

EDUARDO GONÇALVES DE CARVALHO BORBA

# RESPOSTA NÃO-LINEAR DE EDIFÍCIOS SUJEITOS À AÇÃO DE TSUNAMIS



2023



EDUARDO GONÇALVES DE CARVALHO BORBA

# RESPOSTA NÃO-LINEAR DE EDIFÍCIOS SUJEITOS À AÇÃO DE TSUNAMIS

**Mestrado em Engenharia Civil**  
**Especialidade em Estruturas**



2023



# RESPOSTA NÃO-LINEAR DE EDIFÍCIOS SUJEITOS À AÇÃO DE TSUNAMIS

## *Declaração de autoria da obra*

Declaro ser o autor desta obra, que é original e inédita. Os autores e obras consultados são devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluídas.

---

(Eduardo Gonçalves de Carvalho Borba)

©2023, EDUARDO GONÇALVES DE CARVALHO BORBA

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus, minha família, docentes do curso de mestrado e amigos(as).



## RESUMO

A ocorrência de sismos e tsunamis tem impactado na vida de milhões de pessoas desde o início das civilizações. Os acontecimentos desse tipo nos últimos anos deixaram evidente que o desenvolvimento das cidades necessita cada vez mais do avanço de especialidades como a engenharia civil e planeamento urbano. Este trabalho analisa alguns eventos sísmicos e de tsunami em Portugal e outros países com a finalidade de entender o comportamento estrutural de um edifício sob tais condições. As propriedades de onda para análise estrutural foram retiradas de relatos históricos, modelações computacionais e outros estudos. O levantamento das cargas do tsunami foi feito com base na norma americana ASCE 7-16, o procedimento japonês indicado em MLIT 2570 e alguns estudos experimentais. O trabalho consiste em analisar a capacidade de deformação e o comportamento de uma estrutura, dimensionada de acordo com as normas NP EN 1990:2009, NP EN 1992-1-1:2010 e NP EN 1998-1:2010, sob efeitos de carregamento sísmico e/ou de tsunami, na região de Lagos, localizada no Algarve, Portugal.

O estudo contém duas situações de projeto em que o tsunami tem três e nove metros de altura. Ele irá comparar a capacidade de deformação máxima da estrutura para algumas situações de carga, entre elas a de impacto, hidrodinâmica e impulsão hidrostática vertical. Para cada uma delas, a estrutura será analisada para situações onde só há a ocorrência do tsunami e outra em que o tsunami atinge o edifício após um sismo.

**Palavras-chave:** Tsunamis; sismos; *pushover*; zonas costeiras; Algarve; SeismoStruct; estruturas



## ABSTRACT

The occurrence of earthquakes and tsunamis has impacted the lives of millions of people since the beginning of civilizations. Events of this type in recent years have made it clear that the development of cities increasingly requires the advancement of specialities such as civil engineering and urban planning. This work analyses some seismic and tsunami events in Portugal and other countries in order to understand the structural behavior of a building under such conditions. The wave properties for structural analysis were taken from historical accounts, computer modeling and other studies. The calculation of tsunami loads was based on the American standard ASCE 7-16, the Japanese procedure indicated in MLIT 2570 and some experimental studies. The work consists of analysing the deformation capacity and behavior of a structure, designed according to the codes NP EN 1990:2009, NP EN 1992-1-1:2010 and NP EN 1998-1:2010, under earthquake and/or tsunami loadings, in the region of Lagos, located in Algarve, Portugal.

The study contains two design situations where the tsunami is three and nine meters high. There will be a comparison of maximum deformation capacity of the structure for some load situations, including impact, hydrodynamics and buoyant. For each of them, the structure will be analyzed for situations where there is only the occurrence of the tsunami and another in which the tsunami hits the building after an earthquake.

**Keywords:** Tsunamis; earthquakes; *pushover*; coastal zones; Algarve; SeismoStruct; structures



## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	ENQUADRAMENTO GERAL .....	1
1.2	OBJETIVOS .....	2
2	TSUNAMI.....	3
2.1	O QUE É E COMO É FORMADO?.....	3
2.2	PROPRIEDADES E FATORES IMPORTANTES DO TSUNAMI.....	5
2.3	DADOS DE ENTRADA PARA A MODELAÇÃO COMPUTACIONAL.....	8
3	IMPORTÂNCIA DESTE ESTUDO PARA O ALGARVE.....	10
3.1	TSUNAMIS EM PORTUGAL .....	11
3.2	TSUNAMIS EM OUTROS PAÍSES .....	14
3.3	MECANISMOS PARA SALVAR VIDAS HUMANAS .....	16
4	FORÇAS ATUANTES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES .....	19
4.1	FORÇA HIDROSTÁTICA HORIZONTAL.....	19
4.2	IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL .....	21
4.3	FORÇA HIDRODINÂMICA .....	22
4.4	FORÇA IMPULSIVA.....	28
4.5	FORÇA DE IMPACTO .....	29
4.6	FORÇA DE REBENTAÇÃO.....	34
4.6.1	FORÇA DE REBENTAÇÃO SOBRE PILAR.....	34
4.6.2	FORÇA DE REBENTAÇÃO SOBRE PAREDE ESTRUTURAL .....	35

4.7	FORÇA DE ACUMULAÇÃO RESIDUAL .....	36
4.8	FORÇA DE LEVANTAMENTO .....	36
4.9	CARGA DE ÁGUA RESIDUAL NAS LAJES .....	36
4.10	CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO DAS NORMAS .....	37
4.10.1	ASCE/SEI 7-16.....	37
4.10.2	MLIT .....	38
5	DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL PARA SISMO E TSUNAMI .....	42
5.1	CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO.....	44
5.1.1	TSUNAMI .....	46
5.1.2	SISMO.....	48
5.2	RESULTADOS DAS FORÇAS ATUANTES E COMBINAÇÕES DE CARGA .....	61
5.2.1	CARGAS PERMANENTES E SOBRECARGA .....	62
5.2.2	CARGAS HIDRODINÂMICA E IMPULSIVA.....	62
5.2.3	CARGAS DE IMPACTO .....	64
5.2.4	IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL .....	64
5.2.5	FORÇAS SÍSMICAS.....	66
5.2.6	SITUAÇÕES DE PROJETO E COMBINAÇÕES DE CARGA .....	67
5.3	ANÁLISE <i>PUSHOVER</i> .....	67
6	ANÁLISE NÃO LINEAR – SEISMOSTRUCT .....	73
6.1	ANÁLISE ESTRUTURAL PARA TSUNAMI DE TRÊS METROS .....	79
6.1.1	IMPACTO E IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL .....	80
6.1.2	IMPACTO, IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL E SISMO.....	81

6.2	ANÁLISE ESTRUTURAL PARA TSUNAMI DE NOVE METROS .....	82
6.2.1	HIDRODINÂMICA E IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL .....	83
6.2.2	HIDRODINÂMICA, IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL E SISMO .....	84
6.2.3	IMPACTO E IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL .....	85
6.2.4	IMPACTO, IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL E SISMO.....	86
7	DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	87
8	CONCLUSÕES.....	91
8.1	CONCLUSÕES PRINCIPAIS .....	91
8.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	93
9	REFERÊNCIAS .....	94



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Camadas da terra ( <i>freepik.com</i> , 2023).....	4
Figura 2.2 - Placas Tectônicas e os continentes (adaptada de <i>freepik.com</i> , 2023).....	4
Figura 2.3 – Tipos de movimento de placas tectônicas (adaptada de <i>freepik.com</i> , 2023).....	5
Figura 2.4 – Propagação de uma onda vista em planta .....	6
Figura 2.5 – Propriedades de onda.....	6
Figura 2.6 – Propriedades de um tsunami (adaptado de ASCE/SEI 7-16, 2017) .....	8
Figura 3.1 – Limites de placas tectônicas e relevos submarinos (adaptado de Google Earth, 2023) .....	10
Figura 3.2 – Profundidade do fundo do mar ( <i>Google Earth</i> , 2023).....	11
Figura 3.3 – Escala de cor .....	11
Figura 4.1 – Força hidrostática sob um elemento vertical .....	20
Figura 4.2 – Força de impulsão hidrostática vertical sob a estrutura.....	22
Figura 4.3 – Força hidrodinâmica sob elemento estrutural.....	23
Figura 4.4 – Modelo esquemático da onda experimento (adaptado de Foster et al., 2017) .	27
Figura 4.5 – Comportamento da força ao longo do tempo num impacto (adaptado de Yeh et al., 2014).....	28
Figura 4.6 – Força hidrostática equivalente por MLIT 2570.....	40
Figura 4.7 – Gráfico comparativo de forças laterais (adaptado de Macabuag et al., 2018) ..	41
Figura 5.1- Modelo esquemático da estrutura e pórtico em destaque .....	45
Figura 5.2 – Área de influência para carregamentos atuantes no pórtico.....	45
Figura 5.3 – Configuração modal (modo 1).....	51

Figura 5.4 – Configuração modal (modo 2).....	51
Figura 5.5 – Configuração modal (modo 3).....	52
Figura 5.6 – Configuração quadrática modal (CQC) .....	52
Figura 5.7 - Zonas sísmicas em Portugal Continental ( <i>Anexo Nacional NP EN 1998-1:2010</i> ) .....	54
Figura 5.8 - Forma do espectro de resposta elástica (NP EN 1998-1, 2010) .....	55
Figura 5.9 – Pórtico modelado no Revit e suas dimensões.....	60
Figura 5.10 – Relação idealizada de força/deslocamento (NP EN 1998-1, 2010) .....	70
Figura 6.1 – Pórtico e cargas permanentes no SeismoStruct (SeismoSoft, 2022) .....	76
Figura 6.2 – Carga unitária da análise <i>pushover</i> para impacto a 3 metros de altura (SeismoSoft, 2022) .....	76
Figura 6.3 – Carga unitária da análise <i>pushover</i> para impacto a 9 metros de altura (SeismoSoft, 2022) .....	77
Figura 6.4 – Cargas incrementais da força hidrodinâmica para tsunami de 9 metros (SeismoSoft, 2022) .....	77
Figura 6.5 – Cargas de impulsão hidrostática vertical para tsunami de 3 metros (SeismoSoft, 2022) .....	78
Figura 6.6 – Cargas de impulsão hidrostática vertical para tsunami de 9 metros (SeismoSoft, 2022) .....	78
Figura 6.7 – Cargas horizontais sísmicas equivalentes no SeismoStruct (SeismoSoft, 2022) .....	79
Figura 6.8 – Modelo esquemático do caso do tsunami com 3 metros de altura .....	80
Figura 6.9 – Deslocamento em X dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022) .....	80
Figura 6.10 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022).....	81

Figura 6.11 – Deslocamento em X dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022) .....	81
Figura 6.12 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022).....	82
Figura 6.13 – Modelo esquemático do caso do tsunami com 9 metros de altura .....	82
Figura 6.14 – Deslocamento em X da estrutura (SeismoSoft, 2022).....	83
Figura 6.15 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022).....	83
Figura 6.16 – Deslocamento em X da estrutura (SeismoSoft, 2022).....	84
Figura 6.17 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022).....	84
Figura 6.18 – Deslocamento em X da estrutura (SeismoSoft, 2022).....	85
Figura 6.19 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022).....	85
Figura 6.20 – Deslocamento em X da estrutura (SeismoSoft, 2022).....	86
Figura 6.21 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022).....	86
Figura 7.1 – Capacidade estrutural das situações estudadas para tsunamis de 3 e 9 metros .....	87
Figura 7.2 – Relação entre capacidade e exigência para a força de impacto.....	88
Figura 7.3 – Relação entre capacidade e exigência para força hidrodinâmica no caso máximo .....	89
Figura 7.4 – Relação entre capacidade e exigência para força hidrodinâmica no caso 2 da ASCE 7-16.....	89



