentos à GNR – CDF (Comando da Doutrina e Formação), a atenção prestada e os elementos cedidos.

**Resumo**

O objetivo deste estudo é o dimensionamento ótimo de uma torre metálica de observação, localizada junto ao mar, em Aguçadoura, Póvoa de Varzim, que serve de apoio a uma antena de radar colocada no seu topo a 45 m de altura. Esta torre, à semelhança de outras localizadas ao longo da costa portuguesa têm como principal função a vigilância marítima, de atividades ilícitas, como por exemplo: o tráfico de droga, pessoas e/ou produtos.

Em primeiro lugar fez-se um estudo expedito da ação do vento com o intuito de obter uma primeira solução estrutural, contudo no decorrer da dissertação utilizou-se o modelo cedido pela Metalogalva S.A.. Em função da localização da estrutura foram estimadas as ações mais condicionantes para a torre: a ação do vento, a ação sísmica e a ação dinâmica induzida pela antena em movimento. As dimensões da torre metálica e secção da torre são 45 m de altura e 3 m de lado transversalmente. Foram efetuadas as várias combinações de ações para estados limites últimos (ULS), e estados limites de utilização (SLS), tendo sido verificada a segurança para a combinação de ações mais extremas, e calculadas as dimensões adequadas dos perfis a utilizar, das ligações, e, uniformizando ao máximo a solução encontrada, por forma a simplificar a construção da torre.

Para mitigar as oscilações da torre, essencialmente a oscilação excessiva ( devido á excentricidade da antena radar e do conjunto antena radar, torre) induzida , em regime de pleno funcionamento, e à velocidade máxima, foi estudado um TLD (Tuned Liquid Damper), a implementar no topo da torre, na plataforma à cota 45m, onde se encontra a antena radar e onde a oscilação é máxima. De entre as várias soluções válidas para reduzir os deslocamentos na torre, como por exemplo, implementação de tirantes, ou a correção das excentricidades existentes na estrutura, a solução do TLD é de longe a solução, mais indicada, pela sua facilidade de implementação e manutenção, sendo constituído por um recipiente de pequenas dimensões, materializado em plástico rígido, e parcialmente cheio com um líquido, neste caso água. O estudo de TLDs é um tema que envolve grande complexidade. No caso presente foi utilizada uma abordagem de dimensionamento de TLD (Tuned Liquid Damper), que tem por base um modelo mecânico relativamente simples que traduz o funcionamento do TMD (Tuned Mass Dampers). Com a implementação do TLD, pretende-se reduzir os deslocamentos, e se possível os esforços e consequentemente validar uma solução mais vantajosa economicamente sem comprometer a segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Ações dinâmicas, TLD (Tuned Liquid Dampers), TMD (Tuned Mass Dampers), Torre metálica, Torre-Radar.

**Abstract**

This study has the objective to optimum design of an observance metallic tower, located by the sea, in Aguçadoura, Póvoa de Varzim, which is the support of a radar antenna placed in the top of the tower. This tower, like many others located along the Portuguese coast, has main function to allowing the maritime surveillance of illicit activities, like for instance the drug dealing, traffic of people and/or illicit products.

In first place was done an expeditious analysis of the wind action with the aim to obtain one first structural solution, although during this dissertation is used one model, given by the Metalogalva S.A.. Depending on the structure location, were estimated the various dynamic actions most conditioning for the tower, the wind action, the seismic action and the dynamic action induced by the radar antenna in motion. The dimensions of the tower are 45 m height and 3 m squared cross-section. Several combinations of actions were performed to the ultimate limit state (ULS), and service limit state (SLS). The security was verified to the most extreme action combination, and gauged the adequate dimensions of the profiles used, connections, standardizing the solution the most possible, in such a way that the construction is simplified.

To mitigate the oscillation of the tower, especially the excessive oscillation (due to the eccentricity of the radar antenna, and the eccentricity of the set radar antenna and tower) induced in fully functioning to the maximum angular velocity, was studied a TLD (Tuned Liquid Damper) to be implemented in the top of the tower (in the platform at 45 m height where the radar antenna is placed and the oscillation is maximum). Among the valid solutions to reduce the displacement in the tower, for instance, the implementation of guys, or the correction of the existing eccentricity on the structure, the TLD solution, is from far, the most indicated, for its simplicity of implementation and maintenance, consisting in a container materialized in rigid plastic, and partially filled with a liquid, in this case water. The study of TLDs is a theme that involves great complexity. In the present case was used an approach to dimensionate the TLD (Tuned Liquid Damper), with a relatively simplified mechanical model, that translates the principle of functioning of the TMD (Tuned Mass Damper).

With the implementation of the TLD, it is intended obtain a characterization of displacements and stresses, validate a solution more economically advantageous without compromising the security.

KEYWORDS: Dynamic actions, TLD (Tuned Liquid Dampers), TMD (Tuned Mass Dampers), Metallic Tower, Radar tower.

**ÍNDICE GERAL**

**AGRADECIMENTOS** ..... iv

**RESUMO** ..... v

**ABSTRACT** ..... vi

# 1 INTRODUÇÃO ..... 1

**1.1 ENQUADRAMENTO** ..... 1

**1.2 OBJETIVOS** ..... 3

**1.3 METODOLOGIAS DE TRABALHO** ..... 4

**1.4 DISPOSIÇÃO DA DISSERTAÇÃO** ..... 4

**1.5 PRÉ DIMENSIONAMENTO DA TORRE METÁLICA** ..... 5

# 2 CONSIDERAÇÕES DE INTERESSE PARA ANÁLISE ESTRUTURAL ..... 9

**2.1 TIPO DE ANÁLISE** ..... 9

**2.2 IMPERFEIÇÕES.** ..... 10

**2.3 MODELAÇÃO** ..... 11

**2.4 ESTADO DE ARTE CONTROLO ESTRUTURAL** ..... 13

2.4.1 SISTEMAS PASSIVOS ..... 13

2.4.2 SISTEMAS DE CONTROLO ATIVOS, HÍBRIDOS E SEMI-ATIVOS ..... 15

# 3 ELEMENTOS REGULAMENTARES TEÓRICOS E PRÁTICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA TORRE-RADAR ..... 22

**3.1 AÇÃO DO VENTO** ..... 22

3.1.1 VELOCIDADE DO VENTO E PRESSÃO DINÂMICA ..... 22

3.1.2 CATEGORIAS DE TERRENO ..... 23

3.1.3 BASE DE CÁLCULO ..... 23

3.1.4 VENTO MÉDIO ..... 24

3.1.5 TURBULÊNCIA DO VENTO ..... 25

3.1.6 PRESSÃO DINÂMICA DO VENTO ..... 25

3.1.7 COEFICIENTES DE FORÇA ..... 26

3.1.8 AÇÕES DEVIDAS AO VENTO ..... 28

3.1.9 FATOR ESTRUTURAL $cscd$ ..... 29

3.1.10 MÉTODO DO ANEXO B – PROCEDIMENTO 1 ..... 30

3.1.11 COEFICIENTE ESTRUTURAL ..... 31

3.1.12 DESLOCAMENTO E ACELERAÇÕES PARA VERIFICAÇÃO DE UMA CONSTRUÇÃO VERTICAL EM RELAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO ..... 33
3.1.13 DECREMENTO LOGARÍTMICO ..... 33
3.1.14 DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES ..... 36
3.1.15 VELOCIDADE CRITICA DE VENTO $vcrit, i$ ..... 36
**3.2 AÇÃO DO SISMO ..... 37**
3.2.1 EXCITAÇÃO SÍSMICA E EQUAÇÃO DE MOVIMENTO ..... 37
3.2.2 RESPOSTA TEMPORAL ..... 37
3.2.3 ESPECTRO DE RESPOSTA ..... 38
3.2.4 ESPECTRO DE RESPOSTA ELÁSTICA $Se(t)$ ESPECTO DE CÁLCULO $Sd(t)$ ..... 38
3.2.5 AÇÃO SÍSMICA EUROCÓDIGO 8 ..... 39
Espectro de cálculo ..... 41
**3.3 AÇÃO DA ANTENA RADAR ..... 43**
3.3.1 MOVIMENTO EM REGIME PERMANENTE ..... 45
3.3.2 MOVIMENTO EM REGIME TRANSITÓRIO ..... 47
3.3.3 CÁLCULO DAS EXCENTRICIDADES ..... 48
3.3.4 CÁLCULO DA FORÇA LIVRE (FREE FORCE) ..... 49
**3.4 FUNCIONAMENTO DE UM TMD ÓTIMO ..... 51**
**3.5 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE ESTRUTURAL DA FUNDAÇÃO EM BLOCO, PELO MÉTODO DE SULZBERGER ..... 54**
**4 CASO DE ESTUDO: RESULTADOS COMPARATIVOS .... 58**
**4.1 LOCALIZAÇÃO DA TORRE-RADAR ..... 58**
**4.2 CARATERIZAÇÃO GEOTÉCNICA ..... 59**
4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS ..... 59
4.2.2 FUNDAÇÃO ..... 60
**4.3 VENTO ..... 61**
**4.4 SISMO ..... 63**
4.4.1 ANÁLISE MODAL ..... 64
**4.5 AÇÃO DA ANTENA ..... 66**
4.5.1 RESPOSTA A EXCITAÇÃO HARMÓNICA ..... 68
**4.6 COMBINAÇÃO DE AÇÕES ..... 71**
4.6.1 ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (ULS) ..... 71
4.6.2 ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO (SLS) ..... 73
**4.7 DIMENSIONAMENTO ..... 74**
**4.8 AMORTECEDOR DE LÍQUIDO SINTONIZADO ..... 76**
4.8.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA A IMPLEMENTAR TLD, TMD ..... 76

4.8.2 DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE UM TLD: ANALOGIA DE UM TMD EQUIVALENTE ..... 78
4.8.3 CÁLCULO E AFINAÇÃO DOS TLDS ..... 81
4.8.4 SIMULAÇÃO DOS TLD NO PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO ..... 87
4.8.5 REPRESENTAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA E RECOMENDAÇÕES ..... 88
4.8.6 SOLUÇÃO DE DIMENSIONAMENTO COM TLDS ..... 91
4.8.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS ..... 93

**5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES ..... 95**

**5.1 CONCLUSÕES FINAIS ..... 95**

**5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ..... 96**

## Índice de Tabelas

*Tabela 1.5.1 - Solução de Pré-Dimensionamento* ..... 7

*Tabela 2.1.1- Cálculo do parâmetro $\alpha_{cr}$* ..... 10

*Tabela 2.2.1- Parâmetros de cálculo para consideração ou não de imperfeições globais:* ..... 11

*Tabela 3.1.1-Categorias e parâmetros de terreno* ..... 23

*Tabela 3.1.2 – Valor básico da velocidade de referência do vento* ..... 25

*Tabela 3.1.3 - Valores aproximados do decremento logarítmico de amortecimento estrutural relativo ao modo fundamental, $\delta s$, adaptado de (NP-EN-1991-1-4 2010)* ..... 35

*Tabela 3.2.1 - Aceleração máxima de referência $agR$ (m/s$^2$) nas várias zonas sísmicas adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)* ..... 40

*Tabela 3.2.2– Classes de importância para Torres, Mastros e Chaminés adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)* ..... 40

*Tabela 3.2.3– Coeficientes de importância adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)* ..... 40

*Tabela 3.2.4– Tipo de Terreno adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)* ..... 41

*Tabela 3.2.5 -Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para a Acão sísmica Tipo 1* ..... 42

*Tabela 3.2.6 -Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para a Acão sísmica Tipo 2 ( adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)* ..... 42

*Tabela 3.2.7 - Requisitos relativos à classe de secção transversal de elementos dissipativos em função da classe de ductilidade e do valor de referência do coeficiente de comportamento* ..... 43

*Tabela 3.5.1 - Parâmetros mecânicos de solos tipos* ..... 56

*Tabela 4.1.1 – Coordenadas Geográficas da Torre-Radar* ..... 59

*Tabela 4.2.1 - Características do solo* ..... 60

*Tabela 4.2.2 – Dimensionamento do Bloco de Fundação* ..... 61

*Tabela 4.3.1-Parâmeros da Ação do Vento* ..... 62

*Tabela 4.3.2 - Parâmetros intervenientes no cálculo pormenorizado do coeficiente CsCd* ..... 63

*Tabela 4.3.3 – Coeficiente CsCd (ANEXO B)* ..... 63

*Tabela 4.3.4 -Cálculo das forças estáticas do vento pelo (NP-EN-1991-1-4 2010)* ..... 63

*Tabela 4.4.1- Aceleração máxima de referência $agR$ $(\mathrm{m/s2})$ nas várias zonas sísmicas adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)* ..... 64

*Tabela 4.4.2 – Análise modal para ação sísmica* ..... 65

*Tabela 4.5.1-Força livre na antena radar* ..... 66

*Tabela 4.5.2 – Força descompensada (free force), deslocamento máximo da estrutura no topo* ..... 67

*De acordo com o anexo A da (NP-EN-1993-3-1 2006), os coeficientes de confiança de torres, são apresentados de acordo com a sua localização, e são classificados, em três categorias com se pode verificar na Tabela 4.6.1.* ..... 71

*Tabela 4.6.2- Classes de Confiança em Torres; adaptado de do Anexo A do (NP-EN-1993-3-1 2006)* ..... 71

*Tabela 4.6.3 – Coeficientes parciais para ações permanentes e variáveis retirada do Anexo a de (NP-EN-1993-3-1 2006)* ..... 71

*Tabela 4.6.4 Valores de Valores de cálculo das ações (STR/GEO) (Conjunto B), retirada da (NP-EN-1990 2009), Anexo A1, Quadro A1.2(B)* ..... 72

*Tabela 4.6.5- Valores de cálculo das ações a utilizar nas situações de projeto acidentais e sísmicas.* ..... 72

*Tabela 4.6.6- Quadro de resumo das combinações de ações para ULS* ..... 72

*Tabela 4.6.7 Combinações SLS, retirada de (NP-EN-1990 2009), Anexo A1, Quadro A1.4.* ..... 73

*Tabela 4.6.8 Combinação característica* ..... 73

*Tabela 4.6.9 Combinação Quase -permanente* ..... 73

*Tabela 4.6.10 - Combinação Quase -permanente.* ..... 74

*Tabela 4.6.11 – Resumo de Combinações das Ações* ..... 74

*Tabela 4.7.1-Situação 1 - Antena Velocidade Máxima (60 rpm) -Reações na Base e deslocamento máximo.* ..... 75

*Tabela 4.7.2-Situação 2 - Antena Velocidade Média (30 rpm) -Reações na base e deslocamento máximo* ..... 75

*Tabela 4.7.3 – Peso da solução dimensionada para o cenário 2 e solução da Metalogalva S.A.* ..... 76

*Tabela 4.8.1 – Comparação entre valores de frequências dos tanques pelo método de (Abramson 1966) e por (Vasylenko 2014)* ..... 81

*Tabela 4.8.2 – Determinação das dimensões dos tanques retangulares para frequência de 1Hz* ..... 84

*Tabela 4.8.3 – Determinação das dimensões dos tanques cilíndricos para frequência de 1Hz* ..... 84

*Tabela 4.8.4- Resumo das várias massas impulsivas e convectivas a simular no programa de cálculo automático para 4 tanques paralelepipédicos para* $\mu = 4mTLDs/M1$ ..... 86

*Tabela 4.8.5 - Resumo das várias massas impulsivas e convectivas simuladas no programa de cálculo automático para 4 tanques cilíndricos para* $\mu = 4mTLDs/M1$ ..... 86

*Tabela 4.8.6- Resumo das várias massas impulsivas e convectivas a simular no programa de cálculo automático para 4 tanques paralelepipédicos para* $\mu = 4mTLDs/Mest$ ..... 86

*Tabela 4.8.7- Resumo das várias massas impulsivas e convectivas a simular no programa de cálculo automático para 4 tanques cilíndricos para* $\mu = 4mTLDs/Mest$ ..... 87

*Tabela 4.8.8 – Cálculo do Angulo máximos e altura máxima da onda do TLD* ..... 89

*Tabela 4.8.9 - Solução Proposta redução de oscilação em %* ..... 90

*Tabela 4.8.10 – Pesos da solução com 4 TLDs e da solução da Metalogalva S.A.* ..... 93

## Índice de Figuras

*Figura 1.1.1 – Localização das Torres-Radar existentes na costa Portuguesa: Fonte GNR- CDT..... 2*

*Figura 1.5.1 -Dimensões Geométricas Da Torre-Radar..... 6*

*Figura 1.5.2-Forças usadas no pré-dimensionamento da Torre-Radar..... 6*

*Figura 1.5.3 – Solução de Pré-Dimensionamento..... 7*

*Figura 2.3.1 – Rotor com massa descompensada retirado de (Assunção 2012)..... 12*

*Figura 2.3.2– Esquema de simulação no Robot Structural Analysis 2019..... 13*

*Figura 2.4.1-TMD – Torre Taipei 101, Taiwan..... 14*

*Figura 2.4.2 – TLD- Torre One Rincon Hill-São Francisco..... 14*

*Figura 2.4.3– Esquema de um TLCD e de um LCVA adaptado de (Bong-Ho, Eunjong, and Hongjin 2016)..... 15*

*Figura 2.4.4 - Edifício Sendagaya INTES..... 16*

*Figura 2.4.5 – Princípio de funcionamento de sistemas DUOX..... 17*

*Figura 2.4.6 - Edifício Kyobashi Seiwa e AMDs..... 17*

*Figura 2.4.7 – Esquema de amortecimento de orifício variável..... 18*

*Figura 2.4.8 – Configuração do sistema SAVS..... 19*

*Figura 2.4.9 – Esquema de amortecedor de líquido controlável..... 19*

*Figura 3.1.1- Coeficientes de força $Cf,0$para uma estrutura treliçada plana constituída por perfis de secção angulosa, em função do índice de cheios $\varphi$, adaptado de (NP-EN-1991-1-4 2010)..... 27*

*Figura 3.1.2 - Coeficientes de força $Cf,0$para uma estrutura treliçada espacial constituída por perfis em secção angulosa, em função do índice de cheios $\varphi$, adaptado de (NP-EN-1991-1-4 2010)..... 27*

*Figura 3.1.3 - Formas gerais das construções abrangidas pelo método de cálculo, adaptado de (NP-EN-1991-1-4 2010)..... 29*

*Figura 3.1.4-Função de densidade espectral de potência $SL(fl)$..... 31*

*Figura 3.2.1- Sistema SDO adaptado de (Chopra 2014)F..... 37*

*Figura 3.2.2 - Força estática. equivalente adaptado de (Chopra 2014)..... 38*

*Figura 3.2.3 – Espectro de cálculo definido como a envolvente de espectro de cálculo para sismos originários de duas falhas diferentes adaptado de (Chopra 2014)..... 39*

*Figura 3.2.4 - Zonamento sísmico de Portugal adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)..... 39*

*Figura 3.3.1– Alçado e planta da Antena cedido pelo fornecedor..... 44*

*Figura 3.3.2– Vista lateral do conjunto antena e motor..... 44*

*Figura 3.3.3 – Imagem da Antena Radar (Haste)..... 45*

*Figura 3.3.4 – Motor da Antena Radar..... 45*

*Figura 3.3.5 – Esquema da Torre com Antena Radar..... 45*

*Figura 3.3.6– Excentricidade do motor face ao centro de rotação da antena..... 46*

*Figura 3.3.7– Esquema de forças no caso de regime permanente* ..... *47*

*Figura 3.3.8-Esquema de forças no caso de regime transitório* ..... *48*

*Figura 3.3.9 – Esquema de excentricidades* ..... *49*

*Figura 3.4.1 – Amortecedor de Vibração Dinâmica de Frahm 1909 adaptado de (Hartog 1940)* ..... *52*

*Figura 3.4.2- Duas frequências de ressonância em função do rácio de massa $\mu$, pela equação (3.4.7); adaptado de (Hartog 1940)* ..... *53*

*Figura 3.5.1 - Localização aproximado do CIR, conforme a natureza do solo* ..... *55*

*Figura 3.5.2 - Diagrama de impulsos laterais e de base sobre o bloco de ancoragem* ..... *56*

*Figura 4.1.1 – Localização do Concelho de Póvoa de Varzim* ..... *58*

*Figura 4.1.2- Localização da Torre-Radar* ..... *59*

*Figura 4.4.1-Espectro de resposta espectral para sismo tipo II (maior aceleração, nas direções X e Y.)* ..... *64*

*Figura 4.4.2 – Deslocamento máximo na direção x pelo CQS* ..... *66*

*Figura 4.5.1- Esquema de aplicação de forças livre -cenário 1* ..... *68*

*Figura 4.5.2 - Esquema de aplicação de forças livre -cenário 2* ..... *68*

*Figura 4.5.3 – Variação da direção da força Livre $Fs$, para simular a ação harmónica dinâmica* ..... *69*

*Figura 4.5.4-Excitação Harmónica $Fssin(\varpi t)$* ..... *69*

*Figura 4.5.5—Deslocamento em cm no topo da Torre-Radar devido á força de excitação do Cenário 1* ..... *70*

*Figura 4.5.6-Deslocamento em cm no topo da Torre-Radar devido à força de excitação do cenário 270*

*Figura 4.7.1 - -Secções da torre em S355 - Solução 1 para envolvente de esforços* ..... *76*

*Figura 4.8.1- Esquema de um mecânico TLD* ..... *77*

*Figura 4.8.2- Modelo mecânico equivalente relativo ao movimento oscilatório do líquido no interior de um tanque adaptado de (Yalla 2002)* ..... *79*

*Figura 4.8.3- Modelo dinâmico e equilíbrio dinâmico de forças, adaptado de (USAEC-Division of Reactor Development 1963)* ..... *79*

*Figura 4.8.4 – Dimensões de TLDs em função da sua frequência 1Hz* ..... *80*

*Figura 4.8.5 – Localização dos TLDs paralelepipédicos na secção média, localização dos nós em estudo* ..... *82*

*Figura 4.8.6 – Localização dos TLDs paralelepipédicos nas arestas, localização dos nós em estudo 82*

*Figura 4.8.7 – Localização dos TLDs cilíndricos na secção média, localização dos nós em estudo* .... *82*

*Figura 4.8.8 – Localização dos TLDs cilíndricos nas arestas, localização dos nós em estudo.* ..... *82*

*Figura 4.8.9 – Solução de TLDs a cilíndricos a implementar* ..... *89*

*Figura 4.8.10–Deslocamento máximo para a solução de 4 TLDs localizados tangente aos guarda corpos da plataforma à cota 45 m o nó 637 localizado no centro geométrico da torre, 652 livre e 659 nó fixo compatível* ..... *90*

*Figura 4.8.11– Deslocamentos máximos no nó 637 (Centro Geométrico) para a solução com 4 TLDS e sem TLDs.* ..... *91*

*Figura 4.8.12 – "Solução 1" com TLDs e sem TLDs no nó 636 centro geométrico da plataforma a 45 m* ..... *92*

*Figura 4.8.13– Solução1 com TLDs* ..... *93*

*Figura 4.8.14 – Solução da Metalogalva S.A.* ..... *93*

# 1
# INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO

A implementação de torres ao longo da costa Portuguesa têm a finalidade de proporcionar um ponto de controlo e fiscalização de atividades ilícitas; tais como o tráfico de droga, a imigração ilegal, contrafação, pesca ilegal, etc, (Barros, Guimarães, and César 2016). Estas estruturas são administradas pela GNR (Guarda Nacional Republicana) -Controlo Costeiro. Foram gentilmente cedidos dados sobre as Torres-Radar em Portugal pela GNR- CDF (Comando da Doutrina e Formação), através de requerimento efetuado. Existem cerca de 20 torres de observação em Portugal (ver Figura 1.1.1), das quais 11 têm a altura de 45 m (como a estudada nesta dissertação). Existem 5 na costa sul, e as remanescentes ao longo da costa oeste. As alturas variam entre os 15 m, de altura máxima e os 45 m. Estão implantadas a distâncias de 40 Km umas das outras. De acordo com a informação prestada todos os colapsos de Torres-Radar tinham a altura de 45 m, tendo uma Torre -Radar colapsado em dezembro de 2017 em Cabo da Roca. Outras duas Torres-Radar colapsaram em 13 de outubro de 2018. Durante o furacão Leslie, em menos de um ano colapsaram 3 torres de 45 m de altura localizadas na costa oeste Portuguesa, o que significa cerca de 30% das torres com altura máxima, o que é um dado bastante relevante, que carece de mais estudos, como o aqui apresentado. Podem ser consultados todos os dados cedidos pela GNR-CDT no ANEXO A, deste trabalho. Sendo cada vez mais importante as autoridades possuírem meios de fiscalização adequados e que acompanhem a evolução tecnológica, tem aumentado o número de infraestruturas de apoio à monitorização da costa Portuguesa.

Estas estruturas em perfis metálicos são as ideais para servir de base de funcionamento à antena radar fixada à altura de 45 m, sendo bastante económicas, quando comparada a uma estrutura de betão armado, bastante mais leves, envolvendo menos meios mecânicos e mão de obra.

No caso presente, a torre é constituída em perfis metálicos em L, designada torre reticulada, com uma altura de 45 m, e uma secção em planta quadrada de 3 m de lado. Tem perfis horizontais a cada 2.5 m e diagonais para dotarem a estrutura menos suscetível a fenómenos de encurvadura; existe também uma escada desde o nível zero até ao nível 45 m onde se encontra instalada a antena radar. Existem 3 plataformas nos níveis a 5 m, 40 m e a 45m.

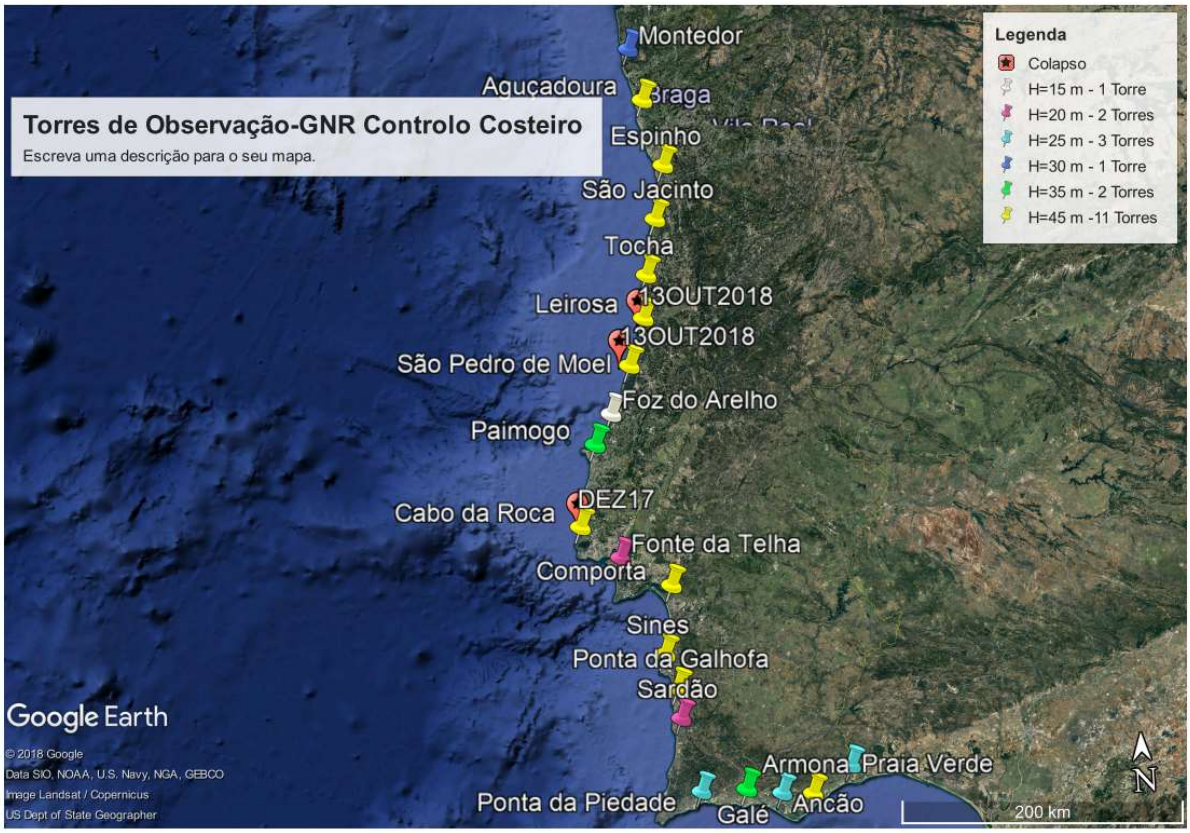



*Figura 1.1.1 – Localização das Torres-Radar existentes na costa Portuguesa: Fonte GNR- CDT*

A antena radar é localizada no centro geométrico da torre em planta a uma distância das arestas de 1,5 m, apoiada num perfil localizado cerca de 2.2 m de altura acima dos 45m. A antena tem um peso total de cerca de 400 Kgf, do qual 230 Kgf para o motor e cerca de 170 Kgf, para a hélice (braços), distribuído uniformemente. A hélice tem um diâmetro de 6.56 m, e um raio 3.28 m. A função da torre é assegurar o apoio da antena radar na plataforma a 45 m, proporcionando o funcionamento ótimo da antena, que, em pleno funcionamento atinge a velocidade angular máxima de 60 rpm, o que provoca (tal como a ação do vento) uma oscilação da torre metálica. De acordo com o fornecedor das antenas radar, é para esta velocidade (60 rpm) que se obtém o funcionamento ótimo da antena,e é também para esta velocidade que se verifica uma oscilação, que impede o normal funcionamento da antena radar. A antena radar tem a possibilidade de operar noutras velocidades inferiores, ajustadas por exemplo em função da velocidade do vento, mas a situação de funcionamento ótimo é para a velocidade máxima.

Neste tipo de estruturas é preponderante a ação do vento. Relativamente a esta de ação ambiental, têm de tidas em conta as alterações climáticas, que tornam obrigatório a adequada quantificação e estudo, no sentido de serem precavidos cenários limite, para ventos muito fortes como os que surgiram durante o furacão Leslie, que assolou a costa portuguesa, em outubro de 2018. Durante este furacão colapsaram várias torres similares às estudadas neste trabalho, inclusive a torre em estudo foi uma dessas situações em que teve de ser reconstruída. A ação de sismos não se torna tão preponderante neste tipo de estruturas, devido ao facto de serem estruturas bastante dúcteis, com grande capacidade de dissipação de energia.

Como fundação, para este tipo de estruturas é de uso corrente o bloco de fundação, podendo atingir dimensões apreciáveis de betão armado, normalmente superiores a dimensões de cubos ou paralelepípedos de 5 m de lado , para fazer face á excentricidade provocada pelas ações na torre. Dependendo do terreno, podem também ser usadas outro tipo de soluções de fundação, como por exemplo, estacas moldadas, acopladas a maciços de betão.

Para diminuir as oscilações, devidas às ações dinâmicas referidas anteriormente, e no seguimento de estudos realizados, serão desenvolvidos alguns tipos de amortecedores de líquido sintonizado, TLD, (Tuned Liquid Dampers). Este tipo de sistemas, quando bem estudados e aplicados, podem ser muito vantajosos, no decréscimo das oscilações da torre, envolvendo muito baixo custo de aplicação e manutenção, pois consistem basicamente num depósito(s) com água, colocado(s) estrategicamente no topo da torre. Embora haja a possibilidade de empregar neste sistema outros líquidos, com maior viscosidade como por exemplo, azeite ou óleo, entre outros, nesta dissertação apenas serão testados depósitos com água, por ser o líquido mais comum e abundante por um lado, e por outro lado a probabilidade de se atingirem temperaturas que solidifiquem a água são praticamente nulas.

Este sistema de mitigação de vibrações nas torres é afinado normalmente para a primeira frequência de vibração da estrutura, que é determinante na resposta da estrutura. No presente estudo, por ter um papel tão importante, na oscilação da torre, o sistema será afinado para a frequência da antena em funcionamento à velocidade máxima, que é igual a 60 rpm, correspondendo a 2π rad/s, 1Hz.

O amortecedor de líquido sintonizado (TLD), terá de ser constituído por material extremamente rígido, para evitar interações do depósito com a própria estrutura, caso contrário introduzem-se fenómenos de grande complexidade na sua avaliação.

O estudo do movimento do líquido em TLDs ou noutra aplicação é de grande complexidade, tendo sido abordada por inúmeros autores nos últimos 50 anos. O comportamento do líquido pode ser previsto, recorrendo a modelos numéricos, sendo os mais rigorosos os modelos numéricos não lineares. Podem também ser simulados por modelos de elementos finitos.

No caso de estudo optou-se por um modelo mecânico que tem apresentado bons resultados, que será definido mais à frente neste trabalho.

A forma do TLD é também fundamental no desempenho do TLD. Serão abordadas duas formas neste estudo, a forma retangular, e cilíndrica vertical. São classificados como águas profundas quando, $\frac{H}{L} \geq 0.15$, sendo L ou R metade da dimensão na direção considerada.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o estudo aprofundado de um TLD em função das ações dinâmicas a que estes tipos de estruturas estão sujeitas, que são essencialmente a ação da antena radar e a ação do vento. A ação do sismo apesar de não ser critica para a estrutura também foi quantificada.

Após a quantificação das ações é efetuada a combinação de ações de cenários limite para a estrutura, obtendo desta forma secções adequadas para resistir aos estados limite definidos nas várias combinações de ações.

Com a solução de 4 tanques que minimiza as oscilações na torre estudada, e com as novas características dinâmicas da torre devido ao 4 TLDs acoplados, será dimensionada uma torre metálica com secções menores às que constituem a solução sem TLDs, e que , no limite se pretende que seja similar à solução que foi implementada no local pela Metalogalva S.A (não são conhecidas as ações

que lhe deram origem). É objetivo deste estudo validar ou não esta solução, pela metodologia de cálculo utilizada.

## 1.3 METODOLOGIAS DE TRABALHO

- ✓ Após a quantificação da ação do vento de uma forma sucinta (assumiu-se uma largura de 0.1 m de cada uma das barras), será feito um pré-dimensionamento, obtendo-se desta forma uma primeira solução de torre. Com o apoio do Eurocódigo (NP-EN-1993-1-1 2010), foram determinados parâmetros da análise estrutural, tomando por base a torre cedida pela Metalogalva S.A. classificando-se a estrutura em termo de nós fixos ou móveis, qual o tipo de análise que pode ser realizada, elástica ou plástica. A consideração ou não das imperfeições.
- ✓ Na sequência são abordados todos os fundamentos teóricos que servem de base para o cálculo das ações, ação do vento com base na norma (NP-EN-1991-1-4 2010); ação dinâmica da antena radar com o apoio da (NP-EN-1993-3-1 2006), e para a quantificação da ação sísmica a (NP-EN-1998-1 2010).
- ✓ Foram efetuadas as combinações das ações onde foram obtidos os esforços de cálculo recorrendo à (NP-EN-1990 2009), os esforços obtidos foi dimensionada a torre metálica.
- ✓ Foi feito um estudo de um amortecedor de líquido sintonizado (TLD), de entre várias alturas, e volumes de água, com geometrias cúbicas e cilíndricas utilizando essencialmente as disposições do (USAEC-Division of Reactor Development 1963). A solução de TLD implementada é a que mais diminui a oscilação da antena radar.
- ✓ A torre é dimensionada novamente com TLD acoplado, agora com características dinâmicas diferentes da estrutura sem TLD, e averigua-se se são obtidas novas secções (menores) de perfis metálicos, que serão confrontadas com as dimensões obtidas pela Metalogalva S.A.. Efetua-se a verificação dos perfis mais solicitados de acordo com a (NP-EN-1993-1-1 2010), e dimensionadas as ligações com esforços mais importantes de acordo com a (NP-EN-1993-1-8 2010).
- ✓ Por último serão tiradas conclusões de todo o trabalho efetuado.

## 1.4 DISPOSIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está disposta em cinco capítulos. No primeiro capítulo é enquadrado o tema desta dissertação, são definidos os objetivos, a metodologia aplicada, a forma de disposição da dissertação, e é feito um pré dimensionamento da torre metálica através da ação do vento com o programa de cálculo Robot Structural Analysis 2019.

No segundo capítulo são determinados alguns parâmetros que constam na (NP-EN-1991-1-4 2010) do EC3, considerados de interesse para a análise estrutural, para se determinar o tipo de análise a efetuar, através destes parâmetros é verificada a necessidade da introdução das imperfeições do material. É explicitada a forma de como se executou a modelação no programa de cálculo utilizado, é e descrito o estado de arte dos vários sistemas de controlo estrutural, incluindo os amortecedores de líquidos sintonizado (TLD -Tuned Liquid Dampers).

No terceiro capítulo são apresentados os elementos regulamentares teóricos e práticos para o dimensionamento da Torre-Radar, das ações, (vento, sismo, antena radar) e os elementos teóricos que servem de base ao estudo de TLDs, de dimensionamento da fundação

No capítulo quarto é apresentado o caso de estudo concreto de uma Torre-Radar, são apresentados os resultados das ações consideradas Combinadas as ações e executado o dimensionamento da torre para a combinação de ações mais gravosa para a estrutura, bem como as fundações e são feitas as verificações dos elementos metálicos e ligações Estava previsto, dimensionar a Torre-Radar para as

várias combinações de ações, e depois dimensionar o amortecedor de líquido sintonizado (TLD), e seguidamente quantificar a diminuição da oscilação. Como foi fornecida a solução que foi implementada pela Metalogalva S.A:, optou-se por uma metodologia ligeiramente diferente, verificar a solução da Metalogalva S.A., para as ações quantificadas. Em princípio a solução não verifica a ação da antena concomitante com a ação do vento, pelo que foram idealizados cenários bastante exigentes. Contudo quando estudado e implementado o tanque de líquido sintonizado (TLD) para mitigar as oscilações, a solução da Metalogalva S.A.: será testada por forma a verificar as ações que foram quantificadas. Nesta fase serão realizadas verificações aos perfis mais solicitados, as ligações e fundação tendo em conta as características e parâmetros geotécnicos fornecidos pelo levantamento que foi levado a cabo, e cedido pela Metalogalva S.A..

A caracterização e evolução da solução a implementar "a priori", tanque com líquido no topo da estrutura, ou outra solução com o mesmo princípio de funcionamento definidos (como por exemplo TLCD- Tuned Liquid Column Damper) para diminuição da oscilação decorrentes destas ações. Depois de bem quantificadas as ações dinâmicas e dos cenários extremos que as originam, serão estudados tanques com Líquido (TLD), em função das grandezas dinâmicas da Torre-Radar por forma a obter a menor oscilação possível, conduzindo a valores aceitáveis os níveis de oscilação da torre , tanto para a ação quase-permanente da antena no topo da estrutura, como para diminuir os deslocamentos e acelerações induzidos pela ação do vento. Apesar de existirem Torres-Radar bem projetadas e bem contruídas, foram verificados alguns colapsos destas estruturas, devido a vento extremamente forte, que ocorreram em Portugal (na zona costeira central) no início do outono de 2018. Esta dissertação é referente ao estudo de uma dessas torres, neste caso localizadas em Aguçadoura, Póvoa de Varzim.

No último capítulo são apresentadas as conclusões desta dissertação, e são apresentadas sugestões para futuros trabalhos.

## 1.5 PRÉ DIMENSIONAMENTO DA TORRE METÁLICA

O pré-dimensionamento foi feito através das forças geradas pelo vento de uma forma simplificada, seguindo a normativa NP-EN-1991-1-4 (2010), calculando uma força por cada 2,5 m de altura de torre. Foi assumido para o cálculo das forças uma largura de 0.1 m em todas as barras. O cálculo dos parâmetros da ação do vento foram obtidos através do cálculo das pressões, e forças do vento através da área exposta na direção da ação do vento, e do coeficiente estrutural $c_s c_d$. Os parâmetros dinâmicos da ação do vento foram obtidos através do Anexo B da NP-EN-1991-1-4 (2010). Nestas circunstâncias foi obtida a distribuição de forças por nível, que se pode ver na Figura 1.5.2. Apesar de não ser percetível na figura, as forças calculadas têm valores iguais nas duas colunas verticais da tabela incorporada sendo o seu valor em kN.