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Os tsunamis com maior altura de água já registados (NOAA, 2023).....	16
Tabela 4.1 – Coeficiente $C_d$ para estrutura (ASCE/SEI 7-16, 2017) .....	24
Tabela 4.2 – Valores de $R_{max}$ .....	32
Tabela 4.3 - Massa e rigidez de um contentor (ASCE/SEI 7-16, 2017).....	33
Tabela 4.4 – Valores do coeficiente de massa adicionada.....	34
Tabela 5.1 – Classe de exposição e seus ambientes (NP EN 1992-1-1, 2010).....	43
Tabela 5.2 – <i>Run-up</i> e distância de inundação máxima adaptado de (Baptista et al., 2010) .....	47
Tabela 5.3 – Alturas de onda e distância de inundação máximas (NOAA, 2023).....	48
Tabela 5.4 – Classes de importância de edificações (NP EN 1998-1, 2010).....	49
Tabela 5.5 – Coeficientes de importância (Anexo Nacional NP EN 1998-1:2010).....	49
Tabela 5.6 – Valores referentes ao sismo tipo 1 ( <i>Anexo Nacional NP EN 1998-1:2010</i> ).....	50
Tabela 5.7 – Frequência e período das configurações modais .....	53
Tabela 5.8 – Valores de $a_{gR}$ para cada zona sísmica em Portugal Continental (NP EN 1998-1, 2010) .....	54
Tabela 5.9 – Valores referentes ao sismo tipo 1 ( <i>Anexo Nacional da NP EN 1998-1:2010</i> ).	56
Tabela 5.10 – Valores referentes ao sismo tipo 2 ( <i>Anexo Nacional da NP EN 1998-1:2010</i> ) .....	57
Tabela 5.11 – Valores referentes ao sismo vertical ( <i>Anexo Nacional NP EN 1998-1:2010</i> )	58
Tabela 5.12 – Valor básico do coeficiente de comportamento $q_0$ (NP EN 1998-1, 2010) ....	59
Tabela 5.13 – Cargas permanentes e sobrecarga .....	62

Tabela 5.14 – Propriedades para o tsunami de três metros .....	63
Tabela 5.15 – Força hidrodinâmica e impulsiva de um tsunami de três metros.....	63
Tabela 5.16 – Propriedades para tsunami de nove metros .....	63
Tabela 5.17 – Força hidrodinâmica e impulsiva de um tsunami de nove metros.....	64
Tabela 5.18 – Força de impacto de um contentor .....	64
Tabela 5.19 – Força de impulsão hidrostática vertical para situação mais crítica.....	65
Tabela 5.20 – Força de impulsão hidrostática vertical tsunami de 3 metros.....	66
Tabela 5.21 – Forças horizontais sísmicas .....	66
Tabela 6.1 – Secções transversais dos pilares e suas armaduras no SeismoStruct .....	74
Tabela 6.2 – Secções transversais das vigas e suas armaduras no SeismoStruct .....	75
Tabela 7.1 – Altura máxima de água que a estrutura resiste .....	90

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$d_t$	deslocamento-alvo para sistema com mais de um grau de liberdade
$F_{ded}$	força hidrodinâmica atuante em toda a estrutura
$F_{isi}$	força de impacto simplificada
$F_y^*$	força de cedência ou resistência última do sistema idealizado
$d_{et}^*$	deslocamento-alvo para o sistema equivalente com um só grau de liberdade
$d_y^*$	deslocamento no limite de plasticidade do sistema idealizado
$h$	altura do nível da água (m)
$h_1$	altura do escoamento antes da estrutura
$h_2$	altura do escoamento depois da estrutura
$h_{max}$	altura máxima do nível de água em relação ao solo
$h_s$	nível da laje em relação ao solo
$h_{sx}$	altura de inundação
$A_{col}$	área de pilares perpendiculares ao fluxo de água
$A_{par}$	área de paredes perpendiculares ao fluxo de água
$A_{viga}$	área de vigas perpendiculares ao fluxo de água
$C_D$	coeficiente de arrasto
$C_{D0}$	coeficiente de arrasto para uma estrutura com secção quadrada
$C_H$	coeficiente empírico
$C_{cx}$	coeficiente de percentual da área dos elementos estruturais em relação à área de fachada

$C_d$	coeficiente que leva em consideração a forma do elemento estrutural
$C_{db}$	coeficiente referente a forma do pilar
$C_o$	coeficiente de orientação
$C_p$	coeficiente de pressão dinâmica
$E_m^*$	energia de deformação real até à formação do mecanismo plástico
$F_h$	força hidrostática horizontal
$F_b$	força de corte na base
$F_b$	impulsão hidrostática vertical
$F_i$	força de impacto instantânea
$F_i$	forças laterais normalizadas
$F_{ni}$	força nominal de impacto
$F_r$	número de Froude
$Fr_1$	número de Froude do escoamento a montante da estrutura
$Fr_2$	número de Froude do escoamento a jusante da estrutura
$Fr_d$	número de Froude do escoamento logo após a estrutura
$F_t$	força por unidade de comprimento na parede
$F_y^*$	força de cedência ou resistência última do sistema idealizado
$H_b$	altura da onda a rebentar
$I_{tsu}$	fator de importância e risco do edifício
$P_{max}$	pressão dinâmica e estática combinada máxima exercida na parede
$S_d(T_1)$	ordenada do espectro de cálculo para o período $T_1$

$S_e(T^*)$	espectro de resposta elástica no período do sistema idealizado
$S_{max}$	parâmetro cujo valor está indicado nas Tabelas 5.9 e 5.10
$T^*$	período do sistema idealizado
$T_1$	período correspondente ao primeiro modo de vibração da estrutura
$T_B$	limites de períodos no patamar de aceleração espectral constante
$T_C$	limites de períodos no patamar de aceleração espectral constante
$T_D$	limites de períodos no patamar de aceleração espectral constante
$a_g$	valor de cálculo da aceleração à superfície do terreno
$a_{gR}$	aceleração máxima de referência
$a_{vg}$	valor de cálculo da aceleração à superfície do terreno na direção vertical
$d_m^*$	deslocamento correspondente a força $F_y^*$
$d_n$	deslocamento do nó de controlo para o sistema com vários graus de liberdade
$d_s$	altura de inundação em relação à base da parede
$dA$	diferencial de área
$k_w$	coeficiente que reflete o modo de rotura predominante nos sistemas estruturais de paredes
$m^*$	massa do sistema equivalente
$m_f$	massa do fluido deslocado
$m_i$	massa do pavimento i
$q_o$	coeficiente de comportamento básico
$q_u$	relação entre a aceleração na estrutura com comportamento elástico ilimitado $S_e(T^*)$

e outra estrutura com resistência limitada  $F_y^*/m^*$

$u_1$	velocidade do escoamento a montante da estrutura
$u_2$	velocidade do escoamento a jusante da estrutura
$u_{max}$	velocidade máxima de escoamento
$v_r$	velocidade do objeto, que é igual a velocidade do escoamento
$z_i$	altura do pavimento i em relação ao solo
$\Phi_i$	deslocamentos normalizados
$\gamma_I$	coeficiente de importância da edificação
$\rho_s$	massa volúmica do líquido
$\Delta t$	tempo de desaceleração do objeto
$B$	largura do elemento estrutural
$h$	altura de inundação
$V$	volume submerso no interior do edifício que não está preenchido pela água
$A$	área da secção transversal do objeto
$B$	largura do edifício
$C$	coeficiente de massa adicionada
$D$	diâmetro do pilar ou 1,4 vezes a maior dimensão do pilar
$E$	módulo de elasticidade do objeto
$L$	comprimento do objeto
$P$	pressão
$S$	coeficiente de solo

$S_d(T)$	espectro de resposta de dimensionamento
$S_e(T)$	espectro de resposta elástica
$S_{ve}(T)$	espectro de resposta elástica vertical
$T$	período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade
$V$	velocidade do objeto
$W$	peso do objeto
$a$	aceleração
$b$	largura do elemento estrutural
$g$	aceleração da gravidade
$k$	rigidez do elemento
$k$	rigidez elástica equivalente do objeto
$m$	massa do objeto
$m$	massa total do edifício acima da fundação
$q$	coeficiente de comportamento
$u$	velocidade do fluxo
$v$	velocidade de escoamento do fluido
$w$	largura do canal
$z$	altura total do edifício
$\Gamma$	coeficiente de transformação
$\gamma$	peso específico da água
$\eta$	coeficiente de correção do amortecimento

- $\lambda$  fator de correção
- $\lambda$  coeficiente empírico
- $\rho$  massa volúmica do líquido

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 ENQUADRAMENTO GERAL**

Ao longo dos anos, a ação de tsunamis e sismos tem afetado direta e indiretamente milhões de vidas humanas, causando medo, destruição e mortes nas cidades afetadas em diversos continentes. Há diferentes causas para a ocorrência de tsunamis, que serão citadas neste trabalho, mas a análise estrutural será realizada levando em consideração uma onda formada no oceano, como consequência de uma instabilidade em uma falha geológica. Os eventos de sismo e tsunami podem acontecer independente um do outro, isto é, há casos onde a origem do sismo, denominado como epicentro, está a uma grande distância do continente, o que possibilita a dissipação da energia das vibrações antes que sejam sentidas nas cidades, porém o tsunami chega à costa algum tempo depois do movimento das placas tectônicas, ou em casos onde o epicentro é muito próximo à costa e não há distância nem energia o suficiente para formar um tsunami e somente os tremores do sismo são sentidos no continente. A ocorrência sequencial desses dois fenômenos é ainda mais grave e requer muita atenção por parte dos engenheiros estruturais, já que a estrutura pode conter deslocamentos significativos no momento da chegada do tsunami.

Portugal é um país localizado próximo ao encontro de duas placas tectônicas, o que resulta num alto potencial sísmico para algumas regiões. Evidências históricas, como investigações geológicas e relatos antigos, comprovam a ocorrência de sismos e tsunamis em algumas regiões de Portugal a mais de 6000 anos atrás. A catástrofe de 1755, em que algumas regiões do país foram atingidas por fortes abalos sísmicos seguido de tsunami, pode ser considerado o evento natural mais trágico da história portuguesa.

O Algarve é uma das zonas mais preocupantes em relação aos efeitos a serem estudados neste trabalho. Ele encontra-se próximo do encontro das placas tectônicas Euroasiática e Africana, o que aumenta os riscos associados e faz com que a onda chegue ao continente num curto período de tempo, minimizando o tempo para que as medidas certas de evacuação sejam executadas. O facto de a zona ser turística nos meses do verão agrava ainda mais as potenciais perdas humanas e econômicas, já que a densidade populacional se multiplica

nesse período do ano e a maioria dos turistas não passam por treinos de evacuação ou não recebem instruções de como agir em caso de ocorrência dessa catástrofe.

Este trabalho possui como metodologia uma abordagem que pode ser dividida em quatro casos: a estrutura é atingida somente por um tsunami de três metros, outro caso onde ela é atingida por um de nove metros e dois eventos em que a estrutura sofrerá um evento sísmico antes do tsunami, com as mesmas alturas citadas anteriormente. A dissertação contém a análise *pushover* de algumas situações de carga, em que é possível observar a resistência máxima da estrutura e sua capacidade de deformação. A edificação em estudo apresenta o piso térreo vazado, isto é, só há alvenaria nos outros andares, já que o comportamento dessa estrutura é problemático para comportamentos dinâmicos.

## 1.2 OBJETIVOS

A dissertação possui como objetivos:

- Avaliar o nível de ação em uma estrutura sob efeito de cargas induzidas por um tsunami e por sismo seguido de tsunami
- Avaliar a capacidade de deformação de uma estrutura sob efeitos de tsunami e sismo seguido de tsunami e comparar resultados
- Estudar os procedimentos de minoração de danos previstos
- Contribuir para uma possível diretriz de dimensionamento estrutural para tsunamis em Portugal

As verificações de segurança serão realizadas para um edifício de três pavimentos localizado em Lagos, vazado no piso térreo, que sofre uma ação de ondas com três e nove metros de altura. Para essas duas alturas de onda, as verificações de segurança estrutural também serão realizadas para um edifício que sofre um sismo seguido de tsunami. No final deste estudo, os resultados obtidos serão comparados e a diferença no comportamento estrutural entre uma situação em que o edifício sofra uma ação sísmica anterior ao tsunami e uma outra em que só a força induzida pelo tsunami atua poderá ser quantificada.

## 2 TSUNAMI

Este capítulo compreende na explicação do que é esse fenômeno e como ele é formado, assim como destaca suas características e propriedades importantes.

### 2.1 O QUE É E COMO É FORMADO?

Um tsunami é caracterizado por uma série de ondas, que contêm uma alta energia, formadas em zonas aquáticas com grande potencial de devastação. Quando as ondas estão distantes da costa, elas possuem um grande comprimento de onda entre si e sua velocidade pode ser superior a setecentos quilômetros por hora. O tsunami pode percorrer centenas de quilômetros, e a medida que se aproxima da costa, seu comprimento de onda diminui e a altura da onda aumenta. Ela é caracterizada pela propagação de energia, que é responsável pelo deslocamento vertical de um objeto que se encontra na superfície da água, e propagação de massa, que ocorre na direção horizontal e pode ser caracterizada como potencial de movimentar objetos. As possíveis causas de um tsunami são:

- Deslocamento de uma falha na crosta oceânica
- Deslizamento de terra submarino
- Erupção vulcânica no oceano
- Deslizamentos de terra em reservatórios e lagos
- Queda de meteoro
- Colapso de plataformas de gelo

O tsunami formado a partir do movimento de placas tectônicas será o tipo de tsunami abordado neste trabalho. O planeta Terra possui algumas camadas, como pode ser observado no modelo esquemático na Figura 2.1, onde a crosta terrestre (dividida em placas tectônicas) está sobre a camada denominada manto, o qual contém magma em contínua convecção, que gera a movimentação das placas tectônicas. A Figura 2.2 é um modelo representativo da divisão da crosta terrestre em relação às principais placas tectônicas, suas disposições em relação aos continentes e a direção de movimentação das placas. A Figura

2.3 contém a representação dos tipos de movimentos relativos entre placas tectônicas, como deslizamento, convergente e divergente.

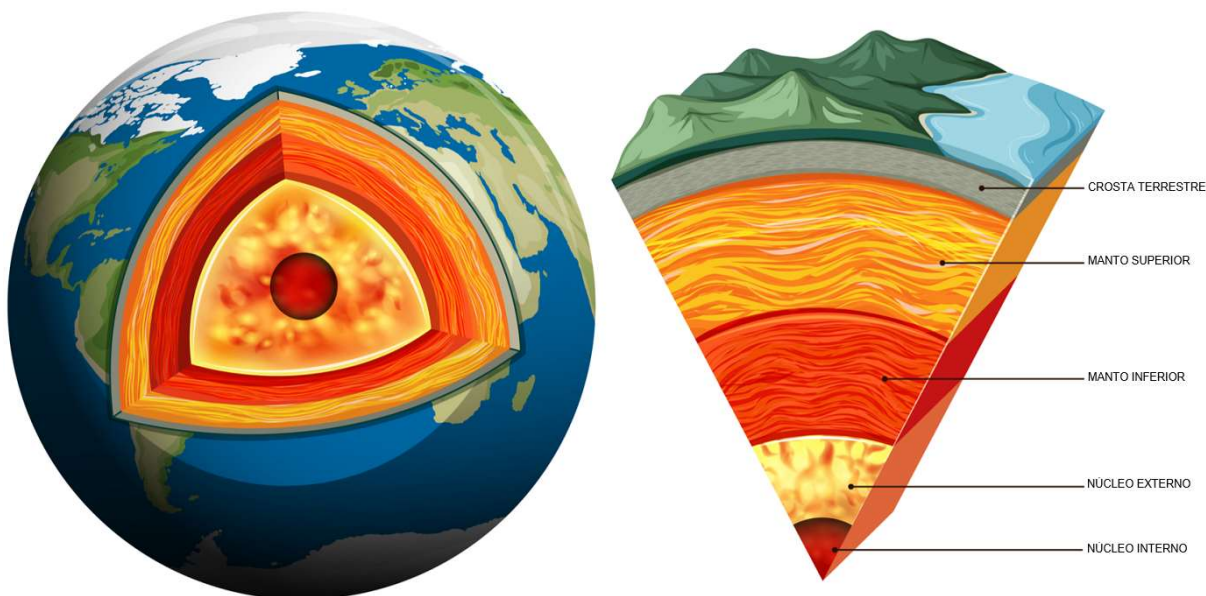


Figura 2.1 – Camadas da terra (freepik.com, 2023)

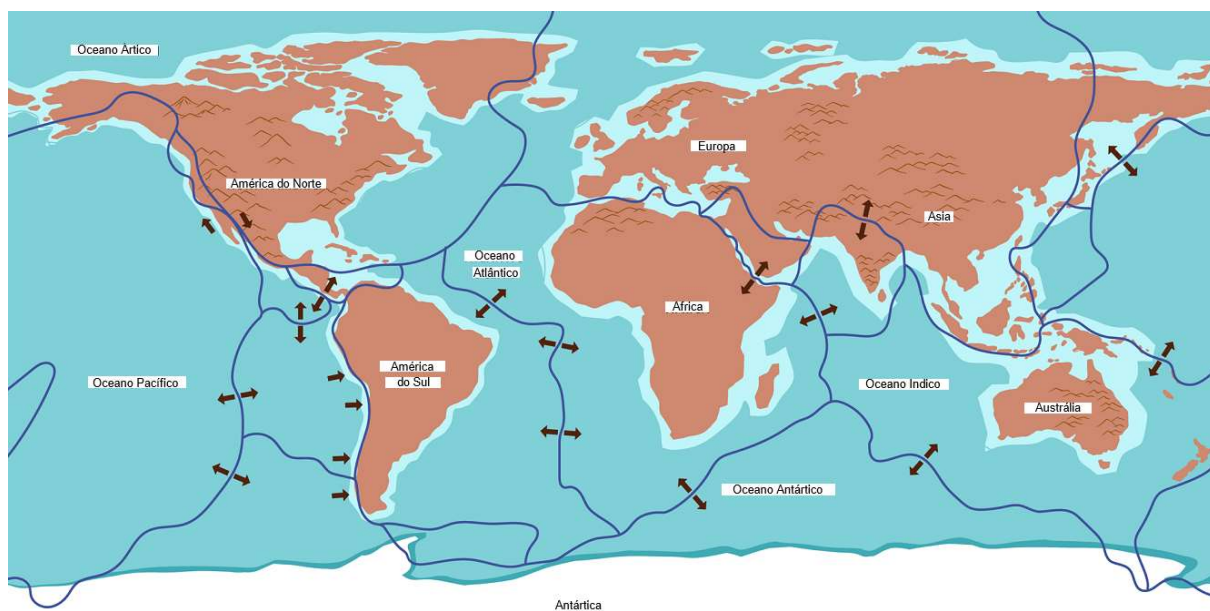


Figura 2.2 - Placas Tectônicas e os continentes (adaptada de freepik.com, 2023)

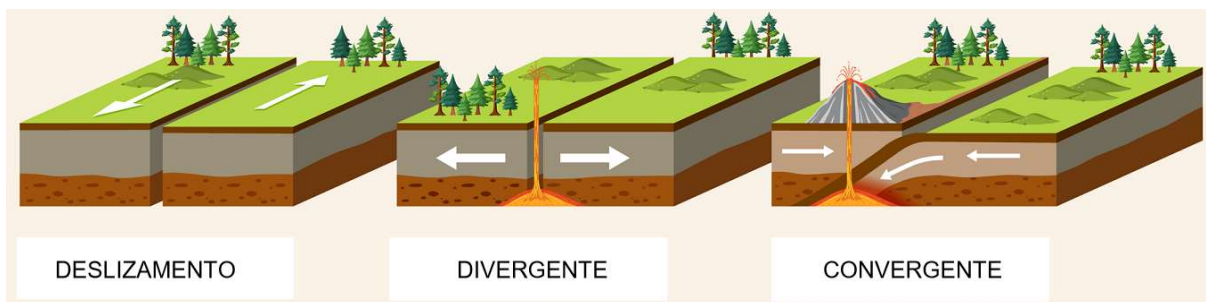


Figura 2.3 – Tipos de movimento de placas tectônicas (adaptada de freepik.com, 2023)

## 2.2 PROPRIEDADES E FATORES IMPORTANTES DO TSUNAMI

O tsunami possui muita energia e comporta-se como uma onda, apresentando duas formas diferentes de se propagar, que dependem do referencial do observador. Em planta, ela propaga-se radialmente, como observado na Figura 2.4, em que há um corte no sentido radial da propagação, indicado em vermelho, que está representado na Figura 2.5. Esse corte representa a forma da onda se propagar vista em alçado, em que pode ser identificado o comprimento de onda e a amplitude. A seguir serão listadas suas principais propriedades e características:

- Comprimento de onda
- Frequência
- Periodicidade
- Amplitude
- Velocidade
- Energia
- Número de Froude
- Densidade do Líquido