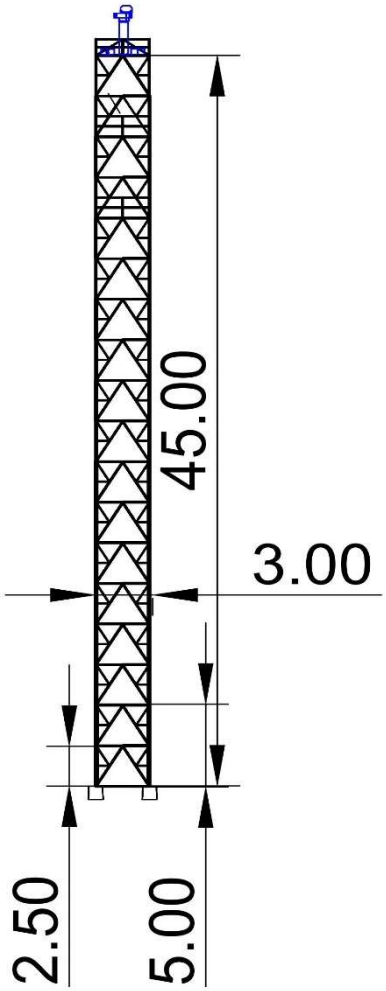



*Figura 1.5.1 -Dimensões Geométricas Da Torre-Radar*

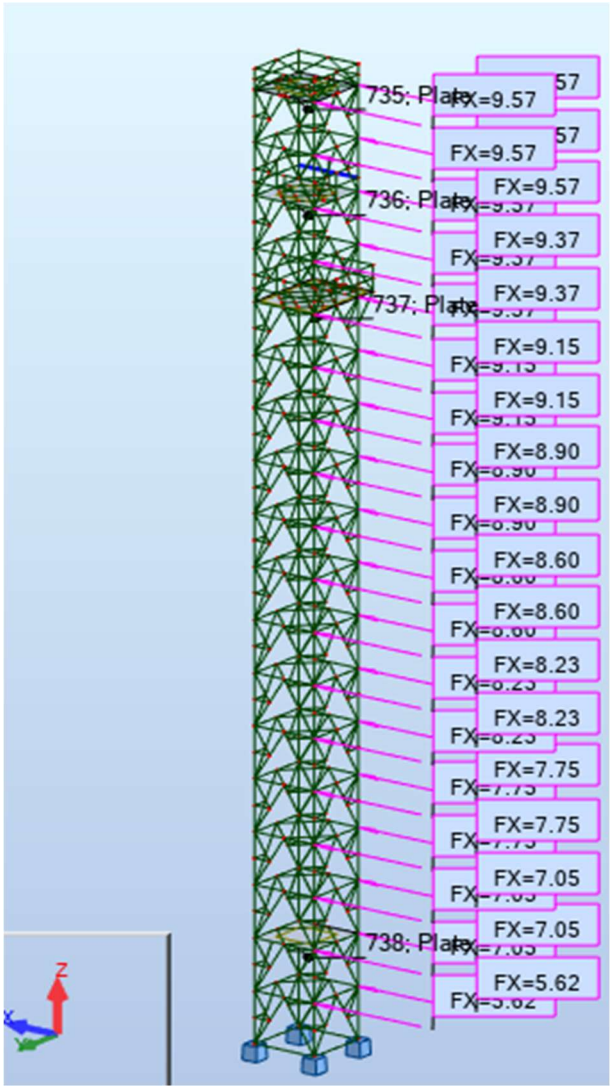



*Figura 1.5.2-Forças usadas no pré-dimensionamento da Torre-Radar*

Com a ajuda o programa de cálculo automático Robot Structural Analysis, chegou-se a uma primeira solução de torre, simplificada correspondente ao pré-dimensionamento, sendo verificada a segurança para estados limites últimos com uma solução de dois perfis; um para os 4 montantes, e o restante para todas as outras barras. Neste caso é uma imposição do dono de obra que a torre tenha níveis de 5 em 5 metros e os contraventamentos sejam dispostos de 2,5 em 2,5 m, (mas poderia ser perfeitamente subdividido, em dimensões mais pequenas). Indagando a Metalogalva S.A. sobre este assunto, merece a pena contraventar em alturas menores, desde que se obtenha soluções com menos peso em cerca de 5%. Para soluções em que se verifique uma redução de peso inferior a 5%, deixa de ser economicamente viável ou interessante contraventar com menores espaçamentos. Ao ter mais níveis de contraventamentos, em alturas inferiores, em que a solução não faça descer 5%, o peso deixa ser vantajoso, devido ao aumento de trabalho envolvido na montagem da torre.

Noutros casos, para este tipo de torres em secções angulares, normalmente o que está na base é o máximo aproveitamento dos comprimentos das secções, que para perfis mais correntes, é fornecido em barras de 6 m, podendo ter de ser feito um corte nas extremidades dos perfis para se obter uma secção com maior perfeição. Sendo possível é sempre preferível dimensionar a torre com perfis de dimensões mais correntes que levará sempre a soluções mais económicas; normalmente os perfis correntes são os perfis com dimensões de secções mais correntes comercializadas.

Para ser garantida a durabilidade da torre, os perfis da estrutura têm de ser galvanizados por forma a evitar a corrosão pela localização junto do mar. O processo de galvanização consiste na imersão a quente dos vários elementos constituintes da torre metálica num tanque com zinco fundido a 450º. Nestas circunstâncias está posta de parte a soldadura dos vários elementos fazendo com que as ligações sejam do tipo aparafusado, onde são utilizados parafusos pré-esforçados, consumando ligações semi-rígidas. No pré-dimensionamento efetuado foram usados apenas dois perfis, um para os montantes da Torre-Radar, e outro em todos os outros elementos ( ver Figura 1.5.3), e o peso obtido consta da Tabela 1.5.1 - Solução de Pré-DimensionamentoTabela 1.5.1.

Tabela 1.5.1 - Solução de Pré-Dimensionamento

| *Perfil* | *Número* | *Comprimento (m)* | *Peso unitário (kG/m)* | *Peso da barra (kG)* | *Peso total (kG)* |
|---|---|---|---|---|---|
| *CAEP 90x9* | *766* | *1292,05* | *12,19* | *15746,99* | *15747* |
| *CAEP 180x20* | *36* | *180* | *53,67* | *9661,02* | *9661* |
| *Total:* | | | | | *25408* |

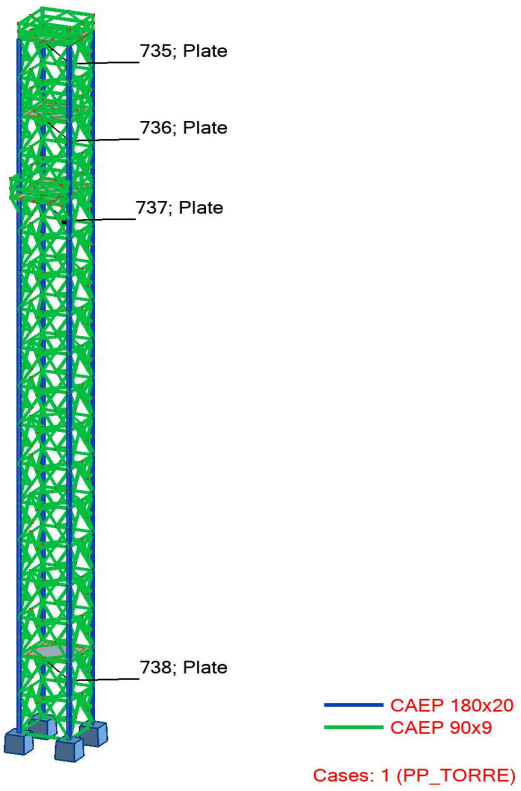



*Figura 1.5.3 – Solução de Pré-Dimensionamento*

# 2 CONSIDERAÇÕES DE INTERESSE PARA ANÁLISE ESTRUTURAL

## 2.1 TIPO DE ANÁLISE

Os esforços finais sobre uma estrutura metálica tipo torre podem ser determinados geralmente através de: análise de primeira ordem; considerando a geometria inicial da estrutura; ou análises de segunda ordem, tomando em consideração a influência da configuração deformada da estrutura.

Os efeitos de segunda ordem, deverão ser considerados sempre que aumentem os efeitos das ações ou modifiquem o comportamento estrutural de forma significativa.

Poderá ser feita uma análise de primeira ordem da estrutura quando forem desprezáveis os efeitos da configuração deformada no aumento dos esforços ou no comportamento da estrutura. Esta condição poderá considerar-se satisfeita se os seguintes critérios forem cumpridos para o parâmetro critico $\alpha_{cr}$ aferidor de stuações:

$$\alpha_{cr} \leq 10 \; análise\; elástica \; (\; nós\; móveis)$$

$$\alpha_{cr} \geq 10 \; análise\; elástica \; (\; nós\; fixos)$$

$$\alpha_{cr} \geq 15 \; análise\; plástica \; (\; nós\; fixos)$$

Como se trata de uma torre com vários níveis foi feito um cálculo do parâmetro $\alpha_{cr}$ em cada um dos níveis da torre de 2,5 em 2,5 m; onde $\alpha_{cr}$ é dado pela equação seguinte (2.1.1).

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}}\right)\left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}}\right) \qquad (2.1.1)$$

$H_{Ed}$- Valor de cálculo da carga horizontal total, incluindo forças equivalentes transmitidas pelo piso (storey shear)

$V_{Ed}$ - Valor de cálculo da carga vertical transmitida pelo piso (storey thrust)

$\delta_{H,Ed}$ - Deslocamento horizontal no topo do piso, medido em relação à base quando se considera um carregamento do pórtico

$h$ - Altura do piso

Na Tabela 2.1.1, é apresentado o cálculo do parâmetro $\alpha_{cr}$ , por níveis de 2.5 m para classificar o tipo de análise a realizar.

Tabela 2.1.1- Cálculo do parâmetro $\alpha_{cr}$

| *h (m)* | *desl (cm)* | *drif (cm)* | *HEd (kN)* | *VEd (kN)* | *αcr* |
|---|---|---|---|---|---|
| *45,00* | *29,658* | *1,082* | *9,570* | *11,801* | *187,305* |
| *42,50* | *28,575* | *2,172* | *9,570* | *11,521* | *95,559* |
| *40,00* | *26,402* | *2,179* | *9,570* | *11,521* | *95,284* |
| *37,50* | *24,223* | *2,187* | *9,370* | *11,521* | *92,960* |
| *35,00* | *22,036* | *2,180* | *9,370* | *11,521* | *93,257* |
| *32,50* | *19,856* | *2,167* | *9,150* | *11,521* | *91,577* |
| *30,00* | *17,688* | *2,139* | *9,150* | *15,337* | *69,710* |
| *27,50* | *15,549* | *2,091* | *8,900* | *11,521* | *92,323* |
| *25,00* | *13,457* | *2,027* | *8,900* | *11,521* | *95,229* |
| *22,50* | *11,429* | *1,942* | *8,600* | *11,521* | *96,058* |
| *20,00* | *9,486* | *1,836* | *8,600* | *11,521* | *101,615* |
| *17,50* | *7,650* | *1,703* | *8,230* | *11,521* | *104,803* |
| *15,00* | *5,946* | *1,548* | *8,230* | *11,521* | *115,345* |
| *12,50* | *4,398* | *1,360* | *7,750* | *11,521* | *123,581* |
| *10,00* | *3,037* | *1,148* | *7,750* | *11,521* | *146,422* |
| *7,50* | *1,889* | *0,900* | *7,050* | *11,521* | *169,817* |
| *5,00* | *0,988* | *0,632* | *7,050* | *11,521* | *241,808* |
| *2,50* | *0,355* | *0,355* | *5,620* | *11,521* | *342,630* |
| *0,00* | *0,000* | *0,000* | *0,000* | *0,000* | *0,000* |

Os efeitos de segunda ordem associados a deslocamentos laterais, devido a presença de cargas verticais, podem ser calculados pela amplificação de cargas horizontais $H_{Ed}$, através da amplificação efetuada pelo fator de amplificação da equação (2.1.2).

$$\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha_{cr}}} \qquad (2.1.2)$$

No caso da torre estudada o fator $\alpha_{cr}$ tem valores muito altos, pelo que esta amplificação é apenas 1. Pelo quadro anterior podemos constatar que se trata de uma estrutura de nós fixos $\alpha_{cr} \geq 10$.Pode ser efetuada uma análise plástica, que envolve grande complexidade, e o próprio material terá de ser de classe 1 (possibilidade de grandes rotações). Na análise global plástica segundo a NP-EN-1993-3-1 (2006) consideram-se os efeitos do comportamento não linear dos materiais no cálculo dos efeitos provocados pelas ações num sistema estrutural; este comportamento deverá ser modelado por um dos seguintes métodos: Uma análise elasto-plástica em que as secções e/ou ligações são modeladas como rótula plásticas; uma análise plástica não linear em que é considerada a plastificação parcial dos elementos ao longo das zonas plásticas; uma análise rígido-plástica em que se despreza o comportamento elástico dos troços dos elementos entre rótulas plásticas. No entanto nesta tese foi realizada uma verificação elástica de 1ª ordem.

## 2.2 IMPERFEIÇÕES.

Para pórticos suscetíveis à ocorrência de instabilidade global com deslocamentos laterais e sistemas de contraventamento, o efeito das imperfeições deve ser incorporado na análise global através de uma imperfeição equivalente com a forma de uma inclinação das colunas (imperfeições globais), e de deformadas iniciais dos seus elementos (imperfeições locais). As amplitudes destas imperfeições podem ser determinadas do seguinte modo:

$$\emptyset = \emptyset_0 \alpha_h \alpha_m \qquad (2.2.1)$$

$\Phi_0$ - Valor de base $\phi_0 = 1/200$

$\alpha_h$ - Coeficiente de redução, calculando em função de h através de:

$h$ - Altura da estrutura em m;

$\alpha_m$- Coeficiente de redução associado ao número de colunas num piso: $\alpha_m = \sqrt{0.5\left(1+\frac{1}{m}\right)}$

$m$ - Número de colunas de piso, incluindo apenas aquelas que estão submetidas a um esforço axial $N_{Ed}$ superior a 50% do valor médio por coluna no pano vertical considerado;

No quadro seguinte é feito um resumo, para aplicação de imperfeições ou dispensa sendo que estão dispensadas a consideração de imperfeições globais sempre que HEd≥0.15 VE

*Tabela 2.2.1- Parâmetros de cálculo para consideração ou não de imperfeições globais:*

| | $\delta_{h,Ed}$ (cm) | Drif (cm) | HEd (kN) | VEd (kN) | VEdx15% |
|---|---|---|---|---|---|
| 45,00 | 29,658 | 1,082 | 9,570 | 11,801 | 1,770 |
| 42,50 | 28,575 | 2,172 | 9,570 | 11,521 | 1,728 |
| 40,00 | 26,402 | 2,179 | 9,570 | 11,521 | 1,728 |
| 37,50 | 24,223 | 2,187 | 9,370 | 11,521 | 1,728 |
| 35,00 | 22,036 | 2,180 | 9,370 | 11,521 | 1,728 |
| 32,50 | 19,856 | 2,167 | 9,150 | 11,521 | 1,728 |
| 30,00 | 17,688 | 2,139 | 9,150 | 15,337 | 2,300 |
| 27,50 | 15,549 | 2,091 | 8,900 | 11,521 | 1,728 |
| 25,00 | 13,457 | 2,027 | 8,900 | 11,521 | 1,728 |
| 22,50 | 11,429 | 1,942 | 8,600 | 11,521 | 1,728 |
| 20,00 | 9,486 | 1,836 | 8,600 | 11,521 | 1,728 |
| 17,50 | 7,650 | 1,703 | 8,230 | 11,521 | 1,728 |
| 15,00 | 5,946 | 1,548 | 8,230 | 11,521 | 1,728 |
| 12,50 | 4,398 | 1,360 | 7,750 | 11,521 | 1,728 |
| 10,00 | 3,037 | 1,148 | 7,750 | 11,521 | 1,728 |
| 7,50 | 1,889 | 0,900 | 7,050 | 11,521 | 1,728 |
| 5,00 | 0,988 | 0,632 | 7,050 | 11,521 | 1,728 |
| 2,50 | 0,355 | 0,355 | 5,620 | 11,521 | 1,728 |

Como de pode concluir pela Tabela 2.2.1, devido ao efeito das imperfeições geométricas não é necessário majorar as forças horizontais pois é verificada a condição **HEd≥0.15 VEd**.

## 2.3 MODELAÇÃO

A modelação foi feita com o apoio do programa de cálculo automático (CAE – Computer Aided Engeneering), Robot Structural Analisys 2019.

A torre metálica foi modelada como um pórtico tridimensional (3D), cada barra corresponde a um elemento finito do tipo barra, mas internamente o programa discretiza as barras em pontos médios e nas extremidades. Podendo as barras em torres mais elevadas e de muito maior mobilidade ter mais pontos de discretização para deteção do comportamento estrutural.

As secções dos elementos são barras do tipo cantoneira de abas iguais, existentes na base de dados do programa. A estrutura tem a mesma forma de 5 em 5 metros, sendo que após o primeiro modulo de 5m, pode-se proceder a copiar os módulos de 5 m, até perfazer a altura de 5 m seguintes. Há que ter uma preocupação acrescida ao colocar as cantoneiras na posição de maior inércia, por forma a maximizar a rigidez e resistência obtida essencialmente para esforços axiais; basicamente é um cuidado que te que se ter com o angulo e orientação da barra no programa.

A fundação foi modelada como um encastramento perfeito. Quanto às ações para simular o efeito da rotação da antena, foi introduzida no programa uma ação harmónica associada à força livre $F_s$.

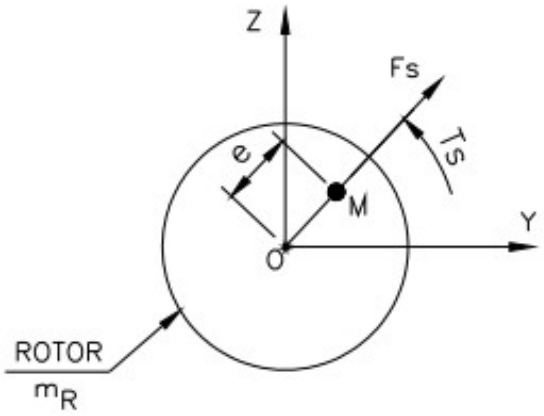



*Figura 2.3.1 – Rotor com massa descompensada retirado de (Assunção 2012)*

Em que:

$M$- Massa do rotor;

$O$ – Centro Geométrico;

$T_s$- Frequencia angular do rotor;

$e$ – Excentricidade da massa;

$F_s$- Força descompensada ou força livre.

A ação do vento foi introduzida com forças concentradas de 2,5 em 2,5 m, para as direções x, y e a 45º entre x e y. Posteriormente foi feita uma combinação de ações para verificar o estado limite último da torre.

A simulação dos TLDs na torre foi efetuada utilizando dois nós por cada TLD, ligados a uma barra com rigidez muito grande de 1000 $cm^4$ nas direcções x,y,z e sem massa. No nó mais próximo da plataforma simula-se a massa impulsiva, que não se oscila $m_0$ (e constitui peso morto para a estrutura). No segundo nó da barra localizado à altura superior corresponde à massa convectiva $m_1$, (massa oscilante), a qual é modelada através de introdução de nós compatíveis, o que fiz com que um nó se divida em dois. O nó compatível introduzido fica imóvel e o nó já existente pode oscilar, com características de c (amortecimento) e k (rigidez).

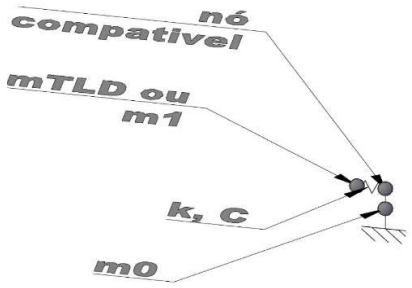



*Figura 2.3.2– Esquema de simulação no Robot Structural Analysis 2019*

É feita uma análise temporal com a frequência de excitação de 1Hz que corresponde à frequência de rotação máxima da antena, associada à força livre $F_s$. Em cada uma das simulações são introduzidos os valores da matriz de amortecimento do tipo Rayleigh da estrutura, (Clough and Penzien 1975), que tem em conta os dois primeiros modos de vibração. São introduzidos no programa a excitação e a matriz de amortecimento para calculo da resposta dinâmica da torre pelo método de Newmark (aceleração), similar ao método normal de Newmark, mas mais completo permite cálculo de respostas não lineares. O intervalo de tempo utilizado é de 0.05s, que corresponde a uma rotação da antena de cerca de 18º, num total de análise temporal de 15s.

## 2.4 ESTADO DE ARTE CONTROLO ESTRUTURAL

Nos anos mais recentes têm vindo a ser alvo de investigação e desenvolvimento dispositivos de controlo estruturais passivos e ativos, em particular para diminuir os deslocamentos devidos a ação do vento e sismo. Para ambas ações foram feitos esforços para desenvolver controlos estruturais através de tecnologia em constante evolução. Hoje em dia existem vários dispositivos instalados numa larga variedade de estruturas.

O alvo deste estado-de-arte são os sistemas de controlo passivos, ativos, semi-activos e híbridos para controlo estrutural. Neste texto sobre estado-de-arte é feita uma breve recapitulação histórica do desenvolvimento e avaliação destas tecnologias em constante evolução. São também discutidas as vantagens e limitações de cada sistema no contexto sísmico e adaptação a estruturas de engenharia civil (Soong and Spencer 2002).

O maior desafio da investigação no controlo ativo em engenharia civil é o facto de integrar diversas disciplinas, algumas das quais fora do âmbito da engenharia civil mais tradicional incluindo, sistemas informáticos, processamento de dados, teoria de controlo, engenharia de materiais, tecnologia de sensores, métodos estatísticos, dinâmica de estruturas e engenharia sísmica

### 2.4.1 SISTEMAS PASSIVOS

Como exemplo de sistema passivo de controlo estrutural existe o TMD (Tuned Mass Damper), que consiste numa da massa ligada a uma estrutura com certas características de amortecimento c, e rigidez k para diminuir oscilações numa dada frequência, um exemplo de aplicação de um TMD é a torre Taipei 101 em Taiwan, que se apresenta na Figura 2.4.1.

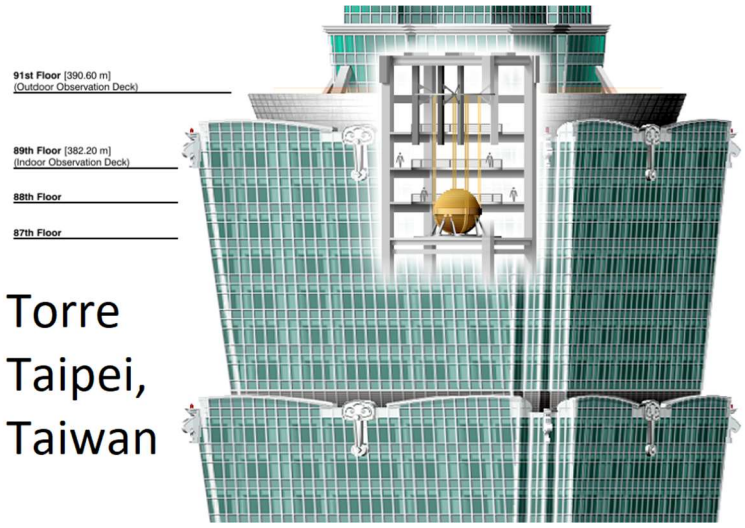



*Figura 2.4.1-TMD – Torre Taipei 101, Taiwan*

O TLD (Tuned Liquid Damper), é um sistema que consiste em acoplar a uma dada estrutura um tanque com líquido, e é usado para mitigar respostas estruturais em uma ou mais frequências para o qual o TLD foi afinado como exemplo de aplicação de um TLD, é a Torre One Rincon Hill, em São Francisco, que se pode observar na Figura 2.4.2.




*Figura 2.4.2 – TLD- Torre One Rincon Hill-São Francisco*

Relativamente aos sistemas passivos, além dos referidos TMD e TLD, existem ainda os TLCD, (TLCD-Tuned Liquid Column Damper), que são subestruturas dissipadoras de energia, usados para melhorar o comportamento estrutural dinâmico. Um TLCD consiste num sistema rígido de tubos, que é integrado na estrutura, e é parcialmente cheio de líquido, de preferência água. Neste sistema pode ser introduzido um dispositivo de mola de ar, e sendo aplicado por um sistema de controlo ativo, que

resulta num novo sistema híbrido de amortecimento que consiste na combinação de sistemas de controlo(Hochrainer 2005).

O LCVA (LCVA (Liquid Column Vibration Absorver), tal como o TLCD tira partido do movimento do líquido no tanque em forma de U, para contrabalançar as forças na estrutura. O LCVA também pode ter orifícios por forma a aumentar a dissipação de energia, através da resistência de passagem do líquido. A diferença entre ambos é que ao contrário do TLCD, o LCVA tem diferentes secções horizontal e vertical, e no TLCD são iguais. (Bong-Ho, Eunjong, and Hongjin 2016) avançaram com um esquema dos dois sistemas descritos, como se apresenta na Figura 2.4.3.

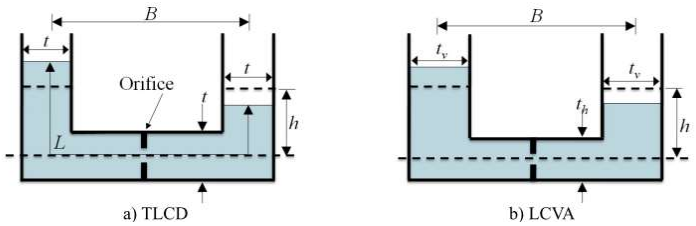



*Figura 2.4.3– Esquema de um TLCD e de um LCVA adaptado de (Bong-Ho, Eunjong, and Hongjin 2016)*

É ainda de referir, da bibliografia, a existência doutro sistemas passivos nomeadamente: o designado isolamento de base e os amortecedores viscosos histeréticos.

### 2.4.2 Sistemas de Controlo Ativos, Híbridos e Semi-Ativos

Os sistemas de controlo estrutural ativo, semi-ativo e híbridos são a evolução de tecnologias de controlo passivas. Sistemas de controlo estrutural ativos ou híbridos, são sistemas que permitem a introdução de forças, integrando sensores e processadores em tempo real na estrutura, atuando simultaneamente para excitações perigosas para a estrutura, melhorando o comportamento da estrutura, para estados limites de serviço e segurança. No caso de sistemas híbridos a grande diferença entre para os sistemas ativos é consistem na combinação de vários sistemas de controlo , por exemplo activos e passivos (Kobori 1998).

Em comparação com sistemas de controlo passivos têm algumas vantagens como por exemplo, maior efetividade no controlo da resposta, que só é limitada pela capacidade dos sistemas de controlo, aplicabilidade a várias frequências indesejáveis para a estrutura, possibilidade de selecionar objetivos de controlo, por exemplo, aumentar a segurança durante uma ação sísmica. O conceito de controlo ativo quando aplicado a estruturas de engenharia civil resulta em consideráveis incertezas, incluindo não-linearidades tanto a associadas a propriedades físicas como associadas a fenómenos como ventos e sismos. A escala de forças envolvidas pode ser muito considerável, limitando o número de sensores e activadores, a dinâmica dos activadores pode envolver grande complexidade, e normalmente são de grandes dimensões e devem ser à prova de falha (Dyke et al. 1995)

Os sistemas de controlo híbridos referem-se a sistemas de controlo passivos e ativos, sendo uma parte cumprido pelo controlo passivo, e outra parte pelo sistema de controlo ativo, implicando menores recursos de energia. Os sistemas semi-ativos são os que os activadores não adicionam energia diretamente à estrutura, e consequentemente, estes dispositivos de controlo são tidos como sistemas passivos controláveis. As vantagens dos sistemas de controlo híbridos e semi-ativo são que, no caso de

falha de energia, os componentes passivos de controlo ainda oferecem algum grau de proteção, ao contrário de sistemas de controlo ativo.

#### SISTEMAS HÍBRIDOS DE AMORTECIMENTO DE MASSA (HMD)

Sistemas híbridos de amortecimento de massa (HMD- Hybrid Mass Damper), são uma combinação de um TMD e um activador de controlo. As forças do activador servem para reduzir as respostas estruturais, principalmente no movimento natural do TMD. A energia e forças requeridas para operar um HMD, típico são muito menores do que aquelas associadas a um TMD completamente ativo de desempenho comparável. Um exemplo de aplicação é o HMD instalado no edifício Sendagaya INTES em Tóquio, como pode ser visto na Figura 2.4.4. O HMD foi instalado no 11º piso da torre e consiste em duas massas para controlar os movimentos estruturais transversos e torsionais, enquanto que activadores hidráulicos proporcionam o controlo ativo. O apoio das massas em suportes de borracha reduz a energia de controlo consumida pelo HDM, e suaviza os movimentos das massas (Higashino and Aizawa 1993).

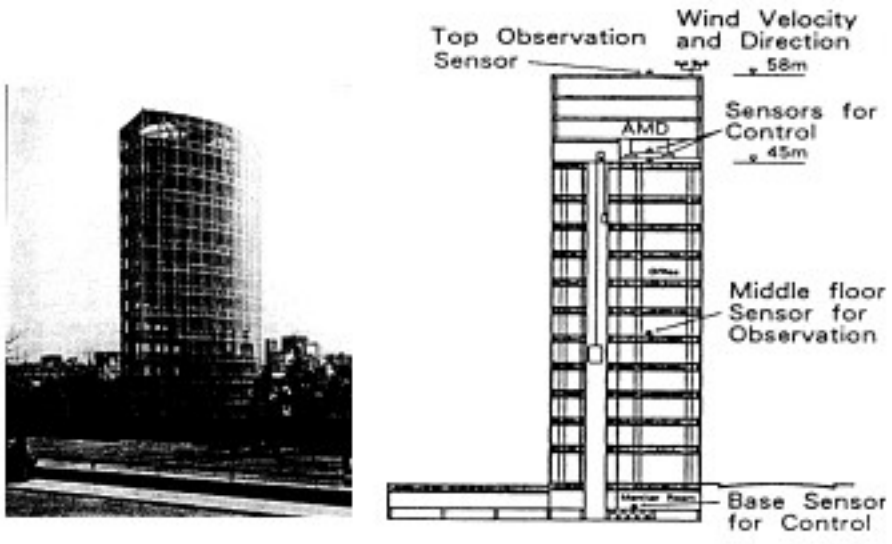



*Figura 2.4.4 - Edifício Sendagaya INTES*

O sistema DUOX HMD, que se apresenta na Figura 2.4.5, consiste num TMD controlado ativamente por uma massa auxiliar, foi instalado, por exemplo no edifício Ando Nishikicho em Tokyo.

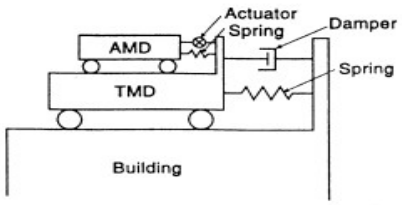



*Figura 2.4.5 – Princípio de funcionamento de sistemas DUOX*

**SISTEMAS DE ATIVOS DE AMORTECIMENTO DE MASSA**

Constrangimentos de projeto, como limitações de espaço, podem impedir o uso de sistema HDM, tal como acontece no Edifício Kyobashi Seiwa em Tokyo e na Torre Nanjing Communication em Nanjing, na China, que têm ADM instalados. O edifício Kyobashi Seiwa, foi o primeiro edifício em que se implementou em larga escala tecnologia de controlo ativo. É um edifício com 11 pisos e uma dimensão em planta de 423 $m^2$. Como pode ser visto na Figura 2.4.6. O sistema de controlo consiste em dois AMDs, em que o AMD principal é usado para movimentos na direção transversal e tem uma massa de 4t, enquanto que o AMD secundário tem uma massa de 1t. a sua aplicação reduz o movimento de torção. O objetivo da aplicação dos AMDs é reduzir a oscilação devido a ventos fortes e moderar as excitações de sismos, aumentando assim o conforto dos ocupantes do edifico.

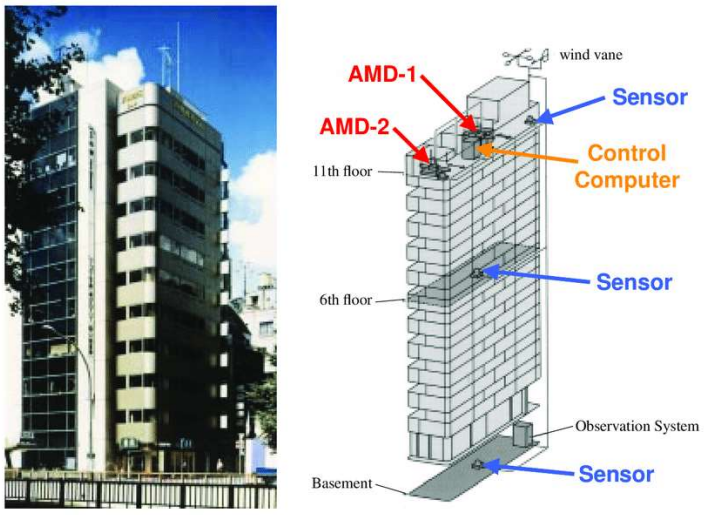



*Figura 2.4.6 - Edifício Kyobashi Seiwa e AMDs*

**SISTEMAS DE CONTROLO SEMI-ATIVOS**

Estratégias de controlo tendo por base dispositivos semi-ativos combinam as melhores características de ambos sistemas de controlo passivos e ativos. O interesse que houve nesta área nos últimos anos pode ser atribuído ao facto de que dispositivos de controlo semi-ativos providenciam flexibilidade face a dispositivos de controlo ativo, sem exigir amplas fontes de energia. Podem operar com energia de baterias, o que é critico durante um sismo quando a distribuição de energia pode falhar.

Pode ser constituído por várias fontes de energia autónomas conferindo redundância aos sistemas de controlo semi-ativo (Braz César and Barros 2014). Vários estudos evidenciam que sistemas semi-

ativos, corretamente implementados têm comportamento significativamente melhor do que dispositivos passivos, e têm potencial para atingir a maioria do desempenho de sistemas ativos, permitindo redução da resposta efetiva ao longo de uma gama de solicitações dinâmicas.

Uma forma de obter um dispositivo de amortecimento semi-ativo é usar uma válvula de controlo do orifício eletromecânico para alterar a resistência de fluxo de um amortecedor hidráulico convencional. Um esquema de tal dispositivo é apresentado na Figura 2.4.7. (Sack and Patten 1994) conduziram experiências onde um activador hidráulico com um orifício controlado por válvula foi implementado numa ponte de uma via para dissipar a energia induzida pelo tráfego de veículos. Um segundo ensaio em larga escala foi levado a cabo numa ponte da autoestrada estadual I-35, para demonstrar esta tecnologia (Patten 1998). Este ensaio foi o primeiro em larga escala onde foi implementado o controlo estrutural semi-activo no EUA.

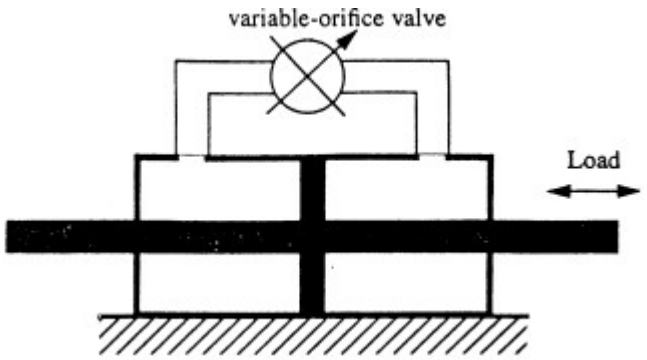



*Figura 2.4.7 – Esquema de amortecimento de orifício variável*

Concebido como dispositivo de rigidez variável, (Kamagata 1994) e (Kobori 1998), implementaram em larga escala um amortecedor de orifício-variável, num sistema semi-ativo de rigidez variável (SAVS - Semi Active Variable Sitffness), para investigar o controlo semi-ativo no complexo Kobori Research. O sistema é mostrado na Figura 2.4.8 onde dispositivos SAVS, foram instalados em ambos lados da estrutura na direção longitudinal. Os resultados destes estudos analíticos e experimentais indicam que este dispositivo é eficaz na redução da resposta estrutural.

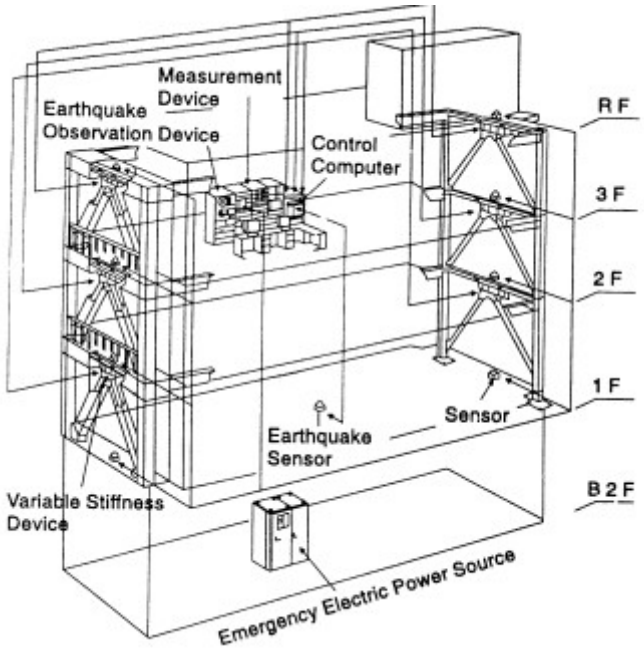



*Figura 2.4.8 – Configuração do sistema SAVS*

**AMORTECEDORES SEMI -ACTIVOS DE FLUIDOS CONTROLÁVEIS**

Outra classe de dispositivos semi-ativos que usa fluidos controláveis é mostrado esquematicamente na Figura 2.4.9. Em comparação com sistemas amortecedores semi-ativos, os dispositivos fluidos controláveis não contêm partes em movimento além do pistão, que os torna simples e potencialmente muito confiáveis.

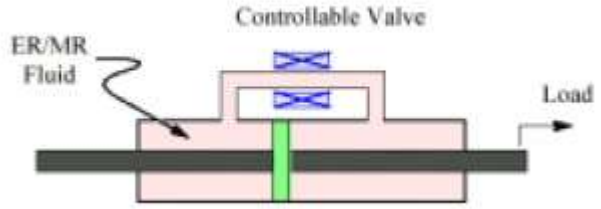



*Figura 2.4.9 – Esquema de amortecedor de líquido controlável*

As caraterísticas essenciais dos fluidos controláveis são a sua aptidão de mudar de um fluxo livre, fluido viscoso linear para um semi sólido com uma força controlável de cedência em milissegundos quando exposto a um campo elétrico [para electro reológico (ER- Electrorheological)], ou magnético [para fluido magneto reológico (MR – magnetorheological)]. Estes materiais são designados de "materiais inteligentes" – (Smart Materials), que mudam as suas caraterísticas reológicas muito rapidamente, através de perturbações externas, ou campos magnéticos. Dispositivos inteligentes – (Smart Devices), com o ER, são altamente sensíveis a impurezas, resultantes do fabrico. Os dispositivos de MR são menos sensíveis a temperatura e não são afetados por impurezas. Os sistemas MR mostram reversibilidade entre o estado fluido e estado sólido (Braz-César and Barros 2012).

**OBSERVAÇÕES FINAIS**

Segundo (Soong 1988), o conceito de estruturas ativas é avançado. Uma estrutura ativa é definida como dois membros resistentes a ações: os estáticos tradicionais (ou passivos) e membros que são projetados para suportar ações básicas de projeto, e membros dinâmicos (ou ativos) cuja função é aumentar a capacidade da estrutura para resistir a cargas dinâmicas extraordinárias. A sua integração é feita de uma forma ótima e produz uma estrutura que é adaptável para mudar cargas ambientais e de serviço.

Estrutura ativa é conceptualmente e fisicamente diferente de uma estrutura que é controlada ativamente. No caso de uma estrutura com controlo ativo, é uma estrutura projetada convencional e suplementada por um dispositivo de controlo ativo que é ativado sempre que for necessário para melhorar o desempenho estrutural sob ações extraordinárias. Portanto, a estrutura e o sistema de controlo ativo são projetados individualmente e otimizados.

Uma estrutura ativa, por outro lado, é uma estrutura cujos componentes passivos e ativos são integrados e simultaneamente otimizados para produzir uma nova categoria de sistemas estruturais. Esta importante diferença faz com que o conceito de estrutura ativa seja empolgante e potencialmente revolucionário. Entre muitas possíveis consequências, podem-se antever grandes mudanças que podem levar a estruturas maiores, mais altas, e melhores formas estruturais. (Soong and Spencer 2000)

.

# 3
# ELEMENTOS REGULAMENTARES TEÓRICOS E PRÁTICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA TORRE-RADAR

## 3.1 AÇÃO DO VENTO

A quantificação dos efeitos da ação do vento na estrutura da Torre-Radar foi efetuada de acordo com o preconizado na norma NP-EN-1991-1-4 (2010). De acordo com essa norma, a pressão dinâmica de referência $q_b$ é dada pela equação (3.1.1.).

$$q_{b=}\frac{1}{2}\times\rho\times v_m^2 \qquad (3.1.1)$$

Onde

$\rho$ – Densidade do ar ($1.25\ kg/m^3$)

$v_m$ – Velocidade média do vento.

### 3.1.1 VELOCIDADE DO VENTO E PRESSÃO DINÂMICA

A ação do vento é determinada a partir dos valores de referência do vento, ou pressão dinâmica. Os valores de referência são valores característicos cuja probabilidade anual de serem excedidos é de 0.02, o equivalente a um período de retorno igual a 50 anos. Para a determinação da ação do vento todos os coeficientes a partir dos valores de referência são escolhidos de forma que a probabilidade de ocorrência da ação do vento, não seja superior à probabilidade de ocorrência desses valores de referência.

A resposta da estrutura à ação do vento depende da dimensão, da forma e das propriedades dinâmicas da estrutura. A resposta da estrutura deve ser calculada a partir da pressão dinâmica de pico $q_p$ para uma altura de referência e no campo não perturbado, dos coeficientes de força e de pressão e do coeficiente estrutural $c_s c_d$. A pressão $q_p$ depende do regime local dos ventos, da rugosidade do terreno, da orografia e da altura de referência. A pressão $q_p$ é igual à pressão dinâmica média do vento acrescida de uma contribuição associada a flutuações de curta duração.

### 3.1.2 CATEGORIAS DE TERRENO

De acordo com a Tabela 3.1.1, são caracterizadas 5 categorias de rugosidade de terreno, bem como parâmetros do terreno, como o comprimento de rugosidade $z_0$e altura mínima $z_{min}$.

*Tabela 3.1.1-Categorias e parâmetros de terreno*

| *Categorias de terreno* | *z0* *[m]* | *zmin* *[m]* |
|---|---|---|
| *0 Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar* | *0,003* | *1* |
| *I - Lagos ou zona plana e horizontal com vegetação negligenciável e livre de obstáculos* | *0,01* | *1* |
| *II - Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura* | *0,05* | *2* |
| *III - Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: aldeias, zonas suburbanas, florestas permanentes)* | *0,3* | *5* |
| *IV - Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m* | *1,0* | *10* |

### 3.1.3 BASE DE CÁLCULO

A velocidade do vento e a pressão dinâmica compreende uma componente média e uma ação flutuante.

O valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$ , é o valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de 10 min, independentemente da direção do vento e da época do ano, a uma altura de 10 m acima do nível do solo em terreno do tipo campo aberto, com vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura.

O valor de referência da velocidade do vento $v_b$, definido em função da direção do vento e da época do ano a uma altura de 10 m acima da superfície de um terreno da categoria II, é calculado pela seguinte equação (3.1.2):

$$v_b = c_{dir}\, c_{season}\, v_{b,0} \qquad (3.1.2)$$

$c_{dir}$- Coeficiente de direção;

$c_{season}$- Coeficiente de sazão;

$v_{b,0}$ – Valor básico de referência da velocidade do vento

Em algumas situações é vantajoso considerar a velocidade fundamental com probabilidade de ser excedida (p), diferente de 2%. O método usado pelo Eurocódigo é baseado no tratamento estatístico de dados de pressão do vento na Europa. A velocidade básica é obtida multiplicando a equação (3.1.2)

por um fator de probabilidade $c_{prob}$, dado pela equação (3.1.3), dependente da probabilidade desejada ou pretendida (p).

$$c_{prob} = \left(\frac{1 - K\ln(-\ln(1-p))}{1 - K\ln(-\ln(0.98))}\right)^{n} \qquad (3.1.3)$$

O parâmetro de forma $k$, dependente do coeficiente de variação da distribuição do valor extremo, e o expoente $n$, são parâmetros que devem ser quantificados no anexo nacional, cujos valores recomendados são 0.2 e 0.5 respetivamente.

### 3.1.4 VENTO MÉDIO

A velocidade média do vento varia com a altura e é definida como o valor médio de velocidade do vento $v_m$ por um período de 10 min e uma determinada altura sobre o solo. A variação da velocidade média do vento a uma altura z acima do solo, $v_m$, é determinada a partir do valor de referência $v_b$, o qual depende do regime local de ventos, rugosidade do terreno, orografia e do valor de referência da velocidade do vento $v_b$, e é determinada através da equação (3.1.4) :

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b \qquad (3.1.4)$$

em que:

$c_r(z)$- Coeficiente de rugosidade é dado pela equação (3.1.5):

$$c_r(z) = \begin{Bmatrix} k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) para\ z_{min} \le z \le z_{max} \\ c_r(z_{min}), para\ z \le z_{mín} \end{Bmatrix} \qquad (3.1.5)$$

onde:

$z_0$ - Comprimento de rugosidade;

$z_{máx}$ - É considerado igual a 200m;

$v_b$-Valor de referência da velocidade do vento;

$z_{min}$ - é a. altura mínima (Tabela 3.1.1);

$k_r$ - Coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade z0, calculado através da expressão (3.1.6):

$$K_r = 0.19 \times (\frac{z_0}{z_{o,II}})^{0.07} \qquad (3.1.6)$$

Onde $z_{0,II} = 0.5\ m$, (terreno categoria II), A categoria de rugosidade que deve ser usada para uma dada direção de vento depende da distância para a qual a rugosidade é constante, chamada distância de referencia (pequenas áreas que apresentam diferentes rugosidades de terreno podem ser ignoradas), e dentro de um angulo de 15º para cada lado da direção fixa do vento. A distância de referência deve está especificada no anexo nacional do NP-EN-1991-1-4 (2010). No caso de dois ou mais categorias de terreno deverá ser escolhida a rugosidade correspondente ao menor valor de rugosidade. O fator de orografia tem em conta a existência de montanhas, falésias e montes, onde a sua existência resulta num incremento da velocidade do vento maior que 5%. Os efeitos da orografia poderão ser

desprezados quando o declive médio do terreno a barlavento é inferior a 3°. O terreno a barlavento poderá ser tomado em consideração até uma distância de 10 vezes a altura do elemento orográfico isolado. Se uma construção for implantada na proximidade de outra cuja altura seja, de pelo menos, o dobro da altura média das construções vizinhas, poderá então ficar exposta (em função das suas características) a velocidades do vento acrescidas, para certas direções do vento.

Para efeitos da quantificação do valor básico da velocidade de referência do vento, considera-se o País dividido em duas zonas:

Zona A – a generalidade do território, exceto as regiões pertencentes à zona B;

Zona B – os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou altitudes superiores a 600m;

*Tabela 3.1.2 – Valor básico da velocidade de referência do vento*

| *Zona* | $v_{b,0}[m/s]$ |
|---|---|
| *A* | *27* |
| *B* | *30* |

### 3.1.5 TURBULÊNCIA DO VENTO

O Eurocódigo EC1 adota um modelo simplificado onde a intensidade de turbulência decresce em altura, na proporção inversa, com o crescimento da velocidade média do vento entre as alturas $z_{min}$ e $z_{máx}$ , e tirando um valor constante para alturas abaixo da $z_{min}$.

A intensidade de turbulência à altura $z$, $I_v(z)$ *é* definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento pela equação (3.1.7):

$$\begin{Bmatrix} I_V(z) = \dfrac{\sigma_v}{v_m(z)} = \dfrac{K_I}{C_0(z)\, ln\left(\dfrac{z}{z_0}\right)} \;\; para \;\; z_{min} \leq z \leq z_{máx} \\ \\ I_V(z) = I_V(z_{min}) \;\; para \;\; z \leq z_{min} \end{Bmatrix} \qquad (3.1.7)$$

A componente turbulenta da velocidade do vento tem um valor médio e um determinado desvio padrão $\sigma_v$ , em termos de terreno $k_r$, velocidade básica do vento $v_b$ e o coeficiente de turbulência $k_1$, onde o desvio padrão é dado, pela equação (3.1.18):

$$\sigma_v = k_r v_b k_1 \qquad (3.1.8)$$

O valor recomendado de $k_1$, é 1.

### 3.1.6 PRESSÃO DINÂMICA DO VENTO

A pressão dinâmica de pico a uma dada altura $z$, $q_p(z)$, resulta da velocidade média e das flutuações de curta duração da velocidade do vento e pode se calculada a partir da equação (3.1.9).

$$q_p(z) = [1 + 7.I_v(z)].\frac{1}{2}.\rho.v_m^2(z) = C_e(z).q_b \qquad (3.1.9)$$

em que:

$\rho = 1.25\ \text{kg/m}^3$, massa volúmica do ar

$c_e(z)$ - Coeficiente de exposição é dado pela equação (3.1.10)

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \qquad (3.1.10)$$

$q_b$ - Pressão dinâmica de referência, calculada pela equação (3.1.11), $v_b$, é o valor de referência da velocidade do vento.

$$q_b = \frac{1}{2}.\rho.v_b^2 \qquad (3.1.11)$$

### 3.1.7 COEFICIENTES DE FORÇA

**PARA ESTRUTURAS RETICULADAS**

O coeficiente de força $C_f$ para estruturas reticuladas de cordas paralelas deverá ser obtido através da equação (3.1.12):

$$C_f = c_{f,0}\ \psi_\lambda \qquad (3.1.12)$$

Onde:

$C_{f,0}$ - coeficiente de força para estruturas reticuladas sem efeitos de extremidade, fornecido pelas Figura 4.5.4 e Figura 4.5.5 em função do índice de cheios e do número de Reynolds $Re$, calculado utilizando o diâmetro médio dos elementos através da equação (3.1.13)(3.3.11).

$\psi_\lambda$ - Coeficiente de efeitos de extremidade, o qual é função da esbelteza da estrutura, λ, calculada com l e b=d

$$Re = \frac{b.v(ze)}{v} \qquad (3.1.13)$$

$b$– Largura da secção transversal;

$v$ - Viscosidade cinemática do ar ($v$= $15.10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$);

$v(z_e)$ - Velocidade de pico do vento, à altura $z_e$.

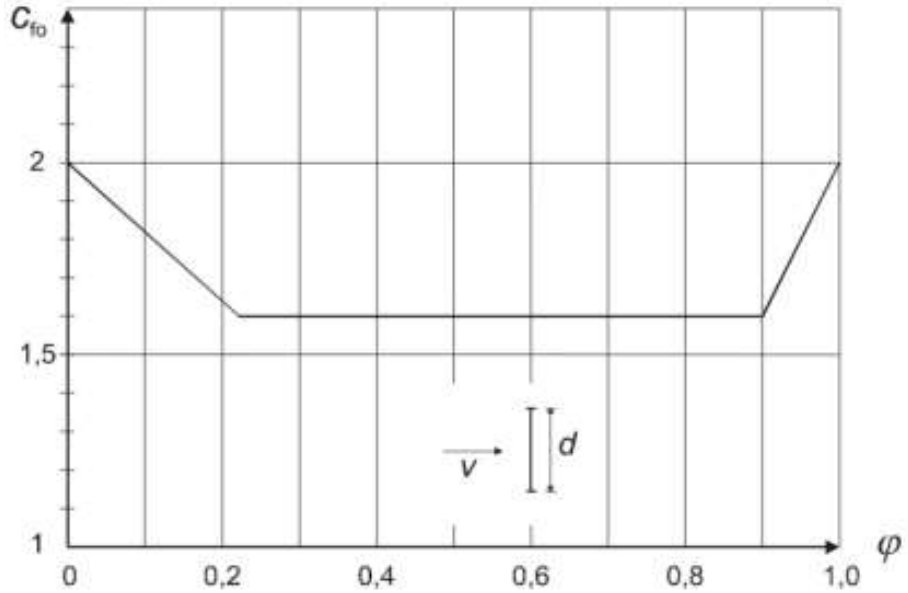



*Figura 3.1.1- Coeficientes de força $C_{f,0}$para uma estrutura treliçada plana constituída por perfis de secção angulosa, em função do índice de cheios $\varphi$, adaptado de (NP-EN-1991-1-4 2010)*

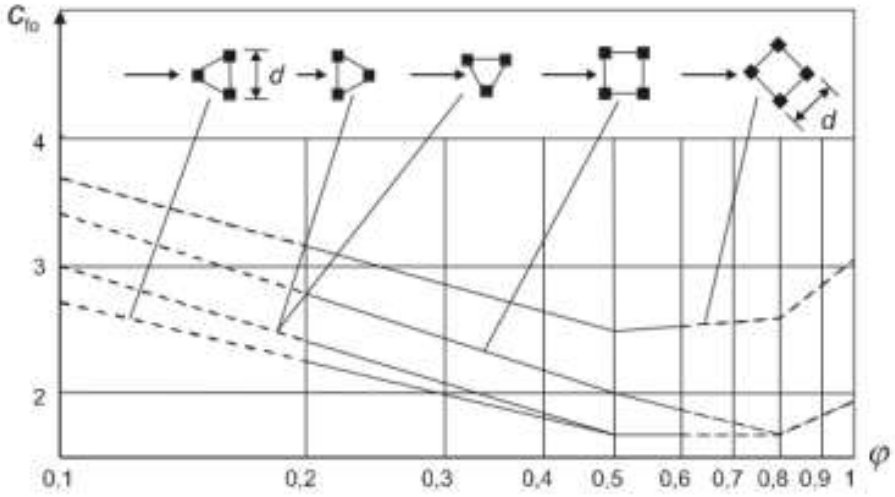



*Figura 3.1.2 - Coeficientes de força $C_{f,0}$para uma estrutura treliçada espacial constituída por perfis em secção angulosa, em função do índice de cheios $\varphi$, adaptado de (NP-EN-1991-1-4 2010)*

O Índice de cheios $\varphi$ e dado pela equação

$$\varphi = \frac{A}{Ac} \qquad (3.1.14)$$

A - Soma das áreas das projeções no plano da face, perpendicularmente a esse plano, de todos os elementos e chapas de *gousset* da face $A = \sum_i b_i\, l_i + \sum_k A_{gk}$,

$A_c$- Área limitada pelo contorno da face em projeção normal à mesma $= dl$;

$l$ - Comprimento da treliça;

$d$ - Largura da treliça;

$b_i, l_i$ largura e comprimento do elemento *i* , projetado perpendicularmente à face;

$A_{gk}$ área da chapa de *gousset k*:

$A_{ref}$ – Calculada pela equação (3.1.15)

$$A_{ref} = A \qquad (3.1.15)$$

O coeficiente de força $c_f$ para estruturas treliçadas de cordas paralelas deverão ser obtidos através da equação (3.1.16):

$$C_f = C_{f,0}\psi_\lambda \qquad (3.1.16)$$

$C_{f,0}$ - Coeficiente de força para estruturas reticuladas sem efeitos de extremidade, fornecido pelas Figura 3.1.1 e Figura 3.1.2 em função do índice de cheios φ (3.1.14)

As áreas de referência devem ser consideradas como se refere a seguir em ambas as direções, constante a largura b, para a estrutura Torre-Radar é constituída por cantoneiras de abas iguais:

Direção x: $Aref,_x = Axb$

Direção y: $Aref,_y = Axb$

Para poder calcular o coeficiente de força, torna-se necessário obter o número de Reynolds tendo em consideração a variável b igual à unidade (i.e, por unidade de largura).

### 3.1.8 AÇÕES DEVIDAS AO VENTO

As pressões de vento em superfícies exteriores $w_e$ são obtidas multiplicando o coeficiente de pressão de força exterior $c_{pe}$ pela pressão dinâmica para a velocidade de pico $z_e$ de acordo com a equação (3.1.17):

$$w_e = q_p\,(z_e).c_{pe} \qquad (3.1.17)$$

As forças do vento que atuam na estrutura (ou numa componente da estrutura), podem ser determinadas diretamente através de: a) coeficientes adequados de força aplicados a toda a estrutura, ou a componentes da estrutura $b$, soma vetorial de componentes de pressão e tensões de fricção atuando na estrutura, resultando da fricção do vento paralelas ás forças externas.

Quando são usados coeficientes de força, a força do vento $F_w$, que atua na estrutura ou numa componente da estrutura pode ser determinada diretamente pela expressão (3.1.18):

$$F_w = c_s\,c_d\,c_f\,q_p(z_e)\,A_{ref} \qquad (3.1.18)$$

O produto $c_s c_d$, e o fator estrutural, $c_f$, é o coeficiente de força para a estrutura ou componente estrutural, $q_p(z_e)$, é a pressão de velocidade de pico, para a altura de referência, $z_e$ (altura de referencia, igual à altura máxima do elemento do solos ; e $A_{ref}$, é a área de referência da estrutura ou componente estrutural obtido pela equação (3.1.15).

As forças de fricção atuam apenas nas superfícies paralelas ao vento e são mínimas em comparação com as forças de pressão, só tendo significado, quando a área das superfícies paralelas ao fluxo é considerável.

Os efeitos dinâmicos e os efeitos relacionados com a dimensão da estrutura devidos ao fator estrutural $c_s c_d$ , são estritamente para os componentes externos sendo que no Eurocódigo EC1 (NP-EN-1991-1-4 2010) assume que as pressões externas e as forças de fricção são valores estáticos completamente distribuídos ao longo das superfície (Ferreira, Barros, and Delgado 2011).

### 3.1.9 FATOR ESTRUTURAL $c_s c_d$

O fator estrutural $c_s c_d$, tem em conta o efeito combinado de: a) A ocorrência não simultânea da pressão de pico de vento nas fachadas da estrutura, chamado efeito de dimensão (size effect $c_s$), b) Vibração da estrutura no modo fundamental devido à ação da turbulência, designada de resposta dinâmica. (dynamic factor $c_d$).

Existem situações em que o valor do fator estrutural pode ser igual a 1. Esta simplificação de calculo corresponde, a pequenas estruturas ou elementos estruturais, para o qual o efeito da dimensão e efeito dinâmico são pequenos. No caso de estudo da Torre-Radar não se enquadra neste grupo, podendo ser calculados por dois métodos diferentes especificados no Euro-Código 1 o método do Anexo B e o método do Anexo C.

O coeficiente estrutural $c_s c_d$ tem em conta o efeito nas ações do vento devido à não simultaneidade na ocorrência das pressões de pico sobre a superfície da torre $c_s$ e o efeito das vibrações da estrutura provocadas pela turbulência $c_d$

Para ao caso de estruturas verticais como por exemplo edifícios, ou estruturas horizontais tais como barras ou vigas, e para o caso onde a vibração da estrutura na direção do vento ocorre apenas no seu modo fundamental de vibração, o fator estrutural é dado pela equação (3.1.19):

$$C_s C_d = \frac{1 + 2.K_p.I_v(Z_s).\sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7.I_v.(Z_s)} \qquad (3.1.19)$$

Em que:

$z_s$- Altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural de acordo com a Figura 3.1.3 e equação (3.1.20).

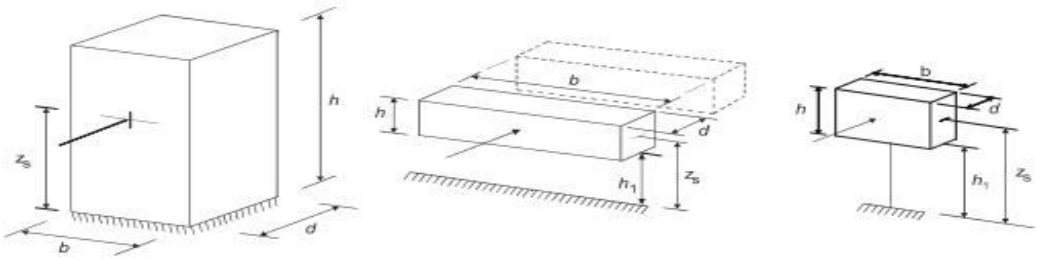



*Figura 3.1.3 - Formas gerais das construções abrangidas pelo método de cálculo, adaptado de (NP-EN-1991-1-4 2010)*

$$z_s = 0.6h \geq z_{min} \qquad (3.1.20)$$

$h$ - Altura da construção;

$k_p$ - Fator de pico, definido como o quociente entre o valor máximo da parte flutuante da resposta e o desvio padrão desta;

$I_v$- Intensidade de turbulência;

$B^2$- Coeficiente de resposta quase -estática, que tem em conta a falta de total correlação das pressões sobre a superfície de construção;

$R^2$- Coeficiente de resposta em ressonância, que tem em conta o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração.

Este procedimento estima a resposta dinâmica da estrutura como a raiz quadrada da soma de uma componente de ressonância e outra componente de fundo. O coeficiente de dimensão, $C_s$, tem em conta o efeito da redução na ação do vento devido à não simultaneidade na ocorrência das pressões de pico sobre a superfície da construção e; pode ser obtido através da equação (3.1.21).

$$C_s = \frac{1 + 7.I_v(Z_s).\sqrt{B^2}}{1 + 7.I_v * (Z_{s)}} \qquad (3.1.21)$$

O coeficiente dinâmico $c_d$, tem em conta o efeito de majoração devido ás vibrações provocadas pela turbulência em ressonância com a estrutura e; pode ser obtido através da equação (3.1.22).

$$C_d = \frac{1 + 2.K_{p.}I_{v.}(Z_s).\sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7.I_v.(Z_s).\sqrt{B^2}} \qquad (3.1.22)$$

$z_s$ - Altura de referência (60% da altura total da torre)

### 3.1.10 MÉTODO DO ANEXO B – PROCEDIMENTO 1

A escala de turbulência $L$(z) representa a dimensão média dos turbilhões do vento natural. Para alturas z inferiores a 200m, a escala de turbulência poderá ser calculada através da equação (3.1.23):

$$L(z) = L_t.\left(\frac{z}{z_t}\right)^{\alpha} \; para \; z \geq z_{min}$$
$$L(z) = L(z_{min}) \; para \; z < z_{min} \qquad (3.1.23)$$

Para uma altura de referência $z_t = 200$ m e uma escala de referência de $L_t = 300\,m$, e com $\alpha = 0.67 + 0.05\ln(z_0)$, em que o comprimento de rugosidade $z_0$ é expresso em m. A altura mínima $z_{min}$ é fornecida na Tabela 3.1.1, o inicio deste capitulo em Categorias de Terreno 3.1.2.

A distribuição de energia do vento em frequência é expressa pela função da densidade espectral de potência adimensional $S_L(n, z)$, a qual deverá ser determinada pela equação (3.1.24) e encontra-se representada na Figura 3.1.4.

$$S_L(\mathrm{z}) = \frac{n.S_v(z,n)}{\sigma_v^2} = \frac{6{,}8.f_{L(z,n)}}{(1+10{,}2.f_L(z,n))^{\frac{5}{3}}} \qquad (3.1.24)$$

Em que $S_v(n,z)$, é a densidade espectral de um só ramo (apenas definidas para frequências positivas), $f_L(z,n)$, é a frequência adimensional, que pode ser obtida através da equação (3.1.25):

$$f_L(z,n) = \frac{n.L(z)}{v_m(z)} \qquad (3.1.25)$$

$n = n_{1,x}$ - Frequência própria da estrutura, expressa e, Hz;

$V_m(z)$ - Velocidade média do vento, à altura z;

$L(z)$ - Escala de Turbulência.

### 3.1.11 COEFICIENTE ESTRUTURAL

O coeficiente de resposta quase-estática, $B^2$, traduz a falta de total correlação das pressões na superfície da torre e pode ser calculado através da equação (3.1.26).

$$B^2 = \frac{1}{1+0.9.\left(\frac{b+h}{L(z_s)}\right)^{0.63}} \qquad (3.1.26)$$

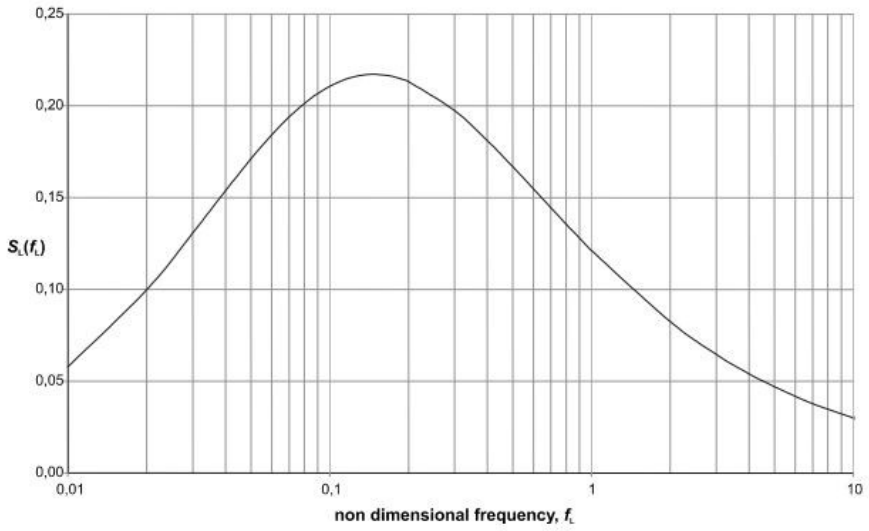



*Figura 3.1.4-Função de densidade espectral de potência $S_L(f_l)$*

Onde:

$b, h$ - Largura e altura da construção;

$L(z_s)$ - Escala de turbulência, fornecida pela equação (3.1.23) à altura de referência $z_s$;

Em termos de segurança é conservativo utilizar $B^2 = 1$;

O fator de pico $k_p$, definido como o quociente entre o valor máximo da parte flutuante da resposta e o desvio padrão desta, deverá ser obtido da equação (3.1.27).

$$K_p = \sqrt{2.ln(v.T)} + \frac{0{,}6}{\sqrt{2.ln(v.T)}} \; ou \; K_p = 3, considerando - se \; o \; maior \; dos \; valores \qquad (3.1.27)$$

Em que:

$v$-Frequência de passagens ascendentes, equação (3.1.28);

$T$ - Duração de integração da velocidade média do vento, T=600s;

A frequência de passagens ascendentes, v, deverá ser obtida através da equação (3.1.28):

$$v = n_{1,x}\sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \; v \geq 0.08 \; Hz \qquad (3.1.28)$$

Em que $n_{1,x}$ é frequência própria da estrutura,

O coeficiente de resposta em ressonância $R^2$, que tem em conta o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração considerando da estrutura, deverá ser calculado através da equação (3.1.29):

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2.\delta}.S_L(Z_{s,}n_{1,x}).R_h(\eta_h).R_b(\eta_b) \qquad (3.1.29)$$

Em que:

$\delta$ - Decremento logarítmico total de amortecimento, fornecido na equação (3.1.36).

$S_L$ - Função de densidade espectral de potência adimensional, fornecida em pela equação (3.1.23)

$R_h R_b$ - Funções de admitância aerodinâmicas, fornecidas pelas equações (3.1.32)

As funções de admitância aerodinâmica $R_h R_b$para uma configuração de modo fundamental podem ser estimadas através das equações (3.1.30) a (3.1.32).

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2.\eta_h^2}\left(1 - e^{-2.\eta h}\right);\; R_h = 1 \; para \; \eta_h = 0 \qquad (3.1.30)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2.\eta_b^2}\left(1 - e^{-2.\eta b}\right);\; R_b = 1 \; para \; \eta_b = 0 \qquad (3.1.31)$$

Com:

$$\eta_h = \frac{4{,}6.h}{L(z_s)} f_L\left(z_{s,}n_{1,x}\right) \; e \; \eta_b = \frac{4{,}6.\mathrm{b}}{L(z_s)} f_L\left(z_{s,}n_{1,x}\right) \qquad (3.1.32)$$

### 3.1.12 DESLOCAMENTO E ACELERAÇÕES PARA VERIFICAÇÃO DE UMA CONSTRUÇÃO VERTICAL EM RELAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

O deslocamento máximo na direção do vento é determinado a partir da força estática equivalente do vento definido em (3.1.18).

O desvio padrão $\sigma_{a,x}$ da aceleração característica na direção do vento do ponto da construção situado à altura z, deverá ser obtido através da equação (3.1.33).

$$\sigma_{a,x} = \frac{C_f \rho b I_v(z_s) v_m^2(z_s)}{m_{1,x}} . R . K_x \phi_{1,x}(z) \qquad (3.1.33)$$

$C_f$ - Coeficiente de força, equação (3.1.16);

$\rho$ - Massa volúmica do ar, valor recomendado $1.25\ Kg/m^3$;

$b$ - Largura da construção;

$I_v(z_s)$ - Intensidade de turbulência à altura $z = z_s$ acima do solo, equação (3.1.7);

$v_m(z_s)$ - Velocidade média do vento para $z=z_s$, equação (3.1.4);

$z_s$ - Altura de referência;

R raiz quadrada do coeficiente de resposta em ressonância, equação (3.1.29);

$k_x$ - Coeficiente adimensional, fornecido pela equação; (3.1.35);

$m_{1,x}$ - Massa equivalente para o modo fundamental de vibração na direção do vento, equação (3.1.34)

$$m_c = \frac{\int_0^l m(s)\Phi_1^2(s)ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s)ds} \qquad (3.1.34)$$

$n_{1,x}$ - Frequência fundamental de vibração da estrutura na direção do vento; no anexo F do (NP-EN-1991-1-4 2010)são fornecidos valores aproximados

$\Phi_{1,x}(z)$ - Configuração do modo fundamental de vibração na direção do vento; em primeira aproximação; poderão ser utilizadas equações fornecidas pelo anexo F do (NP-EN-1991-1-4 2010)

O coeficiente adimensional $k_x$ é definido pela equação (3.1.35)

$$K_x = \frac{\int_0^h v_m^2 .(z). \Phi_{1,x}(z)dz}{v_m^2(z_s). \int_0^h \Phi_{1,x}^2(z)dz} \qquad (3.1.35)$$

### 3.1.13 DECREMENTO LOGARÍTMICO

O decremento logarítmico de amortecimento, δ, relativo ao modo fundamental de flexão poderá ser estimado através da equação (3.1.6).

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \qquad (3.1.36)$$

$\delta_s$ - Decremento logarítmico de amortecimento estrutural

$\delta_a$ - Decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico para o modo fundamental;

$\delta_d$ - Decremento logarítmico de amortecimento devido a dispositivos especiais (amortecedores de massa sintonizados (T*uned Mass dampers*), amortecedores de movimento de líquido (*sloshing tanks*), etc.).

Na maioria dos casos, os deslocamentos modais $\Phi(y,z)$ são constantes para cada altura *z (isto é,* $\Phi(y,z)$ é independente de z), o decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico, $\delta_a$, para as vibrações na direcção do vento pode ser estimado através da equação (3.1.37).O decremento logarítmico estrutural $\delta_s$, toma valores toma valores que podem ser retirados da Tabela 3.1.3, que se apresenta seguidamente.

$$\delta_a = \frac{c_f\ \rho\ b\ v_m(z_s)}{2\ n_1 m_e} \qquad (3.1.37)$$

Tabela 3.1.3 - Valores aproximados do decremento logarítmico de amortecimento estrutural relativo ao modo fundamental, $\delta_s$, adaptado de (NP-EN-1991-1-4 2010)

| *Tipo de estrutura* | | *Amortecimento estrutural,* $\delta_s$ |
|---|---|---|
| *edifícios de betão armado* | | *0,10* |
| *edifícios de aço* | | *0,05* |
| *estruturas mistas betão + aço* | | *0,08* |
| *torres e chaminés de betão armado* | | *0,03* |
| *chaminés de aço com ligações soldadas, sem revestimento interior e sem isolamento térmico exterior* | | *0,012* |
| *chaminés de aço com ligações soldadas, sem revestimento interior e com isolamento térmico exterior* | | *0,020* |
| *chaminé de aço com um forro de conduta e com isolamento térmico exterior*[a)] | $h/b < 18$ | *0,020* |
| | $20 \leq h/b < 24$ | *0,040* |
| | $h/b \geq 26$ | *0,014* |
| *chaminé de aço com dois ou mais forros de conduta e com isolamento térmico exterior*[a)] | $h/b < 18$ | *0,020* |
| | $20 \leq h/b < 24$ | *0,040* |
| | $h/b \geq 26$ | *0,025* |
| *chaminé de aço com forro de conduta em alvenaria de tijolo* | | *0,070* |
| *chaminé de aço com argamassa projectada ("gunite") no interior* | | *0,030* |
| *chaminés acopladas sem forro de conduta* | | *0,015* |
| *chaminé de aço espiada sem forro de conduta* | | *0,04* |
| *pontes de aço + torres de aço reticuladas* | *com ligações soldadas* | *0,02* |
| | *com ligações de parafusos de alta resistência* | *0,03* |
| | *com ligações de parafusos correntes* | *0,05* |
| *pontes mistas* | | *0,04* |
| *pontes de betão* | *pré-esforçadas, sem fissuração* | *0,04* |
| | *com fissuração* | *0,10* |
| *pontes de madeira* | | *0,06 - 0,12* |
| *pontes de ligas de alumínio* | | *0,02* |
| *pontes de plástico reforçado com fibras ou vidro* | | *0,04 - 0,08* |
| *cabos* | *de fios paralelos* | *0,006* |
| | *de cordões* | *0,020* |

***NOTA:*** *Os valores relativos a compósitos de matriz polimérica e madeira são apenas indicativos. Nos casos em que, no projecto, os efeitos aerodinâmicos se revelem significativos, é necessário obter informações mais precisas através de um parecer especializado (com o acordo, caso se aplique, da autoridade competente).*

[a)] *Para valores intermédios de h/b, poderá ser efetuada uma interpolação linear.*

O decremento logarítmico devido ao amortecimento devido para os dispositivos especiais é dado pela expressão (3.1.38):

$$\delta_d = ln\frac{v_{n+1}}{v_n} = \frac{2\pi\xi_d}{\sqrt{1-\xi_d^2}} \approx 2\pi\xi_d \qquad (3.1.38)$$

$\xi_d$- Amortecimento devido ao TLD (Tuned Liquid Damper)

### 3.1.14 DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES

O desprendimento alternado de vórtices, a partir dos lados opostos de uma construção origina uma força de intensidade variável perpendicular à direção do vento. Podem ocorrer vibrações da estrutura se a frequência do desprendimento de vórtices for igual a uma frequência própria da estrutura. Esta condição verifica-se quando a velocidade do vento é igual à velocidade critica dada adiante pela equação (3.1.40). Geralmente, a velocidade critica do vento é uma velocidade do vento observada frequentemente, pelo que, em resultado do número de ciclos de carregamento, a fadiga poderá tornar-se relevante.

A resposta (da estrutura) induzida pelo desprendimento de vórtices é constituída por uma resposta de banda larga, a qual ocorre quer haja ou não movimento da estrutura, e por uma resposta de banda estreita, originada por uma força aerodinâmica induzida pelo movimento.

O efeito de desprendimento de vórtices deverá ser analisado quando o quociente entre a maior e a menor dimensão transversal da torre, ambas consideradas no plano perpendicular à direção do vento, for superior a 6.

Não é necessário analisar o efeito de desprendimento de vórtices quando:

$$v_{crit,i} > 1.25\ v_m \qquad (3.1.39)$$

$v_{crit,i}$ - Velocidade critica do vento para o modo i;

$v_m$ - Valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de 10min, ao nível da secção transversal em que desencadeia o desprendimento de vórtices.

### 3.1.15 VELOCIDADE CRITICA DE VENTO $v_{crit,i}$

Velocidade critica do vento para o modo de vibração em flexão i, é definido como a velocidade do vento à qual a frequência do desprendimento é igual à frequência própria da estrutura ou elemento estrutural. É obtida pela equação (3.1.40).

$$v_{crit,i} = \frac{bn_{i,y}}{St} \qquad (3.1.40)$$

onde:

$b$ – Largura de referência da secção transversal na qual ocorre o desprendimento de vórtices em ressonância e onde o deslocamento modal é máximo;

$n_{1,y}$ – Frequência própria do modo i de vibração em flexão na direcção transversal ao vento;

$S_t$ – Número de Strouhal.

## 3.2 AÇÃO DO SISMO

### 3.2.1 EXCITAÇÃO SÍSMICA E EQUAÇÃO DE MOVIMENTO

Para fins de engenharia a variação ao longo do tempo da aceleração no solo é uma forma fácil de detectar e de definir a vibração no solo durante um sismo. A aceleração do solo $\ddot{u_g}\ (t)$, aparece no lado direito da equação diferencial de movimento pela equação (3.2.1), comandando a resposta das estruturas para excitações sísmicas. Para uma dada aceleração do solo a solução do problema é definida completamente para um SDOF (Single Degree Of Freedom), conhecidas a suas propriedades de massa $m$, amortecimento $c$, rigidez $k$, (ver Figura 3.2.1).

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = m\ddot{u}_g\ (t) \qquad (3.2.1)$$

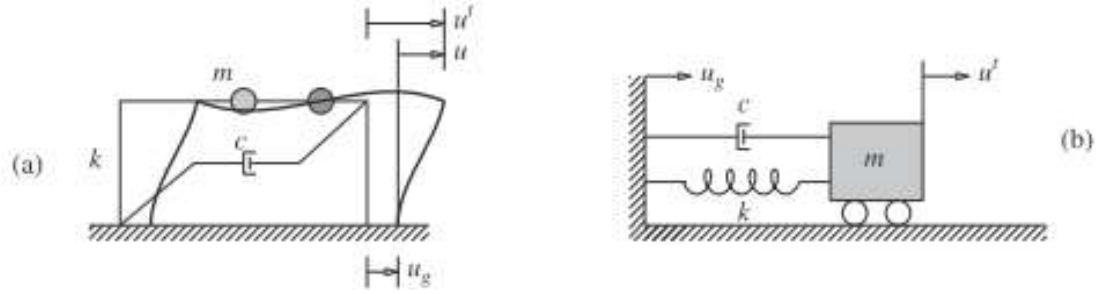



*Figura 3.2.1- Sistema SDO adaptado de (Chopra 2014)F*

Dividindo a equação (3.2.1) por m, obtém-se a equação (3.2.2):

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{u}_g\ (t) \qquad (3.2.2)$$

Para uma dada $\ddot{u}_g\ (t)$, a resposta de deformação $u(t)$, do sistema depende apenas da frequência natural $\omega_n$, e do seu coeficiente de amortecimento $\xi$, portanto, sistemas com os mesmos valores de $\omega_n$, e $\xi$,apresentam a mesma resposta de deformação, embora um sistema tenha mais massa e outro mais rigidez (Chopra 2014).

### 3.2.2 RESPOSTA TEMPORAL

Embora existam dois métodos para implementar a resposta temporal sísmica, o método preferido utilizado na engenharia sísmica é o que que se baseia no conceito de força estática equivalente $f_s$ porque se podem relacionar a forças de sísmicas especificadas nos Eurocódigos, definida pela equação (3.2.3) (Chopra 2014):

$$f_s(t) = \mathrm{k}u(t) \qquad (3.2.3)$$

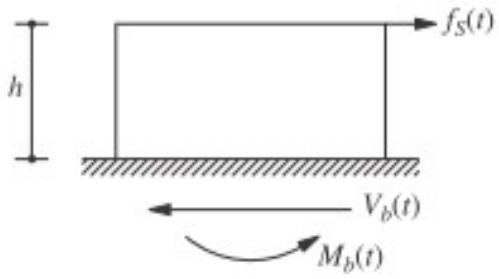



*Figura 3.2.2 - Força estática. equivalente adaptado de (Chopra 2014)*

### 3.2.3 ESPECTRO DE RESPOSTA

O espectro de resposta fornece uma forma prática de resumir a resposta de pico para todos os sistemas SDOF para uma componente particular de movimento do solo. Também proporciona uma abordagem prática para aplicação de conhecimentos de dinâmica estrutural para projetos de estruturas e desenvolvimento de exigências para forças laterias nos regulamentos.

Ao valor de pico de uma dada resposta em função da vibração natural, ou relacionada com parâmetros como por exemplo a frequência angular $\omega_n$, é denominado de resposta espectral para essa resposta (Chopra 2014) .

### 3.2.4 ESPECTRO DE RESPOSTA ELÁSTICA $S_e(t)$ ESPECTO DE CÁLCULO $S_d(t)$

Um espectro de resposta elástica $S_e(t)$ difere conceptualmente do espectro de cálculo $S_d(t)$, em dois pontos fundamentais. No primeiro a resposta irregular é o traçado da resposta de pico para todos os sistemas SDOF e consequentemente, é a descrição de um movimento particular do solo. A resposta regular é uma especificação do nível de força sísmica de cálculo, ou deformação, em função do período de frequência natural e coeficiente de amortecimento. Apesar desta diferença em algumas formas similares, como por exemplo no caso do espectro de cálculo ser determinado por análise estática de vários espectros de resposta comparáveis.

O segundo ponto fundamental onde a resposta elástica e o espectro de cálculo diferem é devido ao facto de que um espectro de cálculo é a envolvente de dois ou mais espectros de cálculo elástico. Um local pode ser atingido por dois tipos diferentes de sismos; sismos de pequena magnitude localizados a pouca distância e, sismos de grande magnitude localizados a uma distância maior. A porção de curto período é determinada pelo sismo que está localizado próximo, enquanto que a porção de maior período é afetada pelo sismo localizado a uma maior distância ver Figura 3.2.3,(Chopra 2014).

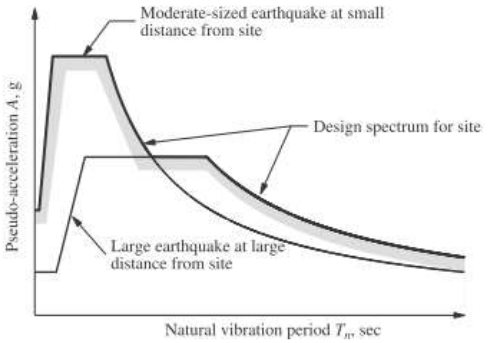



*Figura 3.2.3 – Espectro de cálculo definido como a envolvente de espectro de cálculo para sismos originários de duas falhas diferentes adaptado de (Chopra 2014)*

### 3.2.5 AÇÃO SÍSMICA EUROCÓDIGO 8

#### ZONAMENTO SÍSMICO

O território nacional é dividido em zonas sísmicas, dependendo da sismicidade do local. Por definição admite-se que a sismicidade de cada local é constante (ver Figura 3.2.4).

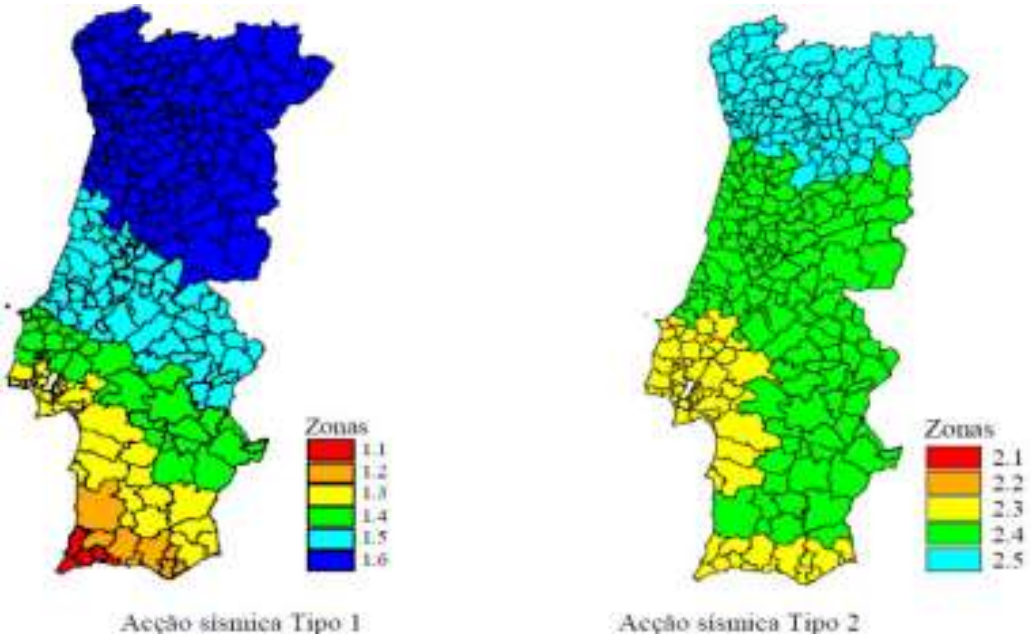



*Figura 3.2.4 - Zonamento sísmico de Portugal adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)*

#### ACELERAÇÃO MÁXIMA DE REFERÊNCIA

Na maioria das aplicações, a sismicidade é descrita por um único parâmetro, $a_{gR}$, definido como aceleração máxima de referência (ver Tabela 3.2.1).