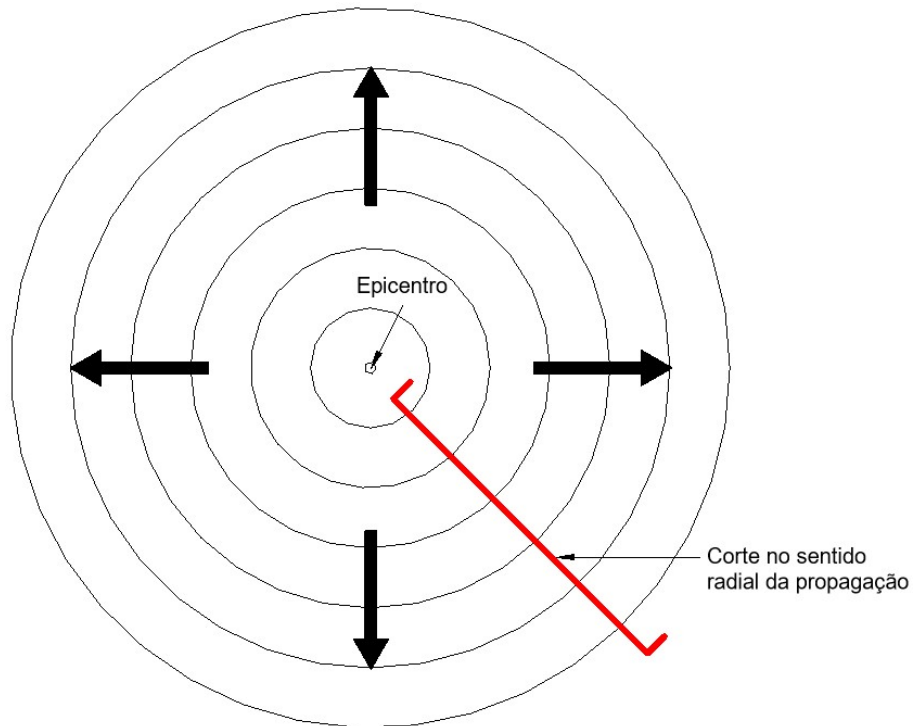


Figura 2.4 – Propagação de uma onda vista em planta

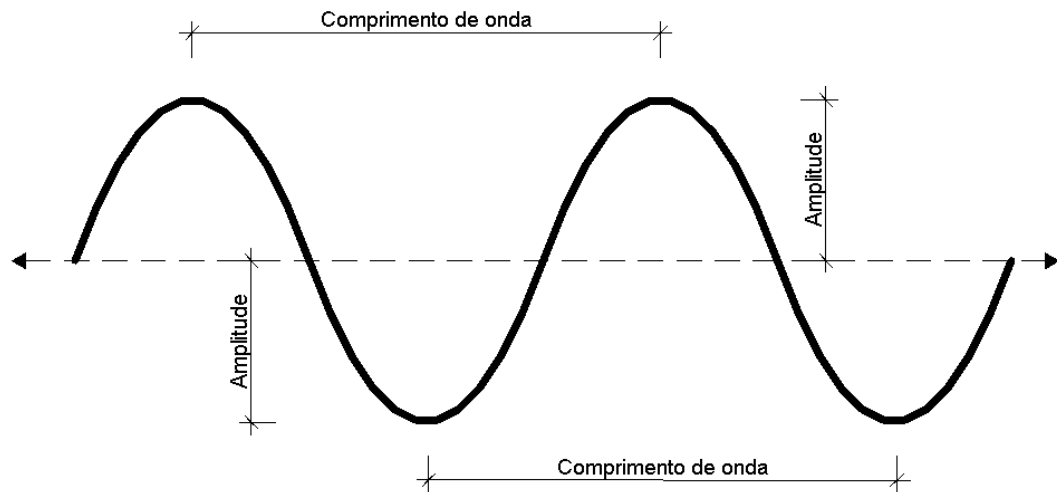


Figura 2.5 – Propriedades de onda

O número de Froude determina a relação entre forças inerciais (cinética) e resistência ao deslocamento (gravitacional), sendo importante para definir o tipo de regime ao qual o escoamento está submetido. Para valores menores que um, o regime é denominado subcrítico, onde o fluxo é dominado pelas forças inerciais, e para valores maiores que um, o

regime é caracterizado como supercrítico, em que as forças gravitacionais prevalecem. Ele leva em consideração a interação do fluido com o meio onde ele está contido de forma simplificada e seu valor é obtida através da Equação 2.1.

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (2.1)$$

Onde:

$v$ : velocidade de escoamento do fluido (m/s)

$g$ : aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$h$ : altura do fluido (m)

A massa volúmica do líquido é a razão de sua massa por um determinado volume e deve levar em consideração os sedimentos e objetos que estão contidos nele. A norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017) determina que a massa volúmica ( $\rho$ ) mínima do líquido para cálculos que levam em consideração efeitos de um tsunami seja 1127,5 kg/m<sup>3</sup>.

As propriedades do tsunami e seus efeitos estão relacionados diretamente com alguns fatores físicos e geográficos, os principais estão listados a seguir:

- Magnitude do sismo
- Localização do epicentro e sua distância até a costa
- Profundidade do oceano em relação ao nível do mar
  - A altura da onda aumenta conforme a profundidade diminui, isto é, a altura da onda é máxima quando chega a costa.

Além disso, há diversos fatores secundários que estão relacionados com a geografia e as especificidades do local. Eles influenciam na forma com que o tsunami irá chegar ao continente e o grau de danos que as edificações podem sofrer, entre elas:

- Obstruções naturais ou construções
  - Elas podem ser capazes de canalizar o fluxo de água e aumentar sua velocidade ou altura de escoamento

- Topografia do local
- Presença de rios
- Presença de embarcações próximas à costa
- Planos eficazes de evacuação da população

A Figura 2.6 é uma figura adaptada da norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017) que representa algumas características importantes referentes ao tsunami em relação ao terreno.

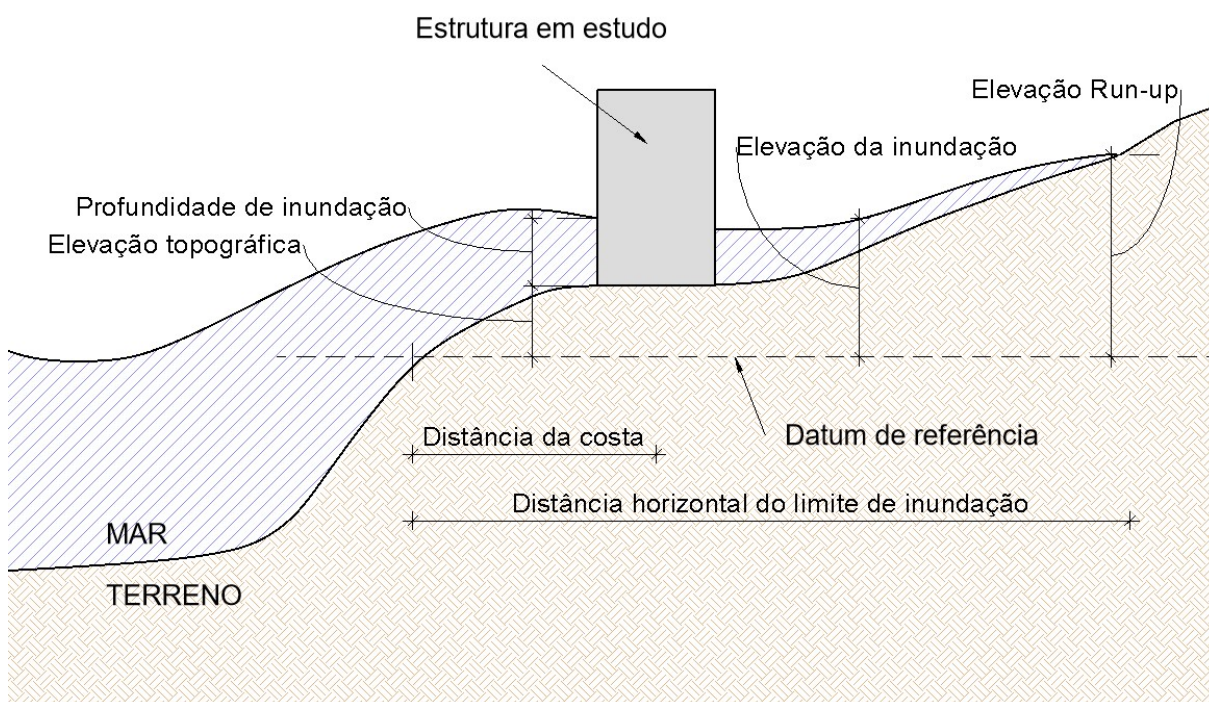


Figura 2.6 – Propriedades de um tsunami (adaptado de ASCE/SEI 7-16, 2017)

### 2.3 DADOS DE ENTRADA PARA A MODELAÇÃO COMPUTACIONAL

A modelação e simulação computacional são ferramentas importantes para auxiliar a previsão dos impactos causados pelo tsunami e mitigá-los ao máximo. Ela envolve equações diferenciais referentes ao comportamento de fluidos sob regime de escoamento e analisa a interação entre o líquido e a topografia do local. A realização desse estudo é imprescindível para se obter o tempo de chegada da onda no continente, a velocidade com que ela atinge a costa e as possíveis alturas de inundação causadas pelo tsunami.

Por mais que seja impossível quantificar e obter todos os dados referentes ao tsunami e o ambiente que será impactado, é importante colocar algumas informações no software de modelação computacional a fim de se obter resultados mais fidedignos e próximos da realidade. Alguns dados de entrada comuns neste tipo de simulação estão listados a seguir:

- Localização do epicentro
- Magnitude do sismo
- Orografia do continente e do fundo do mar
- Profundidade do oceano
- Altura máxima do fluxo de água
- Velocidade de escoamento
- Número de Froude
- Densidade do fluido

O estudo (Zhang et al., 2008) cita a importância das modelações e simulações computacionais para entender o comportamento de um tsunami em relação ao ambiente que está inserido. Ele explica os principais métodos e suas considerações, destacando seus benefícios e dificuldades. Há um facto importante a ser destacado de que em alguns casos o método mais completo e recente não é possível de ser utilizado, já que a resolução de equações diferenciais não-lineares requer um grande esforço computacional e pode demorar muito tempo dependendo do caso em estudo. Os principais métodos de simulação para tsunamis destacados por (Zhang et al., 2008) estão indicados abaixo.

- Análise linear bidimensional pelas equações de águas rasas
- Análise não-linear bidimensional através das equações de águas rasas e de Bossinesq
- Análise bidimensional ou tridimensional por elementos finitos
- Análise bidimensional ou tridimensional não-linear através das equações de Navier-Stokes

### 3 IMPORTÂNCIA DESTE ESTUDO PARA O ALGARVE

A região do Algarve encontra-se próxima a algumas importantes falhas tectônicas, como a fratura de Açores-Gibraltar e a falha da Glória (Omira et al., 2018). Com base na visualização do relevo submarino, é possível concluir que a região marítima localizada a oeste e sudoeste de Portugal, apresentada na Figura 3.1, possui algumas cadeias montanhosas no fundo do oceano, como o Banco de Gorringe e os montes submarinos Ampere, Hirondele e Coral Patch, próximas à falha da Glória, uma região com alto potencial sísmico (Omira et al., 2018). A Figura 3.2 indica os níveis de elevação do relevo no fundo do oceano com base no nível do mar (a legenda de cor para este mapa está indicada na Figura 3.3). Neste capítulo serão citados alguns casos de tsunami emblemáticos ocorridos em Portugal e outros países, como Indonésia, Japão, Chile e Alasca. Posteriormente, mecanismos de minoração de danos serão analisados, com a finalidade de salvar o maior número de vidas possível.

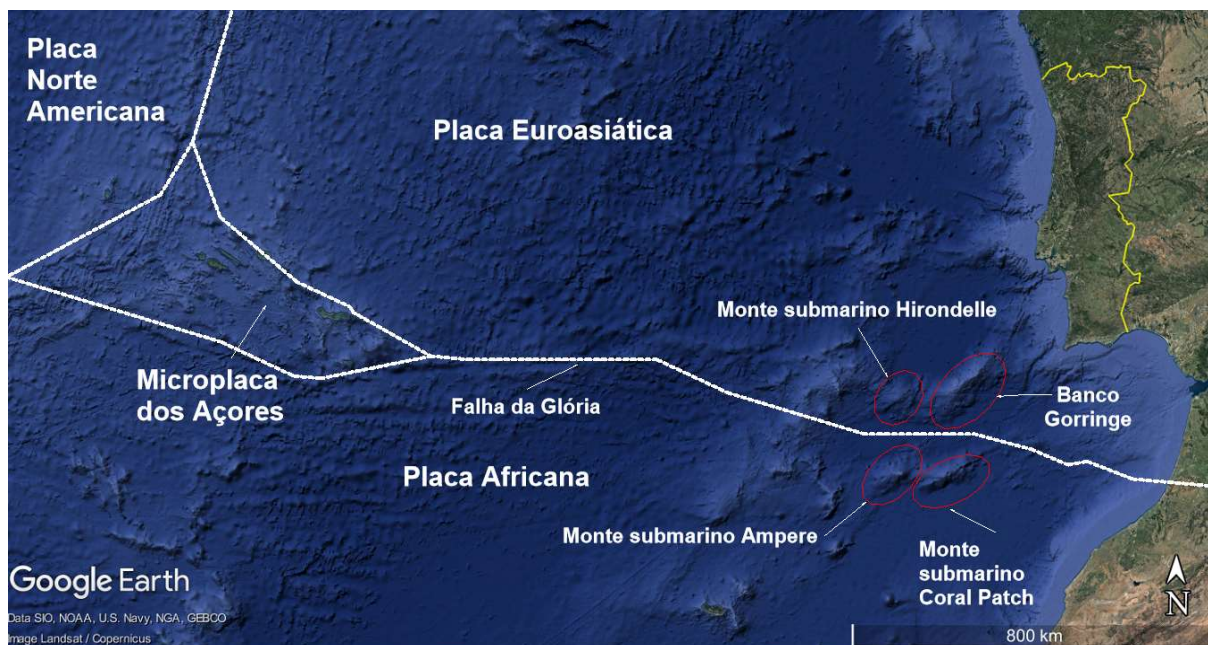


Figura 3.1 – Limites de placas tectônicas e relevos submarinos (adaptado de Google Earth, 2023)