Tabela 3.2.1 - Aceleração máxima de referência $a_{gR}$ (m/s$^2$) nas várias zonas sísmicas adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)

| *Acão sísmica tipo 1* | | *Acão 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* | | |

#### ACELERAÇÃO DE REFERÊNCIA

O valor de referência da aceleração máxima à superfície do terreno, para cada uma das zonas sísmicas corresponde ao período de retorno de referência $T_{NCR}$, da ação sísmica para o requisito de não ocorrência de colapso, (ou de forma equivalente, à probabilidade de excedência de 50 anos, $P_{NCR}$.) A este período de retorno é associado um coeficiente de importância $\gamma_1$ (ver Tabela 3.2.2 e Tabela 3.2.3.)

Tabela 3.2.2– Classes de importância para Torres, Mastros e Chaminés adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)

| *Classe de importância* | *Edifícios* |
|---|---|
| *I* | *Edifícios de importância menor para a segurança pública, como por exemplo edifícios agrícolas, etc.* |
| *II* | *Edifícios correntes, não pertencentes às outras categorias.* |
| *III* | *Edifícios cuja resistência sísmica é importante tendo em vista as consequências associadas ao colapso, como por exemplo escolas, salas de reunião, instituições culturais, etc.* |
| *IV* | *Edifícios cuja integridade em caso de sismo é de importância vital para a protecção civil, como por exemplo hospitais, quartéis de bombeiros, centrais eléctricas, etc.* |

Tabela 3.2.3– Coeficientes de importância adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)

| *Classe de Importância* | *Ação sísmica Tipo 1* | *Ação sísmica Tipo 2* | |
|---|---|---|---|
| | | *Continente* | *Açores* |
| *I* | *0,65* | *0,75* | *0,85* |
| *II* | *1,00* | *1,00* | *1,00* |
| *III* | *1,45* | *1,25* | *1,15* |
| *IV* | *1,95* | *1,50* | *1,35* |

**TIPO DE TERRENO**

Os tipos de terreno do Eurocódigo 8 EC8 (NP-EN-1998-1 2010) são os constantes na Tabela 3.2.4:

*Tabela 3.2.4– Tipo de Terreno adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)*

| *Tipo de Terreno* | *Descrição do perfil estratigráfico* | *Parâmetros* | | |
|---|---|---|---|---|
| | | *vs,30 (m/s)* | *NSPT (pancadas/30 cm)* | *cu (kPa)* |
| *A* | *Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que incluam, 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 o medianamente compacta, de seixo com uma espessura entre dezenas e muitas centenas de metros.* | *180 – 360* | *415 - 50* | *70 - 250* |
| *D* | *Depósitos de solos não coesivos de compacidade 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 vs do tipo C ou D e uma espessura entre cerca de 5 m e 20 m, situado sobre um estrato mais rígido com* | *vs > 800 m/s* | | |
| *S1* | *Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial com valores de vs do tipo C ou D e uma espessura entre cerca de 5 m e 20 m, situado sobre um estrato mais rígido com* | *< 100 (indicativo) vs > 800 m/s* | *-* | *10 - 20* |
| *S1* | *Depósitos de solos com potencial de liquefação, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terreno não incluído nos tipos A – E ou S1* | | | |

*ESPECTRO DE CÁLCULO*

Para as componentes horizontais da ação sísmica, o espectro de cálculo, $S_d(t)$, é definido pelas seguintes equações:

$$T \leq T \leq T_B: \quad S_d(t) = a_g.S.[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B}(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3}) \qquad (3.2.4)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_d(T) = S_d(T) = a_g.S.\frac{2.5}{q} \qquad (3.2.5)$$

$$T_C \leq T \leq: T_D \quad S_d(T) = a_g.S.\frac{2.5}{q}.\left[\frac{T_C}{T}\right] \geq \beta.a_g \qquad (3.2.6)$$

$$T_D \leq T: \quad S_d(T) = S_d(T) = a_g.S.\frac{2.5}{q}.\left[\frac{T_C T_D}{T}\right] \geq \beta.a_g \qquad (3.2.7)$$

em que:

$a_g, S, T_c \; e \; T_d$ - Definidos na Tabela 3.2.5 e Tabela 3.2.6;

$S_d(t)$ - Espectro de cálculo;

$q$ - Coeficiente de comportamento definido na Tabela 3.2.7;

$\beta$ - Coeficiente correspondente ao limite inferior do espectro de cálculo horizontal;

$a_g = a_{gR}\gamma_1$.

Para a componente vertical da ação sísmica, o espectro de cálculo é obtido pelas equações (3.2.4) a (3.2.7), com o valor de cálculo da aceleração à superfície do terreno na direção vertical, $a_{gR}$, substituindo $a_g$, $S$ tomado com valor igual a 1,0 e os outros parâmetros definidos como na Tabela 3.2.6.

Tabela 3.2.5 -Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para a Acão sísmica Tipo 1

| *Tipo de Terreno* | *Smax* | *$T_B$ (s)* | *$T_C$ (s)* | *$T_D$ (s)* |
|---|---|---|---|---|
| *A* | *1,0* | *0,1* | *0,6* | *2,0* |
| *B* | *1,35* | *0,1* | *0,6* | *2,0* |
| *C* | *1,6* | *0,1* | *0,6* | *2,0* |
| *D* | *2,0* | *0,1* | *0,8* | *2,0* |
| *E* | *1.8* | *0,1* | *0,6* | *2,0* |

Tabela 3.2.6 -Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para a Acão sísmica Tipo 2 ( adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)

| *Tipo de Terreno* | *Smax* | *$T_B$ (s)* | *$T_C$ (s)* | *$T_D$ (s)* |
|---|---|---|---|---|
| *A* | *1,0* | *0,1* | *0,6* | *2,0* |
| *B* | *1,35* | *0,1* | *0,6* | *2,0* |
| *C* | *1,6* | *0,1* | *0,6* | *2,0* |
| *D* | *2,0* | *0,1* | *0,8* | *2,0* |
| *E* | *1.8* | *0,1* | *0,6* | *2,0* |

Tabela 3.2.7 - Requisitos relativos à classe de secção transversal de elementos dissipativos em função da classe de ductilidade e do valor de referência do coeficiente de comportamento

| *Classe de ductilidade* | *Valor de referência do coeficiente de comportamento q* | *Classe de secção transversal necessária* |
|---|---|---|
| *DCM* | *$1,5 < q \leq 2$* | *classe 1, 2 ou 3* |
| | *$2 < q \leq 4$* | *classe 1 ou 2* |
| *DCH* | *$q > 4$* | *classe 1* |

## 3.3 AÇÃO DA ANTENA RADAR

Conhecidas as características mecânicas da antena radar, foi efetuado estudo relativo à vibração introduzida na Torre-Radar, quando a antena se encontra em funcionamento. Solicitou-se ao fabricante informação detalhada relativa às características da antena de radar a instalar no topo da torre metálica. O melhor desempenho da antena verifica-se quando esta se encontra em pleno funcionamento a 60 rpm desde que a velocidade do vento seja inferior a 35m/s. Acima deste valor de velocidade de vento a antena pode operar a 30 rpm. Resumidamente, a antena propriamente dita tem um peso de cerca de 170 kgf, o motor e todos os outros acessórios pesam cerca de 230 kgf, pelo que o peso total da antena é de 400 kgf.

A antena parte da posição zero, e, até atingir a velocidade máxima de 60 rpm leva o tempo de cerca de 30s. Podem-se distinguir dois tipos de funcionamento da antena, que são designados de regime transitório, e regime permanente. No regime permanente a antena roda com uma velocidade angular constante, e aceleração angular e tangencial nulas, induzindo na torre, uma excitação harmónica, devido a excentricidades. As excentricidades são provocadas por vários fatores entre os mais significativos, e alvo deste estudo, destaca-se a excentricidade da própria Torre-Radar, fruto de uma plataforma que se afasta da planta da torre na direção de y com um comprimento de 1,0 m a toda a largura da torre 3m à cota 35 m, onde é posicionada uma câmara digital. O motor não é perfeitamente centrado com a torre e como a antena tem uma dimensão superior numa das direções (ver Figura 3.3.1 a Figura 3.3.5), provoca uma excentricidade na direção y. O próprio suporte pedestal da antena pode ter alguma excentricidade, face à localização teórica no centro da plataforma da torre.

Quando a antena se encontra no seu regime transitório, é quando parte do repouso e é acelerada uniformemente até atingir determinada velocidade angular máxima. Esta situação introduz um momento torsor na torre, mas como é por um período muito curto não se considerou este cenário como crítico para a estrutura, pela grandeza do momento.

O fabricante cedeu ainda outros valores para duas situações limite; quando a antena se encontra em funcionamento; com rotação entre 20 e 60 rpm, e quando sujeita a uma ação do vento quando este tem uma velocidade extrema de 75 m/s.

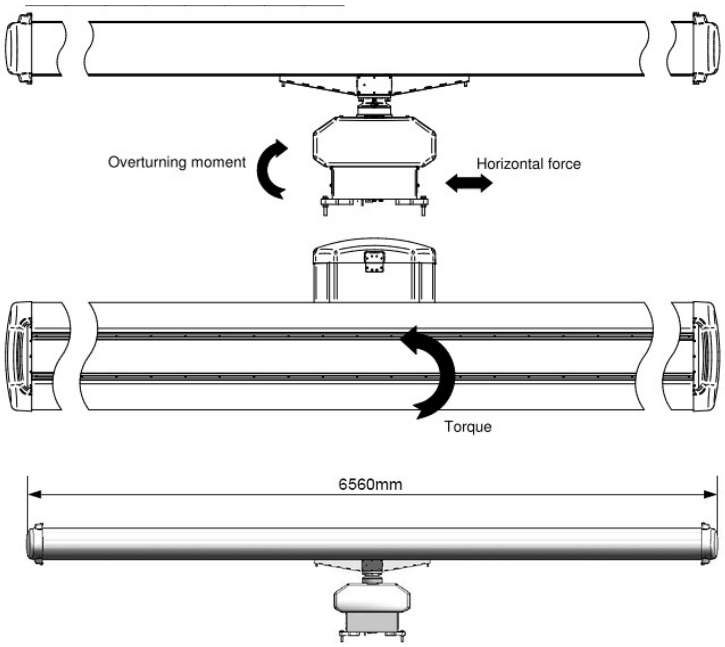



Figura 3.3.1– Alçado e planta da Antena cedido pelo fornecedor

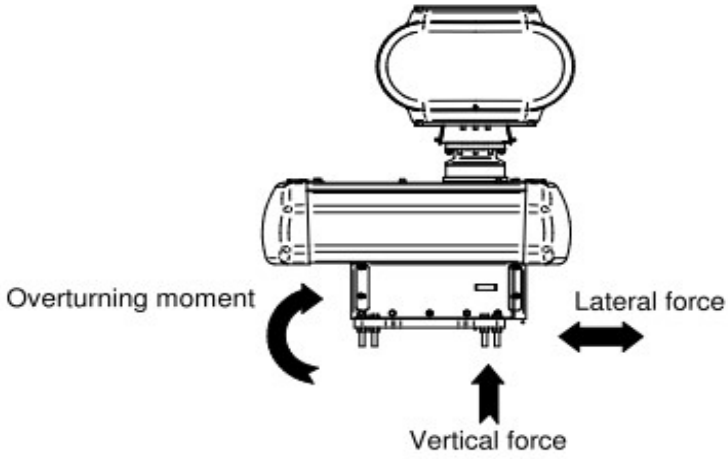



*Figura 3.3.2– Vista lateral do conjunto antena e motor*




*Figura 3.3.3 – Imagem da Antena Radar (Haste)*



*Figura 3.3.4 – Motor da Antena Radar*

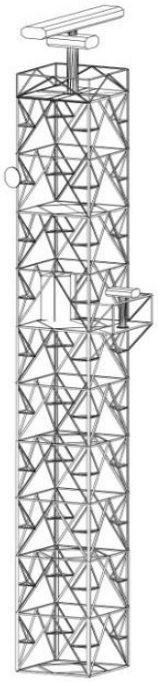


*Figura 3.3.5 – Esquema da Torre com Antena Radar*

### 3.3.1 MOVIMENTO EM REGIME PERMANENTE

Segundo desenho fornecido pelo fornecedor a distância entre o centro de rotação e o centro de gravidade do conjunto antena/motor é de 42 mm, com se pode verificar na Figura 3.3.6. Neste caso resta quantificar a excentricidade da própria torre, relativamente ao que foi referido anteriormente a cerca da varanda, à cota 35 m que tem cerca de 1 m em consola, por 3 metros de largura, coincidente com a torre.

Para a situação de funcionamento da antena, designado regime permanente, fisicamente o movimento é circular uniforme, sendo que a aceleração é exclusivamente centrípeta e dada pela equação (3.3.1) e

a posição da antena num dado instante é dado pela equação (3.3.2). Assim tem-se duas forças centrifugas opostas entre si, com sentidos contrários. Na Figura 3.3.7 apresenta-se um esquema do equilíbrio de forças nesta situação na, sendo a velocidade angular constante.

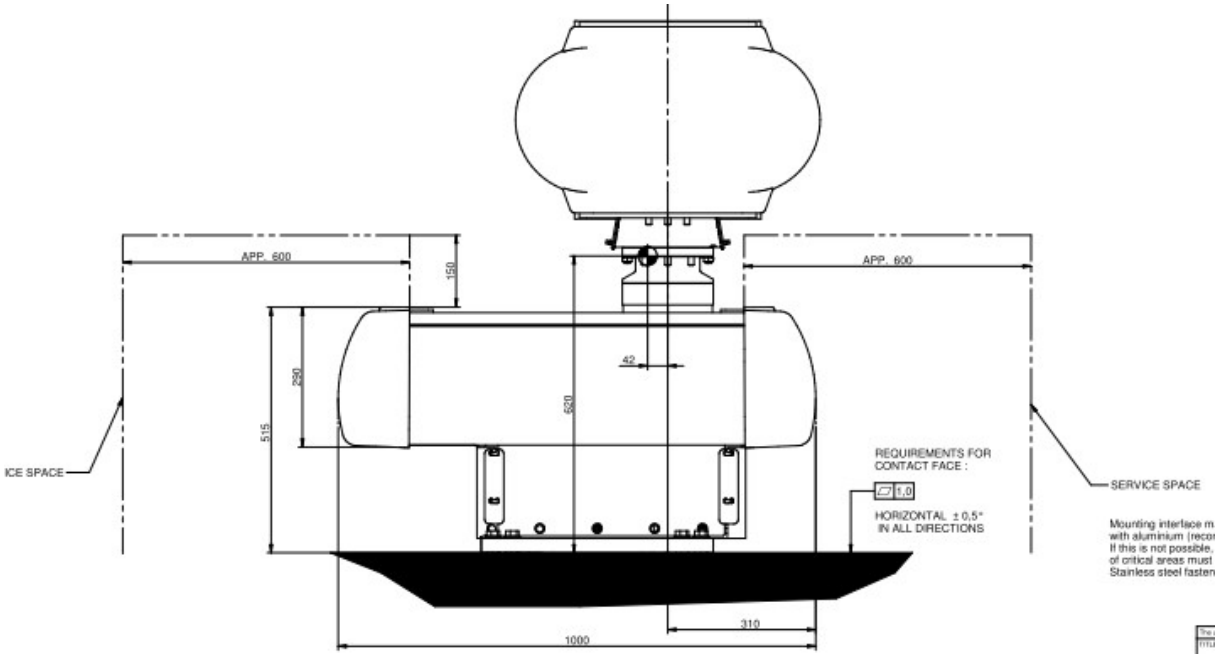



*Figura 3.3.6– Excentricidade do motor face ao centro de rotação da antena*

Força centrípeta

$$F_C = m.a_c = m.\frac{v^2}{R} = m.\omega^2.R \qquad (3.3.1)$$

$M$ - Massa da partícula;

$a_c$ - Aceleração centrípeta;

$\omega$ - Velocidade angular;

$R$ - Raio da trajetória.

Da resolução da equação do movimento (PFD para sólidos em movimento de rotação) resulta a seguinte solução temporal do movimento circular, dada pela expressão (3.3.2):

$$\theta = \frac{1}{2} \times a_c \times t^2 \qquad (3.3.2)$$

$\theta$ - Deslocamento angular ou rotação instantânea do radar em movimento permanente

$t$ - Instante t em segundos

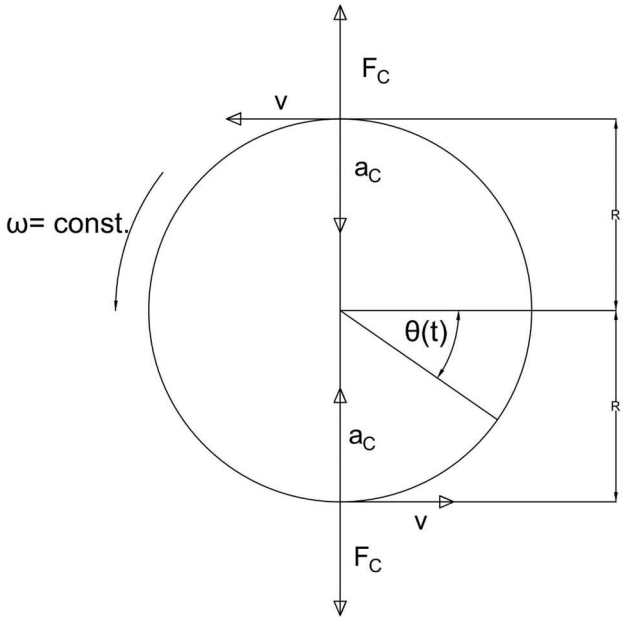



*Figura 3.3.7– Esquema de forças no caso de regime permanente*

### 3.3.2 MOVIMENTO EM REGIME TRANSITÓRIO

No regime transitório, fisicamente o movimento é uniformemente variado, sendo que a resultante da aceleração passa a ter duas componentes, a componente centrípeta que aponta para o centro da trajetória circular e a componente tangencial ao movimento circular. A componente centrípeta é expressa de igual à do movimento uniforme, e, a componente de aceleração tangencial $a_t$ pela equação (3.3.3):

$$a_t = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}\left(R.\frac{d\theta}{dt}\right) = \frac{d}{dt}(R.\omega) = R.\alpha \qquad (3.3.3)$$

Os braços das forcas tangenciais geram um binário dado pela equação (3.3.4):

$$M_b = F_{t.}(2R) = m.a_{t.}(2R) = 2.mR^2.\alpha \qquad (3.3.4)$$

Equação de movimento é traduzida pela expressão (3.3.5):

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2 \qquad (3.3.5)$$

A aceleração angular é $\alpha$ de 30 $rad/s^2$ e atinge a velocidade máxima de 60 rpm

Através da equação da velocidade equação (3.3.6), que é obtida derivando a equação de movimento (3.3.5) obtém-se um valor da aceleração angular $\alpha$:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \qquad (3.3.6)$$

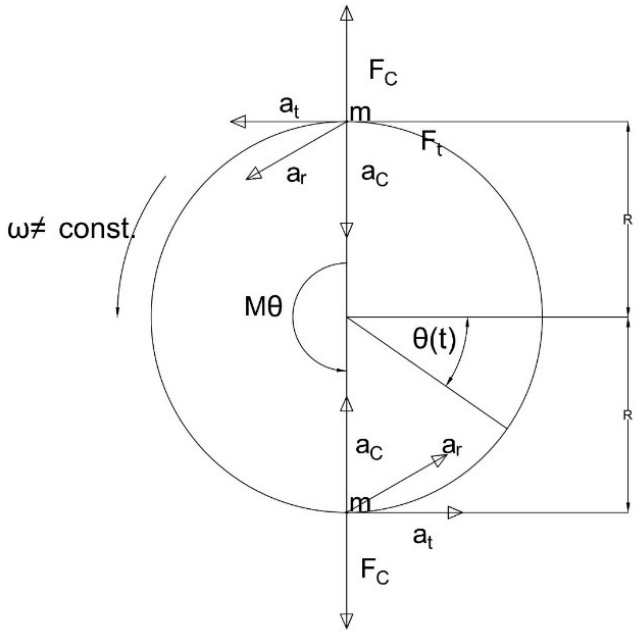



*Figura 3.3.8-Esquema de forças no caso de regime transitório*

### 3.3.3 CÁLCULO DAS EXCENTRICIDADES

O centro de gravidade da antena com motor incluído (CG) está localizado a uma distância de 42 mm do centro de rotação da antena CR como se pode verificar na e Figura 3.3.9.

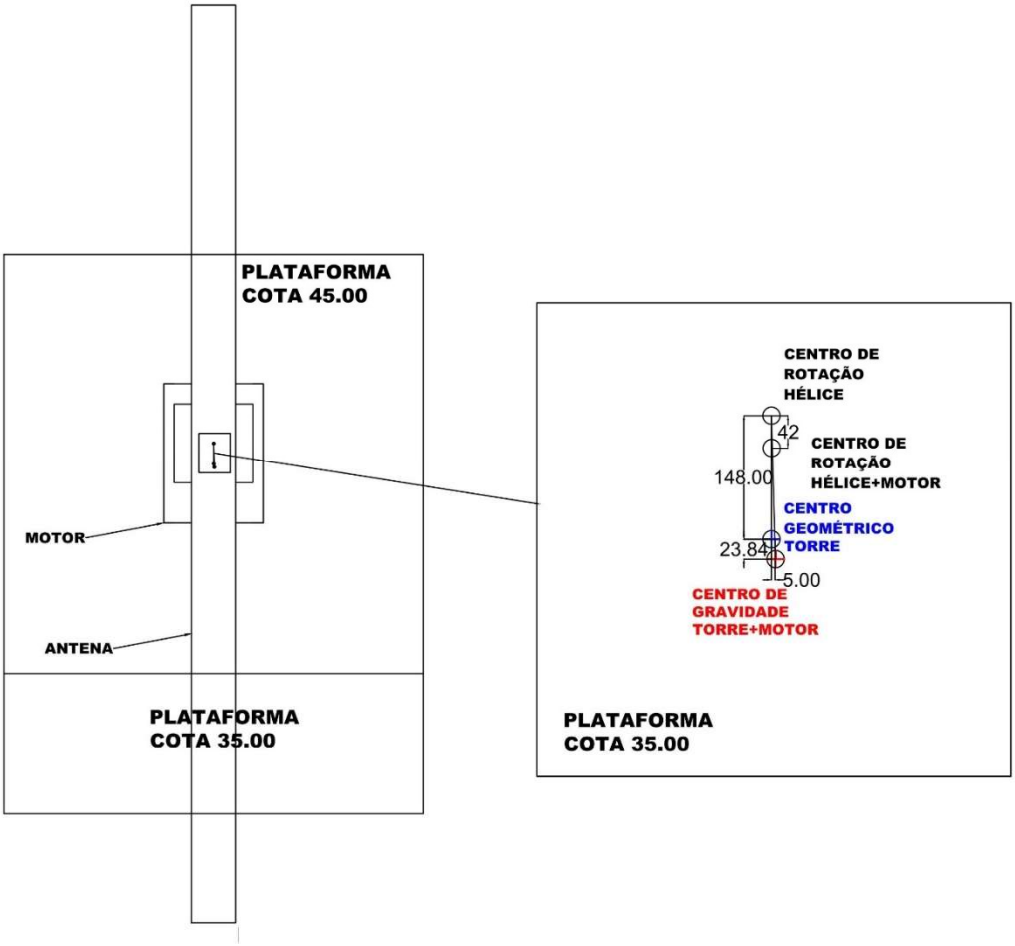



*Figura 3.3.9 – Esquema de excentricidades*

### 3.3.4 CÁLCULO DA FORÇA LIVRE (FREE FORCE)

Segundo o Eurocódigo 1, EC1 parte 3 (NP-EN-1991-1-3 2006), pode ser calculada a força livre (free force $F_s$), da antena, a qual é pela equação (3.3.7):

$$F_s = m_R \omega_{r(} \omega_r e_M) \qquad (3.3.7)$$

Onde:

$F_s$ - Força do eixo de rotação;

$m_R$ - Massa eixo de rotação;

$\omega_R$ - Frequência circular do eixo de rotação em (rad/s);

$e_M$ - Excentricidade da massa do eixo de rotação;

$\omega_{R,}\, e_M$ - Precisão do balanceamento do eixo de rotação, expresso como amplitude de velocidade.

Um eixo de rotação possui normalmente dois tipos de movimento de corpo rígido, a rotação pura quando o centro de massa gira em torno do eixo geométrico, e o movimento de precessão, que é a vibração orbital do centro geométrico em relação à linha de equilíbrio dos apoios.

As vibrações podem ser síncronas, quando a velocidade de rotação for igual à velocidade orbital, ou assíncronas quando forem diferentes.

Para a velocidade de operação máxima da antena 60 rpm a força livre é constante e tem o valor indicado na Tabela 4.5.2, sendo que sempre que uma dada massa da hélice se afasta do centro de gravidade da antena, a outra massa diametral oposta aproxima-se do centro de gravidade da antena. A equação que define a força centrípeta para os braços da antena, genericamente é dada pelas equações (3.3.8) e (3.3.9).

**FORCA CENTRÍPETA 1**

$$FC1 = 0.42 + 3.28 * cos(2\pi \times t) \quad (3.3.8)$$

**FORÇA CENTRÍPETA 2**

$$FC2 = 0.42 + 3.28 * cos(2\pi \times t + \pi) \quad (3.3.9)$$

A resposta de um sistema de um Grau de Liberdade; (SDOF) a uma excitação harmónica causada pela força livre expressa anteriormente é dada pela solução da equação geral (3.3.10), conforme (Clough and Penzien 1975).

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = po\ sin\ \varpi t \quad (3.3.10)$$

$m$ - Massa do sistema $(t)$;

$c$-Amortecimento de sistema $(kNs/m)$;

$k$ - Rigidez do sistema $(kN/m)$;$\ddot{u}$ – Aceleração do sistema $(m/s^2)$;

$\dot{u}$- Velocidade do sistema $(m/s)$;

$u$ – Deslocamento do sistema$(m)$

$p_0$- Carga estática $(kN)$;

$\varpi$ – Frequência da excitação $(Hz)$;

$t$- Tempo$(s)$.

A solução particular é dada pela equação (3.3.11).

$$u = Ucos\ (\varpi t - \alpha) + e^{-\xi\omega_n t}(C_1 cos(\omega_d t) + C_2 sen\ (\omega_d t) \quad (3.3.11)$$

$\alpha$ – Ângulo de fase;

$\omega_d$ - Frequência natural amortecida;

$\xi$ – Coeficiente de amortecimento;

$C_1$, $C_2$ – Constante das condições iniciais;

$$U = \frac{u_{s0}}{[(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2]^{\frac{1}{2}}} \qquad (3.3.12)$$

$U$ -Deslocamento estacionário;

$u_{s0}$ – Carga estacionaria;

$r$ - Relação entre frequência excitadora e frequência natural.

$$u_{s0} = \frac{p_0}{k} \qquad (3.3.13)$$

$$r = \frac{\varpi}{\omega_n} \qquad (3.3.14$$

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\xi^2} \qquad (3.3.15)$$

Segundo (Clough and Penzien 1975) e (Chopra 2014) "Na equação (3.3.11), o termo $\cos(\varpi t)$, fornece a oscilação da frequência de excitação, os termos $\cos(\omega_d t)$ e $\text{sen}\,(\omega_d t)$, fornecem a oscilação para a frequência natural do sistema. A primeira é a oscilação estacionária, independentemente das condições iniciais da oscilação. A segunda, a oscilação transitória, que depende das condições iniciais dada oscilação, deslocamento e velocidade, existindo mesmo que estas condições iniciais sejam diferentes de zero.".

## 3.4 FUNCIONAMENTO DE UM TMD ÓTIMO

Considerando a antena em movimento à sua frequência de operação máxima, 1 Hz, onde a força varia em função do tempo, esta induz uma ação harmónica na estrutura, dada por $P_0 sin(\varpi t)$, sendo ($\varpi = 2\pi f = 2\pi(1) = 2\pi\, rad/s$).

Para mitigar a oscilação da antena foi estudado o controlo de vibração através da técnica de TMD, com a função de diminuir a oscilação induzida pela antena. De acordo com a Figura 3.4.1, o sistema principal de massa M e rigidez K (ver Figura 3.4.1)representa a antena em movimento na Torre-Radar, onde atua a força $P_0 sin(\omega_1 t)$; o amortecedor de vibrações consiste na implementação de um sistema acessório comparativamente pequeno com parâmetros de massa m, e rigidez k, acoplado ao sistema K;M (ver Figura 3.4.1).

De acordo com (Hartog 1940) "A frequência natural $\sqrt{k/m}$ do amortecedor de vibrações indesejadas é escolhida para ser igual à frequência perturbadora $\omega$, uma vez que será mostrado que então a massa M não vibra, e que o pequeno sistema k,m, vibra de tal forma que a força na mola é em todo o instante igual e oposta a $P_0 sin(\omega t)$".

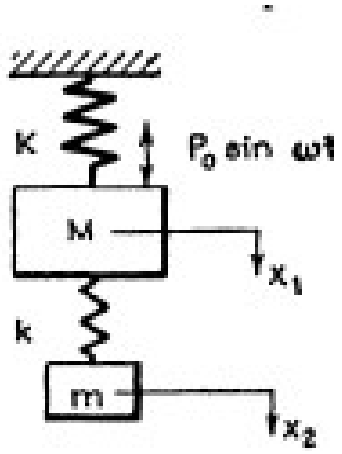



Figura 3.4.1 – Amortecedor de Vibração Dinâmica de Frahm 1909 adaptado de (Hartog 1940)

As equações de movimento da Figura 3.4.1, são dadas pelas equações (3.4.1).

$$\begin{cases} M\ddot{x_1} + (K+k)x_1 - kx_2 = P_0\sin(\omega t) \\ m\ddot{x_2} + k(x_2 - x_1) = 0 \end{cases} \quad (3.4.1)$$

A vibração forçada deste sistema tem a forma da equação (3.4.2):

$$\begin{aligned} x_1 &= a_1\sin(\omega t) \\ x_2 &= a_2\sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3.4.2)$$

Neste caso como só tem termos $x_1, x_2, \ddot{x_1} e \ddot{x_2}$, depois de duas derivações a função seno mantem-se, sendo proporcionais à função seno, a equação diferencial (3.4.1), transforma-se na equação algébrica (3.4.3)

$$\begin{cases} a_1(M\omega^2 + K + k) - ka_2 = P_0 \\ -ka_1 + a_2(-m\omega^2 + k) = 0 \end{cases} \quad (3.4.3)$$

Esta equação na forma adimensional torna-se me na equação (3.4.4).

$$\begin{cases} \dfrac{a_1}{x_{est}} = \dfrac{1 - \dfrac{\omega^2}{\omega_a^2}}{\left(1 - \dfrac{\omega^2}{\omega_a^2}\right)\left(1 + \dfrac{k}{K} - \dfrac{\omega^2}{\Omega_n^2}\right) - \dfrac{k}{K}} \\ \dfrac{a_2}{x_{est}} = \dfrac{1}{\left(1 - \dfrac{\omega^2}{\omega_a^2}\right)\left(1 + \dfrac{k}{K} - \dfrac{\omega^2}{\Omega_n^2}\right) - \dfrac{k}{K}} \end{cases} \quad (3.4.4)$$

Onde:

$x_{st} = \frac{P_0}{K}$ – Deslocamento estático do sistema principal

$\omega_a^2 = \frac{k}{m}$-Frequencia natural do amortecedor

$\Omega_n^2$-Frequência natural do sistema principal

$\mu = \frac{m}{M}$-Rácio de massa

A amplitude $a_1$da massa principal é zero quando o numerador $1 - \frac{\omega^2}{\omega_a^2}$ é zero, ocorrendo esta situação quando a frequência da força é igual à frequência natural do sistema amortecedor. Nestas circunstâncias quando $\omega = \omega_a$, a primeira equação de (3.4.4)(4.8.4), é zero, ficando o segundo termo da equação reduzido a:

$$a_2 = -\frac{P_0}{k} \tag{3.4.5}$$

A massa principal fica em repouso e a massa do sistema amortecedor de movimento $-\frac{P_0}{k}\sin(\omega t)$, igual e oposta à excitação externa. A adição do sistema amortecedor só faz sentido quando o sistema principal se encontra em ressonância ou perto da ressonância. Neste caso a equação (3.4.4)(4.8.4), pode ser reescrita dando origem à equação (3.4.6)

$$\begin{cases} \frac{a_1}{x_{est}} = \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_a^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_a^2}\right)\left(1 + \frac{k}{K} - \frac{\omega^2}{\Omega_n^2}\right) - \mu}\sin(\omega t) \\ \frac{a_2}{x_{est}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_a^2}\right)\left(1 + \frac{k}{K} - \frac{\omega^2}{\Omega_n^2}\right) - \mu}\sin(\omega t) \end{cases} \tag{3.4.6}$$

Neste caso os denominadores são iguais, o denominador contém um termo proporcional a $(\frac{\omega^2}{\omega_a^2})^2$, um termo independente a $(\frac{\omega^2}{\omega_a^2})^1$, e um termo independente deste rácio. Quando igualada a zero, o denominador é uma equação quadrática em $\frac{\omega^2}{\omega_a^2}$, que tem necessariamente duas raízes. Estas duas raízes são frequências ressonantes do sistema. Caso uma das amplitudes se torna infinita, também a outra amplitude se torna infinita, e consequentemente os dois denominadores têm de ser o mesmo.

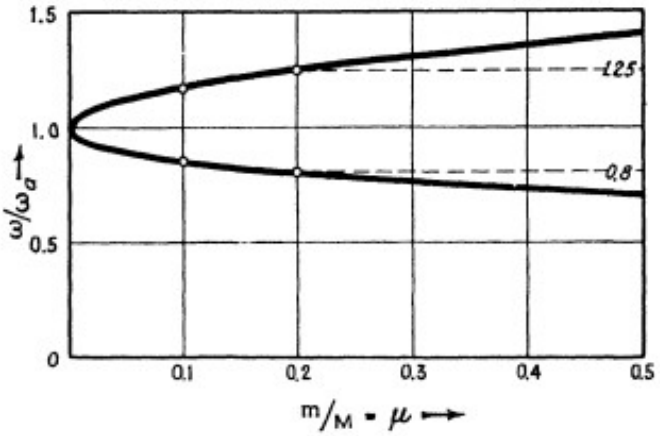



*Figura 3.4.2- Duas frequências de ressonância em função do rácio de massa μ, pela equação (3.4.7); adaptado de (Hartog 1940)*

$$(\frac{\omega^2}{\omega_a^2})^2 = \left(1+\frac{\mu}{2}\right) \pm \sqrt{\mu + \frac{\mu^2}{4}} \quad (3.4.7)$$

A relação gráfica desta equação é visualizada na Figura 3.4.2, onde se pode observar que pora cada amortecedor há duas frequências naturais do sistema combinado.

O dimensionamento ótimo de um amortecedor de massa sintonizadas consiste em sintonizar os parâmetros md, Kd e Cd, com o intuito de diminuir os deslocamentos estruturais. Uma estrutura sem amortecimento sujeita a uma ação dinâmica harmónica, $F(t) = F_0 sen\,(\varpi t)$, tem a sua curva de amplificação dinâmica dada pela expressão (3.4.8):

$$\frac{X_1}{X_{1,est}} = \sqrt{\frac{(2\xi_2 r_1 q)^2 + (r_1^2 - q^2)^2}{\{r_1^2 - [1+(1+\mu)q^2]r_1^2 + q^2\}^2 + (2\xi_2 r_1 q)^2[1 - r_1^2(1+\mu)]^2}} \quad (3.4.8)$$

Em que:

$\xi_2$- Coeficiente de amortecimento do TMD; $\xi_2 = \frac{c}{2\sqrt{km}}$

$r_1$ – Razão entre frequência de excitação e frequência inicial do sistema; $r_1 \frac{\varpi}{\omega}$

q- Razão entre frequência do TMD e a frequência inicial do sistema;$q = \frac{\omega_{TMD}}{\omega}$

$\mu$ – Razão entre massa e massa do TMD e massa do sistema 1 GL (SDOF);$\mu = \frac{m}{M}$

Através deste procedimento é conseguido um valor de que conduz a um dimensionamento ótimo, podendo então recorrer-se às equações (3.4.9) e (3.4.10):

$$q_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (3.4.9)$$

$$\xi_{2,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (3.4.10)$$

Em estruturas com amortecimento a curva de amplitude do movimento da massa principal vem:

$$\frac{x}{x_{st}} = \sqrt{\frac{(2\xi_2 r_1 q)^2 + (r_1^2 - q^2)^2}{2r_1^2[\xi_2(r_1^2(1+\mu)-1) + \xi_1(r_1^2 - q^2)]^2 + [\mu q^2 r_1^2 - (r_1^2 - 1)(r_1^2 - q^2) + (2r_1)^2\xi_1\xi_2]^2}} \quad (3.4.11)$$

## 3.5 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE ESTRUTURAL DA FUNDAÇÃO EM BLOCO, PELO MÉTODO DE SULZBERGER

Tendo por base o método tradicional desenvolvido por Sulzberger, considera-se um bloco prismático de secção transversal b x h (de base quadrada com lado b e altura h), solicitado verticalmente por P (o seu peso próprio , do poste que nele se apoia e outros equipamento permanentes adicionais) e ainda por uma força lateral F a uma distância d acima do bloco, conforme representado na Figura 3.5.1. Assume-se igualmente todas as considerações da metodologia de Sulzberger, tais como:

Para solos sem coesão (tipo areias) o centro instantâneo de rotação (CIR) do bloco é o ponto O também coincidente com o centro geométrico e de gravidade do bloco;

Para solos de comportamento rígido ou extremamente resistentes, o CIR seria o ponto O" junto ao canto inferior da base do bloco;

Para solos de comportamento intermédio do tipo plástico o CIR estaria sensivelmente localizado no ponto O', à distância de b/4 à direita (ou à esquerda) e h/6 abaixo do centro geométrico, conforme representado na Figura 3.5.1.

A resistência do solo é nula à superfície e cresce proporcionalmente à profundidade.

As forças de atrito ao longo das faces verticais do bloco (e também ao longo da base horizontal) podem ser conservativamente desprezadas;

O bloco de ancoragem pode rodar pequenos ângulos α tais que tg(α)=0,01, sem grandes variações das características resistentes do solo.

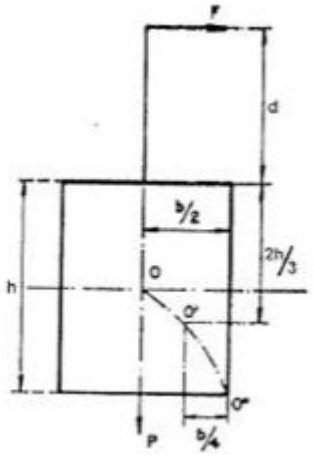



*Figura 3.5.1 - Localização aproximado do CIR, conforme a natureza do solo*

A aplicação destas considerações a blocos de ancoragem prismáticos e tais que d/h>5, apoiados em solos de resistência média e comportamento plástico, permitiu o desenvolvimento prático por Sulzberger (também conhecido por Método Suíço). Segundo este método e de acordo com a Figura 3.5.2, nas faces laterais verticais do bloco de ancoragem desenvolvem-se impulsos parabólicos horizontais de amplitude $\sigma_1$ e $\sigma_2$ devidos ao solo lateral envolvente, e junto ao pé da base do bloco desenvolvem-se pressões lineares recativas do solo de fundação de amplitude $\sigma_3$. Estas amplitudes dos impulsos às pressões são expressas por:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= C_{I1} h/3 \tan\alpha \\ \sigma_2 &= C_{I2} h/9 \tan\alpha \\ \sigma_3 &= \sqrt{\frac{2C_b P tan\alpha}{b}} \end{aligned} \qquad (3.5.1)$$

Sendo $C_{I1}$ e$C_{I2}$ respetivamente o coeficiente lateral de compressibilidade do solo (ou do terreno) é o coeficiente lateral de compressibilidade do solo junto à base do bloco;

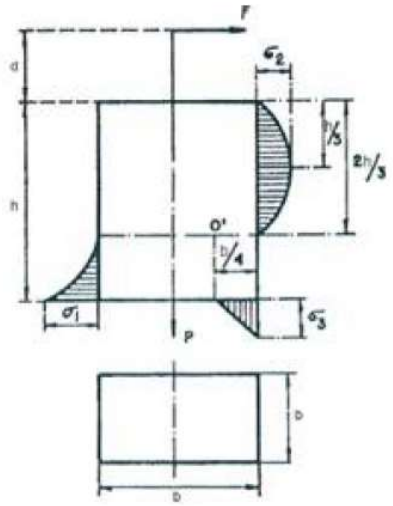



Figura 3.5.2 - Diagrama de impulsos laterais e de base sobre o bloco de ancoragem

Os coeficientes laterais/base do solo (para solos mais comuns) à profundidade de referência de 2m, propostos nas décadas de 60 e 70 são expressos na Tabela 3.5.1:

Tabela 3.5.1 - Parâmetros mecânicos de solos tipos

| *Tipo Solo* | $\gamma\ (KN/m^3$ | $\sigma_{adm}\ (kPa)$ | $C_l\ ou\ C_b\ (kN/m^3$ | $\mu$ |
|---|---|---|---|---|
| *Areia fina húmida* | *17* | *80* | *15000* | *0,5* |
| *Argila branda* | *17* | *80* | *30000* | *0,4* |
| *Argila semi-rigida* | *17* | *180* | *65000* | *0,5* |
| *Cascalho rolados e compacto* | *17* | *500* | *1450000* | *0,5* |

Em que:

$\gamma$ - Representa o peso volúmico do solo;

$\sigma_{adm}$ - Tensão admissível do solo;

$\mu$ - Coeficiente de atrito na superfície de contacto entre o terreno e o betão.

O momento de derrube do bloco de ancoragem relativamente ao CIR em O', devido à força horizontal F aplicada a uma distância d acima do bloco é expresso pela equação (3.5.2):

$$M_{d,sd} = F\left[d + \frac{2h}{3}\right] \qquad (3.5.2)$$

O momento resistente em torno do CIR em O', devido à atuação dos referidos diagramas de pressões nas faces laterais e na base do bloco de ancoragem, é expresso pela equação (3.5.3):

$$M_{r,Rd} = \frac{1}{3}\sigma_1 \frac{h}{3} b \left[\frac{3}{4}\frac{h}{3}\right] + \frac{2}{3}\sigma_2 \frac{2h}{3} b \left[\frac{1}{2}\frac{2h}{3}\right] + \frac{1}{2}\sigma_3 \frac{b}{3} b \left[\frac{2}{3}\frac{b}{4}\right] + P\frac{b}{4} \qquad (3.5.3)$$

Com todas estas considerações sobre a aplicação do método Suíço, e com considerações adicionais complementares de (Carneiro De Barros 2001) realizou-se a verificação da estabilidade do bloco e fundação da Torre-Radar conforme é tradicionalmente aplicado pelos projetistas estruturais na Metalogalva S.A.. No capítulo 4, (parágrafo 4.2.2) será apresentado a verificação do bloco de fundação do caso prático desta tese, através desta formulação apresentada.

# 4
# CASO DE ESTUDO: RESULTADOS COMPARATIVOS

## 4.1 LOCALIZAÇÃO DA TORRE-RADAR

Esta Torre-Radar em estudo localiza-se em Aguçadoura-Póvoa de Varzim, a uma distância ao mar de cerca de 250 m. Na Figura 4.1.2 pode-se visualizar a localização numa zona costeira junto de algumas habitações, com as coordenadas geográficas constam na Tabela 4.1.1.

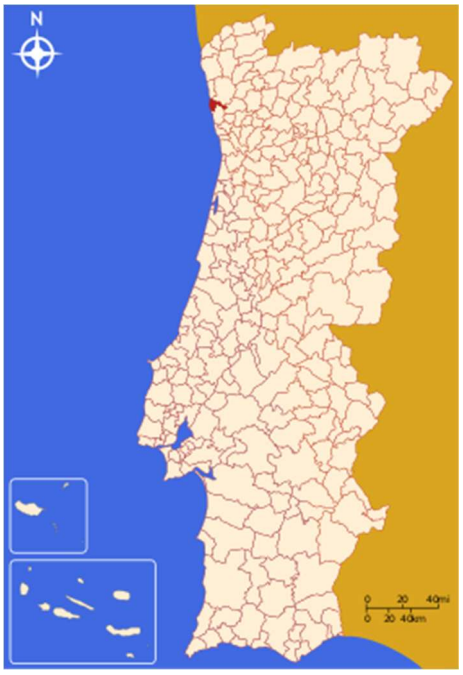



*Figura 4.1.1 – Localização do Concelho de Póvoa de Varzim*




*Figura 4.1.2- Localização da Torre-Radar*

Tabela 4.1.1 – Coordenadas Geográficas da Torre-Radar

| *Latitude* | *Longitude* |
|---|---|
| *41.424419°* | *-8.782019°* |

## 4.2 CARATERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

### 4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Na Tabela 4.2.1 são apresentadas as características do solo de acordo com levantamento geotécnico cedido pela Metalogalva S.A..

No levantamento efetuado verifica-se que até a uma profundidade de 1.7 m existe um estrato de areia de duna, que do ponto de vista geotécnico tem características de resistência residuais, tendo se de ser removido, a segunda camada de solo sob a areia de duna é um uma camada de areia, que apresenta bons parâmetros de resistência, embora só tenha uma espessura de 0.20 m. A partir da profundidade de 1.9 m o terreno é constituído por xistos e gauvaques, que apesar de apresentar diaclases e a xistosidade, não deixa de ser uma rocha, com bons parâmetros de resistência para as fundações da torre.

Tabela 4.2.1 - Características do solo

| *Tipo de Solo* | *Profundidade (m)* | *σ (kPa)* | *γt (kN/m3)* | *ϕ' (o)* | *C' (kN/m2)* | *E' (kN/m2)* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Areias de Duna* | *0-1.7m* | *-* | *17* | *25* | *0* | *1* |
| *Areias solta* | *1.7m-1.9m* | *600* | *19* | *36* | *10* | *30* |
| *Xistos e - grauvaques* | *+1.9m* | *600* | *22* | *42º* | *150* | *75* |

### 4.2.2 FUNDAÇÃO

O tipo de fundação mais corrente é o Bloco de Fundação, neste caso em estudo segundo estas dadas as características do solo, terá de ser removido além das areias, que são tarefa fácil, uma considerável parte de xisto, que consoante a sua fratura pode ser uma tarefa fácil, envolvendo meios mecânicos, ou mais difícil sendo necessário recorrer a explosivos para o remover. Apesar de se estar a retirar um material com boas características mecânicas, este procedimento é necessário para depois se preencher de betão para materializar o Bloco de Fundação. O Bloco de Fundação tem dimensões tais que suporta as ações da torre essencialmente pelo seu peso próprio, podendo ou não ter uma armadura mínima quadrada junto da rocha. Sendo assim a melhor solução será aproveitar a rocha como material de fundação, e assentar a fundação diretamente na rocha, embora devido às ações na torre metálica, a fundação teria de ter uma altura e dimensão em planta considerável. Para evitar estas dimensões em planta desmensuradas, o mais apropriado seria materializar estacas moldadas na rocha em 4 pontos, podendo estes pontos ter o espaçamento dos apoios da torre metálica quadrada de 3m de lado, e por fim realizar um maciço de encabeçamento assente na rocha.

#### BLOCO DE FUNDAÇÃO

No cálculo considerou-se que o solo é constituído apenas por um estrato de areia em toda a sua profundidade, sendo a situação mais desfavorável por um lado, e simplificando bastante o cálculo por outro. As dimensões do Bloco de Fundação apresentadas na Tabela 4.2.2, foram obtidas através das disposições do método de Sulzberger, descrito no item 3.5 da capítulo 3, desta dissertação.

Tabela 4.2.2 – Dimensionamento do Bloco de Fundação

| *Dimensões do Bloco* | |
|---|---|
| *b (m)* | *4* |
| *h (m)* | *5* |
| *ct (kN/m3)* | *37500* |
| *tan(α)* | *0,01* |
| *Peso do Bloco* | |
| *P(kN) bloco* | *2000* |
| *P(kN) solo* | *382,5* |
| *P(kN) Torre* | *101,224* |
| *Ptotal(kN)* | *2483,724* |
| *u_solo* | *0,5* |
| *Angulo φ °* | *26,56505* |
| *b_atrito (m)* | *2,5* |
| *γ_solo (kN/m3)* | *17* |
| *Mresistente* | |
| *Mt (kN.m)* | *5208,333* |
| *Mb(kN.m)* | *3460,83* |
| *Mr(KN.m)* | *8669,163* |
| | |
| *Esforços em ELU na chapa de base da Torre* | |
| *Ms_base (kN.m)* | *6670,62* |
| *Vs_base (kN)* | *238,44* |
| *Ms_O' (kN.m)* | *7465,42* |

Como se pode verificar na Tabela 4.2.2 O bloco de fundação tem de ter dimensões 4 m de secção quadrada por 5 m de altura, para resistir à solicitação mais extrema que ocorre na torre metálica.

## 4.3 VENTO

Tendo em conta a localização da estrutura, bem como da respetiva envolvente, obtiveram-se os seguintes parâmetros da Tabela 4.3.1, definidos em 3.1.

Tabela 4.3.1-Parâmeros da Ação do Vento

| $Zona$ | $B$ |
|---|---|
| $Rugosidade$ | $II$ |
| $c_{dir}$ | 1·0 |
| $c_{season}$ | 1·0 |
| $v_{b·0}$ | $30\ m/s$ |
| $v_b$ | $30\ m/s$ |
| $z_0$ | $0{\cdot}003\ (m)$ |
| $z_{min}$ | $1{\cdot}00\ (m)$ |
| $\rho$ | $1{\cdot}25\ (Kg/m3)$ |
| $q_b$ | $5518{\cdot}125\ Pa$ |

Para quantificar as forças estáticas pelo Eurocódigo 1 EC1 (NP-EN-1991-1-4 2010), optou-se por dividir a estrutura em níveis de dois metros e meio, calculando para cada uma destas alturas a força nodal que acuta a cada dois metros e meio, sendo a força global do vento a soma das contribuições. Para o cálculo das forças foi efetuada uma medição das áreas para as alturas referidas, sendo que a torre tem menos área à medida que aumenta de altura. O cálculo da ação do vento foi efetuado segundo o Eurocódigo 1, e obteve-se uma dimensão horizontal por metro de altura de torre que é cerca de 1.18 $m^2/m$. Foi feita uma média por cada 5 m de torre, e para chegar a uma força nos nós de 2,5 em 2,5 foi multiplicada essa média (kN/m) por 2.5 m, chegando-se desta forma a um valor de força em cada nó de Torre-Radar em (kN).

Nos elementos estruturais foi calculada apenas a força estática do vento, por um lado porque não havia informação credível para o cálculo nos elementos acessórios como por exemplo escadas, e por outro, como a quantificação da força desequilibrada da antena radar é feita à custa do cálculo de forças estáticas aplicadas à própria antena radar e à torre (ver Figura 4.5.1 e Figura 4.5.2). Esta força concentrada na antena por exemplo, é aplicada no centro de rotação, o que faz com que tenha um efeito muito localizado quando o que se pretende é simular uma força distribuída. Por esse motivo e por uma questão de bom senso naõ foi contabilizada a força do vento na antena radar, sendo compensada pelo cenário de dimensionamento da força livre $F_s$ da antena radar. O parâmetros adotados, bem como resultados obtidos são apresentados Tabela 4.3.2Tabela 4.3.1 a Tabela 4.3.4.

Tabela 4.3.2 - Parâmetros intervenientes no cálculo pormenorizado do coeficiente CsCd

| *b (m)* | *h (m)* | *$V_m$ (m/s)* | *Iv* | *n1,x (Hz)* | *$f_L(z,n)$* | *$S_L(z,n)$* | *$c_f$* | *δa* | *δs* | *δ* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *3,00* | *45,00* | *52,88* | *0,10* | *1,47* | *13,77* | *0,02* | *1,66* | *0,14* | *0,05* | *0,19* |

Tabela 4.3.3 – Coeficiente CsCd (ANEXO B)

| *$B^2$* | *$\eta_h$* | *$\eta_b$* | *$R_h$* | *$R_b$* | *$R^2$* | *v (Hz)* | *$K_p$* | *CsCd* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *0,81* | *6,81* | *0,02* | *0,14* | *0,99* | *3,74* | *1,08* | *3,77* | *1,03* |

Tabela 4.3.4 -Cálculo das forças estáticas do vento pelo (NP-EN-1991-1-4 2010)

| *z(m)* | *Vento XX* | *VENTO YY* |
|---|---|---|
| *45* | *7,59* | *7,59* |
| *42,5* | *7,59* | *7,59* |
| *40* | *7,59* | *7,59* |
| *37,5* | *7,28* | *6,71* |
| *35* | *7,28* | *6,71* |
| *32,5* | *6,42* | *5,85* |
| *30* | *6,42* | *5,85* |
| *27,5* | *5,00* | *5,00* |
| *25* | *5,00* | *5,00* |
| *22,5* | *4,829* | *4,829* |
| *20* | *4,829* | *4,829* |
| *17,5* | *4,622* | *4,622* |
| *15* | *4,622* | *4,622* |
| *12,5* | *4,354* | *4,354* |
| *10* | *4,354* | *4,354* |
| *7,5* | *3,963* | *3,963* |
| *5* | *3,963* | *3,963* |
| *2,5* | *3,160* | *3,160* |
| *0* | | |

No final deste trabalho no ANEXO B, são apresentados os resultados, relativo à ação do vento, aplicados ao caso de estudo.

## 4.4 SISMO

Para ação sísmica foram seguidas as disposições do Eurocódigo 8, EC8 (NP-EN-1998-1 2010), que constam no ponto 3.2 desta tese. A localização da torre é em Aguçadoura, Póvoa doe Varzim, o tipo de terreno é predominantemente areia de duna sobre xistos e grauvaques definido em item 4.2 do capitulo 4, na Tabela 4.2.1 .

No que concerne ao tipo de terreno, para efeito de calculo sísmico no (NP-EN-1998-1 2010) segundo a Tabela 4.4.1, o tipo de terreno enquadra-se no tipo C de acordo com Tabela 3.2.4 em 3.2.5 adaptada do Eurocódigo 8.

Tabela 4.4.1- Aceleração máxima de referência $a_{gR}\,(\mathrm{m/s^2})$ nas várias zonas sísmicas adaptado de (NP-EN-1998-1 2010)

| *Portugal Continental* | | *Acão sísmica* | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | *Tipo 1* | | *Tipo 2* | |
| *Código do município* | *Designação* | *Zona sísmica* | *Aceleração* $a_{gR}\,(m/s^2)$ | *Zona sísmica* | *Aceleração* $a_{gR}\,(m/s^2)$ |
| *1313* | *Póvoa de Varzim* | *1.6* | *0,35* | *2.5* | *0,8* |

O espectro de resposta da Figura 4.4.1-Espectro de resposta espectral para sismo tipo II (maior aceleração, nas direções X e Y.) Figura 4.4.1 foi obtido através das equações (3.2.4) a (3.2.7), e a aprtir dos valores para tipo de terreno C, das Tabela 3.2.5 e Tabela 3.2.6 no item 3.2.5 capitulo 3. Sendo que o espectro de cálculo é dividido pelo coeficiente de comportamento $q$ que foi considerado para a estrutura da Torre-Radar de 1.5, a partir da Tabela 3.2.7 - Requisitos relativos à classe de secção transversal de elementos dissipativos em função da classe de ductilidade e do valor de referência do coeficiente de comportamentoTabela 3.2.7, e a classe de importancia $I$, segundo a Tabela 3.2.2 e Tabela 3.2.3 apresentadas no mesmo item 3.2.5 do capitulo 3, desta dissertação.

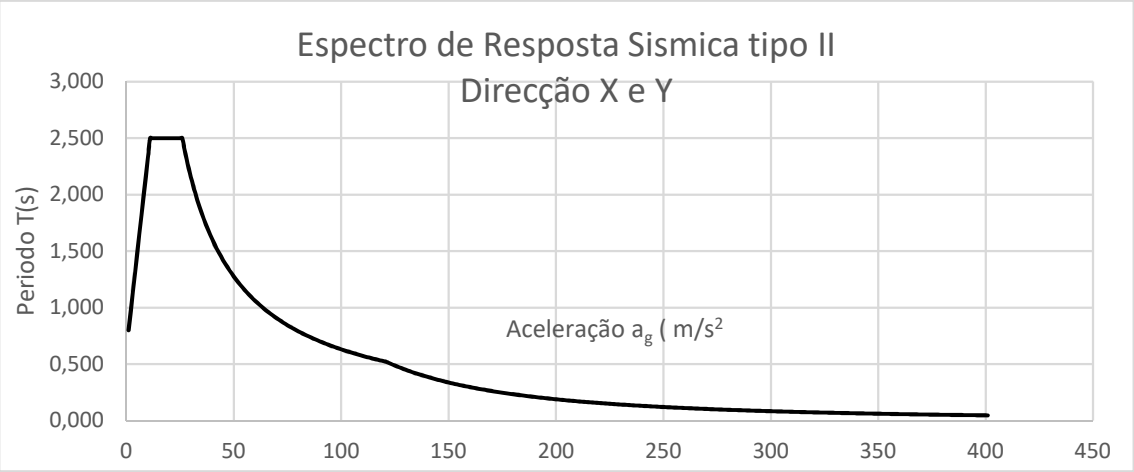



Figura 4.4.1-Espectro de resposta espectral para sismo tipo II (maior aceleração, nas direções X e Y.)

### 4.4.1 ANÁLISE MODAL

Foi executada uma análise modal no programa de cálculo Robot Structural Analysis, onde a partir da introdução do espectro de calculo definido na Figura 4.4.1, e para os 20 primeiros modos de vibração que representam cerca de 90% da resposta da estrutura, foram determinados, os parâmetros de

frequência $f$, de cada um dos modos, período $T$, fator de participação modal Γ, nas direções ortogonais x e y, e a massas modais efetivas, dadas por $\Sigma\Gamma_X^2/M$ Todos estes parâmetros de análise modal encontram-se na Tabela 4.4.2

Tabela 4.4.2 – Análise modal para ação sísmica

| *Modo* | *f (Hz)* | *T (s)* | $\Gamma_X$ | $\Gamma_y$ | $\Gamma_X^2/M_n$ | $\Gamma y^2/M_n$ | $\Sigma\Gamma_X^2/M_n$ | $\Sigma\Gamma y^2/M_n$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *1* | *1,47* | *0,68* | *50,32* | *-50,2* | *24,54* | *24,42* | *24,54* | *24,42* |
| *2* | *1,47* | *0,68* | *50,29* | *50,41* | *24,51* | *24,63* | *49,05* | *49,05* |
| *3* | *3,11* | *0,32* | *-19,96* | *18,95* | *3,86* | *3,48* | *52,91* | *52,53* |
| *4* | *3,15* | *0,32* | *18,8* | *19,83* | *3,42* | *3,81* | *56,34* | *56,34* |
| *5* | *5,23* | *0,19* | *0,66* | *-0,05* | *0* | *0* | *56,34* | *56,34* |
| *6* | *6,8* | *0,15* | *24,81* | *42,17* | *5,96* | *17,24* | *62,3* | *73,57* |
| *7* | *6,81* | *0,15* | *42,23* | *-24,87* | *17,29* | *6* | *79,59* | *79,57* |
| *8* | *9,82* | *0,1* | *-0,38* | *-0,29* | *0* | *0* | *79,59* | *79,57* |
| *9* | *10,5* | *0,1* | *0,23* | *0,3* | *0* | *0* | *79,59* | *79,57* |
| *10* | *10,64* | *0,09* | *0,08* | *0,09* | *0* | *0* | *79,59* | *79,57* |
| *11* | *10,76* | *0,09* | *-0,1* | *0,02* | *0* | *0* | *79,59* | *79,57* |
| *12* | *10,81* | *0,09* | *0,02* | *0,15* | *0* | *0* | *79,59* | *79,57* |
| *13* | *11* | *0,09* | *-0,3* | *-1,61* | *0* | *0,03* | *79,6* | *79,6* |
| *14* | *11,39* | *0,09* | *0,25* | *0,38* | *0* | *0* | *79,6* | *79,6* |
| *15* | *11,83* | *0,08* | *0,18* | *0,37* | *0* | *0* | *79,6* | *79,6* |
| *16* | *12,04* | *0,08* | *-0,57* | *0,68* | *0* | *0* | *79,6* | *79,61* |
| *17* | *12,5* | *0,08* | *0,53* | *0,5* | *0* | *0* | *79,6* | *79,61* |
| *18* | *12,88* | *0,08* | *-20,65* | *-19,8* | *4,13* | *3,8* | *83,73* | *83,41* |
| *19* | *13,05* | *0,08* | *-19,38* | *21,35* | *3,64* | *4,42* | *87,38* | *87,83* |
| *20* | *13,17* | *0,08* | *-0,66* | *-0,56* | *0* | *0* | *87,38* | *87,83* |

Na Figura 4.4.2 pode ser observado o deslocamento máximo para o espectro de resposta da Figura 4.4.1, obtido pela CQS (Combinação Quadrática Simples ) dada pela expressão (4.4.1):

$$u_{j,máx} = \sqrt{u_{j1,máx}^2 + u_{j2,máx}^2 + \cdots} \qquad (4.4.1)$$




*Figura 4.4.2 – Deslocamento máximo na direção x pelo CQS*

## 4.5 AÇÃO DA ANTENA

De acordo com a observação da torrequando a antena se encontra em movimento, é visível uma oscilação na torre.

Tendo em conta a situação de pleno funcionamento caracterizado por uma velocidade máxima de 60 rpm, foi feito um estudo por forma a caracterizar da melhor forma, a situação de funcionamento da antena, e determinar uma oscilação coerente com a que acontece na realidade.

Pela equação (3.3.7), que permite calcular a força livre $F_s$ (free force) apresentada na Tabela 4.5.1, foram estudadas várias situações, que originam, forças de diferentes intensidades, para a situação de funcionamento de velocidade angular $\omega_R$ máxima.

No cenário 1 apresentado na Tabela 4.5.2 ,foi calculada a força livre, para uma velocidade máxima $\omega_R$ de 60 rpm, ou seja, $2\pi$ rad/s, com 400 Kg, e 42 mm o valor da excentricidade $e_M$. Nestas condições a força livre $F_s$ tem o valor de 0.663 kN. Refira-se que esta força é aplicada no centro de rotação da antena.

Tabela 4.5.1-Força livre na antena radar

| $m_R$ (Kg) | $\omega_r$ (rad/s) | $e_M$ (m) |
|---|---|---|
| 400 | 2xπ | 0.042 |
| Fs (N) | 663.24 | |

Para o cenário 2, a força livre $F_s$ foi calculada de forma análoga ao cenário 1, mas neste caso a força livre foi decomposta em duas componentes, a primeira componente com a mesma intensidade e aplicação do cenário 1. A segunda componente do cenário 2 foi determinada pela mesma equação de força livre (3.3.7) que se encontra no item 3.3.4 do terceiro capitulo deste trabalho, com velocidade

angular $\omega_R$, 60 rpm, a massa $m_R$ de 480,5 Kg, (massa da plataforma á cota 45 m, e peso entre a plataforma á cota 45 e cota 40), a excentricidade segundo o eixo dos yy, $e_M$ de 162 mm. Esta segunda componente foi aplicada no centro geométrico da plataforma à cota 45 m. Na Tabela 3.2.2, é apresentado um resumo das várias forças determinadas para os vários cenários.

Tabela 4.5.2 – Força descompensada (free force), deslocamento máximo da estrutura no topo

| *Cenário* | *Parte Considerada* | *FS Total (N)* | *FS Parcial (N)* | *$M_R$ Parcial (Kg)* | *$M_R$ Total (kg)* | *ω (rad/s)* | *$e_M$ (m)* | *δ max(cm)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *1* | *Antena+ Motor* | *663,24* | *663,24* | *400,00* | *400,00* | *6,28* | *0,04* | *2,43* |
| *2* | *Plat_45 m* | *3470,71* | *2807,47* | *480,50* | *880,50* | *6,28* | *0,15* | *5,72* |
| *3* | *Plat_40 m* | *6064,91* | *2594,21* | *444,00* | *1324,50* | *6,28* | *0,15* | *6,82* |
| *4* | *1/8 Torre* | *8702,94* | *2638,03* | *451,50* | *1776,00* | *6,28* | *0,15* | *7,64* |
| *5* | *Plat_ 35 m* | *13152,26* | *4449,33* | *605,50* | *2381,50* | *6,28* | *0,19* | *8,62* |

Considerando todos os cenários, os mais plausíveis face aos deslocamentos que originam, são os cenários 1 e 2, que vão de encontro aos deslocamentos reais observados na torre.

Para obter os deslocamentos, devidos à ação dinâmica da $F_s$ (free force), utilizaram-se as diferentes forças com a intensidade dos cenários 1 e 2 respetivamente, associadas a uma excitação harmónica com velocidade angular $2\pi\ rad/s$. Estas forças foram aplicadas no eixo de rotação da antena no caso do cenário 1, e no cenário 2 aplicadas uma no centro de rotação e outra centro geométrico nas plataformas. Para cada uma das forças estáticas foi feita uma análise dinâmica no programa de cálculo Robot Structural Analisys 2019, associando uma excitação harmónica à $F_s$ estática. As aplicações das forças estáticas têm a localização das Figura 4.5.1 e Figura 4.5.2 respetivamente para o cenário 1 e cenário 2.

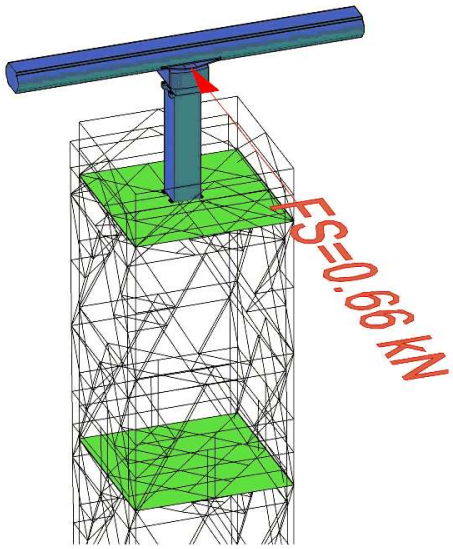



*Figura 4.5.1- Esquema de aplicação de forças livre - cenário 1*

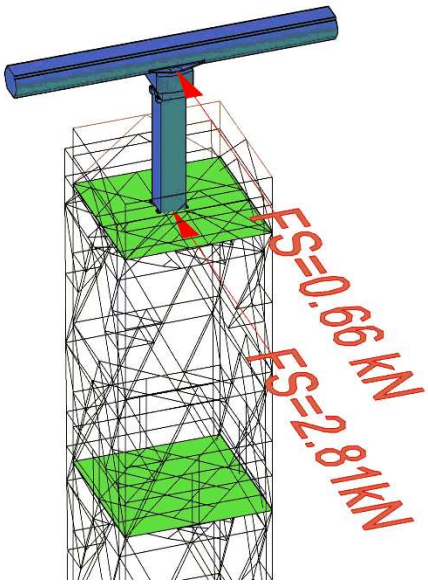



*Figura 4.5.2 - Esquema de aplicação de forças livre - cenário 2*

### 4.5.1 RESPOSTA A EXCITAÇÃO HARMÓNICA

A estrutura tem como primeira frequência natural $\omega_1$=1.47 Hz. Adotou-se um amortecimento $\xi$, de 2%, e uma frequência da excitação de 1 Hz, para a situação de funcionamento da antena, à velocidade de operação máxima. A metodologia adotada no software de calculo automático Robot Structural Analysis 2019, consistiu em aplicar a força livre, e executar uma análise dinâmica onde foram introduzidos os valores de amortecimento e de frequência de excitação. Foi efetuada uma análise harmónica para cada um dos cenários de forças livres, associando a força livre uma excitação harmónica com frequência 1Hz, segundo a Figura 4.5.6 variando a intensidade da força livre em função do tempo $t$. Desta forma foi preconizada uma análise dinâmica através da aplicação de forças estáticas, variando a sua direção até fazer o ciclo completo de oscilação da torre de 360º, ou vários ciclos, foram repetidas simulações fazendo variar as forças livre de 22,5º em 22,5º conforme se apresenta na Figura 4.5.3 . Os deslocamentos obtidos nos gráficos são a resposta à excitação harmónica dinâmica. Os deslocamentos obtidos da análise dinâmica descrita anteriormente encontram-se nos gráficos das Figura 4.5.1, para o cenário 1, e Figura 4.5.2 para o cenário 2.

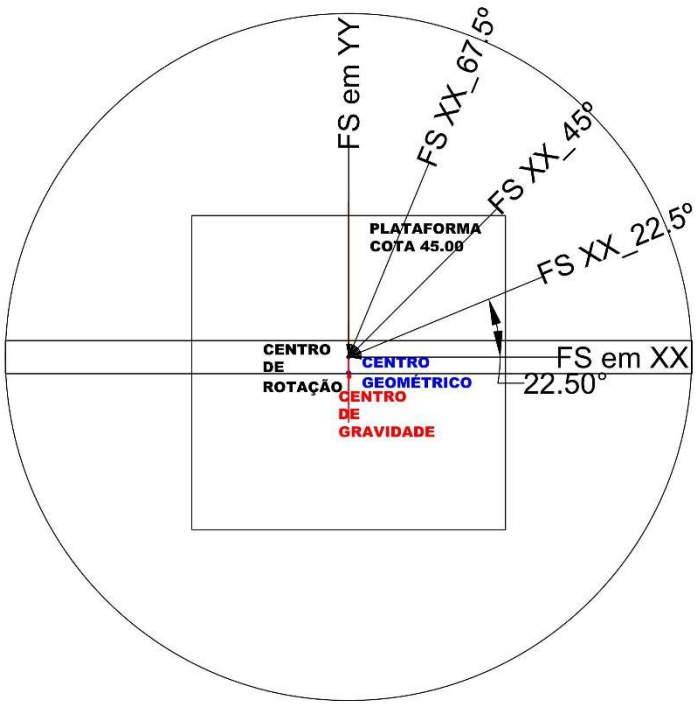



*Figura 4.5.3 – Variação da direção da força Livre $F_s$, para simular a ação harmónica dinâmica*

Para a torre em estudo a primeira frequência natural da estrutura é de $\omega_1 = 1.47$ Hz e $\varpi = 1$ Hz, onde $\varpi/\omega \approx 1$, sendo que a frequência de excitação quase igual á primeira frequência natural, o sistema é bastante sensível ao amortecimento, nestas circunstancias a amplitude da resposta pode ser muito superior à deformação estática, podendo concluir-se que a resposta é controlada pelo sistema de amortecimento.

O ângulo de fase $\alpha$, define o desfasamento da força e da resposta, que também varia com $\varpi/\omega$, neste caso $\varpi/\omega \approx 1$, log $\alpha = 90°$ ,para todos os valores de $\xi$ o deslocamento atinge o seu máximo quando a força passa pelos zeros.

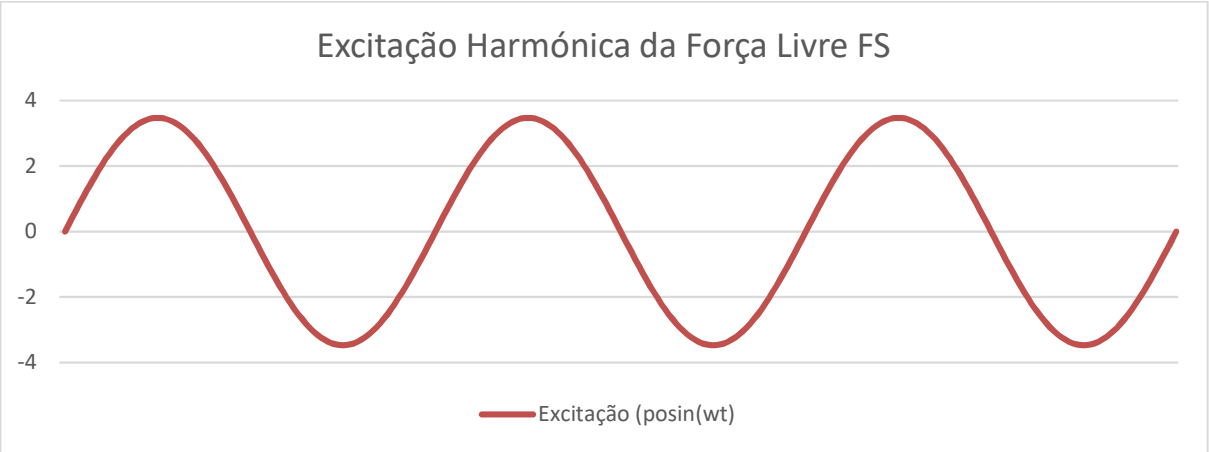



*Figura 4.5.4-Excitação Harmónica $F_s sin(\varpi t)$*

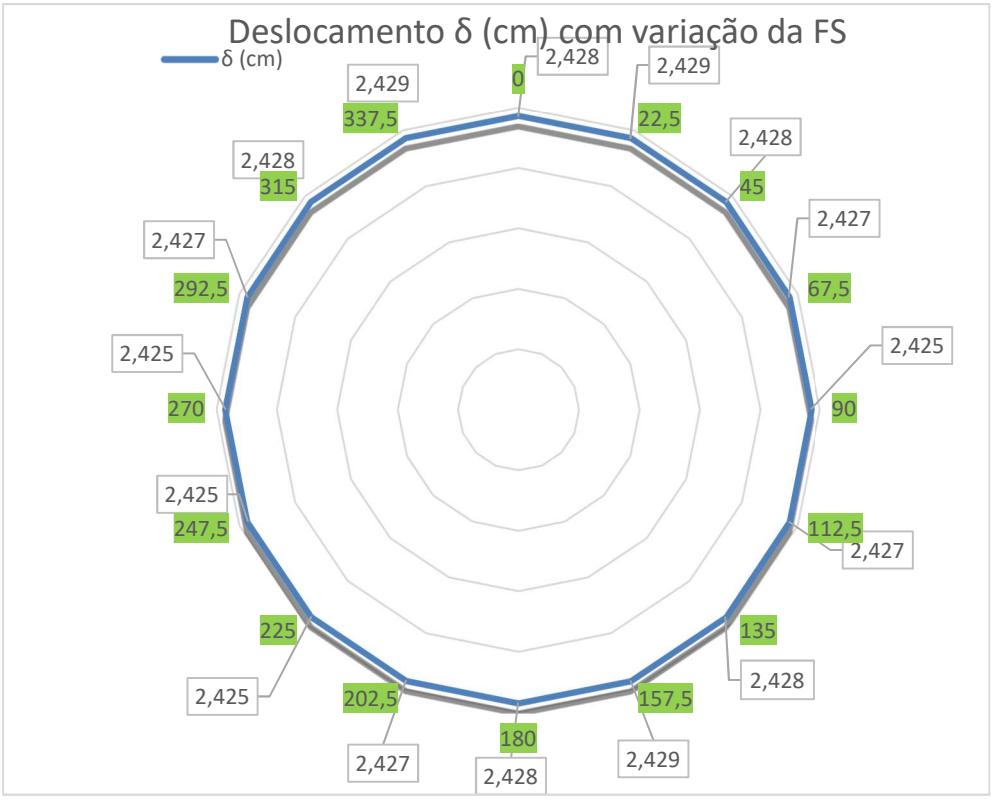



*Figura 4.5.5—Deslocamento em cm no topo da Torre-Radar devido á força de excitação do Cenário 1*

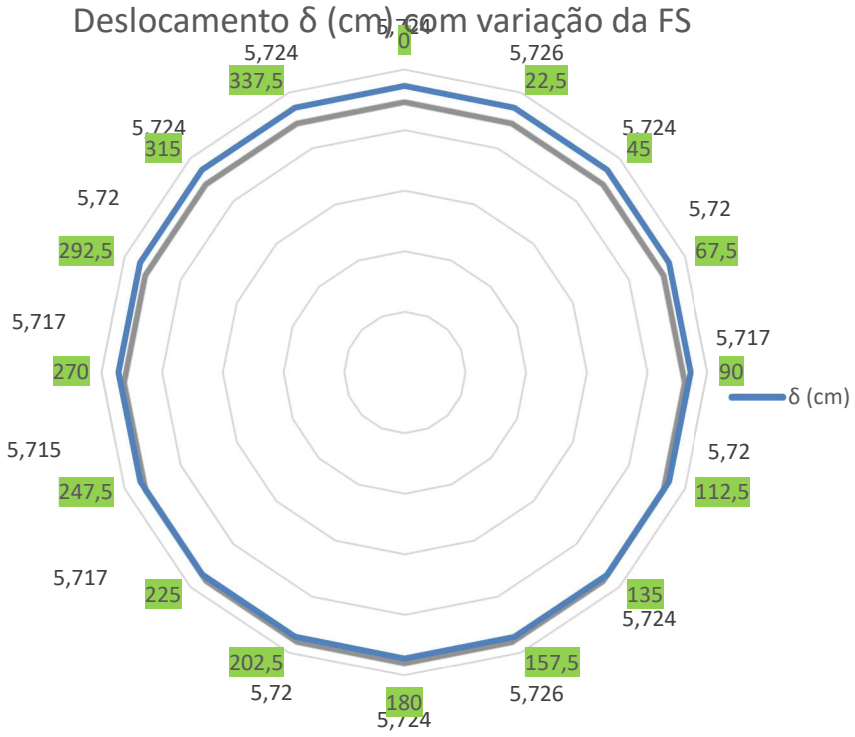



*Figura 4.5.6-Deslocamento em cm no topo da Torre-Radar devido à força de excitação do cenário 2*

O momento torsor provocado pela aceleração é angular dado pela equação (3.3.4) no item 3.3 do capítulo 3.Tem a intensidade de 1.87 kN/m, e não foi equacionada no dimensionamento por ter uma intensidade pequena na estrutura da Torre-Radar

## 4.6 COMBINAÇÃO DE AÇÕES

### 4.6.1 ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (ULS)

De acordo com o anexo A da (NP-EN-1993-3-1 2006), os coeficientes de confiança de torres, são apresentados de acordo com a sua localização, e são classificados, em três categorias com se pode verificar na Tabela 4.6.1.

Tabela 4.6.2- Classes de Confiança em Torres; adaptado de do Anexo A do (NP-EN-1993-3-1 2006)

| *Classe de Confiança* | |
|---|---|
| *3* | *Torres construídas em locais urbanos, ou onde o seu colapso é plausível de causar lesões ou perda de vidas; Torres usadas para comunicações vitais; outras grandes estruturas de onde as consequências de colapso são importantes* |
| *2* | *Todas as que não podem ser definidas na classe 1 ou 3* |
| *1* | *Torres construídas em espaços abertos, torres cujo colapso não é plausível de causar danos a pessoas* |

Mediante estas classes de confiança de torres da Tabela 4.6.2, são retirados os coeficientes para ações permanentes ou variáveis através da Tabela 4.6.3.

Tabela 4.6.3 – Coeficientes parciais para ações permanentes e variáveis retirada do Anexo a de (NP-EN-1993-3-1 2006)

| *Tipo de Ação* | *Classe de Confiança* | *Ações Permanentes* | *Ações variáveis (Qs)* |
|---|---|---|---|
| *Desfavorável* | *3* | *1.2* | *1.6* |
| | *2* | *1.1* | *1.4* |
| | *1* | *1.0* | *1.2* |
| *Favorável* | *Todas as Classes* | *1.0* | *0.0* |
| *Acidental* | | *1.0* | *1.0* |

**A COMBINAÇÃO DE AÇÕES FUNDAMENTAL, É A SEGUINTE:**

$$\sum_{j\geq 1}\gamma_{G,j}G_{K,j}\text{ "+" }\gamma_{k,1}Q_{k,1}\text{"+"}\sum_{j>1}\gamma_{Q,i}\psi_{0,1}Q_{k,1} \qquad (4.6.1)$$

**COMBINAÇÃO DE AÇÕES PARA AÇÃO SÍSMICA:**

$$\sum_{j\geq 1}G_{K,j}\text{ "+" }A_{Ed}\text{" + "}\sum_{j\geq 1}\psi_{2,i}Q_{k,i} \qquad (4.6.2)$$

Tabela 4.6.4 Valores de Valores de cálculo das ações (STR/GEO) (Conjunto B), retirada da (NP-EN-1990 2009), Anexo A1, Quadro A1.2(B)

| *Situações de projeto persistentes e transitórias* | *Ações permanentes* | | *Acção variável de base da combinação* *) | *Ações variáveis acompanhantes* *) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | *Desfavoráveis* | *Favoráveis* | | *Principais (caso existam)* | *Outras* |
| *Equação (4.6.1)* | $\gamma_{Gj,sup}G_{kj,sup}$ | $\gamma_{Gj,inf}G_{kj,inf}$ | $\gamma_{Q,1}Q_{k,1}$ | | $\gamma_{Q,i}\psi_{0,i}Q_{k,i}$ |

Tabela 4.6.5- Valores de cálculo das ações a utilizar nas situações de projeto acidentais e sísmicas

| *Situações de projeto* | *Ações permanentes* | | *Ações de acidente ou sísmicas de base da combinação* | *Ações variáveis acompanhantes* **) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | *Desfavoráveis* | *Favoráveis* | | *Principais (caso existam)* | *Outras* |
| *Sísmicas Equações (4.6.2)* | $G_{kj,sup}$ | $G_{kj,inf}$ | $\gamma_I A_{Ek}$ ou $A_{Ed}$ | | $\psi_{2,i}$* $Q_{k,i}$ |

*Os coeficientes $\psi_{2,i}$, foram retirados do (NP-EN-1990 2009), Anexo A.1,Quadro A1.1

Tabela 4.6.6- Quadro de resumo das combinações de ações para ULS

| *Ação Base* | *G (Peso Próprio)* | *Q1 (Ação da Antena)* | *Q2 (Sobrecarga nas Plataformas)* | *Q3 (Vento X, Y,45°)* |
|---|---|---|---|---|
| *E(sismo)* | *1.00* | *0.00* | *1x0.6* | *0.00* |
| *Q1 (Acão da Antena)* | *1.00* | *1.20* | *0.00* | *1.2x0.6* |
| *Q2 (Sobrecarga nas Plataformas*)* | *1.35* | *0.00* | *1.50* | *0.00* |
| *W (vento)* | *1.00* | *1.20x0.70* | *0.00* | *1.20* |

* Valor da sobrecarga nas plataformas segundo (NP-EN-1991-1-3 2006), ponto 2.3 recomenda o valor de 2 kN/m$^2$

### 4.6.2 ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO (SLS)

**COMBINAÇÃO CARACTERÍSTICA:**

$$\sum_{j\geq 1} G_{K,j} \text{ "+" } Q_{k,1} \text{"+"} \sum_{j>1} \psi_{0,1} Q_{k,1} \qquad (4.6.3)$$

**COMBINAÇÃO FREQUENTE:**

$$\sum_{j\geq 1} G_{K,j} \text{ "+"} \psi_{1,1} Q_{k,1} \text{"+"} \sum_{j>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \qquad (4.6.4)$$

**COMBINAÇÃO QUASE-PERMANENTE**

$$\sum_{j\geq 1} G_{K,j} \text{ "+"} \sum_{j\geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \qquad (4.6.5)$$

Tabela 4.6.7 Combinações SLS, retirada de (NP-EN-1990 2009), Anexo A1, Quadro A1.4

| *Combinação* | *Ações permanentes $G_d$* | | *Ações variáveis $Q_d$* | |
|---|---|---|---|---|
| | *Desfavoráveis* | *Favoráveis* | *De base da combinação* | *Outras* |
| *Característia* | *Gkj,sup* | *Gkj,in* | *Qk,1* | *$\psi$0,i Qk,i* |
| *Frequente* | *Gkj,sup* | *f Gkj,inf* | *$\psi$1,1 Qk,1* | *$\psi$2,i Qk,i* |
| *Quase-permanente* | *Gkj,sup* | *Gkj,inf* | *$\psi$2,1 Qk,1* | *$\psi$2,i Qk,i* |

Tabela 4.6.8 Combinação característica

| *Ação Base* | *G (Peso Próprio)* | *Q1 (Ação da Antena)* | *Q2 (Sobrecarga nas Plataformas)* | *Q3 (Vento X, Y, 45°)* |
|---|---|---|---|---|
| *Q1 (Acão da Antena)* | *1.00* | *1.00* | *0.00* | *1x0.60* |
| *Q2 (Sobrecarga nas Plataformas)* | *1.35* | *0.00* | *1.00* | *0.00* |
| *W (vento)* | *1.00* | *1.00x0.70* | *0.00* | *1.00* |

Tabela 4.6.9 Combinação Quase -permanente

| *Ação Base* | *G (Peso Próprio)* | *Q1 (Ação da Antena)* | *Q2 (Sobrecarga nas Plataformas)* | *Q3 (Vento X, Y e Z)* |
|---|---|---|---|---|
| *Q1 (Acão da Antena)* | *1.00* | *1x0.50* | *0.00* | *1x0.20* |
| *Q2 (Sobrecarga nas Plataformas)* | *1.35* | *0.00* | *1x0.50* | *0.00* |
| *W (vento)* | *1.00* | *1x0.20* | *0.00* | *1x0.50* |

Tabela 4.6.10 - Combinação Quase -permanente

| *Ação Base* | *G (Peso Próprio)* | *Q1 (Ação da Antena)* | *Q2 (Sobrecarga nas Plataformas)* | *Q3 (Vento X, Y e Z)* |
|---|---|---|---|---|
| *Q1 (Acão da Antena)* | *1.00* | *1x0.30* | *0.00* | *0.00* |
| *Q2 (Sobrecarga nas Plataformas)* | *1.35* | *0.00* | *1x0.30* | *0.00* |
| *W (vento)* | *1.00* | *0.00* | *0.00* | *1x0.30* |

Tabela 4.6.11 – Resumo de Combinações das Ações

| *Combinação* | *PP* | *Antena XX* | *Antena YY* | *Antena 45º* | *Vento XX* | *Vento YY* | *Vento 45º* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *1* | *1* | *1,2* | *0* | *0* | *1,2x0,6* | *0* | *0* |
| *2* | *1* | *1,2* | *0* | *0* | *0* | *1,2x0,6* | *0* |
| *3* | *1* | *1,2* | *0* | *0* | *0* | *0* | *1,2x0,6* |
| *4* | *1* | *0* | *1,2* | *0* | *1,2x0,6* | *0* | *0* |
| *5* | *1* | *0* | *1,2* | *0* | *0* | *1,2x0,6* | *0* |
| *6* | *1* | *0* | *1,2* | *0* | *0* | *0* | *1,2x0,6* |
| *7* | *1* | *0* | *0* | *1,2* | *1,2x0,6* | *0* | *0* |
| *8* | *1* | *0* | *0* | *1,2* | *0* | *1,2x0,6* | *0* |
| *9* | *1* | *0* | *0* | *1,2* | *0* | *0* | *1,2x0,6* |
| *10* | *1* | *1,2x0,7* | *0* | *0* | *1,2* | *0* | *0* |
| *11* | *1* | *1,2x0,7* | *0* | *0* | *0* | *1,2* | *0* |
| *12* | *1* | *1,2x0,7* | *0* | *0* | *0* | *0* | *1,2* |
| *13* | *1* | *0* | *1,2x0,7* | *0* | *1,2* | *0* | *0* |
| *14* | *1* | *0* | *1,2x0,7* | *0* | *0* | *1,2* | |
| *15* | *1* | *0* | *1,2x0,7* | *0* | *0* | *0* | *1,2* |
| *16* | *1* | *0* | *0* | *1,2x0,7* | *1,2* | *0* | *0* |
| *17* | *1* | *0* | *0* | *1,2x0,7* | *0* | *1,2* | *0* |
| *18* | *1* | *0* | *0* | *1,2x0,7* | *0* | *0* | *1,2* |

*A ação da antena é a componente máxima da resposta harmónica na direção considerada.