Figura 3.2 – Profundidade do fundo do mar (Google Earth, 2023)

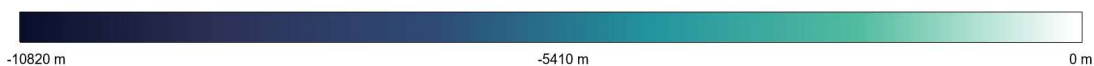


Figura 3.3 – Escala de cor

### 3.1 TSUNAMIS EM PORTUGAL

O artigo (Lario et al., 2011) é um catálogo de ocorrência de paleotsunamis durante o período Holoceno na região do Golfo de Cádiz e relata um conjunto de evidências sedimentares, paleontológicas e geomorfológicas de diversos estudos que indicam a existência de tsunamis a mais de sete mil anos atrás. Ele faz uma análise de diferentes estudos, os quais alguns serão citados posteriormente, compila seus resultados e correlaciona suas conclusões, o que aumenta a confiabilidade da análise. Há fortes evidências que corroboram na ocorrência de tsunami em 7000-6800, 5500-5000, 3900-3600 e 2200-2000 anos calibrados antes do presente (*cal yr. BP*).

Um outro artigo (Vizcaino et al., 2006) apresenta um estudo geológico, através de quatro perfurações de sondagem, pelas quais pôde ser realizado um estudo da mineralogia e a

datação das amostras por carbono 14, em zonas marítimas específicas próximo ao Cabo de São Vicente. Após a deteção de mineral turbitida, da distribuição de solos homogêneos de silte/argila e dos materiais contidos nas camadas do solo, pôde estimar-se a ocorrência de eventos que provocaram grande movimento de massa em  $29190 \pm 560$ ,  $9480 \pm 55$ ,  $5170 \pm 55$ ,  $3270 \pm 60$  e  $1940 \pm 55$  anos calibrados antes do presente (*cal yr. BP*).

O estudo (Baptista & Miranda, 2009) analisa e compila os catálogos de tsunamis portugueses. Há uma descrição de um sismo, com magnitude de 8,5 ( $M_w$ ) (Martins & Mendes Víctor, 2001), que ocorreu no ano 60 *BC* e é o evento desse tipo mais antigo que se tem referência. Há uma descrição do tsunami, em que é retratada uma vasta destruição em cidades de Portugal e Galiza com um significativo aumento do nível do mar, a inundar áreas jamais vistas anteriormente. No ano de 382 *AD*, tem-se conhecimento da ocorrência de um sismo, que posteriormente teve sua magnitude estimada em 7,5 ( $M_w$ ) (Martins & Mendes Víctor, 2001), seguido por tsunamis, dos quais os relatos descrevem um aumento anormal do nível do mar, que resultou na inundação de algumas ilhas na região do Cabo de São Vicente, em Sagres.

Em 27 de dezembro de 1722 ocorreu um sismo cujo epicentro se localizava próximo a Tavira. O tsunami, que pode ser considerado como um evento local, causou inundações em áreas bem documentadas na época. Com base numa simulação computacional, a estimativa da magnitude do sismo foi de 6,5 ( $M_w$ ) e da localização do seu epicentro foi 37 01' N 7 49' O. (Baptista et al., 2007)

Em 1 de novembro de 1755 ocorreu o evento trágico mais marcante da história recente de Portugal, onde o país foi atingido por um forte sismo, com magnitude estimada entre 8,5 e 9 ( $M_w$ ) seguido de tsunamis em algumas partes costeiras de Portugal, a costa sul da Espanha e Marrocos. Há relatos que ondas com dez a quinze metros de altura foram avistadas no Cabo de São Vicente, em Sagres, e ao longo do Golfo de Cádiz (Baptista & Miranda, 2009). A região do Algarve foi fortemente atingida pelo aumento do nível do mar, causado pelo tsunami, o que resultou na destruição de muitas cidades da região. O estudo (Baptista & Miranda, 2009) contém relatos os quais defendem que o nível da água atingiu aproximadamente catorze metros de altura e em pouco tempo arruinou a cidade de Lagos.

O estudo (Vigliotti et al., 2019) analisou as camadas geológicas em alguns pontos específicos na zona da Boca do Rio, no Algarve, a considerar a presença de areia em camadas intermediárias e as propriedades magnéticas e geoquímicas dos elementos contidos no solo. Com base na datação dos materiais do solo por meio de carbono 14 e no estudo da

estratigrafia do solo, pôde concluir-se que o tsunami gerado pelo sismo de 1755 impactou a zona do Algarve e carregou muito material arenoso para determinados locais.

Em 31 de março de 1761 ocorreu um sismo com magnitude estimada em 8,5 ( $M_w$ ) e com epicentro localizado próximo à 34,5° N 13° O (Baptista et al., 2006). As amplitudes registadas em Lisboa são estimadas em 2,4 metros de altura (Baptista & Miranda, 2009).

Em 18 de novembro de 1929 ocorreu um sismo com magnitude de 7,2 ( $M_w$ ) com epicentro próximo ao Canadá que gerou um grande deslizamento de terra submarino (estimado em 200 km<sup>3</sup>) (Fine et al., 2005). A maior amplitude registada em Portugal foi de 0,19 e 0,14 metro em Leixões e Ponta Delgada, respetivamente (Baptista & Miranda, 2009). Porém este evento causou ondas com amplitudes de três a oito metros, a resultar na morte de vinte e oito pessoas no Canadá.

Em 28 de fevereiro de 1969 ocorreu um sismo com magnitude estimada de 7,3 ( $M_w$ ), das quais as coordenadas estimadas são 36,01°N e 10,57° O. Há registos em alguns locais das amplitudes dos tsunamis, que chegaram a 93,2 e 84,3 centímetros em Cascais e Lagos, respetivamente (Baptista & Miranda, 1992). Em maio de 1975, um sismo com magnitude estimada em 7,9 ( $M_w$ ), cujo epicentro está próximo das coordenadas 35,9° N 17,6° O, causou tsunamis que tiveram as amplitudes registadas de 53,1 e 27,4 centímetros em Lagos e Cascais, respetivamente. Uma das conclusões de (Baptista & Miranda, 1992) foi que a movimento de deslizamento entre placas tectônicas (*strike-slip*) é um tipo de movimentação muito menos efetiva para geração de tsunamis que o movimento convergente (*dip-slip*).

Um estudo (Andrade et al., 2006) coletou diversas fontes de informação que relatam a ocorrência de sismos e tsunamis na região dos Açores. Essa região encontra-se localizada numa falha tectônica, o que resulta numa recorrência de um sismo com magnitude média de 6,5 ( $M_w$ ) a cada setenta anos aproximadamente. A base de dados coletada pelo artigo fornece a informação de que um tsunami ocorre a cada dezoito anos nos Açores, independentemente da sua origem e intensidade. Entre os eventos que possuem os tsunamis com maiores alturas, estão os tsunamis ocorridos em 1641, 1688, 1755 e 1856, cujas alturas são estimadas em nove, sete, quinze e dez metros, respetivamente. O último tsunami registado no Açores foi em 1980, quando um sismo de magnitude de 6,8 ( $M_w$ ) (Borges et al., 2007) gerou dezoito ondas, divididas em duas séries. A amplitude média das ondas do tsunami registadas foi de trinta centímetros e não gerou nenhum dano ao continente (Andrade et al., 2006).

### 3.2 TSUNAMIS EM OUTROS PAÍSES

Em 26 de dezembro de 2004, ocorreu um grande sismo de magnitude 9,3 ( $M_w$ ), cujo epicentro estava localizado no oceano Índico próximo ao norte de Sumatra (aproximadamente 116 quilômetros de distância do epicentro). O sismo gerou uma série de tsunamis em vários países e resultou na morte de mais de 260000 pessoas, sendo Indonésia, Tailândia e Sri Lanka os mais afetados (Rossetto et al., 2007). O artigo (Syamsidik et al., 2020) realizou uma modelação computacional, cujos resultados apontaram que as alturas das ondas chegaram até cinco metros em algumas ilhas da região em 2004. Após esse acontecimento, ocorreram alguns fortes eventos sísmicos com magnitudes entre 7,2 e 8,6 ( $M_w$ ) do ano 2005 até 2012 (Syamsidik et al., 2020), o que reforça a necessidade de planeamento para mitigação de efeitos trágicos e de preparação do país para próximos possíveis eventos.

Há evidências históricas de uma série de tsunamis ocorridos em Fukushima, no Japão. O estudo (Kusumoto et al., 2018) analisa as camadas do solo de ponto estratégicos, onde foram encontradas camadas de areias intermédias ao solo comum da região e presença de conchas em algumas delas. Através da datação por radiocarbono dos elementos extraídos, foi possível concluir que há indícios da ocorrência de paleotsunamis há mais de três mil anos no Japão. Alguns eventos ficaram marcados nos últimos anos, entre eles pode destacar-se os tsunamis Meiji Sanriku (1846) e Showa Sanriku (1993) cujas máximas alturas *run-up* chegaram a 38,2 e 28,7 metros, respetivamente (Mori et al., 2011).

O sismo de Tohoku, com magnitude de 9,0 ( $M_w$ ), ocorreu em 11 de março de 2011 e é considerado o maior sismo já registado na história do Japão, o qual gerou um tsunami com altura de 11,5 a 15,5 metros de altura em relação ao nível do mar, sendo que a altura máxima *run-up* foi registada em Miyako com 39,7 metros (Mori et al., 2011). Essa catástrofe foi marcada por um acidente nuclear, o qual foi causado pelo dano da onda no gerador de emergência a diesel, a resultar na falha do sistema de segurança, que gerou o derretimento do seu núcleo e explosões de hidrogênio. Acredita-se que a principal falha de projeto foi considerar uma altura de onda pequena, porém ela estava de acordo com os dados históricos coletados. Esse facto é importante para alertar os projetistas de que os eventos passados não garantem comportamentos futuros e deve-se sempre olhar para os casos mais críticos.

O Chile está localizado próximo ao encontro de duas placas tectônicas, onde a placa de Nazca sofre subducção para baixo da placa Sul Americana, o que resulta em uma região de alta atividade sísmica. O estudo (León et al., 2023) coleta diversas informações sobre sismos e tsunamis no passado e pode concluir-se que o sismo de 2010, cuja magnitude foi de 8,8 ( $M_w$ ),

resultou na maior onda de tsunami da história registada no país, na comuna de Constitución (localizada na província de Talca), com vinte e nove metros de altura e também gerou ondas com alturas significativas de doze a quinze metros na comuna de Pichilemu (localizada na província de Cardenal Caro). Em 1960, ocorreu o maior sismo já registado da história, com magnitude de 9,5 ( $M_w$ ) o qual resultou num tsunami de quinze metros em Ancud (localizada na província de Chiloé). Essa informação é importante para identificar que o maior sismo pode não resultar no maior tsunami, já que há uma diversidade muito complexa de fatores determinantes para a altura da onda.