## 4.7 DIMENSIONAMENTO

No dimensionamento foram tidos em conta duas situações limite distintas e complementares, uma relativa ao funcionamento da antena à sua máxima força com velocidade de vento até 35 m/s, e outra situação limite é quando o vento atua na sua intensidade máxima e a antena apenas pode rodar a 30 rpm que é metade da sua velocidade máxima. Nestas duas situações subdivide-se cada cenário em duas situações; uma de funcionamento da antena na sua velocidade máxima a 60 rpm, onde a velocidade do vento é de 35 m\s. A outra situação corresponde ao funcionamento da antena a 30 rpm, com a velocidade máxima obtida para calculo das forças estáticas máximas (ver item 4.3, do capítulo quarto, e ANEXO A). Seguidamente na Tabela 4.7.1 e Tabela 4.7.2 são apresentados os valores que correspondem a cada uma das situações descritas para estados limites últimos (ULS).

Os esforços apresentados são os esforços na base de um montante e o deslocamento máximo para a combinação considerada.

Tabela 4.7.1-Situação 1 - Antena Velocidade Máxima (60 rpm) -Reações na Base e deslocamento máximo.

| | FX (kN) | FY (kN) | FZ (kN) | MX (kN.m) | MY (kN.m) | MZ (kN.m) | δmax (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -16,72 | 0,01 | -289,45 | -0,22 | -0,07 | 0,02 | 13,956 |
| 2 | -1 | -15,33 | -281,22 | 0,06 | 0,07 | 0 | 16,053 |
| 3 | -15,73 | -14,7 | -511,38 | -0,16 | 0,04 | 0,02 | 16,28 |
| 4 | -15,7 | -1,01 | -289,52 | -0,21 | -0,06 | 0,03 | 14,268 |
| 5 | 0,01 | -16,34 | -281,29 | 0,08 | 0,08 | 0 | 13,564 |
| 6 | -14,71 | -15,72 | -511,46 | -0,15 | 0,05 | 0,02 | 16,283 |
| 7 | -16,43 | -0,71 | -302,4 | -0,22 | -0,06 | 0,03 | 13,493 |
| 8 | -0,71 | -16,05 | -294,17 | 0,06 | 0,08 | 0 | 13,109 |
| 9 | -15,44 | -15,42 | -524,34 | -0,16 | 0,05 | 0,02 | 16,733 |
| 10 | -26,95 | -0,06 | -469,75 | -0,39 | -0,08 | 0,04 | 21,57 |
| 11 | -0,75 | -25,61 | -456,03 | 0,08 | 0,15 | 0 | 22,804 |
| 12 | -25,3 | -24,58 | -839,64 | -0,29 | 0,1 | 0,03 | 25,913 |
| 13 | -26,24 | -0,77 | -469,8 | -0,38 | -0,07 | 0,04 | 21,552 |
| 14 | -0,04 | -26,32 | -456,08 | 0,1 | 0,16 | 0 | 20,941 |
| 15 | -24,59 | -25,29 | -839,69 | -0,28 | 0,11 | 0,03 | 25,912 |
| 16 | -26,74 | -0,56 | -478,82 | -0,39 | -0,07 | 0,04 | 21,228 |
| 17 | -0,55 | -26,12 | -465,1 | 0,08 | 0,16 | 0 | 20,601 |
| 18 | -25,1 | -25,08 | -848,71 | -0,29 | 0,11 | 0,03 | 26,249 |

Tabela 4.7.2-Situação 2 - Antena Velocidade Média (30 rpm) -Reações na base e deslocamento máximo

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -35,9 | -0,13 | -628,09 | -0,54 | -0,09 | 0,05 | 36,38 |
| 2 | -0,49 | -34,67 | -609,32 | 0,1 | 0,23 | -0,01 | 30,305 |
| 3 | -33,66 | -33,26 | -1127,59 | -0,4 | 0,15 | 0,04 | 41,984 |
| 4 | -35,51 | -0,52 | -628,08 | -0,53 | -0,09 | 0,05 | 30,066 |
| 5 | -0,09 | -35,06 | -609,32 | 0,11 | 0,23 | -0,01 | 37,061 |
| 6 | -33,26 | -33,65 | -1127,59 | -0,4 | 0,16 | 0,04 | 42,275 |
| 7 | -35,79 | -0,41 | -633,6 | -0,54 | -0,09 | 0,05 | 34,785 |
| 8 | -0,37 | -34,95 | -614,83 | 0,1 | 0,23 | -0,01 | 35,208 |
| 9 | -33,54 | -33,54 | -1133,11 | -0,4 | 0,16 | 0,04 | 44,033 |
| 10 | -59,53 | -0,27 | -1051,38 | -0,94 | -0,11 | 0,09 | 53,099 |
| 11 | -0,5 | -57,84 | -1020,1 | 0,13 | 0,42 | -0,01 | 48,097 |
| 12 | -55,79 | -55,49 | -1883,89 | -0,71 | 0,3 | 0,07 | 63,614 |
| 13 | -59,25 | -0,55 | -1051,38 | -0,93 | -0,11 | 0,09 | 48,154 |
| 14 | -0,23 | -58,11 | -1020,1 | 0,14 | 0,42 | -0,01 | 53,225 |
| 15 | -55,51 | -55,77 | -1883,89 | -0,71 | 0,3 | 0,07 | 63,75 |
| **16** | **-59,45** | **-0,47** | **-1055,24** | **-0,94** | **-0,11** | **0,09** | **51,762** |
| **17** | **-0,42** | **-58,04** | **-1023,96** | **0,13** | **0,42** | **-0,01** | **51,77** |
| **18** | **-55,71** | **-55,69** | **-1887,75** | **-0,71** | **0,3** | **0,07** | **65,15** |

A torre foi dimensionada para o cenário 2 da Tabela 4.7.2 e Tabela 4.8.2. Esta solução foi uniformizada ao máximo para reduzir ao máximo o número de perfis, simplificando a construção. Esta uniformização não teve por base nenhum estudo económico do acréscimo de peso foi feita a sentimento, mas procurou-se a simplicidade da estrutura, o que fez com que a solução tenha um acréscimo de peso, mas maior simplicidade. A solução dimensionada será designada como "Solução 1". De acordo com a Tabela 4.7.3, e em comparação com a solução da Metalogalva S.A. a Solução 1 de dimensionamento pesa cerca do dobro. Por um lado, a estrurura foi uniformizada o que leva a que se torne mais pesada; por outro lado a solução da Metalogalva S.A., foi cedida, mas não são conhecidas as ações que lhe deram origem.

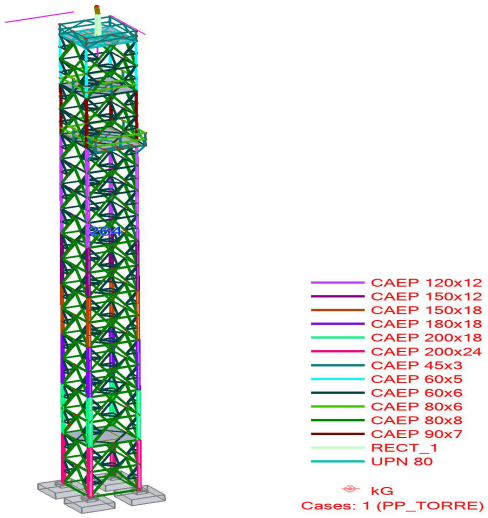



*Figura 4.7.1 - -Secções da torre em S355 - Solução 1 para envolvente de esforços*

*Tabela 4.7.3 – Peso da solução dimensionada para o cenário 2 e solução da Metalogalva S.A.*

| *Peso (kg) -Dimensionamento (Solução 1)* | *Peso (kg) - Metalogalva S.A.* |
|---|---|
| *20097* | *10404* |
| *+93.16 %* | |

## 4.8 AMORTECEDOR DE LÍQUIDO SINTONIZADO

### 4.8.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA A IMPLEMENTAR TLD, TMD

O sistema a implementar para diminuir os deslocamentos estruturais na torre, devidos à ação dinâmica da antena radar, é o TLD, que mecanicamente é similar ao TMD, com diferença que poderá mitigar deslocamentos num espectro de frequências, (adicionando ou subtraindo líquido) ao contrário do TMD que é indicado para mitigar deslocamentos numa dada frequência. O sistema mecânico do TLD é o sistema da Figura 4.8.1, que é caracterizado por uma massa $m_0$, correspondente ao peso de água que fica imóvel durante a oscilação da estrutura, que pode ser introduzida como peso morto na estrutura. A

massa $m_1$, é a massa que efetivamente oscila, e forma uma onda no sentido oposto à força, reduzindo deslocamento na estrutura. Um TLD é sintonizado para uma dada frequência, podendo esta ser uma frequência natural da estrutura ou outra. Quando com o TLD oscila devido a uma excitação dinâmica externa, o fluido no tanque move-se. O movimento de agitação do fluido (sloshing), neste caso água modifica a resposta global da estrutura, resultando na redução dos deslocamentos estruturais.

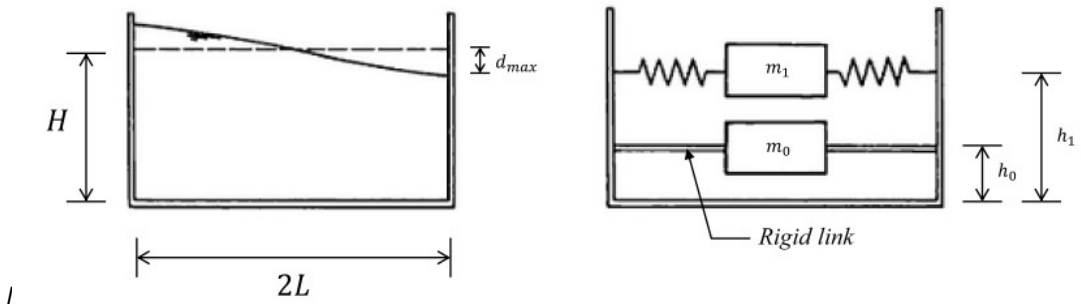



*Figura 4.8.1- Esquema de um mecânico TLD*

Os TLDs são tanques com um fluido, com determinada viscosidade, neste caso água, podem ser essencialmente quadrados (cúbicos), retangulares (poligonais) e cilíndricos horizontais e verticais. Um importante parâmetro a considerar e que faz com que os tanques sejam considerados de águas profundas ou águas pouco profundas é se o quociente $\frac{H}{2L} > 1.5$ então é considerado de águas profundas, são estes tanques aplicados neste estudo tanto na forma cilíndrica como cúbica. Existe também a possibilidade de seccionar os tanques tanto na situação de tanques geométricos como curvos (Abramson 1966). Nos TLDs curvos obtêm-se os mesmos resultados quando a excitação tem qualquer direção e sentido, sendo que a formação da onda interior tem sempre a mesma forma. Os tanques cúbicos têm maior eficiência quando a força de excitação é aplicada na direção dos lados do cubo, embora também tenham eficiência quando solicitados, noutras direções, apesar de este efeito de atenuação não ser fácil de quantificar (Love and Tait 2013).

Os TLDs são bastante competitivos a nível de custo de implementação e de manutenção, podendo ser sintonizados rapidamente para frequências naturais da estrutura, ou outra frequência com efeitos adversos na estrutura, ou em situações temporárias.

Dentro dos TLDs anteriormente referidos (de águas profundas) são assumidos certos pressupostos para o estudo, entre os quais; os tanques são considerados rígidos, o fluido é não viscoso e incompressível, pequenos deslocamentos, velocidade e inclinação da superfície líquida, homogeneidade do líquido. (Abramson 1966). Caso o tanque não seja completamente rígido podem existir importantes interações entre a estrutura principal e o tanque, que são de difícil estudo.

Para quocientes de $\frac{H}{2L} > 1.0$ as frequências naturais do líquido, podem ser consideradas como independentes da profundidade do líquido (Abramson 1966).

Um efeito adverso pode ocorrer caso o movimento de onda não diminua imediatamente após a cessação da excitação, sendo que alguma da energia absorvida pelo TLD é transferida para a estrutura. (Soong and Spencer 2002). Para mitigar este efeito foram efetuados vários estudos, como por exemplo a inclinação das paredes e fundo do tanque.(Gardarsson, Yeh, and Reed 2001).

Os movimentos do fluido como meio de amortecimento foram usados para estabilização de navios e até satélites. Os TLDs são também usados em plataformas offshore, através de água em elementos estruturais. Os tanques de águas pouco profundas são mais eficientes, mas os seus contributos para a diminuição dos deslocamentos dinâmicos da estrutura têm comportamento não-linear (quebra de ondas), e são de grande complexidade, embora existam vários estudos sobre este tema USAEC-Division of Reactor Development (1963). Alguns estudos foram levados a cabo usando elementos finitos (FEM), em malhas móveis baseados na formulação de Lagrange (ALE- Arbitrary Lagrangian Eulerian), (Takashi 1994).

### 4.8.2 DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE UM TLD: ANALOGIA DE UM TMD EQUIVALENTE

A Figura 4.8.2 representa o modelo mecânico equivalente, em que os parâmetros determinados através da teoria linear de onda (Abramson 1966), são dados pelas (4.8.1) e (4.8.2):

$$m_n = M_t \left( \frac{8\tanh[(2\mathrm{n}-1)\pi \mathrm{r}}{\pi^3 r(2n-1)^3} \right) \qquad (4.8.1)$$

$$\omega_n^2 = \frac{g(2n-1)\pi \tanh[(2n-1)\pi r}{l} \qquad (4.8.2)$$

Em que:

$n$ – Modo de Oscilação (Sloshing) , com n=(Takashi 1994);

$m_n$- Massa de líquido atuante em cada modo n;

$\omega_n$ – Frequência angular de oscilação do modo n;

$r = \frac{h}{l}$ Razão entre altura de água (h), e o comprimento do tanque na direção de oscilação (l);

$M_t$ – Massa total de água no tanque;

$m_0$ – Massa inativa ou impulsiva, isto é, que não participa na oscilação; dada por

$$m_0 = M_t - \sum_{n=1}^{\infty} m_n$$

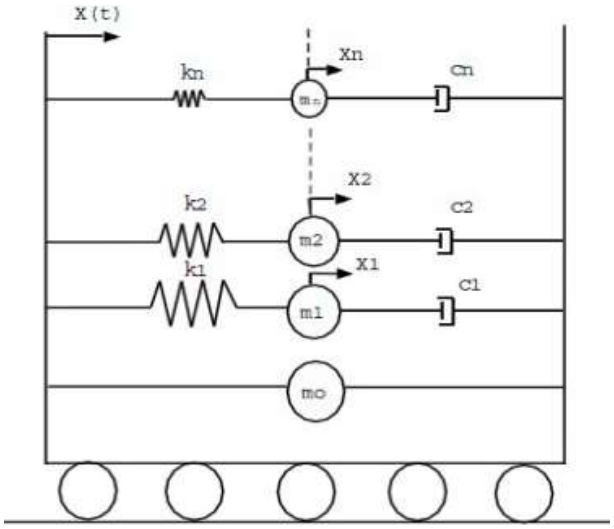



*Figura 4.8.2- Modelo mecânico equivalente relativo ao movimento oscilatório do líquido no interior de um tanque adaptado de (Yalla 2002)*

O modelo análogo de n-massas oscilantes também foi totalmente deduzido por (Carneiro De Barros 2008), como resultado de trabalhos científicos publicados no período temporal de 2000 a 2008.

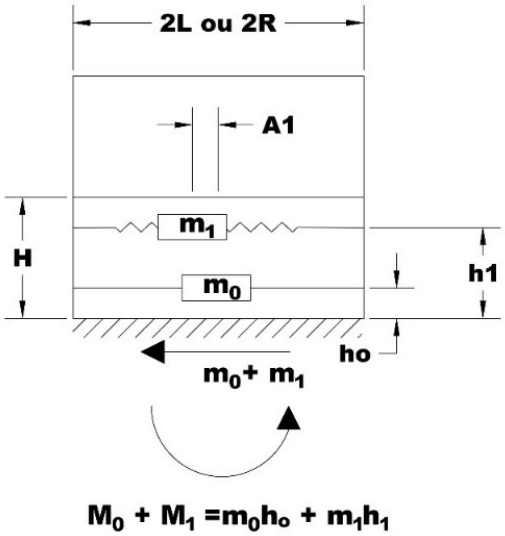



*Figura 4.8.3- Modelo dinâmico e equilíbrio dinâmico de forças, adaptado de (USAEC-Division of Reactor Development 1963)*

$$m_1 = \frac{M_t \tanh(\sqrt{3}\frac{L}{H})}{\sqrt{3}\frac{L}{H}} \qquad (4.8.3)$$

$$m_0 = \frac{M_t \tanh(\frac{\pi}{2}\frac{L}{H})}{\frac{\pi}{2}\frac{L}{H}} \qquad (4.8.4)$$

A Figura 4.8.2 e Figura 4.8.3 representam o esquema dinâmico das massas impulsivas $m_0$ e convectiva $m_1$, obtidas pelas equações **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** e (4.8.4) de (Housner 1990) e respetivas alturas, dependentes da frequência própria do tanque. Neste caso a frequência de excitação é para o caso de $\mu = 0.01$, que será depois afinado para a razão de massas, resultante da colocação de 4 tanques nas arestas da torre à altura de 45 m. Segundo a equação (3.4.9) no item 3.4, no capitulo 3, $q_{opt}$ é também igual a $q_{opt} = \omega_{TMD/\omega_{Antena}} \approx 1.0Hz$.

A partir da equação (4.8.5) de (Lamb 1975), e para uma frequência de TLDs igual a 1Hz, obteve-se o gráfico da Figura 4.8.4 com as dimensões do vários TLDs possíveis, para cada H (altura de água) corresponde uma só dimensão L (metade da dimensão do tanque na direção da excitação); o mesmo gráfico também se aplica a TLDs cilíndricos onde a dimensão de L nos tanques paralelepipédicos, corresponde a R (raio do TLD cilíndrico). Na equação (4.8.5) a dimensão L, representa metade da dimensão do TLD, na direção da excitação.

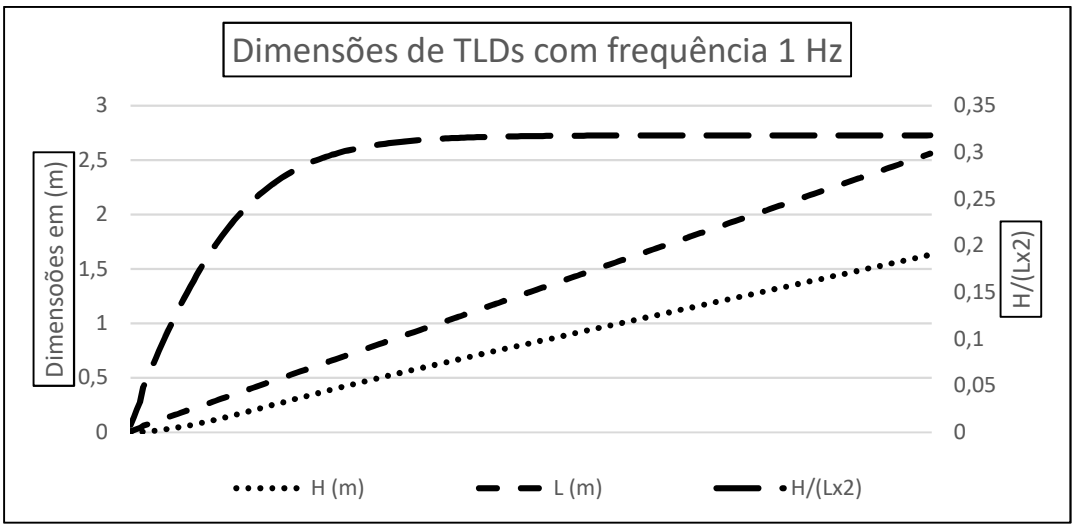



*Figura 4.8.4 – Dimensões de TLDs em função da sua frequência 1Hz*

$$\omega_{TMD}^2 = \frac{\pi g}{2L}\tanh(\frac{\pi H}{2L}) \qquad (4.8.5)$$

$$k_{TMD} = m_{TLD}\omega_{TMD}^2 r \qquad (4.8.6)$$

$$C_{TLD} = 2m_{TLD}\omega_{TLD}\xi_{opt} \qquad (4.8.7)$$

Para se determinar a frequência própria dos tanques forma usados mais dois métodos, com resultados muito semelhantes; o método de (Abramson 1966) pelas expressão (4.8.2) e o método recentemente de Vasylenko (2014) pela expressão (4.8.8). Ambas são válidas para o cálculo de tanques retangulares poligonais como para formas cilíndricas. Na Tabela 4.8.1 pode-se observar um resumo das frequências próprias dos TLDs para as várias alturas de água (H) e semi-largura, ou raio (L ou R) de tanques consoante a forma retangular ou circular.

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} 1.26\left[1 - e^{-3.67(H/L)}\right] \qquad (4.8.8)$$

Tabela 4.8.1 – Comparação entre valores de frequências dos tanques pelo método de (Abramson 1966) e por (Vasylenko 2014)

| | | | *Abramson 1966* | | | *Vasylenko 2014* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *L(m)* | *H (m)* | *H/2L* | *f1 (hz)* | *f2 (Hz)* | *f3 (Hz)* | *f1* | |
| *0,100* | *0,016* | *0,082* | *0,873* | *1,729* | *2,238* | *0,896* | *Aguas Rasas* |
| *0,125* | *0,026* | *0,103* | *0,879* | *1,740* | *2,252* | *0,945* | |
| *0,150* | *0,038* | *0,126* | *0,886* | *1,754* | *2,270* | *0,979* | |
| *0,175* | *0,053* | *0,150* | *0,895* | *1,772* | *2,293* | *1,003* | |
| *0,200* | *0,070* | *0,176* | *0,906* | *1,794* | *2,322* | *1,018* | *Águas Profundas* |
| *0,225* | *0,092* | *0,204* | *0,920* | *1,821* | *2,357* | *1,027* | |
| *0,250* | *0,117* | *0,235* | *0,937* | *1,854* | *2,400* | *1,032* | |
| *0,275* | *0,149* | *0,270* | *0,958* | *1,897* | *2,455* | *1,033* | |
| *0,300* | *0,187* | *0,312* | *0,986* | *1,952* | *2,526* | *1,031* | |
| *0,325* | *0,237* | *0,365* | *1,024* | *2,026* | *2,623* | *1,026* | |
| *0,350* | *0,306* | *0,437* | *1,079* | *2,137* | *2,765* | *1,019* | |
| *0,375* | *0,419* | *0,558* | *1,179* | *2,334* | *3,021* | *1,009* | |

Como se pode verificar na Tabela 4.8.1, os valores de frequências obtidos para a primeira frequência de oscilação são muito próximos especialmente quando as dimensões do reservatórios aumentam, sendo que o método de Vasylenko (2014), é bastante mais simples de aplicar, e também se aplica a reservatório cilíndricos anelares, com uma aplicação semelhante ao formulário aplicado a reservatórios retangulares e circulares, ao contrário do método de Abramson (1966), que para o formato anelar envolve grande complexidade de expressões.

### 4.8.3 CÁLCULO E AFINAÇÃO DOS TLDS

Foram feitas várias simulações para obter a maior atenuação da oscilação da antena. Para tanques de águas profundas, foram simuladas várias dimensões, tanques paralelepipédicos, localizados numa secção intermédia da plataforma à cota 45 m, e localizados nas arestas da plataforma á mesma cota na Figura 4.8.5 e Figura 4.8.6.. Do mesmo modo foram testados tanques cilíndricos nas duas localizações dos tanques paralelepípedos (ver Figura 4.8.7 e Figura 4.8.8.).

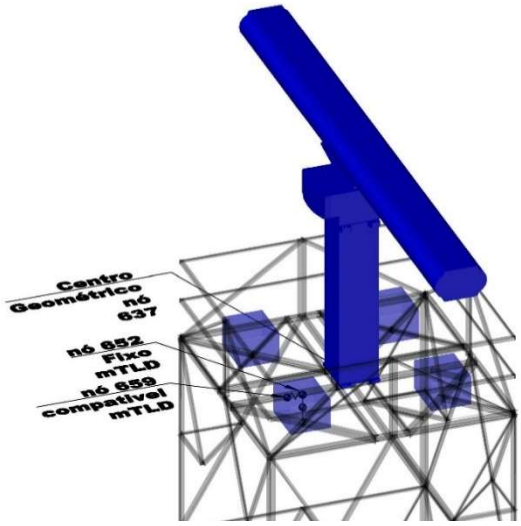



*Figura 4.8.5 – Localização dos TLDs paralelepipédicos na secção média, localização dos nós em estudo*

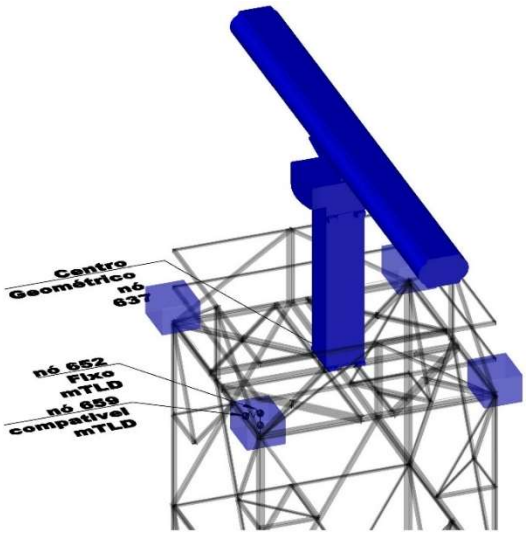



*Figura 4.8.6 – Localização dos TLDs paralelepipédicos nas arestas, localização dos nós em estudo*

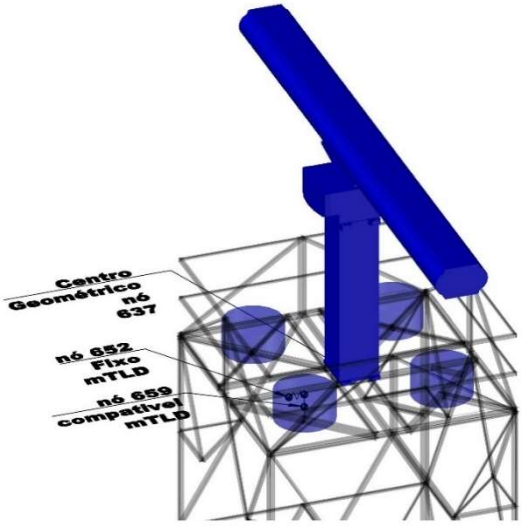



*Figura 4.8.7 – Localização dos TLDs cilíndricos na secção média, localização dos nós em estudo*

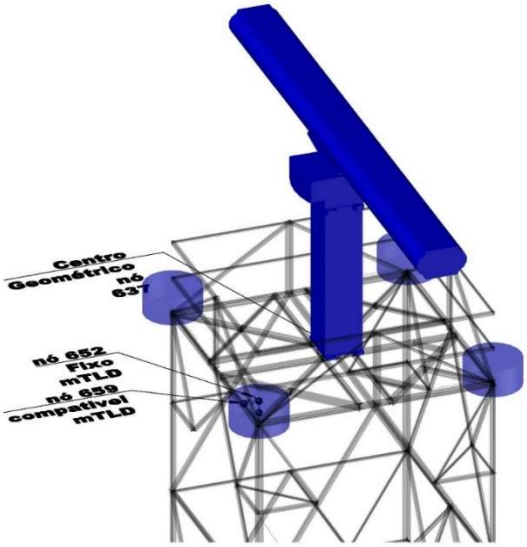



*Figura 4.8.8 – Localização dos TLDs cilíndricos nas arestas, localização dos nós em estudo*

Em primeiro lugar foram determinadas várias dimensões de tanques pela equação (4.8.5), arbitrando a dimensão transversal L ou R, igual a 5 cm e com a frequência é de 1Hz, é determinada a altura de água no tanque H. São também determinadas massas $m_0$, e $m_1$, pelas expressões **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** e (4.8.4), e respetivas alturas $h_0$ e $h_1$, pelas expressões (4.8.9) a (4.8.12), que constam no USAEC-Division of Reactor Development (1963). Para secções de tanques paralelepipédicos a altura $h_0$ da massa impulsiva $m_0$ é calculada pela equação (4.8.9) e a altura da massa convectiva $m_1$, $h_1$ é dada pela equação (4.8.10):

$$h_1 = H\left(1 - \frac{\cosh\left(1.58\frac{H}{L}\right) - 1}{1.58\frac{H}{L}\sinh(1.58\frac{H}{L})}\right) \quad (4.8.9)$$

$$h_0 = \frac{H}{8}\left[\frac{4}{\frac{\tanh(\sqrt{3}\frac{L}{H})}{\sqrt{3}\frac{L}{H}}} - 1\right] \quad (4.8.10)$$

Para o caso de tanques cilíndricos as alturas $h_0$ e, $h_1$ são calculadas com as seguintes equações (4.8.11) e (4.8.12).

$$h_0 = \frac{H}{8}\left[\frac{4}{\frac{\tanh(\sqrt{3}\frac{L}{R})}{\sqrt{3}\frac{L}{R}}} - 1\right] \quad (4.8.11)$$

$$h_1 = H\left(1 - \frac{\cosh\left(1.84\frac{H}{R}\right) - 1}{1.84\frac{H}{R}\sinh(1.84\frac{H}{R})}\right) \quad (4.8.12)$$

Na Tabela 4.8.2e Tabela 4.8.3, são apresentados os valores dos parâmetros que foram descritos anteriormente para tanques retangulares e cilíndricos.

Tabela 4.8.2 – Determinação das dimensões dos tanques retangulares para frequência de 1Hz

| 2L(m) | L(m) | H (m) | H/2L | mt (kg) | m0 (Kg) | m1 (kg) | h0(m) EBP | h1(m) EBP | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,2000 | 0,1000 | 0,0163 | 0,0817 | 0,6535 | 0,0616 | 2,1080 | 0,0061 | 0,0082 | |
| 0,2500 | 0,1250 | 0,0259 | 0,1034 | 1,6159 | 0,1930 | 4,1172 | 0,0097 | 0,0130 | guas Rasas |
| 0,3000 | 0,1500 | 0,0378 | 0,1261 | 3,4054 | 0,4959 | 7,1144 | 0,0142 | 0,0192 | |
| 0,3500 | 0,1750 | 0,0525 | 0,1501 | 6,4365 | 1,1157 | 11,297 | 0,0197 | 0,0268 | |
| 0,4000 | 0,2000 | 0,0703 | 0,1758 | 11,252 | 2,2844 | 16,859 | 0,0264 | 0,0360 | |
| 0,4500 | 0,2250 | 0,0917 | 0,2038 | 18,571 | 4,3687 | 23,990 | 0,0344 | 0,0474 | |
| 0,5000 | 0,2500 | 0,1174 | 0,2349 | 29,359 | 7,9527 | 32,858 | 0,0440 | 0,0613 | Águas Profun das |
| 0,5500 | 0,2750 | 0,1487 | 0,2703 | 44,972 | 13,991 | 43,586 | 0,0558 | 0,0785 | |
| 0,6000 | 0,3000 | 0,1873 | 0,3122 | 67,439 | 24,124 | 56,198 | 0,0702 | 0,1006 | |
| 0,6500 | 0,3250 | 0,2370 | 0,3646 | 100,12 | 41,430 | 70,489 | 0,0889 | 0,1301 | |
| 0,7000 | 0,3500 | 0,3056 | 0,4365 | 149,73 | 72,672 | 85,662 | 0,1146 | 0,1731 | |

Tabela 4.8.3 – Determinação das dimensões dos tanques cilíndricos para frequência de 1Hz

| 2R(m) | R(m) | H (m) | H/2R | mt (kg) | m0 (Kg) | m1 (kg) | h0(m)E BP | h1(m)E BP | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,2000 | 0,1000 | 0,0163 | 0,0817 | 2,0531 | 0,1937 | 3,9961 | 0,0061 | 0,0082 | |
| 0,2500 | 0,1250 | 0,0259 | 0,1034 | 5,0766 | 0,6062 | 7,8049 | 0,0097 | 0,0131 | Águas Rasas |
| 0,3000 | 0,1500 | 0,0378 | 0,1261 | 10,698 | 1,5581 | 13,486 | 0,0142 | 0,0193 | |
| 0,3500 | 0,1750 | 0,0525 | 0,1501 | 20,220 | 3,5051 | 21,416 | 0,0197 | 0,0269 | |
| 0,4000 | 0,2000 | 0,0703 | 0,1758 | 35,351 | 7,1765 | 31,967 | 0,0264 | 0,0363 | |
| 0,4500 | 0,2250 | 0,0917 | 0,2038 | 58,344 | 13,724 | 45,507 | 0,0344 | 0,0479 | |
| 0,5000 | 0,2500 | 0,1174 | 0,2349 | 92,236 | 24,984 | 62,389 | 0,0440 | 0,0621 | |
| 0,5500 | 0,2750 | 0,1487 | 0,2703 | 141,28 | 43,954 | 82,922 | 0,0558 | 0,0799 | Águas Profun das |
| 0,6000 | 0,3000 | 0,1873 | 0,3122 | 211,86 | 75,789 | 107,30 | 0,0702 | 0,1028 | |
| 0,6500 | 0,3250 | 0,2370 | 0,3646 | 314,55 | 130,15 | 135,42 | 0,0889 | 0,1336 | |
| 0,7000 | 0,3500 | 0,3056 | 0,4365 | 470,39 | 228,30 | 166,34 | 0,1146 | 0,1789 | |

*EBP (Excluding Bottom Pressurre -Excluindo Pressão no Fundo do Tanque, poderia ter sido feito um cálculo, incluindo a pressão de fundo, mas faz mais sentido quando são estudados tanques de muito grande dimensão, ex: refinarias).

Foram efetuados dois cálculos em paralelo um tendo por base uma razão de massas $\mu$, (quociente entre a massa $m_1$, ou massa do TLD $m_{TLD}$, e a massa $M_1$, massa do primeiro modo de vibração da torre), e outro tendo por base uma razão de massas $\mu$ (quociente entre a massa $m_1$, ou massa de TLD $m_{TLD}$ e massa da estrutura $M_{est}$). A massa do TLD é a conseguida através da multiplicação por 4, sendo que são utilizados 4 tanques.

Posteriormente, é feita a correção da razão de massas $\mu$ obtida dividindo a massa dos TLDs pela massa do primeiro modo $M_1$ , um resumo das massas simuladas e dos parâmetros obtidos através da razão de massa $\mu = m_{TLD}/M_1$, para tanques retangulares apresentados na Tabela 4.8.4 (estes parâmetros de amortecimento C, e rigidez k são os que vão ser simulados no programa de cálculo Robot Structral Analysis). Na Tabela 4.8.5 são apresentadas as massas e parâmetros dos TLDs obtidos a partir da razão de massa $\mu = m_{TLD}/M_1$, mas para o caso de TLDs cilíndricos.

De modo análogo são apresentados na Tabela 4.8.6 para as razão de massa $\mu = m_{TLD}/M_{est}$ as massas e parâmetros obtidos para formas retangulares, na Tabela 4.8.7 são apresentadas os parâmetros obtidos através da razão de massa $\mu = m_{TLD}/M_{est}$ para tanques cilíndricos .

Para cada um dos cálculos de $\mu$, foram tidas em conta 2 localizações para tanques retangulares numa secção intermédia da plataforma Figura 4.8.5 e nas arestas da plataforma Figura 4.8.6. Para a forma cilíndrica de TLDs foram localizados na mesma secção intermedia na plataforma à altura de 45 m, Figura 4.8.7 e nas arestas da plataforma Figura 4.8.8.

Pretende-se com estas duas localizações limitar a diminuição de oscilação máxima, e analisando os resultados obtidos, localizar espacialmente na plataforma a solução de TLDs que mais faz diminuir a oscilação na torre.

Tabela 4.8.4- Resumo das várias massas impulsivas e convectivas a simular no programa de cálculo automático para 4 tanques paralelepipédicos para $\mu = 4m_{TLDs}/M_1$

| *μ* | *qopt* | *ζ2opt* | *D* | *ωTMD (rad/s)* | *mTMD (Kg)* | *kTMD (KN/m)* | *fTMD (Hz)* | *C TMD (kN*s/m )* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *0,046* | *0,956* | *0,122* | *6,703* | *6,010* | *21,416* | *0,773* | *0,956* | *0,030* |
| *0,068* | *0,936* | *0,145* | *5,517* | *5,883* | *31,967* | *1,107* | *0,936* | *0,051* |
| *0,097* | *0,912* | *0,166* | *4,656* | *5,729* | *45,507* | *1,494* | *0,912* | *0,079* |
| *0,133* | *0,883* | *0,185* | *4,010* | *5,547* | *62,390* | *1,920* | *0,883* | *0,113* |
| *0,176* | *0,850* | *0,202* | *3,514* | *5,342* | *82,923* | *2,366* | *0,850* | *0,152* |
| *0,228* | *0,814* | *0,215* | *3,125* | *5,116* | *107,301* | *2,809* | *0,814* | *0,192* |
| *0,288* | *0,776* | *0,225* | *2,819* | *4,879* | *135,426* | *3,223* | *0,776* | *0,231* |
| *0,354* | *0,739* | *0,231* | *2,580* | *4,642* | *166,345* | *3,584* | *0,739* | *0,264* |

Tabela 4.8.5 - Resumo das várias massas impulsivas e convectivas simuladas no programa de cálculo automático para 4 tanques cilíndricos para $\mu = 4m_{TLDs}/M_1$

| *μ** | *qopt* | *ζ2opt* | *D* | *ωTMD (rad/s)* | *mTMD (Kg)* | *kTMD (KN/m)* | *fTMD (Hz)* | *C TMD (kN*s/m)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *0,046* | *0,956* | *0,122* | *6,703* | *6,010* | *21,416* | *0,773* | *0,956* | *0,030* |
| *0,068* | *0,936* | *0,145* | *5,517* | *5,883* | *31,967* | *1,107* | *0,936* | *0,051* |
| *0,097* | *0,912* | *0,166* | *4,656* | *5,729* | *45,507* | *1,494* | *0,912* | *0,079* |
| *0,133* | *0,883* | *0,185* | *4,010* | *5,547* | *62,390* | *1,920* | *0,883* | *0,113* |
| *0,176* | *0,850* | *0,202* | *3,514* | *5,342* | *82,923* | *2,366* | *0,850* | *0,152* |
| *0,228* | *0,814* | *0,215* | *3,125* | *5,116* | *107,301* | *2,809* | *0,814* | *0,192* |
| *0,288* | *0,776* | *0,225* | *2,819* | *4,879* | *135,426* | *3,223* | *0,776* | *0,231* |
| *0,354* | *0,739* | *0,231* | *2,580* | *4,642* | *166,345* | *3,584* | *0,739* | *0,264* |

Tabela 4.8.6- Resumo das várias massas impulsivas e convectivas a simular no programa de cálculo automático para 4 tanques paralelepipédicos para $\mu = 4m_{TLDs}/M_{est}$

| *μ* | *qopt* | *ζ2opt* | *D* | *mTMD (Kg)* | *ωTMD /rad/s)* | *mTMD (Kg)* | *kTMD (KN/m)* | *fTMD (Hz)* | *C* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *0,004* | *0,996* | *0,039* | *22,019* | *11,297* | *6,257* | *11,297* | *0,442* | *0,996* | *0,006* |
| *0,006* | *0,994* | *0,048* | *18,033* | *0,165* | *6,245* | *16,860* | *0,657* | *0,994* | *0,010* |
| *0,009* | *0,991* | *0,057* | *15,127* | *0,235* | *6,229* | *23,991* | *0,931* | *0,991* | *0,017* |
| *0,012* | *0,988* | *0,066* | *12,936* | *0,322* | *6,209* | *32,859* | *1,267* | *0,988* | *0,027* |
| *0,016* | *0,984* | *0,076* | *11,243* | *0,428* | *6,185* | *43,587* | *1,667* | *0,984* | *0,040* |
| *0,021* | *0,980* | *0,085* | *9,912* | *0,551* | *6,157* | *56,199* | *2,130* | *0,980* | *0,058* |
| *0,026* | *0,975* | *0,095* | *8,862* | *0,692* | *6,125* | *70,489* | *2,645* | *0,975* | *0,080* |
| *0,031* | *0,970* | *0,104* | *8,050* | *0,840* | *6,092* | *85,663* | *3,179* | *0,970* | *0,105* |

Tabela 4.8.7- Resumo das várias massas impulsivas e convectivas a simular no programa de cálculo automático para 4 tanques cilíndricos para $\mu = 4m_{TLDs}/M_{est}$

| *μ* | *qopt* | *ζ2opt* | *D* | *ωTMD (rad/s)* | *m0(Kg)* | *mTMD (Kg)* | *kTMD (KN/m)* | *fTMD (Hz)* | *C TMD (kN*s/m)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *0,009* | *0,992* | *0,056* | *15,315* | *6,230* | *3,505* | *21,416* | *0,831* | *0,992* | *0,015* |
| *0,013* | *0,987* | *0,068* | *12,549* | *6,204* | *7,177* | *31,967* | *1,230* | *0,987* | *0,027* |
| *0,018* | *0,982* | *0,080* | *10,532* | *6,171* | *13,725* | *45,507* | *1,733* | *0,982* | *0,044* |
| *0,025* | *0,976* | *0,093* | *9,010* | *6,130* | *24,984* | *62,390* | *2,345* | *0,976* | *0,070* |
| *0,033* | *0,968* | *0,106* | *7,831* | *6,082* | *43,954* | *82,923* | *3,067* | *0,968* | *0,104* |
| *0,043* | *0,959* | *0,119* | *6,900* | *6,025* | *75,789* | *107,301* | *3,895* | *0,959* | *0,148* |
| *0,054* | *0,949* | *0,132* | *6,159* | *5,960* | *130,158* | *135,426* | *4,811* | *0,949* | *0,202* |
| *0,067* | *0,938* | *0,143* | *5,574* | *5,891* | *228,307* | *166,345* | *5,773* | *0,938* | *0,264* |

μ* - Razão de massa de 4 tanques e a massa modal do primeiro modo de vibração

### 4.8.4 SIMULAÇÃO DOS TLD NO PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

A simulação foi efetuada no programa de cálculo automático Robot Structural Analysis 2019, para a solução estrutural de Torre-Radar cedida pela Metalogalva S.A.. Na análise de resposta temporal (THA-Time History Analysis), por aplicação do Método de Newmark (aceleração), onde foram calculados o parâmetro $\alpha$ *e* $\beta$, [de acordo com as equações (4.8.13) e (4.8.14)] para obter a matriz de amortecimento de Rayleigh. Estes parâmetros de amortecimento da estrutura têm por base os dois primeiros modos de vibração, e um amortecimento de 2%, considerado como adequado para esta estrutura. A simulação dos tanques é feita em conjuntos de quatro pontos distintos em duas localizações diferentes, como foi descrito anteriormente.

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\xi_2\omega_1 - \xi_1\omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \qquad (4.8.13)$$

$$\beta = \frac{2\xi_1\omega_1 - 2\xi_2\omega_2}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \qquad (4.8.14)$$

Na segunda localização dos tanques com as suas várias dimensões de acordo com a Tabela 4.8.4 e, nos nós correspondentes a cada aresta da torre, de lado 3 m, existem barras verticais em cada aresta (que suportam as guardas); para não modificar a massa da estrutura, cada barra foi deslocada da aresta para a secção média, não sendo possível simular o TLD, com o centro coincidente com outra barra. A força excitadora em x e y é a força induzida pela força livre $F_s$, que tem o valor e aplicação que consta na Figura 4.5.2 associada à rotação da antena e como já referido de tem a frequência de 1 Hz dada por $\sin(\omega t)$.

Para cada massa $m_0$, foi adicionada como peso próprio à estrutura através de uma massa aplicada a um novo nó pertencente a uma barra sem massa e com uma grande rigidez, a uma altura correspondente $h_0$, de acordo com Tabela 4.8.2 e Tabela 4.8.3. A massa convectiva $m_1$, e a correspondente altura $h_1$,

é adicionada à estrutura sendo adicionado um nó localizado na mesma barra, com coordenadas similares ao nó onde é colocada a massa $m_1$.

No programa há a possibilidade de duplicar um nó, chamado de nó compatível, (ver **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), o que acontece é que o nó compatível criado fica fixo, e o nó existente fica móvel acoplado ao nó fixo com as características de rigidez k, e amortecimento c, de acordo com a previamente calculado na Tabela 4.8.4.à Tabela 4.8.7.

Procedimentos numéricos que levam a soluções limitadas se o intervalo de tempo $\Delta t$ (time step), for mais curto do que um limite de estabilidade, são designadas de procedimentos condicionalmente estáveis. Procedimentos que levem a soluções limitadas independentemente do intervalo de tempo são designados procedimentos incondicionalmente estáveis.

O método de aceleração média é incondicionalmente estável. O método de aceleração linear é estável se $\frac{\Delta t}{T_1} < 0.551$, o método de diferença central é estável se $\frac{\Delta t}{T_n} < 1/\pi$. Os dois métodos aceleração média e diferença central referidos são condicionalmente estáveis (Chopra 2014). No passado era frequente a escolher-se intervalos de tempo $\Delta t < \frac{T_1}{10}$.

O intervalo de tempo escolhido foi de 0.05 s, que verifica as três condições. Ou seja, em cada intervalo de tempo a antena roda cerca de 18º, o tempo total de excitação de 10s, sendo que cada ciclo demora apenas 1 s, ou seja, tem uma frequência 1Hz. O tempo total da análise temporal é de 15s para se poder visualizar a resposta após cessar a excitação da antena radar.

Para a simulação feita com a razão de massa $\mu = 4m_{TLDs}/M_1$ foram testados em duas localizações 8 dimensões de tanques retangulares ou cilíndricos, verificando-se onde é maior a diminuição da oscilação da torre devido à rotação da antena radar. Foi efetuada uma simulação com a razão de massa $\mu = 4m_{TLDs}/M_{est}$, para essa localização. Dependendo destes resultados de diminuição de oscilação dados pela equação é apresentada a simulação que leva a melhores resultados. Os resultados das várias simulações encontram-se no ANEXO C. O valor em percentagem da redução proporcionada pelos TLDs é obtido pela expressão seguinte (4.8.15), em que $\delta$ é o deslocamento máximo.

$$Redução = \frac{\delta_0 - \delta_{TLD}}{\delta_{TLD}} x100\% \qquad (4.8.15)$$

### 4.8.5 REPRESENTAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA E RECOMENDAÇÕES

A solução que leva a uma diminuição maior da oscilação é a solução cilíndrica, a instalar nas arestas da secção da torre na plataforma a 45 m, tangente às guardas. A massa $m_0$ é de 75.79 0Kg e a $m_{TLD}$ é de 107.30 Kg.

$$d_{máx} = \frac{0.408\, R\, coth(\frac{1.84H}{R})}{\left(\frac{g}{(\omega_{TMD}^2 \theta_h R)} - 1\right)} \qquad (4.8.16)$$

Onde:

g - Aceleração da gravidade $(m/s^2)$

$\theta_h$ - Amplitude angular de oscilaçao livre na superficie do liquido dado pela equação

$$\theta_h = 1.534\frac{u_{máx}}{R}\tanh(184\frac{H}{R}) \qquad (4.8.17)$$

Sendo $u_{max}$, o deslocamento máximo da parede do tanque.

Pelas equações (4.8.16) e (4.8.17), originou a solução de 4 TLDs com os valores de cálculo e resultados apresentados na Tabela 4.8.8.

Tabela 4.8.8 – Cálculo do Angulo máximos e altura máxima da onda do TLD

| *H (m)* | *R (m)* | $u_{máx}\ (m)$ | $\theta_h\ (rad)$ | $d_{máx}\ (m)$ |
|---|---|---|---|---|
| *0,1873* | *0,30* | *0,0376* | *0,1571* | *0,035* |

Apresenta-se seguidamente uma figura com a solução de TLDs a implementar no topo da torre metálica, na Figura 4.8.9. Foi efetuada uma última simulação com a localização precisa do TLDs (em função do diâmetro do tanque, ficando o mais junto possível das guardas para se obter a maior redução na oscilação na Torre-Radar), os resultados da redução máxima da oscilação são apresentados na Tabela 4.8.9.

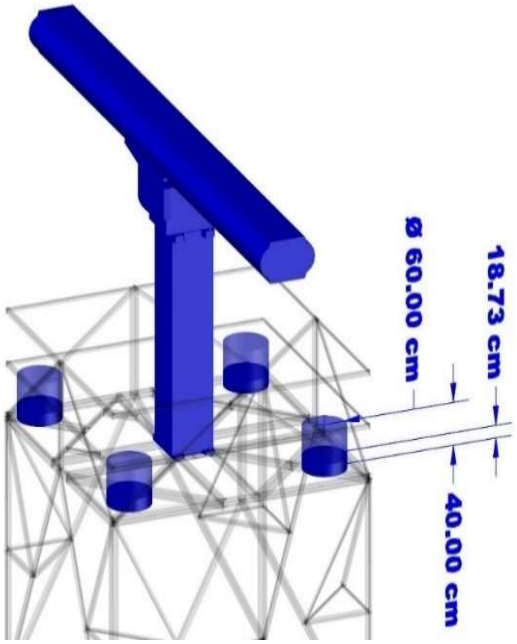
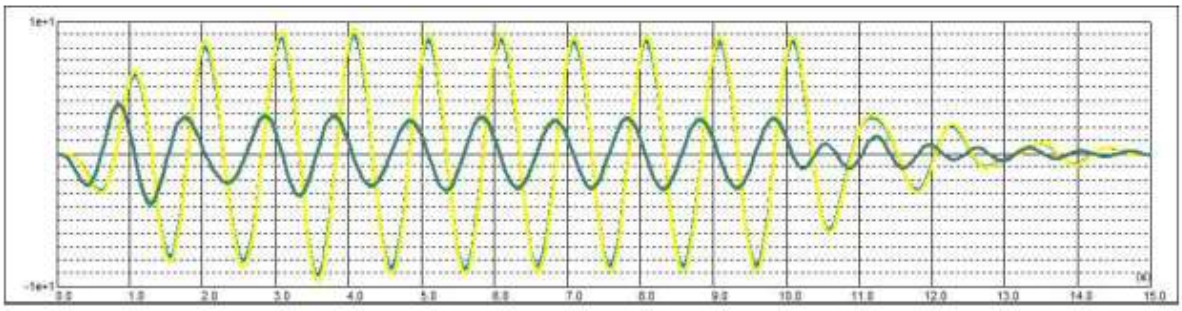



*Figura 4.8.9 – Solução de TLDs a cilíndricos a implementar*

Tabela 4.8.9 - Solução Proposta redução de oscilação em %

| *TLD TANGENTE ÁS GUARDAS* | *M1=4x107.30Kg* | | *SEM TLD* | |
|---|---|---|---|---|
| *Legenda* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* |
| *UY_nó_659* | *3,84397* | *-3,82978* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_652* | *9,51588* | *-9,66885* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_659* | *3,67862* | *-3,6401* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_652* | *9,02168* | *-9,19448* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_637* | *3,77998* | *-3,76594* | *4,376* | *-3,978* |
| *UX_nó_637* | *3,65105* | *-3,61512* | *4,374* | *-3,976* |
| *Redução_nó_637 UY %* | *15,774* | *5,635* | | |
| *Redução_nó_637 UX %* | *19,792* | *9,992* | | |

Os recipientes devem ser materializados em plástico ou fibra de carbono. Aconselha-se também, a pintura com cores claras, de forma a evitar o seu aquecimento excessivo, bem como, proceder à sua correta vedação. O desempenho dos TLDs poderá ser aumentado dotando-o de baffles ou screens, que na prática consiste em seccionar os recipientes, e deixar aberturas devidamente estudadas para tornar o deslocamento do líquido mais gradual. O peso próprio dos recipientes é desprezável quando comparado com a massa total de água.

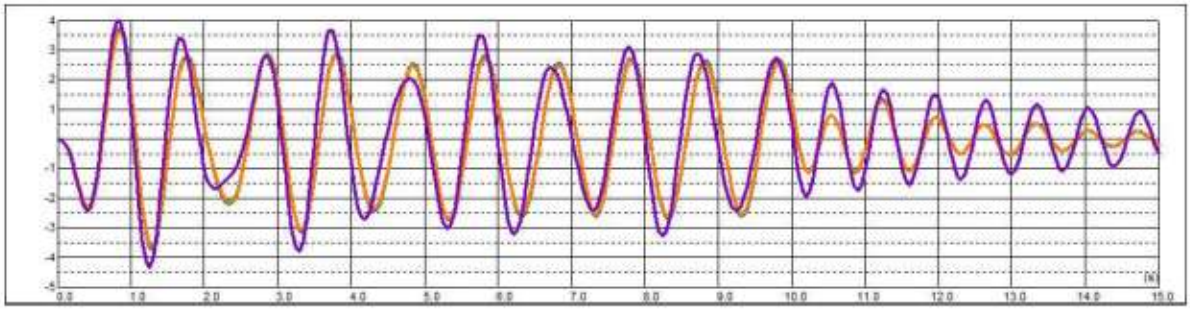


| Legenda | Cor do | Máx. | Min. |
|---|---|---|---|
| 64_Deslocamento_UX_652 | | 9,02168 | -9,19448 |
| 97_Deslocamento_UY_652 | | 9,51588 | -9,66885 |
| 97_Deslocamento_UY_659 | | 3,84397 | -3,82978 |
| 64_Deslocamento_UX_659 | | 3,67862 | -3,64010 |
| 64_Deslocamento_UX_637 | | 3,65105 | -3,61512 |
| 97_Deslocamento_UY_637 | | 3,77998 | -3,76594 |

*Figura 4.8.10–Deslocamento máximo para a solução de 4 TLDs localizados tangente aos guarda corpos da plataforma à cota 45 m o nó 637 localizado no centro geométrico da torre, 652 livre e 659 nó fixo compatível*

Na Figura 4.8.10, pode-se observar o movimento dos nós fixos da estrutura designado nó 659 e o nó acoplado ao nó fixo com amortecimento e rigidez designado 652 na análise de tempo. Os parâmetros introduzidos para a simulação que origina a redução dos deslocamentos podem ser consultados na

Tabela 4.8.7, correspondentes à massa de TLD de 107.30 kg. O nó que corresponde ao centro geométrico da plataforma à cota 45 m é o nó 637.onde é perfeitamente visível o maior deslocamento do nó 652, correspondente ao movimento de um TMD, que minimiza a oscilação da estrutura, para as duas direções x e y.



| Legenda | Cor do | Máx. | Min. |
|---|---|---|---|
| 97_Deslocamento_UY_637 | | 3,77998 | -3,76594 |
| 64_Deslocamento_UX_637 | | 3,65105 | -3,61512 |
| 74_Deslocamento_UY_637_sem TLDs | | 3,98 | -4,38 |
| 64_Deslocamento_UX_637_sem TLDs | | 3,98 | -4,37 |

*Figura 4.8.11– Deslocamentos máximos no nó 637 (Centro Geométrico) para a solução com 4 TLDS e sem TLDs.*

Na Figura 4.8.11 verifica-se a resposta da análise de tempo para a solução de Torre-Radar cedida pela Metalogalva S.A. para a situação de 4 TLDs cilíndricos com massa de 107.30 kg, e para a situação sem TLDs, tomando como referência o centro da plataforma a 45 m, correspondente ao nó 637. Pode-se verificar que além de diminuir a resposta, a solução de TLDs altera a resposta da estrutura. O valor de deslocamento máximo da solução sem TLDs, apesar de ter por base a mesma excitação e força do cenário 2 que é apresentado na Tabela 4.5.2 e no gráfico da Figura 4.5.6 no item 4.5.1 deste capitulo 4, devido ao facto do deslocamento máximo Tabela 4.5.2,estar localizado no centro de rotação da antena (como a força $F_s$ está aplicada no CR centro de rotação o deslocamento máximo ocorre nesse ponto, e na Figura 4.8.10, o deslocamento máximo é no centro CG centro geométrico).Figura 4.8.10– Deslocamento máximo para a solução de 4 TLDs localizados tangente aos guarda corpos da plataforma à cota 45 m o nó 637 localizado no centro geométrico da torre, 652 livre e 659 nó fixo compatível.

### 4.8.6 SOLUÇÃO DE DIMENSIONAMENTO COM TLDS

A solução de dimensionamento obtida em no item 4.7 do quarto capítulo, que consta da Figura 4.7.1, designada "Solução 1", também foi alvo de estudo com a solução de TLDs, embora a solução de TLDs não seja a ótima porque essa solução foi afinada para a estrutura cedida pela Metalogalva S.A:. Foi feita uma simulação para averiguar se diminui a oscilação de serviço induzida pela antena radar. Na Figura 4.8.12 são apresentados os deslocamentos máximos da análise de tempo efetuada para a "Solução 1"com a solução de TLDs definida no item 4.8.5 deste capítulo acoplados na Torre-Radar, e sem TLDs .

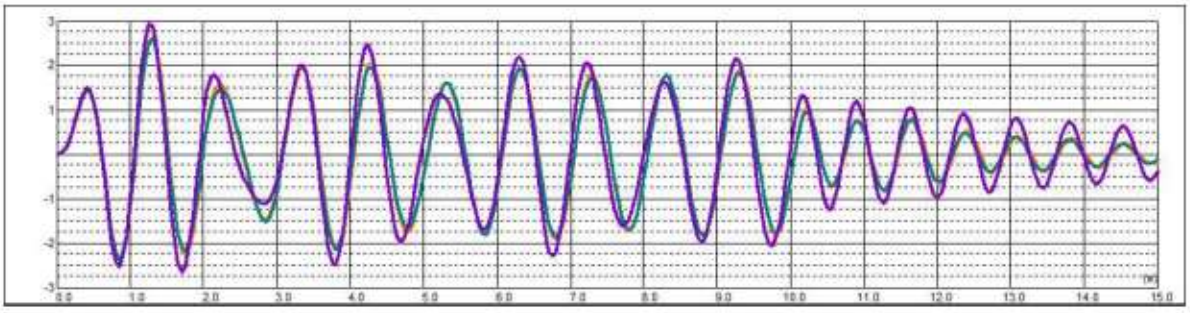
Por um lado, a diminuição da ação do vento devido à diminuição do coeficiente $c_s c_d$, por via do decremento logarítmico associado à solução de amortecedor de líquido sintonizado (TLD), deve leva a

uma solução mais económica. Há ainda uma mudança dos parâmetros de rigidez k, e amortecimento C, que podem ter um efeito benéfico no dimensionamento.

O decremento logarítmico $\delta_d$, e dado pela expressão (3.1.38), e sendo $\xi_d$, coeficiente de amortecimento do TLD dado pela expressão

$$\xi_d = \frac{C}{C_{crit}} = \frac{C}{2m_{TLD}\omega_d} \qquad (4.8.18)$$

$$\delta_d = 0.112$$



| Legenda | Cor do | Máx. | Mín. |
|---|---|---|---|
| 100_Deslocamento_UX_636 | | 2,64992 | -2,38234 |
| 101_Deslocamento_UY_636 | | 2,59665 | -2,37722 |
| 101_Deslocamento_UY_636_sem TLD | | 2,93 | -2,67 |
| 100_Deslocamento_UX_636 sem TLD | | 2,92 | -2,65 |

*Figura 4.8.12 – "Solução 1" com TLDs e sem TLDs no nó 636 centro geométrico da plataforma a 45 m*

Após atualização do coeficiente de $c_s c_d$, foram atualizadas as forças do vento, e aplicadas na estrutura, e instalados os TLDs, dando origem a nova estrutura, com perfis de secções superiores aos obtidos pela Metalogalva S. A., apresentam-se nas Figura 4.8.13 e Figura 4.8.14 as duas soluções, ainda assim menores do que a Solução 1. Esta solução não se encontra uniformizada, sendo que após esta uniformização o peso da estrutura aumenta, ainda assim tem cerca de 18,0% a mais que a solução da Metalogalva S.A. Este acréscimo pode ser explicado pelas ações determinadas para a Solução 1, terem por base cenários bastante exigentes de ações.

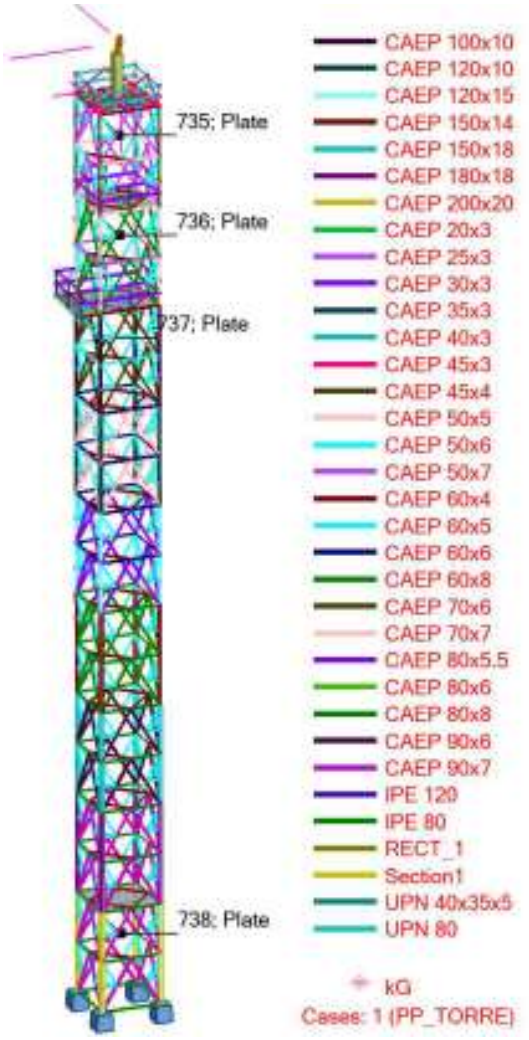



*Figura 4.8.13– Solução1 com TLDs*

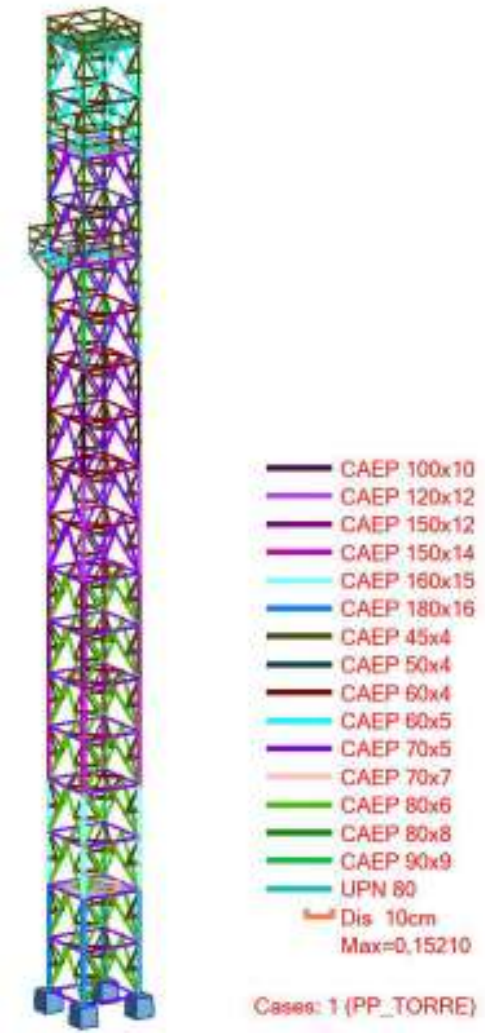



*Figura 4.8.14 – Solução da Metalogalva S.A.*

Tabela 4.8.10 – Pesos da solução com 4 TLDs e da solução da Metalogalva S.A.

| *Peso (kg) -Solução 1 com TLDs* | *Peso (kg) – Metalogalva S.A* |
|---|---|
| *12559* | *10404* |
| *+17.60 %* | |

No ANEXO D encontram-se verificações para a Solução 1 com TLD, das barras nos últimos 5 metros de Torre-Radar.

### 4.8.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O TLD, (Tunned Mass Damper), diminui consideravelmente a oscilação de serviço da torre induzida pelo movimento da antena radar. A ação dinâmica do vento também induz uma oscilação que não foi

quantificada, embora o TLD também possa ter um efeito positivo nessa oscilação, que teria de ser alvo de um estudo aprofundado. Podem existir interações entre a ação dinâmica da antena radar e a ação do vento.

Localizar o centro de rotação CR (centro de rotação) da antena, coincidente com o centro de gravidade CG (centro de Gravidade) teórico do conjunto torre e antena, poderia ter um efeito benéfico na oscilação da antena radar. Nestas condições fazendo coincidir o CR com o CG, acabaria por existir sempre uma excentricidade devido à incerteza no cálculo do CG, devido às imperfeições do material, alguma heterogeneidade dos perfis e passado algum tempo alguma folga nas ligações (aparafusadas).

A oscilação excessiva da antena radar no topo da torre pode ser consequência de um conjunto de motivos, como por exemplo quando associado à rotação da antena se verifica uma interação da ação do vento nessa mesma rotação, o que pode ter repercussões não desprezáveis na estrutura, gerando esforços torção.

Devido a problemas em simular a situação real no programa de cálculo, tanto no caso da simulação do movimento da antena radar na estrutura Torre-Radar, como depois em simular o comportamento da torre com o sistema de TLDs acoplados fez com que o tempo de elaboração da dissertação fosse maior do que o previsto, porque teve de ser obtida informação em fóruns próprios da Autodesk -Robot Structural Analysis.

Uma falha neste estudo foi não ter sido possível medir os deslocamentos in loco da torre, seria muito útil, para compreender melhor o comportamento estrutural, e fazer simulações mais precisas.

Poderia ter sido feito um cálculo plástico, sendo que os parâmetros calculados no segundo capítulo de análise estrutural, indicam essa possibilidade, embora fosse um procedimento previsivelmente moroso.

Associando a ação dinâmica do vento à ação dinâmica da antena radar permitiria proceder a uma análise temporal de fadiga dos elementos da estrutura.

O cenário equacionado para simular a oscilação da torre devido ao movimento da antena radar, têm por base o cálculo de forças concentradas, associadas depois a excitação harmónica, o que faz com que se obtenham em pontos localizados forças desproporcionadas. Por exemplo ao colocar uma força, correspondente à força livre $F_s$ , no centro de rotação da antena, que por sua vez vai ser majorada, faz com que na plataforma se obtenham, momentos fletores extremamente altos, e consequentemente só verificado por perfis de dimensão considerável.A função primordial dos TLDs é mitigar o efeito das ações dinâmicas, mas altera as características da estrutura, e a ação do vento vem minorada á custa do coeficiente $c_s c_d$, essencialmente pelo amortecimento devido a amortecedores de líquido sintonizado.

# 5
# CONCLUSÕES E SUGESTÕES

## 5.1 CONCLUSÕES FINAIS

O sistema de controlo de vibrações TLD, para este tipo de estruturas, pelo seu desempenho, baixo custo, facilidade de aplicação, é muito competitivo.

A oscilação provocada pela antena é a ação que atua constantemente, e é fundamental perceber porque induz oscilações tão importantes na estrutura. O posicionamento no topo da torre terá de ser melhor estudado por forma a minimizar à partida as excentricidades sistema torre/antena radar.

Pela classificação da estrutura segundo o Eurocódigo 3, na classificação da torre, deverá ser feito um estudo que contemple o a análise plástica, que tirará maior partido das secções, e poderá levar a importantes poupanças no custo da estrutura, e com um desempenho estruturalmente equivalente ou melhorado.

Devido ás alterações climáticas deverá ser tida em conta uma majoração da ação do vento, recorrendo a períodos de retorno maiores, tendo em conta o recente furacão Leslie, que colapsou várias torres do (incluindo a deste estudo), e que levem a estruturas mais resistentes sobre pena de haver cada vez mais colapsos destas estruturas.

A colocação dos TLDs colocados mais na periferia da secção da torre, têm mais eficiência na mitigação da oscilação do que a colocação dos TLDs mais próximos do centro da torre na secção transversal da torre à cota 45 m.

Há um efeito proveniente da interação da ação do vento com a rotação da antena que induz uma oscilação extra, e consequentemente um aumento de oscilação que deve ser estudado mais aprofundadamente, terá de se proceder a leituras de deslocamentos, velocidades e acelerações para se perceber melhor esta interação, bem como anemómetros para edição da velocidade do vento.

Ao longo do tempo a torre tem tendência a aumentar a oscilação devido à deterioração das ligações aparafusadas, por esmagamento dos perfis ou corte dos parafusos (terão de ser feitas reparações), ou aumentando de folgas e de excentricidade. Para além de eventual aumento do padrão de deformações iniciais das barras constituintes (Out-Of-Staightness, ou Crookedness).

Neste caso os TLDs de formas cilíndricas são mais eficientes que os retangulares.

Existe uma diferença considerável entre afinar os TLDs com a razão de massa $\mu$ do TLD, sobre a massa modal, ou a razão de massa $\mu$, sobre a massa total da estrutura, verificou-se para o caso melhores resultados afinando os TLDs, através da massa total da estrutura, alterando os parâmetros, rigidez k, e amortecimento c.

Para a razão de massa $\mu = m_{TLD}/M_{est}$ com melhor desempenho é a que tem uma percentagem 4.3%, enquanto que para a razão de massa $\mu = m_{TLD}/M_1$ corresponde a 13.3%.

Quando introduzidos na torre os TLDs na análise modal os primeiros modos de vibração da torre são locais e correspondem à frequência dos TLDs, as frequências da estrutura continuam as mesmas embora a resposta da estrutura seja bastante diferente.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Podia ter sido feito um cálculo plástico, sendo que os parâmetros $\alpha_{cr}$, calculados no ponto 2.1, apresentados na Tabela 2.1.1,indicam essa possibilidade, embora se preveja um procedimento complexo de cálculo.

A ação do vento foi calculada como força estática, para verificar os deslocamentos na estrutura para (ULS), mas associado ao estado limite de serviço (SLS) pode ser determinada a ação dinâmica do vento, e nessas circunstâncias verificar uma solução de TLDs que diminua a oscilação da Torre-Radar associada ao vento. Para uma distribuição de elevado número de harmónicos utilizados na formulação da ação dinâmica do vento.

Ainda associado a ação dinâmica do vento poderia ser feita uma análise de fadiga e prever o aumento da oscilação devido a folgas nas ligações aparafusadas, ou até mesmo o número de ciclos até o rompimento das ligações, por corte dos parafusos quer por esmagamento dos perfis.

A nível de formas de amortecedores de líquido sintonizado (TLDs), podem ser equacionados dispositivos de TLDs seccionados, com formas anelares (colocados no centro da plataforma a 45 m de altura) e por exemplo TLCDs. O dimensionamento de baffles ou screens também pode levar a resultados muito interessantes na mitigação das oscilações.

Também se acha importante que trabalhos posteriores tenham em conta o efeito da não-linearidade geométrica, na quantificação da rigidez total da Torre-Radar, face ás compressões a possa estar sujeita.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abramson, H . Norman. 1966. "The Dynamic Behavihor of liquid in Moving Containers." *National Aeronautics and Space Administration*.

Assunção, Tânia Maria Ribeiro Costa. 2012. "Considerações sobre efeitos dinâmicos e carregamentos induzidos por fontes de excitação em estruturas industriais

".

Barros, R., H. Guimarães, and M. B. César. 2016. "Analysis of the dynamic behavior of a radar tower." Springer Proceedings in Mathematics and Statistics.

Bong-Ho, Cho, Yu Eunjong, and Kim Hongjin. 2016. "1949. Mitigation of wind-induced vibration of a tall residential building using liquid column vibration absorber." *Journal of Vibroengineering* 18 (2):1031-1040.

Braz-César, Manuel T, and Rui Barros. 2012. "A survey of semi-active control with MR dampers." 9th International Congress on Civil Engineering.

Braz César, Manuel, and Rui Barros. 2014. *EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF MR DAMPERS*.

Braz César, Manuel, and Rui Barros. 2016. "ANFIS optimized semi-active fuzzy logic controller for magnetorheological dampers." *Open Engineering* 6. doi: 10.1515/eng-2016-0075.

Carneiro De Barros, R. 2001. Algumas Noções sobre Blocos de Fundação, Espias e Ancoragens para Uso no Projecto de alguns Tipos de Pontes e Estruturas Especiais.

Carneiro De Barros, R. 2008. *Seismic Analysis and Design of Bottom Supported Anchored Metallic Tanks*.

Chopra, Anil K. 2014. "Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering."

Clough, Ray W., and Joseph Penzien. 1975. *Dynamics of structures Ray W. Clough, Joseph Penzien*. New York: McGraw-Hill.

Dyke, S. J., B. F. Spencer, P. Quast, and M. K. Sain. 1995. "Role of Control-Structure Interaction in Protective System Design." *Journal of Engineering Mechanics* 121 (2):322-338. doi: doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:2(322).

Ferreira, Nuno AC, Rui C Barros, and Raimundo Delgado. 2011. "Comparisons of a tall building wind response with and without a TMD." 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2011), Corfu, Greece.

Gardarsson, S., Harry Yeh, and Dorothy Reed. 2001. "Behavior of Sloped-Bottom Tuned Liquid Dampers." *Journal of Engineering Mechanics* 127 (3):266-271. doi: doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:3(266).

Hartog, Den. 1940. "Mechanical Vibrations." *McGraw-Hill, New York*.

Henriques, J. M., and R. Carneiro De Barros. 2013. "Comparisons of a tall lattice wind tower response with and without a TMD." ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Proceedings - An IACM Special Interest Conference.

Higashino, M, and S Aizawa. 1993. "Application of active mass damper system in actual buildings." Proceedings of the International Workshop on Structural Control, Los Angeles, CA.

Hochrainer, MJ. 2005. "Tuned liquid column damper for structural control." *Acta Mechanica* 175 (1-4):57.

Housner, G. W. 1990. *Selected earthquake engineering papers of George W. Housner*. New York, N.Y.: American Society of Civil Engineers.

Kamagata, S. 1994. "Autonomous Adaptive Control of Active Variable Stiffness System for Seismic Ground Motion." *Proceedings of the First World Conference on Structural Control* 2:TA4-33.

Kobori, T. 1998. "Mission and Perspective towards Future Structural Control Research." *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control* 1:25-34.

Lamb, H. 1975. *Hydrodynamics*: Cambridge University Press.

Love, J. S., and M. J. Tait. 2013. "The Influence of Tank Orientation Angle on a 2D Structure-Tuned Liquid Damper System." *Journal of Vibration and Acoustics* 135 (1):011010-011010-3. doi: 10.1115/1.4007416.

NP-EN-1990. 2009. "Eurocódigo 0 :Bases Para Projeto de Estrururas."

NP-EN-1991-1-3. 2006. "Eurocódigo 1: Acções em Estruturas - Parte 3 - Acções em gruas e máquinas."

NP-EN-1991-1-4. 2010. "NP EN 1991-1-4 , Eurocódigo 1, -Acções em Estruturas - Parte 1-4: Acções Gerais - Acções do Vento."

NP-EN-1993-1-1. 2010. "Eurocódigo 3 - Projecto de Estruturas de Aço - Parte 1-1 : Regras Gerais e regras de edifícios ".

NP-EN-1993-1-8. 2010. "Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço - Parte 1-8 : Projecto de ligações."

NP-EN-1993-3-1. 2006. "Eurocodigo 3: Dimensionamento de Estruturas Metálicas - Part 3-1: Torres, Mastros e Chaminés ".

NP-EN-1998-1. 2010. "Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência a sismos- Parte1 - Regras gerais, acções sismicas e regras para edificios."

Patten, W. N. 1998. "The I-35 Walnut Creek Bridge an Intelligent Highway Bridge via Semi-active Structural Control." *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control* 1:427-436.

Sack, Ronald L, and W Patten. 1994. "Semiactive hydraulic structural control." Proceedings of the International Workshop on Structural Control.

Soong, T. T. 1988. "State-of-the-art review: Active structural control in civil engineering." *Engineering Structures* 10 (2):74-84. doi: https://doi.org/10.1016/0141-0296(88)90033-8.

Soong, T. T., and B. F. Spencer. 2000. "Active, semi-active and hybrid control of structures." *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 33 (3):387-402.

Soong, T. T., and B. F. Spencer. 2002. "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice." *Engineering Structures* 24 (3):243-259. doi: https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00092-X.

Takashi, Nomura. 1994. "ALE finite element computations of fluid-structure interaction problems." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 112 (1):291-308. doi: https://doi.org/10.1016/0045-7825(94)90031-0.

USAEC-Division of Reactor Development, U.S. Atomic Energy Commission 1963. "Nuclear Reactors and Earthquakes

" *Report TID-7024*.

Vasylenko, Yevgen. 2014. "Determination of Natural Frequency of Liquid Sloshing in Tanks of Various Shapes."

Yalla, Swaroop Krishna. 2002. "Liquid dampers for mitigation of structural response: Theoretical development and experimental validation."