Em 27 de março de 1964 ocorreu o sismo com maior magnitude da história dos Estados Unidos da América, no Alasca, e originou uma série de tsunamis que atingiram principalmente os estados do Oregon e Califórnia. O sismo de magnitude 9,2 ( $M_w$ ) e seus posteriores tsunamis causaram 129 fatalidades e uma perda estimada em 2,3 mil milhões de dólares (2013). No sul do Alasca, setenta por cento das mortes foram causadas por tsunamis originadas a partir de massivos deslizamentos de terra submarinos. Devido à proximidade desses deslizamentos de terra em relação à costa, as ondas chegaram ao continente em poucos minutos e foram registadas inundações em regiões que estavam acima de cinquenta metros de altura. A cidade de Chenega teve um terço de sua população dizimada quando uma onda de aproximadamente vinte metros chegou à cidade após quatro minutos do sismo. (Brocher et al., 2014).

Os quinze maiores tsunamis já registados na história (NOAA, 2023) estão apresentados na Tabela 3.1. A variedade de causas de tsunamis alerta para que o levantamento das cargas e o dimensionamento da estrutura esteja de acordo com o ambiente em que o empreendimento se encontra, o que inclui regiões montanhosas com reservatórios de água, lagos ou baías.

Tabela 3.1 – Os tsunamis com maior altura de água já registados (NOAA, 2023)

Base de dados (NOAA)					
Ano	Causa do tsunami	País	Localização	Altura máxima da água (m)	Mortes confirmadas
1958	Sismo e deslizamento de terra	Estados Unidos	Sudeste do Alasca	524,6	5
1930	Vulcão	Indonésia	Krakatau	500	
1980	Vulcão	Estados Unidos	Washington	250	
1963	Deslizamento de terra	Itália	Rio de Vajont	235	2000
2015	Deslizamento de terra	Estados Unidos	Baía Icy (Alasca)	193	
1936	Deslizamento de terra	Estados Unidos	Baía de Lituya (Alasca)	149,35	
1853	Deslizamento de terra	Estados Unidos	Baía de Lituya (Alasca)	120	
1674	Sismo e deslizamento de terra	Indonésia	Mar Banda	100	2244
1610 A.C.	Vulcão	Grécia	Ilha de Thera (Santorini)	90	
1741	Vulcão	Japão	Ilha de W. Hokkaido	90	2000
2017	Deslizamento de terra	Groelândia	Karrat Fjord	90	4
2018	Deslizamento de terra	Rússia	Bureya	90	
1788	Sismo	Estados Unidos	Ilhas de Shumagin (Alasca)	88	
1771	Sismo	Japão	Ilhas de Ryukyu	85,4	13486
2018	Vulcão e deslizamento de terra	Indonésia	Krakatau	85	437

### 3.3 MECANISMOS PARA SALVAR VIDAS HUMANAS

Há algumas formas de atenuar os efeitos causados por sismos e tsunamis. A primeira é o aprimoramento das normas de dimensionamento estrutural, que é um processo contínuo de melhoria, já que eventos inéditos acontecem no decorrer da história, o que torna necessária a atualização dos modelos e parâmetros por parte dos técnicos. Conforme a tecnologia avança, tornam-se mais confiáveis os resultados experimentais relacionados aos materiais e os modelos computacionais podem atribuir uma maior quantidade de variáveis e parâmetros.

Uma outra abordagem de minoração do número de fatalidades é alertar a população da ocorrência de um tsunami previamente à chegada dele à costa de modo a possibilitar que a evacuação seja realizada da forma mais rápida possível. A primeira etapa é identificar as zonas mais críticas, isto é, as regiões com baixa altitude onde o tsunami chegará mais rapidamente e cujos danos causados serão maiores. Com isso, é importante saber o número de habitantes que vivem nela e estudar as melhores formas de movimentar essas pessoas no tempo desejado. Para esse tipo de abordagem, é importante estar atentos aos sinais que precedem o tsunami, como por exemplo, um sismo ou o recuo anormal das águas costeiras. A monitorização do nível da água deve ser feita constantemente, através de boias com sensores de nível instaladas em pontos específicos em relação à costa marítima, para que mudanças de nível anormais sejam detetadas rapidamente e haja tempo para avisar as populações.

Há diversos estudos referentes ao escoamento da população em momentos de ocorrência de tsunamis, que levam em consideração as rodovias existentes e as formas de transporte existentes naquele local, geralmente automóveis e deslocamentos à pé. O estudo (Fathianpour et al., 2023) é um exemplo de uma análise computacional da evacuação da população em face da ocorrência de um tsunami, realizado na cidade de Napier, na Nova Zelândia. Com base nos dados da topografia local, população e a localização das zonas seguras, ele analisa o tempo mínimo necessário para um indivíduo se deslocar e chegar a uma zona segura. Com isso, pode calcular-se a percentagem aproximada da população que estaria salva nas condições do estudo e avaliar novas rotas a serem construídas para minimizar o número de mortes.

A evacuação horizontal é caracterizada pela existência de rotas de fuga, cujo objetivo é garantir o rápido escoamento da população para regiões seguras, onde há barreiras projetadas para conter a água ou em lugares onde a topografia possua uma elevação adequada. Para que haja sucesso neste tipo de evacuação é necessário que sejam instaladas sirenes nos locais onde há risco, placas de sinalização que indiquem o melhor caminho a se tomar, treino da população com informações prévias do que fazer durante o evento e um protocolo de informação que alerte a população e que indique as medidas a serem tomadas através de meios eficientes de comunicação (FEMA P-646, 2019).

A evacuação vertical consiste na existência de estruturas elevadas que possam garantir a segurança dos indivíduos no momento em que há o sismo e o tsunami. Essas estruturas devem estar dimensionadas de acordo com as boas práticas sísmicas e devem resistir às forças geradas pelas ondas atuantes posteriormente, para que a população possa esperar o término da catástrofe em segurança. Esse tipo de evacuação também aborda a elevação do nível topográfico de uma região, como construir bermas ou montes com elevação acima do nível máxima de inundação (FEMA P-646, 2019).

A norma (FEMA P-646, 2019) aponta algumas diretrizes importantes para serem levadas em consideração na construção e dimensionamento de estruturas para evacuação vertical. Ela aborda questões importantes quanto ao estudo das áreas sob potencial risco e a distribuição espacial dessas estruturas de segurança, que devem ser classificadas como categoria de risco IV pelas diretrizes americanas, isto é, o coeficiente de majoração das cargas de tsunami deve ser igual a 1,25. A norma (ASCE/SEI 7-16, 2017) determina que para este tipo de estrutura deve-se levar em consideração uma altura de *run-up* de dimensionamento trinta por

cento maior que a altura máxima de *run-up*. Com isso, a norma indica que as cargas do tsunami não precisam ser multiplicadas por um fator de majoração nas combinações de carga.

A construção de barreiras em betão armado pode ser a solução em situações críticas ou para zonas muito próximas à costa. Para esse tipo de estrutura, é importante estudar as cargas hidrostática, de impacto, hidrodinâmica, impulsiva e de rebentação de onda, que serão explicados no Capítulo 4.

## 4 FORÇAS ATUANTES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES

As forças atuantes na ocorrência de um tsunami foram obtidas através da norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017). As forças abordadas neste capítulo são: hidrostática, impulsão hidrostática vertical (*buoyant*), hidrodinâmica, impulsiva, de impacto, de rebentação, acumulação residual, de levantamento e de água residual nos pavimentos. Em seguida, serão abordadas algumas recomendações para as combinações de ações.

### 4.1 FORÇA HIDROSTÁTICA HORIZONTAL

A força hidrostática horizontal é causada por água sem ou com pouco movimento em contato com a estrutura, especialmente quando os níveis de inundação nos diferentes lados da estrutura não são iguais (FEMA P-55, 2011). A área de contato do líquido é caracterizada como área molhada. Os fatores que influenciam essa força são a altura do líquido em relação ao solo e sua densidade, a largura e a altura da estrutura que suportará a força, como apresentado na Figura 4.1. A norma (ASCE/SEI 7-16, 2017) indica que esta força deve ser calculada para paredes estruturais com menos de dez por cento de aberturas em relação à sua área total e comprimento maior que trinta pés (9,14 metros) e em situações que a velocidade de escoamento seja menor que cinco pés por segundo (1,52 metros por segundo). O artigo (Fukuyama et al., 2013) explica como a diretriz japonesa MLIT 2570 utiliza a força hidrostática para quantificar a ação de um tsunami, onde a altura de inundação é multiplicada por um coeficiente de majoração a depender das condições em que o edifício está localizado, como sua distância em relação à costa marítima e a existência de barreiras de proteção.

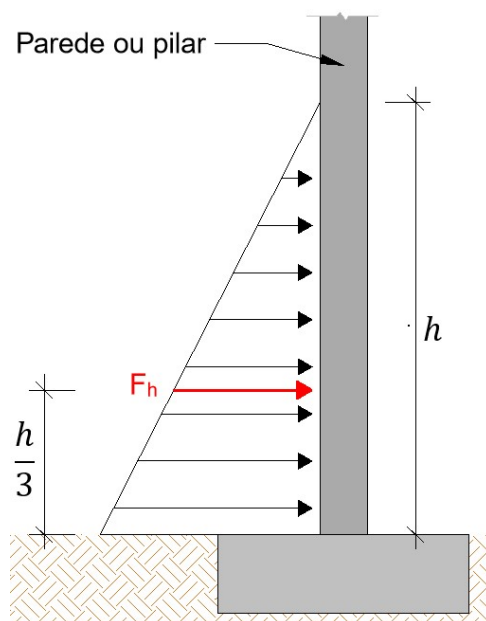


Figura 4.1 – Força hidrostática sob um elemento vertical

A força hidrostática resultante ( $F_h$ ) é calculada a partir da Equação 4.1, que leva em consideração a pressão exercida por um líquido numa determinada área em função de sua altura.

$$F_h = \int P dA = \int_0^{h_{max}} \rho g h b dh = \rho g b \frac{h_{max}^2}{2} \quad (4.1)$$

Onde:

$P$ : pressão (kPa)

$dA$ : diferencial de área

$\rho$ : massa volúmica do líquido ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$ : aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ )

$h$ : altura do nível da água (m)

$b$ : largura do elemento estrutural (m)

$h_{max}$ : altura máxima do nível de água (m)

## 4.2 IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL

Essa força, também chamada de *buoyant*, atua na direção vertical e ocorre quando um corpo está submerso em um líquido, correspondendo ao descrito pelo Teorema de Arquimedes. O edifício, quando se encontra abaixo do nível de água, resiste a uma força no sentido de baixo para cima causada pela interação do líquido com a estrutura. Essa força é mais preocupante nas edificações de baixo peso próprio (força vertical hidrostática pode ser maior que o peso do edifício, fazendo com que haja a elevação da estrutura e a perda de sua sustentação no solo), nas estruturas que contém ensoleiramentos gerais ou piscinas, pois área de contato do líquido com a superfície da estrutura é considerável, e em edifícios onde há cave, pelo facto de haver um grande volume vazio submerso. Essa força aumenta no caso de um tsunami, pois a medida que a altura da água exterior ao edifício torna-se maior, o volume deslocado no interior do edifício aumenta, o que pode causar deslocamentos e/ou deformações significativas. A norma (ASCE/SEI 7-16, 2017) indica que o volume dos elementos estruturais, inclusive fundações superficiais, deve ser incluído no cálculo desta força, assim como o volume de ar aprisionado no interior do edifício em sítios onde as paredes suportam a carga do tsunami (com área de abertura máxima de 25 por cento da área total inundada da parede). Quando a altura de inundação ultrapassa o nível superior das janelas, estes vãos podem ser considerados aberturas. A Figura 4.2 representa o volume deslocado de água numa situação de inundação e a força resultante de flutuação ( $F_b$ ), que pode ser calculada a partir da Equação 4.2.

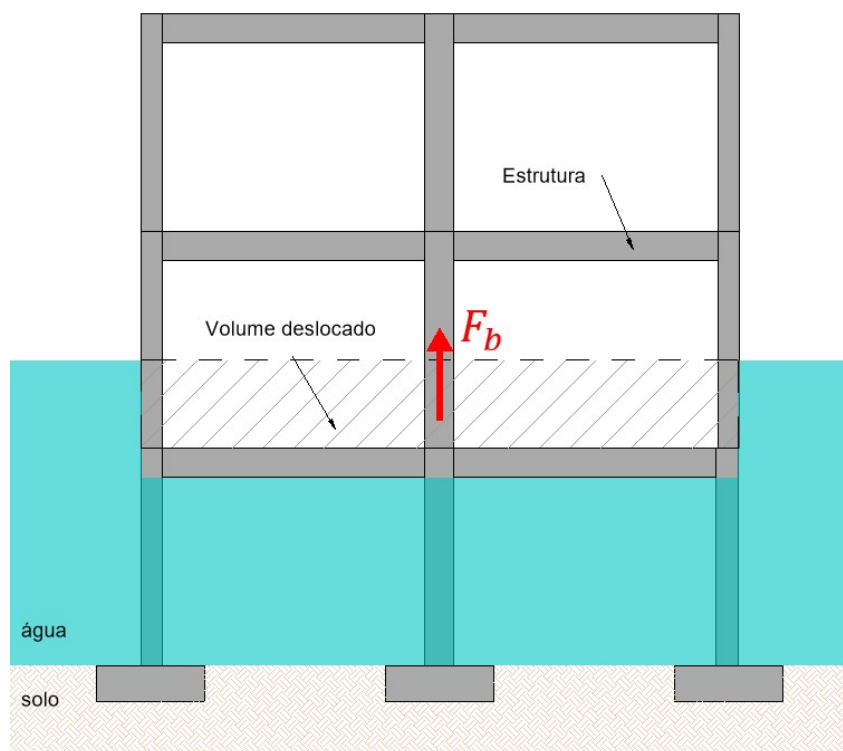


Figura 4.2 – Força de impulsão hidrostática vertical sob a estrutura

$$F_b = \gamma V \quad (4.2)$$

Onde:

$\gamma$ : peso específico da água ( $\text{kN/m}^3$ )

$V$ : volume deslocado de água ( $\text{m}^3$ )

### 4.3 FORÇA HIDRODINÂMICA

Essa força, que também pode ser designada por força de arrastamento, deve ser interpretada como atuante na estrutura como um todo e em elementos estruturais separadamente. Ela é induzida pelo movimento da água e é em função da velocidade do fluxo, da densidade do líquido e geometria do edifício.

O estudo (Qi et al., 2014) faz uma análise do comportamento do líquido levando em consideração um obstáculo retangular cilíndrico em um canal. O trabalho conclui que a força

hidrodinâmica imposta a estrutura pelo líquido é relacionada com o regime do escoamento, isto é, o seu número de Froude. A Figura 4.3 representa a pressão hidrodinâmica a ser considerada para os cálculos num elemento estrutural.

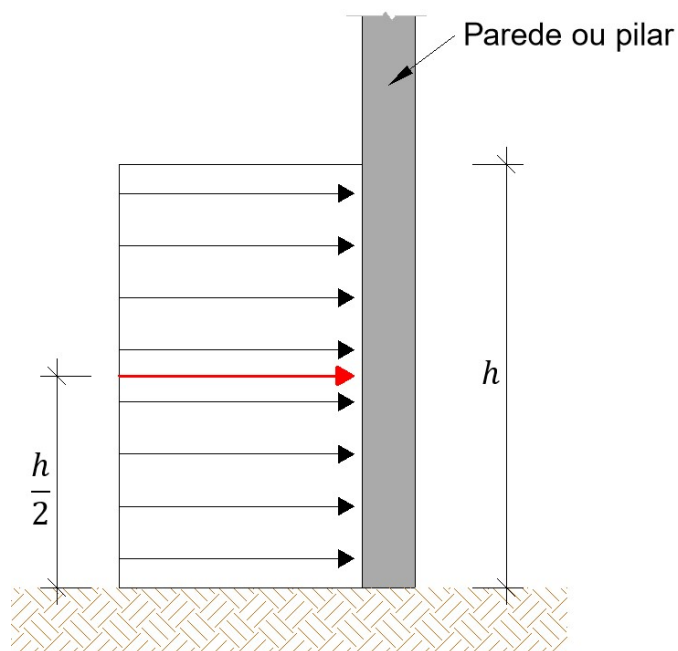


Figura 4.3 – Força hidrodinâmica sob elemento estrutural

A norma (ASCE/SEI 7-16, 2017) define a Equação 4.3 para verificação da resistência do prédio em sua totalidade, em que a força hidrostática ( $F_{ded}$ ) pode ser interpretada como atuante em toda a estrutura. O coeficiente  $C_{cx}$  caracteriza a percentagem de área de elementos estruturais em relação a área total da fachada e seu valor é obtido através da Equação 4.4. O valor de  $C_d$  pertencente à Equação 4.3 é determinado de forma diferente em relação aos casos em que a força é considerada para só um elemento estrutural, demonstrado na Equação 4.5. O valor referente ao prédio em sua totalidade é obtido através da Tabela 4.1, que leva em consideração a razão da largura do prédio por sua altura.

$$F_{ded} = \frac{1}{2} \rho_s I_{tsu} C_d C_{cx} B (hu^2) \quad (4.3)$$

$$C_{cx} = \frac{\Sigma(A_{col} + A_{par}) + 1,5A_{viga}}{Bh_{sx}} \quad (4.4)$$

Onde:

$\rho_s$ : massa volúmica do líquido (kg/m<sup>3</sup>)

$I_{tsu}$ : fator de importância e risco do edifício

$C_d$ : coeficiente que leva em consideração a forma do elemento estrutural

$C_{cx}$ : coeficiente de percentual da área dos elementos estruturais em relação à área de fachada

$B$ : largura do edifício (m)

$h$ : altura de inundação (m)

$u$ : velocidade do fluxo (m/s)

$A_{col}$ :  rea de pilares perpendiculares ao fluxo de água (m<sup>2</sup>)

$A_{par}$ :  rea de paredes perpendiculares ao fluxo de água (m<sup>2</sup>)

$A_{viga}$ :  rea de vigas perpendiculares ao fluxo de água (m<sup>2</sup>)

$h_{sx}$ : altura de inundação (m)

Tabela 4.1 – Coeficiente  $C_d$  para estrutura (ASCE/SEI 7-16, 2017)

Coeficientes $C_d$ para estruturas retilíneas	
$B / h_{sx}$	$C_d$
<12	1,25
16	1,3
26	1,4
36	1,5
60	1,75
100	1,8
≥120	2

A norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017) define a Equação 4.5 para calcular a força hidrodinâmica ( $F_d$ ) utilizada na verificação de resistência de um elemento estrutural. Porém, se o número de Froude do escoamento é maior que um e a largura do elemento for superior a três vezes a altura de inundação, ela indica que o cálculo seja realizado de acordo com a Equação 4.6. O valor correspondente ao  $C_d$  nestas equações citadas anteriormente é igual a 1,2 para pilares circulares e 2 para pilares retangulares ou quadrados (a norma define outros valores para elementos estruturais com seções transversais diferentes). O fator de importância ( $I_{tsu}$ ) é uma constante indicada na norma ASCE 7-16 que leva em consideração o uso do edifício e sua categoria de risco. O valor dessa constante pode ser 1, em casos onde o edifício apresente baixo risco de colapso e baixo potencial de dano, ou 1,25, para casos em que a edificação esteja sob alto risco de tsunami e/ou possua uma grande importância de utilização.

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_s I_{tsu} C_d b (hu^2) \quad (4.5)$$

$$F_d = \frac{3}{4} \rho_s I_{tsu} C_d b (hu^2) \quad (4.6)$$

Onde:

$\rho_s$ : massa volúmica do líquido (kg/m<sup>3</sup>)

$I_{tsu}$ : fator de importância e risco do edifício

$C_d$ : coeficiente que leva em consideração a forma do elemento estrutural

$b$ : largura do elemento estrutural (m)

$h$ : altura de inundação (m)

$u$ : velocidade do fluxo (m/s)

O artigo (Qi et al., 2014) compreende em um estudo experimental para o cálculo da força hidrodinâmica atuante num escoamento de um canal em laboratório. Ele sugere que a força hidrodinâmica seja calculada conforme o número de Froude do escoamento. As Equações

4.7, 4.8 e 4.9 foram indicadas pelo estudo para calcular a força hidrodinâmica atuante num objeto que impede parcialmente o fluxo de água no canal, como demonstrado na Figura 4.4. O artigo (Foster et al., 2017) também é um estudo experimental, realizado num canal controlado em laboratório, para avaliar as forças causadas pela inundação de um tsunami. A única diferença entre os estudos é que (Foster et al., 2017) diferencia situações de escoamento permanente e variável, e atribui equações diferentes para o cálculo do fator  $\lambda$ , que atua em regime de escoamento supercrítico. As Equações 4.10 e 4.11 são sugeridas por (Foster et al., 2017) para situações de escoamento permanente e variável em regime de escoamento supercrítico, respetivamente.

$$F_d = \begin{cases} \frac{1}{2} C_D \rho_s b u_1^2 h_1 ; \text{para } Fr_2 < 1 & (4.7) \\ \lambda \rho_s B g^{\frac{1}{3}} u_1^{\frac{4}{3}} h_1^{\frac{4}{3}} ; \text{para } Fr_2 \geq 1 & (4.8) \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{1}{2} C_D Fr^{\frac{2}{3}} + \frac{1}{2} C_H \left( \frac{1}{Fr_1^{\frac{4}{3}}} - \frac{1}{Fr_d^{\frac{4}{3}}} \right) \quad (4.9)$$

$$\lambda = 0,73 + 1,2 \left( \frac{B}{w} \right) + 1,1 \left( \frac{B}{w} \right)^2 \text{ para escoamento permanente} \quad (4.10)$$

$$\lambda = 1,37 + 1,35 \left( \frac{B}{w} \right) + 1,37 \left( \frac{B}{w} \right)^2 \text{ para escoamento variável} \quad (4.11)$$

Onde:

$C_D$ : coeficiente de arrasto

$\rho_s$ : massa volúmica do líquido ( $\text{kg/m}^3$ )

$b$ : largura do objeto que obstrui o canal (m)

$u_1$ : velocidade do escoamento a montante da estrutura (m/s)

$u_2$ : velocidade do escoamento a jusante da estrutura (m/s)

$h_1$ : altura do escoamento antes da estrutura (m)

$\lambda$ : coeficiente empírico

$B$ : largura do edifício (m)

$g$ : aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$C_H$ : coeficiente empírico

$Fr_1$ : número de Froude do escoamento a montante da estrutura

$Fr_2$ : número de Froude do escoamento a jusante da estrutura

$Fr_d$ : número de Froude do escoamento logo após a estrutura

$w$ : largura do canal (m)

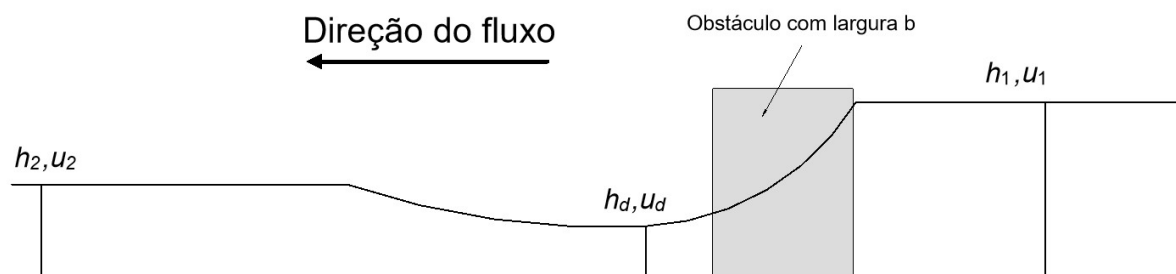


Figura 4.4 – Modelo esquemático da onda experimento (adaptado de Foster et al., 2017)

O valor de  $C_H$  é 0,58 e o  $C_D$  é obtido através da Equação 4.12 (Qi et al., 2014).

$$C_D = C_{D0} \left( 1 + \frac{C_{D0} b}{2w} \right)^2 \quad (4.12)$$

Onde:

$C_{D0}$ : coeficiente de arrasto para uma estrutura com secção quadrada

$b$ : largura do objeto que obstrui o canal (m)

$w$ : largura do canal (m)

O coeficiente  $C_{D0}$  corresponde ao estudo de caso apresentado em (Qi et al., 2014), em que o objeto que representa a estrutura tem uma secção quadrada, e seu valor é 1,9.