**ANEXO A – DADOS DAS TORRES RADAR CEDIDOS PELA GNR-CDT**

Dados das Torre Radar em Portugal

| *Designação* | *Coordenadas* | *Altura de torre* | *Cotas* | *ASL Sensor RADAR* | *Urbanização* | *Obs.* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Ancão* | *37° 02’ 10,20’’ N 08° 02’ 14,80’’ W* | *25* | *23* | *48* | *Não* | |
| *Sardão* | *37° 32’ 59,70’’ N 08° 47’ 32,90’’ W* | *20* | *28* | *48* | *Não* | |
| *Galé* | *37° 04’ 43,25’’ N 08° 18’ 43,80’’ W* | *35* | *14* | *49* | *Não* | |
| *Fonte da Telha* | *38° 34’ 33,90’’ N 09° 11’ 40,00’’W* | *20* | *60* | *80* | *Não* | |
| *Foz do Arelho* | *39° 28' 23"N 09° 11' 54" W* | *15* | *105* | *120* | *Não* | |
| *Armona* | *37° 01’ 03,20’’ N 07° 47’ 39,80’’ W* | *45* | *7* | *52* | *Não* | |
| *Praia Verde* | *37°10' 29" N 07°28' 54" W* | *25* | *21* | *46* | *Sim* | |
| *Leirosa* | *40° 03’ 24,30’’ N 08° 53’ 25,30’’ W* | *45* | *10* | *55* | *Sim* | *Colapsou em 13OUT18* |
| *Montedor* | *41° 45’ 03’’ N 08° 52’ 26’’ W* | *30* | *73* | *103* | *Não* | |
| *Aguçadoura* | *41° 25’ 27’’ N 08° 46’ 55’’ W* | *45* | *4* | *49* | *Sim* | |
| *São Jacinto* | *40° 40’ 15,40’’ N 08° 44’ 30,10’’ W* | *45* | *7* | *52* | *Não* | |
| *Espinho* | *41° 00' 17,60" N 08° 38' 44,20"W* | *45* | *7* | *52* | *Sim* | |
| *Cabo da Roca* | *38°46'54.17"N 09°29'51.29"W* | *45* | *139* | *184* | *Sim** | *Colapsou em DEC17* |
| *Paimogo* | *39°17'18.16"N 9°20'29.93"W* | *35* | *39* | *74* | *Não* | |
| *Ponta da Piedade* | *37° 4'51.39"N 8°40'9.06"W* | *25* | *36* | *61* | *Sim* | |
| *Ponta da Galhofa* | *37°44'28.75"N 8°48'8.40"W* | *45* | *40* | *85* | *Não* | |
| *Sines* | *37°57'27.82"N 8°53'14.79"W* | *45* | *88* | *133* | *Não* | |
| *Comporta* | *38°23'10.14"N 8°48'5.30"W* | *45* | *4* | *49* | *Não* | |
| *São Pedro de Moel* | *39°45'59.96"N 9° 1'35.95"W* | *45* | *31* | *76* | *Não* | *Colapsou em 13OUT18* |
| *Tocha* | *40° 19' 25,63" N 8° 50' 37,85" W* | *45* | *13* | *58* | *Não* | |

**ANEXO B - CÁLCULO DA AÇÃO DO VENTO**

Calculo dos parâmetros da ação do vento segundo o (NP-EN-1991-1-4 2010)

| $z(m)$ | $L(z)=$ | $b(m)$ | $V_m(m/s)$ | $f_L(z,n)$ | $S_L(z,n)$ | $B^2$ | $\eta_h$ | $\eta_b$ | $R_h$ | $R_b$ | $\delta a$ | $\delta s$ | $\delta$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 45,000 | 364,185 | 0,100 | 52,885 | 13,773 | 0,024 | 0,806 | 6,810 | 0,015 | 0,136 | 0,990 | 0,143 | 0,050 | 0,193 |
| 44,000 | 361,092 | 0,100 | 52,761 | 13,688 | 0,024 | 0,805 | 6,869 | 0,015 | 0,136 | 0,990 | 0,143 | 0,050 | 0,193 |
| 43,000 | 357,955 | 0,100 | 52,635 | 13,601 | 0,025 | 0,804 | 6,929 | 0,015 | 0,136 | 0,990 | 0,143 | 0,050 | 0,193 |
| 42,000 | 354,773 | 0,100 | 52,505 | 13,514 | 0,025 | 0,803 | 6,991 | 0,016 | 0,136 | 0,990 | 0,142 | 0,050 | 0,192 |
| 41,000 | 351,543 | 0,100 | 52,373 | 13,425 | 0,025 | 0,802 | 7,055 | 0,016 | 0,136 | 0,990 | 0,142 | 0,050 | 0,192 |
| 40,000 | 348,263 | 0,100 | 52,237 | 13,334 | 0,025 | 0,801 | 7,122 | 0,016 | 0,136 | 0,990 | 0,142 | 0,050 | 0,192 |
| 39,000 | 344,933 | 0,100 | 52,098 | 13,242 | 0,025 | 0,800 | 7,191 | 0,016 | 0,136 | 0,990 | 0,141 | 0,050 | 0,191 |
| 38,000 | 341,549 | 0,100 | 51,955 | 13,148 | 0,025 | 0,799 | 7,262 | 0,016 | 0,136 | 0,990 | 0,141 | 0,050 | 0,191 |
| 37,000 | 338,109 | 0,100 | 51,808 | 13,052 | 0,025 | 0,798 | 7,336 | 0,016 | 0,136 | 0,990 | 0,141 | 0,050 | 0,191 |
| 36,000 | 334,611 | 0,100 | 51,658 | 12,955 | 0,025 | 0,797 | 7,412 | 0,016 | 0,136 | 0,990 | 0,140 | 0,050 | 0,190 |
| 35,000 | 331,053 | 0,100 | 51,503 | 12,856 | 0,026 | 0,796 | 7,492 | 0,017 | 0,136 | 0,990 | 0,140 | 0,050 | 0,190 |
| 34,000 | 327,431 | 0,100 | 51,343 | 12,755 | 0,026 | 0,795 | 7,575 | 0,017 | 0,136 | 0,990 | 0,139 | 0,050 | 0,189 |
| 33,000 | 323,742 | 0,100 | 51,179 | 12,651 | 0,026 | 0,794 | 7,661 | 0,017 | 0,136 | 0,990 | 0,139 | 0,050 | 0,189 |
| 32,000 | 319,983 | 0,100 | 51,010 | 12,546 | 0,026 | 0,792 | 7,751 | 0,017 | 0,136 | 0,990 | 0,138 | 0,050 | 0,188 |
| 31,000 | 316,150 | 0,100 | 50,835 | 12,438 | 0,026 | 0,791 | 7,845 | 0,017 | 0,136 | 0,990 | 0,138 | 0,050 | 0,188 |
| 30,000 | 312,240 | 0,100 | 50,655 | 12,328 | 0,026 | 0,790 | 7,943 | 0,018 | 0,136 | 0,990 | 0,137 | 0,050 | 0,187 |
| 29,000 | 308,248 | 0,100 | 50,468 | 12,215 | 0,026 | 0,789 | 8,046 | 0,018 | 0,136 | 0,990 | 0,137 | 0,050 | 0,187 |
| 28,000 | 304,170 | 0,100 | 50,275 | 12,100 | 0,027 | 0,787 | 8,154 | 0,018 | 0,136 | 0,990 | 0,136 | 0,050 | 0,186 |
| 27,000 | 300,000 | 0,100 | 50,075 | 11,982 | 0,027 | 0,786 | 8,268 | 0,018 | 0,136 | 0,990 | 0,136 | 0,050 | 0,186 |
| 26,000 | 295,733 | 0,100 | 49,868 | 11,861 | 0,027 | 0,784 | 8,387 | 0,019 | 0,136 | 0,990 | 0,135 | 0,050 | 0,185 |
| 25,000 | 291,364 | 0,100 | 49,652 | 11,736 | 0,027 | 0,783 | 8,513 | 0,019 | 0,136 | 0,990 | 0,135 | 0,050 | 0,185 |
| 24,000 | 286,884 | 0,100 | 49,428 | 11,608 | 0,027 | 0,781 | 8,646 | 0,019 | 0,136 | 0,990 | 0,134 | 0,050 | 0,184 |
| 23,000 | 282,287 | 0,100 | 49,194 | 11,477 | 0,027 | 0,779 | 8,786 | 0,020 | 0,136 | 0,990 | 0,133 | 0,050 | 0,183 |
| 22,000 | 277,565 | 0,100 | 48,949 | 11,341 | 0,028 | 0,777 | 8,936 | 0,020 | 0,136 | 0,990 | 0,133 | 0,050 | 0,183 |
| 21,000 | 272,707 | 0,100 | 48,693 | 11,201 | 0,028 | 0,775 | 9,095 | 0,020 | 0,136 | 0,990 | 0,132 | 0,050 | 0,182 |
| 20,000 | 267,703 | 0,100 | 48,425 | 11,056 | 0,028 | 0,773 | 9,265 | 0,021 | 0,136 | 0,990 | 0,131 | 0,050 | 0,181 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *19,000* | *262,542* | *0,100* | *48,143* | *10,907* | *0,028* | *0,771* | *9,447* | *0,021* | *0,136* | *0,990* | *0,131* | *0,050* | *0,181* |
| *18,000* | *257,210* | *0,100* | *47,845* | *10,752* | *0,029* | *0,769* | *9,643* | *0,021* | *0,136* | *0,990* | *0,130* | *0,050* | *0,180* |
| *17,000* | *251,690* | *0,100* | *47,531* | *10,591* | *0,029* | *0,766* | *9,854* | *0,022* | *0,136* | *0,990* | *0,129* | *0,050* | *0,179* |
| *16,000* | *245,965* | *0,100* | *47,198* | *10,423* | *0,029* | *0,764* | *10,084* | *0,022* | *0,136* | *0,990* | *0,128* | *0,050* | *0,178* |
| *15,000* | *240,013* | *0,100* | *46,843* | *10,248* | *0,030* | *0,761* | *10,334* | *0,023* | *0,136* | *0,990* | *0,127* | *0,050* | *0,177* |
| *14,000* | *233,809* | *0,100* | *46,463* | *10,064* | *0,030* | *0,758* | *10,608* | *0,024* | *0,136* | *0,990* | *0,126* | *0,050* | *0,176* |
| *13,000* | *227,325* | *0,100* | *46,056* | *9,872* | *0,030* | *0,755* | *10,911* | *0,024* | *0,136* | *0,990* | *0,125* | *0,050* | *0,175* |
| *12,000* | *220,522* | *0,100* | *45,615* | *9,669* | *0,031* | *0,751* | *11,247* | *0,025* | *0,136* | *0,990* | *0,124* | *0,050* | *0,174* |
| *11,000* | *213,359* | *0,100* | *45,137* | *9,454* | *0,031* | *0,747* | *11,625* | *0,026* | *0,136* | *0,990* | *0,122* | *0,050* | *0,172* |
| *10,000* | *205,779* | *0,100* | *44,613* | *9,225* | *0,032* | *0,743* | *12,053* | *0,027* | *0,136* | *0,990* | *0,121* | *0,050* | *0,171* |
| *9,000* | *197,712* | *0,100* | *44,033* | *8,980* | *0,032* | *0,738* | *12,545* | *0,028* | *0,136* | *0,990* | *0,119* | *0,050* | *0,169* |
| *8,000* | *189,068* | *0,100* | *43,385* | *8,716* | *0,033* | *0,733* | *13,118* | *0,029* | *0,136* | *0,990* | *0,118* | *0,050* | *0,168* |
| *7,000* | *179,725* | *0,100* | *42,651* | *8,428* | *0,034* | *0,726* | *13,800* | *0,031* | *0,136* | *0,990* | *0,116* | *0,050* | *0,166* |
| *6,000* | *169,511* | *0,100* | *41,803* | *8,110* | *0,034* | *0,719* | *14,632* | *0,033* | *0,136* | *0,990* | *0,113* | *0,050* | *0,163* |
| *5,000* | *158,178* | *0,100* | *40,801* | *7,754* | *0,035* | *0,710* | *15,680* | *0,035* | *0,136* | *0,990* | *0,111* | *0,050* | *0,161* |
| *4,000* | *145,333* | *0,100* | *39,573* | *7,345* | *0,037* | *0,699* | *17,066* | *0,038* | *0,136* | *0,990* | *0,107* | *0,050* | *0,157* |
| *3,000* | *130,300* | *0,100* | *37,991* | *6,860* | *0,038* | *0,684* | *19,035* | *0,042* | *0,136* | *0,990* | *0,103* | *0,050* | *0,153* |
| *2,000* | *111,715* | *0,100* | *35,761* | *6,248* | *0,041* | *0,663* | *22,202* | *0,049* | *0,136* | *0,990* | *0,097* | *0,050* | *0,147* |
| *1,000* | *85,873* | *0,100* | *31,949* | *5,376* | *0,045* | *0,625* | *28,883* | *0,064* | *0,136* | *0,990* | *0,087* | *0,050* | *0,137* |

Cálculo das forças do vento por cada 2.5 m de torre

| *z(m)* | *$R^2$* | *v* | *$K^p$* | *Iv(z)=* | *CsCd* | *cf* | *qp(z)= (Pa)* | *Fw ($KN/m^2$)* | *Fw (KN/m) XX* | *Fw (KN/m) YY* | *Fw (KN/m) XX* | *Fw (KN/m) YY* | *VENTO XX* | *VENTO /2.5m* | *VENTO YY* | *VENTO YY/2.5 m* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *45.00* | *0.09* | *0.64* | *3.62* | *0.10* | *1.03* | *1.66* | *3020.49* | *5.18* | *10.27* | *10.27* | | | | | | |
| *44.00* | *0.09* | *0.64* | *3.62* | *0.10* | *1.03* | *1.66* | *3009.36* | *5.16* | *4.31* | *4.31* | | | *15.18* | | *15.18* | |
| *43.00* | *0.09* | *0.64* | *3.62* | *0.10* | *1.03* | *1.66* | *2997.99* | *5.14* | *4.30* | *4.30* | *6.07* | *6.07* | | | | |
| *42.00* | *0.09* | *0.64* | *3.62* | *0.10* | *1.03* | *1.66* | *2986.37* | *5.12* | *4.28* | *4.28* | | | | *7.59* | | *7.59* |
| *41.00* | *0.09* | *0.64* | *3.62* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2974.49* | *5.10* | *7.19* | *7.19* | | | | | | |
| *40.00* | *0.09* | *0.64* | *3.62* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2962.35* | *5.08* | *7.16* | *7.16* | | | | | | |
| *39.00* | *0.09* | *0.64* | *3.62* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2949.92* | *5.05* | *4.23* | *4.23* | | | *14.56* | | *13.41* | |
| *38.00* | *0.09* | *0.64* | *3.62* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2937.19* | *5.03* | *4.21* | *4.21* | *5.83* | *5.37* | | | | |
| *37.00* | *0.09* | *0.64* | *3.62* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2924.15* | *5.01* | *4.19* | *4.19* | | | | *7.28* | | *6.71* |
| *36.00* | *0.09* | *0.64* | *3.62* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2910.78* | *4.99* | *9.33* | *7.03* | | | | | | |
| *35.00* | *0.09* | *0.64* | *3.63* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2897.06* | *4.96* | *9.29* | *7.00* | | | | | | |
| *34.00* | *0.09* | *0.64* | *3.63* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2882.98* | *4.94* | *4.13* | *4.13* | | | *12.85* | | *11.70* | |
| *33.00* | *0.09* | *0.64* | *3.63* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2868.51* | *4.91* | *4.11* | *4.11* | *5.14* | *4.68* | | | | |
| *32.00* | *0.09* | *0.64* | *3.63* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2853.63* | *4.89* | *4.09* | *4.09* | | | | *6.42* | | *5.85* |
| *31.00* | *0.09* | *0.64* | *3.63* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2838.31* | *4.86* | *4.07* | *4.07* | | | | | | |
| *30.00* | *0.09* | *0.65* | *3.63* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2822.53* | *4.83* | *4.05* | *4.05* | *4.00* | *4.00* | *9.99* | | *9.99* | |
| *29.00* | *0.09* | *0.65* | *3.63* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2806.26* | *4.81* | *4.02* | *4.02* | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *28.00* | *0.09* | *0.65* | *3.63* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2789.46* | *4.78* | *4.00* | *4.00* | | | | | |
| *27.00* | *0.09* | *0.65* | *3.63* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2772.11* | *4.75* | *3.97* | *3.97* | | | | *5.00* | | *5.00* |
| *26.00* | *0.09* | *0.65* | *3.63* | *0.11* | *1.03* | *1.66* | *2754.15* | *4.72* | *3.95* | *3.95* | | | | | |
| *25* | *0.092* | *0.648* | *3.627* | *0.111* | *1.034* | *1.656* | *2735.541* | *4.685* | *3.921* | *3.921* | | | | | |
| *24* | *0.092* | *0.648* | *3.627* | *0.111* | *1.034* | *1.656* | *2716.236* | *4.652* | *3.893* | *3.893* | | | *9.657* | | *9.657* | |
| *23* | *0.092* | *0.649* | *3.628* | *0.112* | *1.034* | *1.656* | *2696.176* | *4.617* | *3.864* | *3.864* | *3.863* | *3.863* | | | | |
| *22* | *0.092* | *0.650* | *3.628* | *0.112* | *1.034* | *1.656* | *2675.298* | *4.582* | *3.834* | *3.834* | | | | *4.829* | | *4.829* |
| *21* | *0.092* | *0.651* | *3.628* | *0.113* | *1.034* | *1.656* | *2653.528* | *4.544* | *3.803* | *3.803* | | | | | | |
| *20* | *0.092* | *0.651* | *3.629* | *0.114* | *1.034* | *1.656* | *2630.784* | *4.505* | *3.770* | *3.770* | | | | | | |
| *19* | *0.092* | *0.652* | *3.629* | *0.114* | *1.034* | *1.656* | *2606.970* | *4.464* | *3.736* | *3.736* | | | *9.245* | | *9.245* | |
| *18* | *0.092* | *0.653* | *3.629* | *0.115* | *1.034* | *1.656* | *2581.976* | *4.421* | *3.700* | *3.700* | *3.698* | *3.698* | | | | |
| *17* | *0.092* | *0.654* | *3.630* | *0.116* | *1.034* | *1.656* | *2555.673* | *4.376* | *3.662* | *3.662* | | | | *4.622* | | *4.622* |
| *16* | *0.092* | *0.655* | *3.630* | *0.117* | *1.034* | *1.656* | *2527.910* | *4.328* | *3.622* | *3.622* | | | | | | |
| *15* | *0.092* | *0.656* | *3.631* | *0.117* | *1.034* | *1.656* | *2498.507* | *4.278* | *3.580* | *3.580* | | | | | | |
| *14* | *0.092* | *0.657* | *3.631* | *0.118* | *1.034* | *1.656* | *2467.249* | *4.224* | *3.535* | *3.535* | | | *8.708* | | *8.708* | |
| *13* | *0.092* | *0.658* | *3.632* | *0.119* | *1.034* | *1.656* | *2433.874* | *4.166* | *3.487* | *3.487* | *3.483* | *3.483* | | | | |
| *12* | *0.092* | *0.660* | *3.632* | *0.121* | *1.034* | *1.656* | *2398.060* | *4.105* | *3.435* | *3.435* | | | | *4.354* | | *4.354* |
| *11* | *0.092* | *0.661* | *3.633* | *0.122* | *1.034* | *1.656* | *2359.402* | *4.038* | *3.380* | *3.380* | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *10* | *0.092* | *0.663* | *3.633* | *0.123* | *1.034* | *1.656* | *2317.386* | *3.966* | *3.319* | *3.319* | | | | | | |
| *9* | *0.092* | *0.665* | *3.634* | *0.125* | *1.033* | *1.656* | *2271.339* | *3.887* | *3.253* | *3.253* | | | *7.926* | | *7.926* | |
| *8* | *0.092* | *0.667* | *3.635* | *0.127* | *1.033* | *1.656* | *2220.360* | *3.799* | *3.180* | *3.180* | *3.171* | *3.171* | | | | |
| *7* | *0.092* | *0.670* | *3.636* | *0.129* | *1.033* | *1.656* | *2163.199* | *3.701* | *3.097* | *3.097* | | | | *3.963* | | *3.963* |
| *6* | *0.092* | *0.673* | *3.637* | *0.132* | *1.033* | *1.656* | *2098.050* | *3.589* | *3.004* | *3.004* | | | | | | |
| *5* | *0.092* | *0.676* | *3.639* | *0.135* | *1.033* | *1.656* | *2022.154* | *3.459* | *2.895* | *2.895* | | | | | | |
| *4* | *0.092* | *0.681* | *3.641* | *0.139* | *1.033* | *1.656* | *1930.976* | *3.302* | *2.763* | *2.763* | | | *6.320* | | *6.320* | |
| *3* | *0.092* | *0.688* | *3.643* | *0.145* | *1.032* | *1.656* | *1816.205* | *3.105* | *2.599* | *2.599* | *2.528* | *2.528* | | | | |
| *2* | *0.092* | *0.697* | *3.647* | *0.154* | *1.032* | *1.656* | *1659.758* | *2.836* | *2.374* | *2.374* | | | | *3.160* | | *3.160* |
| *1* | *0.092* | *0.715* | *3.654* | *0.172* | *1.031* | *1.656* | *1406.705* | *2.402* | *2.010* | *2.010* | | | | | | |

Desprendimento de vórtices verificações

| | *Vm(m/s)* | *Vcrit,i(m\s)* | *Vcrit,i(m\s)>1,25,Vm* |
|---|---|---|---|
| *45,00* | *52,885* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *44,00* | *52,761* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *43,00* | *52,635* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *42,00* | *52,505* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *41,00* | *52,373* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *40,00* | *52,237* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *39,00* | *52,098* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *38,00* | *51,955* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *37,00* | *51,808* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *36,00* | *51,658* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *35,00* | *51,503* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *34,00* | *51,343* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *33,00* | *51,179* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *32,00* | *51,010* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *31,00* | *50,835* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *30,00* | *50,655* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *29,00* | *50,468* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *28,00* | *50,275* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *27,00* | *50,075* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *26,00* | *49,868* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *25,00* | *49,652* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *24,00* | *49,428* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *23,00* | *49,194* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *22,00* | *48,949* | *1,913* | *não é Necessário* |

| | | | |
|---|---|---|---|
| *21,00* | *48,693* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *20,00* | *48,425* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *19,00* | *48,143* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *18,00* | *47,845* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *17,00* | *47,531* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *16,00* | *47,198* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *15,00* | *46,843* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *14,00* | *46,463* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *13,00* | *46,056* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *12,00* | *45,615* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *11,00* | *45,137* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *10,00* | *44,613* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *9,00* | *44,033* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *8,00* | *43,385* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *7,00* | *42,651* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *6,00* | *41,803* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *5,00* | *40,801* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *4,00* | *39,573* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *3,00* | *37,991* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *2,00* | *35,761* | *1,913* | *não é Necessário* |
| *1,00* | *31,949* | *1,913* | *não é Necessário* |

**ANEXO C – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS**

Redução com TLDs retangulares localizados na secção média da plataforma nó 637 (centro geométrico cota 45 m) para $\mu = 4m_{TLDs}/M_1$

| *TLD SECÇÃO MÉDIA* | *M1=4x11.30Kg* | | *M1=4x16.86Kg* | | *M1=4x23.99Kg* | | *M1=4x32.86Kg* | | *M1=4x43.59Kg* | | *M1=4x56.20Kg* | | *M1=4x70.49Kg* | | *M1=4x85.66Kg* | | *SEM TLD* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Legenda* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* |
| *UY_nó_659* | *4,080* | *-4,353* | *4,055* | *-4,311* | *4,024* | *-4,274* | *3,995* | *-4,208* | *3,978* | *-4,164* | *3,970* | *-4,138* | *3,981* | *-4,148* | *4,017* | *-4,241* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_652* | *14,631* | *-14,537* | *10,635* | *-10,570* | *8,316* | *-8,394* | *8,072* | *-8,408* | *7,169* | *-7,502* | *6,373* | *-6,649* | *5,799* | *-6,282* | *5,624* | *-6,110* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_659* | *3,918* | *-4,143* | *3,895* | *-4,105* | *3,866* | *-4,071* | *3,831* | *-4,011* | *3,807* | *-3,972* | *3,800* | *-3,950* | *3,811* | *-3,965* | *3,847* | *-4,026* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_652* | *13,925* | *-13,782* | *10,095* | *-10,080* | *7,874* | *-8,028* | *7,635* | *-8,017* | *6,786* | *-7,157* | *6,099* | *-6,353* | *5,475* | *-5,962* | *5,305* | *-5,802* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_637* | *4,046* | *-4,317* | *4,019* | *-4,274* | *3,987* | *-4,235* | *3,957* | *-4,166* | *3,936* | *-4,119* | *3,924* | *-4,089* | *3,930* | *-4,094* | *3,957* | *-4,177* | *4,376* | *-3,978* |
| *UX_nó_637* | *3,908* | *-4,131* | *3,882* | *-4,092* | *3,852* | *-4,057* | *3,816* | *-3,994* | *3,789* | *-3,953* | *3,779* | *-3,929* | *3,787* | *-3,940* | *3,817* | *-3,995* | *4,374* | *-3,976* |
| *Redução_nó_637 UY %* | *8,162* | *-7,847* | *8,887* | *-6,915* | *9,771* | *-6,055* | *10,603* | *-4,514* | *11,183* | *-3,423* | *11,516* | *-2,718* | *11,364* | *-2,824* | *10,593* | *-4,751* | | |
| *Redução_nó_637 UX %* | *11,929* | *-3,742* | *12,653* | *-2,815* | *13,534* | *-1,979* | *14,629* | *-0,451* | *15,430* | *0,589* | *15,726* | *1,197* | *15,501* | *0,922* | *14,595* | *-0,465* | | |

Redução com TLDs retangulares localizados nas arestas da plataforma, nó 637(centro geométrico cota 45m) para $\mu = 4m_{TLDs}/M_1$

| *TLD NAS ARESTAS* | *M1=4x11.30Kg* | | *M1=4x16.86Kg* | | *M1=4x23.99Kg* | | *M1=4x32.86Kg* | | *M1=4x43.59Kg* | | *M1=4x56.20Kg* | | *M1=4x70.49Kg* | | *M1=4x85.66Kg* | | *SEM TLD* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *UY_nó_659* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* |
| *UY_nó_652* | *3,953* | *-4,184* | *3,928* | *-4,141* | *3,897* | *-4,090* | *3,863* | *-4,045* | *3,839* | *-4,005* | *3,833* | *-3,984* | *3,845* | *-4,000* | *3,880* | *-4,064* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_659* | *12,512* | *-12,318* | *10,196* | *-10,179* | *8,967* | *-9,195* | *7,711* | *-8,095* | *6,852* | *-7,225* | *6,159* | *-6,412* | *5,536* | *-6,023* | *5,362* | *-5,860* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_652* | *3,912* | *-4,130* | *3,888* | *-4,088* | *3,858* | *-4,038* | *3,824* | *-3,995* | *3,796* | *-3,956* | *3,790* | *-3,936* | *3,802* | *-3,953* | *3,837* | *-4,010* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_637* | *12,352* | *-12,147* | *10,054* | *-10,051* | *8,842* | *-9,079* | *7,596* | *-7,992* | *6,751* | *-7,135* | *6,088* | *-6,335* | *5,451* | *-5,940* | *5,279* | *-5,779* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_637* | *3,942* | *-4,173* | *3,916* | *-4,128* | *3,884* | *-4,076* | *3,848* | *-4,029* | *3,821* | *-3,987* | *3,812* | *-3,963* | *3,820* | *-3,974* | *3,849* | *-4,031* | *4,376* | *-3,978* |
| *Redução_nó_637 UY %* | *3,909* | *-4,126* | *3,883* | *-4,083* | *3,852* | *-4,032* | *3,816* | *-3,986* | *3,785* | *-3,945* | *3,777* | *-3,923* | *3,785* | *-3,935* | *3,815* | *-3,987* | *4,374* | *-3,976* |
| *Redução_nó_637 UX %* | *11,013* | *-4,666* | *11,749* | *-3,631* | *12,675* | *-2,405* | *13,724* | *-1,267* | *14,517* | *-0,212* | *14,799* | *0,384* | *14,570* | *0,110* | *13,702* | *-1,317* | | |
| *Redução_nó_637 UX %* | *11,898* | *-3,637* | *12,633* | *-2,602* | *13,557* | *-1,379* | *14,605* | *-0,250* | *15,539* | *0,792* | *15,809* | *1,359* | *15,560* | *1,038* | *14,656* | *-0,266* | | |

Redução com TLDs cilíndricos localizados na secção média da plataforma nó 637 (centro geométrico cota 45 m) para $\mu = 4m_{TLDs}/M_1$

| *TLD SECÇÃO MÉDIA* | *M1=4x21.42Kg* | | *M1=4x31.98Kg* | | *M1=4x45.50Kg* | | *M1=4x62.39Kg* | | *M1=4x82.92Kg* | | *M1=4x107.30Kg* | | *M1=4x135,43Kg* | | *M1=4x166.34Kg* | | *SEM TLD* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Legenda* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* |
| *UY_nó_659* | *4,030* | *-4,270* | *3,991* | *-4,206* | *3,964* | *-4,142* | *3,941* | *-4,089* | *3,933* | *-4,063* | *3,941* | *-4,123* | *3,955* | *-4,344* | *4,473* | *-4,613* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_652* | *9,668* | *-9,823* | *8,121* | *-8,460* | *6,967* | *-7,309* | *6,051* | *-6,390* | *5,371* | *-5,920* | *4,845* | *-5,429* | *4,628* | *-5,160* | *4,499* | *-5,006* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_659* | *3,873* | *-4,069* | *3,831* | *-4,009* | *3,795* | *-3,952* | *3,776* | *-3,908* | *3,770* | *-3,890* | *3,780* | *-3,922* | *3,799* | *-4,148* | *4,214* | *-4,386* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_652* | *9,182* | *-9,371* | *7,683* | *-8,069* | *6,610* | *-6,977* | *5,798* | *-6,071* | *5,082* | *-5,629* | *4,621* | *-5,170* | *4,418* | *-4,896* | *4,282* | *-4,735* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_637* | *3,996* | *-4,235* | *3,958* | *-4,169* | *3,928* | *-4,103* | *3,903* | *-4,048* | *3,892* | *-4,019* | *3,895* | *-4,074* | *3,902* | *-4,286* | *4,401* | *-4,539* | *4,376* | *-3,978* |
| *UX_nó_637* | *3,863* | *-4,057* | *3,819* | *-3,996* | *3,782* | *-3,938* | *3,761* | *-3,892* | *3,753* | *-3,873* | *3,760* | *-3,902* | *3,775* | *-4,122* | *4,180* | *-4,351* | *4,374* | *-3,976* |
| *Redução_nó_637 UY %* | *9,506* | *-6,070* | *10,579* | *-4,573* | *11,409* | *-3,045* | *12,120* | *-1,730* | *12,452* | *-1,025* | *12,359* | *-2,342* | *12,143* | *-7,186* | *-0,566* | *-12,349* | | |
| *Redução_nó_637 UX %* | *13,232* | *-1,998* | *14,519* | *-0,503* | *15,657* | *0,969* | *16,292* | *2,154* | *16,548* | *2,679* | *16,317* | *1,905* | *15,860* | *-3,543* | *4,624* | *-8,615* | | |

Redução com TLDs cilíndricos localizados nas arestas da plataforma nó 637 (centro geométrico cota 45 m) para $\mu = 4m_{TLDs}/M_1$

| *TLD NAS ARESTAS* | *M1=4x21.42 Kg* | | *M1=4x31.98 Kg* | | *M1=4x45.50 Kg* | | *M1=4x62.39 Kg* | | *M1=4x82.92 Kg* | | *M1=4x107.30Kg* | | *M1=4x135,43Kg* | | *M1=4x166.34Kg* | | *SEM TLD* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Legenda* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* |
| *UY_nó_659* | *3,907* | *-4,106* | *3,864* | *-4,044* | *3,828* | *-3,986* | *3,809* | *-3,942* | *3,803* | *-3,924* | *3,813* | *-3,962* | *3,832* | *-4,189* | *4,270* | *-4,435* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_652* | *9,276* | *-9,464* | *7,759* | *-8,147* | *6,673* | *-7,043* | *5,855* | *-6,133* | *5,138* | *-5,687* | *4,669* | *-5,223* | *4,464* | *-4,952* | *4,330* | *-4,794* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_659* | *3,867* | *-4,054* | *3,825* | *-3,993* | *3,786* | *-3,937* | *3,767* | *-3,895* | *3,762* | *-3,879* | *3,773* | *-3,910* | *3,792* | *-4,138* | *4,203* | *-4,377* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_652* | *9,147* | *-9,345* | *7,644* | *-8,045* | *6,600* | *-6,955* | *5,788* | *-6,049* | *5,062* | *-5,610* | *4,610* | *-5,154* | *4,409* | *-4,883* | *4,273* | *-4,724* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_637* | *3,896* | *-4,094* | *3,852* | *-4,031* | *3,814* | *-3,972* | *3,794* | *-3,926* | *3,785* | *-3,906* | *3,793* | *-3,940* | *3,806* | *-4,161* | *4,233* | *-4,396* | *4,376* | *-3,978* |
| *UX_nó_637* | *3,863* | *-4,050* | *3,820* | *-3,988* | *3,778* | *-3,931* | *3,759* | *-3,887* | *3,751* | *-3,869* | *3,759* | *-3,897* | *3,775* | *-4,120* | *4,177* | *-4,349* | *4,374* | *-3,976* |
| *Redução_nó_637 UY %* | *12,331* | *-2,837* | *13,615* | *-1,319* | *14,731* | *0,153* | *15,352* | *1,317* | *15,611* | *1,857* | *15,390* | *0,971* | *14,977* | *-4,385* | *3,394* | *-9,501* | | |
| *Redução_nó_637 UX %* | *13,215* | *-1,810* | *14,496* | *-0,300* | *15,753* | *1,156* | *16,363* | *2,291* | *16,600* | *2,780* | *16,345* | *2,048* | *15,865* | *-3,477* | *4,707* | *-8,564* | | |

Redução com TLDs retangulares localizados nas arestas da plataforma nó 637 (centro geométrico cota 45 m) para $\mu = 4m_{TLDs}/M_{est}$

| *TLD NAS ARESTAS* | *M1=4x11.30Kg* | | *M1=4x16.86Kg* | | *M1=4x23.99Kg* | | *M1=4x32.86 Kg* | | *M1=4x43.59 Kg* | | *M1=4x56.20Kg* | | *M1=4x70.49Kg* | | *M1=4x85.66Kg* | | *SEM TLD* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Legenda* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* |
| *UY_nó_659* | *3,950* | *-4,165* | *3,922* | *-4,102* | *3,886* | *-4,031* | *3,863* | *-4,045* | *3,845* | *-3,992* | *3,779* | *-3,824* | *3,774* | *-3,791* | *3,794* | *-3,813* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_652* | *20,222* | *-20,081* | *18,720* | *-18,595* | *16,599* | *-16,419* | *7,711* | *-8,095* | *7,856* | *-7,455* | *12,100* | *-12,089* | *11,098* | *-11,126* | *10,587* | *-10,503* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_659* | *3,910* | *-4,112* | *3,882* | *-4,049* | *3,847* | *-3,980* | *3,824* | *-3,995* | *3,806* | *-3,942* | *3,737* | *-3,779* | *3,733* | *-3,748* | *3,752* | *-3,762* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_652* | *19,979* | *-19,802* | *18,495* | *-18,338* | *16,390* | *-16,193* | *7,596* | *-7,992* | *7,764* | *-7,354* | *11,946* | *-11,950* | *10,950* | *-10,991* | *10,452* | *-10,379* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_637* | *3,939* | *-4,154* | *3,910* | *-4,089* | *3,873* | *-4,017* | *3,848* | *-4,029* | *3,827* | *-3,974* | *3,724* | *-3,766* | *3,750* | *-3,767* | *3,763* | *-3,782* | *4,376* | *-3,978* |
| *UX_nó_637* | *3,906* | *-4,108* | *3,877* | *-4,044* | *3,841* | *-3,974* | *3,816* | *-3,986* | *3,796* | *-3,932* | *3,759* | *-3,804* | *3,716* | *-3,732* | *3,730* | *-3,741* | *4,374* | *-3,976* |
| *Redução_nó_637 UX %* | *11,086* | *-4,238* | *11,933* | *-2,718* | *12,994* | *-0,972* | *13,724* | *-1,267* | *14,339* | *0,104* | *17,521* | *5,625* | *16,709* | *5,604* | *16,288* | *5,180* | | |
| *Redução_nó_637 UX %* | *11,972* | *-3,205* | *12,817* | *-1,682* | *13,877* | *0,065* | *14,605* | *-0,250* | *15,215* | *1,127* | *16,367* | *4,532* | *17,708* | *6,553* | *17,250* | *6,288* | | |

Redução com TLDs cilíndricos localizados nas arestas da plataforma nó 637 (centro geométrico cota 45 m) para $\mu = 4m_{TLDs}/M_{est}$

| *TLD NAS ARESTAS* | *M1=4x21.42Kg* | | *M1=4x31.98Kg* | | *M1=4x45.50Kg* | | *M1=4x62.39Kg* | | *M1=4x82.92Kg* | | *M1=4x107.30 Kg* | | *M1=4x135,43 Kg* | | *M1=4x166.34 Kg* | | *SEM TLD* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Legenda* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* | *Máx.* | *Mín.* |
| *UY_nó_659* | *3,897* | *-4,055* | *3,846* | *-3,961* | *3,786* | *-3,862* | *3,750* | *-3,770* | *3,722* | *-3,688* | *3,705* | *-3,674* | *3,683* | *-3,783* | *3,670* | *-3,945* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_652* | *16,537* | *-6,352* | *14,290* | *-4,110* | *12,587* | *-2,595* | *11,007* | *-11,063* | *10,024* | *-10,165* | *8,998* | *-9,168* | *8,566* | *-8,630* | *8,440* | *-8,234* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_659* | *3,858* | *-4,004* | *3,807* | *-3,912* | *3,747* | *-3,815* | *3,710* | *-3,726* | *3,683* | *-3,647* | *3,665* | *-3,628* | *3,646* | *-3,740* | *3,628* | *-3,898* | *0,000* | *0,000* |
| *UX_nó_652* | *16,748* | *-16,581* | *14,472* | *-14,274* | *12,752* | *-12,743* | *11,145* | *-11,189* | *9,895* | *-10,045* | *9,121* | *-9,285* | *8,464* | *-8,532* | *8,320* | *-8,117* | *0,000* | *0,000* |
| *UY_nó_637* | *3,886* | *-4,044* | *3,834* | *-3,949* | *3,773* | *-3,849* | *3,736* | *-3,755* | *3,705* | *-3,671* | *3,684* | *-3,654* | *3,658* | *-3,758* | *3,637* | *-3,910* | *4,376* | *-3,978* |
| *UX_nó_637* | *3,854* | *-4,000* | *3,803* | *-3,907* | *3,741* | *-3,809* | *3,701* | *-3,718* | *3,672* | *-3,638* | *3,652* | *-3,616* | *3,629* | *-3,724* | *3,605* | *-3,874* | *4,374* | *-3,976* |
| *Redução_nó_637 UY %* | *12,602* | *-1,631* | *14,135* | *0,740* | *15,989* | *3,367* | *17,151* | *5,942* | *18,114* | *8,361* | *18,785* | *8,874* | *19,626* | *5,868* | *20,336* | *1,734* | | |
| *Redução_nó_637 UX %* | *13,487* | *-0,594* | *15,018* | *1,774* | *16,919* | *4,390* | *18,168* | *6,937* | *19,111* | *9,303* | *19,749* | *9,974* | *20,518* | *6,779* | *21,337* | *2,653* | | |

**ANEXO D – VERIFICAÇÕES SOLUÇÃO1 COM TLDS 40-45 M**

| | Bar / Case | Max axial force | λy | λz | λyBarra | λzBarra | λcrit | ϕy | ϕz | χy | χz | Nby,rd (KN) | | Nbz,rd (KN) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CAEP 45x4 | 325//61 | 19,871 | 52,003 | 102,062 | 0,554 | 1,087 | 93,900 | 0,691 | 1,241 | 0,635 | 0,346 | 40,554 | OK | 22,0990 | OK |
| CAEP 45x4 | 331//61 | 1,691 | 52,003 | 102,062 | 0,554 | 1,087 | 93,900 | 0,691 | 1,241 | 0,635 | 0,346 | 40,554 | OK | 22,0990 | OK |
| CAEP 45x4 | 337//61 | 1,494 | 52,003 | 102,062 | 0,554 | 1,087 | 93,900 | 0,691 | 1,241 | 0,635 | 0,346 | 40,554 | OK | 22,0990 | OK |
| CAEP 45x4 | 344//61 | 20,965 | 52,003 | 102,062 | 0,554 | 1,087 | 93,900 | 0,691 | 1,241 | 0,635 | 0,346 | 40,554 | OK | 22,0990 | OK |
| CAEP 50x7 | 321//65 | 12,206 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 322//67 | 23,943 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 323//67 | 15,599 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 324//65 | 8,110 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 327//65 | 38,264 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 328//65 | -42,489 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 329//67 | -29,244 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 330//65 | 34,192 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 333//67 | 19,086 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 334//65 | -1,163 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 335//65 | -6,647 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 336//67 | 3,144 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 340//67 | -44,812 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 341//65 | 36,506 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 342//65 | 31,410 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x7 | 343//65 | -31,431 | 56,740 | 110,332 | 0,604 | 1,175 | 93,900 | 0,725 | 1,356 | 0,599 | 0,317 | 74,454 | OK | 39,4402 | OK |
| CAEP 50x6 | 678//65 | -0,103 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 679//65 | 0,058 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 680//65 | -0,913 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 681//65 | 15,054 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 682//65 | 3,686 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CAEP 50x6 | 683//65 | -0,097 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 684//65 | 0,063 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 685//65 | 0,794 | 40,744 | 79,533 | 0,434 | 0,847 | 93,900 | 0,619 | 0,969 | 0,728 | 0,443 | 77,489 | OK | 47,2189 | OK |
| CAEP 50x6 | 686//65 | 2,159 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 687//65 | -14,078 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 688//65 | 0,087 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 689//65 | -0,072 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 690//65 | 0,973 | 40,744 | 79,533 | 0,434 | 0,847 | 93,900 | 0,619 | 0,969 | 0,728 | 0,443 | 77,489 | OK | 47,2189 | OK |
| CAEP 50x6 | 691//65 | -14,101 | 40,744 | 79,533 | 0,434 | 0,847 | 93,900 | 0,619 | 0,969 | 0,728 | 0,443 | 77,489 | OK | 47,2189 | OK |
| CAEP 50x6 | 692//65 | 1,015 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 695//65 | 2,481 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 696//65 | 14,715 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 697//65 | -0,125 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 698//65 | 0,066 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 700//65 | 0,297 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 701//65 | 0,931 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 702//65 | -0,043 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 703//65 | 0,185 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 704//65 | 0,644 | 40,744 | 79,533 | 0,434 | 0,847 | 93,900 | 0,619 | 0,969 | 0,728 | 0,443 | 77,489 | OK | 47,2189 | OK |
| CAEP 50x6 | 705//65 | -1,100 | 40,744 | 79,533 | 0,434 | 0,847 | 93,900 | 0,619 | 0,969 | 0,728 | 0,443 | 77,489 | OK | 47,2189 | OK |
| CAEP 50x6 | 706//65 | -0,433 | 40,744 | 79,533 | 0,434 | 0,847 | 93,900 | 0,619 | 0,969 | 0,728 | 0,443 | 77,489 | OK | 47,2189 | OK |
| CAEP 50x6 | 707//65 | 0,138 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 708//65 | -0,021 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 709//65 | 0,680 | 40,744 | 79,533 | 0,434 | 0,847 | 93,900 | 0,619 | 0,969 | 0,728 | 0,443 | 77,489 | OK | 47,2189 | OK |
| CAEP 50x6 | 710//65 | -0,473 | 40,744 | 79,533 | 0,434 | 0,847 | 93,900 | 0,619 | 0,969 | 0,728 | 0,443 | 77,489 | OK | 47,2189 | OK |
| CAEP 50x6 | 711//65 | -1,080 | 40,744 | 79,533 | 0,434 | 0,847 | 93,900 | 0,619 | 0,969 | 0,728 | 0,443 | 77,489 | OK | 47,2189 | OK |
| CAEP 50x6 | 712//65 | 0,022 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 713//65 | -0,123 | 28,801 | 56,220 | 0,307 | 0,599 | 93,900 | 0,558 | 0,747 | 0,837 | 0,587 | 89,106 | OK | 62,4868 | OK |
| CAEP 50x6 | 714//65 | 0,942 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 715//65 | 0,318 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 787//65 | -0,659 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |
| CAEP 50x6 | 788//65 | -0,692 | 55,990 | 109,292 | 0,596 | 1,164 | 93,900 | 0,719 | 1,341 | 0,605 | 0,321 | 64,399 | OK | 34,1669 | OK |