#### 4.4 FORÇA IMPULSIVA

Essa força é causada pela mudança de direção ou paragem repentina de um líquido, que no caso do tsunami é quando a onda atinge o edifício. O trabalho (Ramsden, 1993) realiza diversos estudos experimentais sobre as forças impulsivas e hidrodinâmicas em paredes sólidas. Os resultados desses estudos apontaram que há um aumento significativo inicial na força de impacto de uma onda numa parede para situações onde o terreno encontra-se não inundado. Porém, foi detetado que a força inicial é muito maior em casos onde o terreno esteja previamente inundado. A norma (FEMA P-646, 2019) indica que o valor dessa força pode ser calculado ao multiplicar 1,5 vezes a força hidrodinâmica, porém ela só deve ser levada em consideração nos casos em que a largura do elemento estrutural é três vezes maior que a altura de inundação.

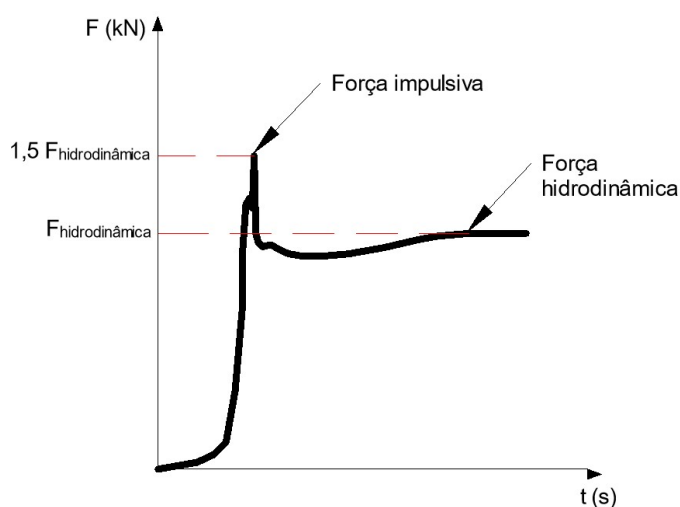


Figura 4.5 – Comportamento da força ao longo do tempo num impacto (adaptado de Yeh et al., 2014)

#### 4.5 FORÇA DE IMPACTO

Essa força é originada pelo impacto objetos que possam estar presentes no fluxo de água causado por um tsunami. Esta força pode ser causada por embarcações, troncos de árvore, automóveis, entre outros. O grande número de possíveis objetos faz com que essa força seja muito difícil de se determinar, o que possibilita o projetista a estudar um tipo específico de caso, mais plausível para situação em estudo. Os fatores que influenciam a magnitude desta força são a massa do elemento que colidirá com a estrutura, a massa adicionada, o tempo do impacto e a velocidade do objeto, que pode ser interpretado como igual à velocidade de fluxo do líquido. A norma ASCE/SEI 7-16 estabelece regiões dos Estados Unidos da América para que as embarcações sejam consideradas como objetos passíveis de exercerem impactos sobre estruturas. A abordagem de impulso-momento, que considera o tempo de impacto próximo a zero, está descrita na Equação 4.13. O artigo (Haehnel & Daly, 2002) defende que esta equação é para a força de impacto média, e não a força máxima.

$$F_i = \frac{W * V}{g * \Delta t} \quad (4.13)$$

Onde:

$W$ : peso do objeto (kN)

$V$ : velocidade do objeto (m/s)

$g$ : aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$\Delta t$ : tempo de desaceleração do objeto (s)

O eurocódigo EN 1991-1-1:2006 refere-se às ações acidentais nas estruturas e determina algumas considerações a serem tomadas em caso de impactos ocasionados por veículos ou embarcações em estruturas, geralmente de grande porte. Ela define as forças de impacto frontal, que tem a mesma direção do fluxo de escoamento, e impacto lateral, que é perpendicular e pode ser considerado como fricção. Esta norma define forças correspondentes a navios e veículos, mas essa abordagem é recomendada para estrutura de grande porte, como obras portuárias, pontes e barragens.

O eurocódigo EN 1991-1-7:2006 define a Equação 4.14 para impactos onde a estrutura é considerada indeformável em relação ao objeto.

$$F = v_r \sqrt{km} \quad (4.14)$$

Onde:

$v_r$ : velocidade do objeto, que é igual a velocidade do escoamento (m/s)

$k$ : rigidez elástica equivalente do objeto (N/m)

$m$ : massa do objeto (kg)

O eurocódigo EN 1991-1-7:2006 indica que quando o objeto a colidir é modelado como um objeto de impacto equivalente de seção transversal uniforme, as Equações 4.15 e 4.16 podem ser utilizadas para calcular a rigidez elástica equivalente e a massa do objeto, respetivamente.

$$k = \frac{EA}{L} \quad (4.15)$$

$$m = \rho AL \quad (4.16)$$

Onde:

$E$ : módulo de elasticidade do objeto (Pa)

$A$ : área da secção transversal do objeto (m<sup>2</sup>)

$L$ : comprimento do objeto (m)

$\rho$ : massa volúmica do líquido (kg/m<sup>3</sup>)

$m$ : massa do objeto (kg)

A norma (ASCE/SEI 7-16, 2017) possui uma metodologia muito semelhante à do eurocódigo explicada anteriormente, porém ela incrementa o uso de coeficientes que levam em

consideração o tipo de edificação e sua orientação, definida pelas Equações 4.17 e 4.18. Ela introduz o conceito de força de impacto nominal de dimensionamento ( $F_{ni}$ ) e a força de impacto instantânea de dimensionamento ( $F_i$ ) para o caso de um tronco de árvore ou poste direcionados longitudinalmente em relação à direção do escoamento do líquido. A massa, a rigidez mínima e o coeficiente de orientação recomendados pela norma para o impacto desses elementos são de 454 quilos, 61300 kN/m e 0,65, respetivamente. Esta norma também propõe a Equação 4.19 para o cálculo simplificado da força de impacto ( $F_{isi}$ ), aplicado no nível de inundação máximo.

$$F_{ni} = u_{max} \sqrt{km} \quad (4.17)$$

$$F_i = I_{tsu} C_o F_{ni} \quad (4.18)$$

$$F_{isi} = 1470 I_{tsu} C_o \quad (4.19)$$

Onde:

$u_{max}$ : velocidade máxima de escoamento (m/s)

$k$ : rigidez do elemento (N/m)

$m$ : massa do objeto (kg)

$I_{tsu}$ : fator de importância e risco do edifício

$C_o$ : coeficiente de orientação

A duração do impacto, se for considerado elástico, pode ser calculado a partir da Equação 4.20 (ASCE/SEI 7-16, 2017). Para que a análise elástica seja mais realista, a força de impacto calculada ( $F_i$ ) deve ser multiplicada pelo fator  $R_{max}$  que leva em consideração a razão da

duração do impacto e do período correspondente à frequência fundamental do primeiro modo de vibração da estrutura. Os valores de  $R_{max}$  podem ser extraídos da Tabela 4.2.

$$t = \frac{2mu_{max}}{F_{ni}} \quad (4.20)$$

Onde:

$m$ : massa do objeto (kg)

$u_{max}$ : velocidade máxima do objeto (m/s)

$F_{ni}$  força de impacto nominal de dimensionamento (N)

Tabela 4.2 – Valores de  $R_{max}$

Razão entre duração de impacto e o período correspondente à frequência fundamental da estrutura	$R_{max}$
0	0
0,1	0,4
0,2	0,8
0,3	1,1
0,4	1,4
0,5	1,5
0,6	1,7
0,7	1,8
0,9	1,8
1	1,7
1,1	1,7
1,2	1,6
1,3	1,6
$\geq 1,4$	1,5

A norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017) determina que, nos casos de contentores de navios, não há necessidade da força de impacto nominal de dimensionamento ( $F_{ni}$ ) ser maior que 980 kN e que o coeficiente de orientação  $C_o$  deve ser igual a 0,65. Ela também define valores padrão para contentores de navios apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Massa e rigidez de um contentor (ASCE/SEI 7-16, 2017)

ASCE/SEI 7-16 - Massa e rigidez de um contentor de navio flutuante carregado pela água			
Tipo de objeto	Massa do contentor vazio (kg)	Massa do contentor carregado (kg)	Rigidez do objeto (kN/m)
Contentor de navio padrão de 6,1 metros orientado longitudinalmente	2270	13150	42900
Contentor de navio padrão de 12,2 metros orientado longitudinalmente	3810	17240	29800

A interação das forças de resistência ao movimento do líquido em relação ao objeto gera uma força denominada massa adicionada, que pode ser interpretada como um acréscimo de massa de um objeto pelo líquido presente à sua volta no momento do deslocamento, causada pela mobilização do líquido pelo atrito superficial do objeto. Esse conceito determina que a massa de um elemento contido num escoamento líquido deve ser multiplicada por um fator de majoração, já que o líquido interage com o objeto e devem ser analisados como só um corpo. O artigo (Haehnel & Daly, 2002) aborda o conceito de massa adicionada considerando uma massa virtual, que é a massa do objeto adicionada à massa do líquido, o que resulta na Equação 4.21. O fenômeno de massa adicionada também deve ser levado em consideração para estruturas submersas que sofram um evento sísmico, pois há o deslocamento da estrutura num líquido. A norma (ASCE/SEI 7-16, 2017) não faz referência a esse fenômeno.

$$F = (m + Cm_f)a \quad (4.21)$$

Onde:

$m$ : massa do objeto (kg)

$C$ : coeficiente de massa adicionada

$m_f$ : massa do líquido deslocado (kg)

$a$ : aceleração ( $m/s^2$ )

O valor do coeficiente de massa adicionada varia de acordo com a geometria do objeto, a profundidade do impacto e a orientação do objeto em relação ao elemento estrutural. O artigo (Haehnel & Daly, 2002) estima os valores de C para algumas situações, os quais estão apresentados na Tabela 4.4, e nota-se que elementos, cuja direção de seu eixo está perpendicular ao fluxo de água, sofrem mais com o efeito de massa adicionada.

Tabela 4.4 – Valores do coeficiente de massa adicionada

Caso	C
Tronco de árvore orientado com a direção do fluxo	0
Pequeno troço de madeira orientado com a direção do fluxo	0,22
Tronco de árvore orientado perpendicularmente ao fluxo	1
Troço de madeira orientado perpendicularmente ao fluxo com seção quadrada	2,4
Troço de madeira orientado perpendicularmente ao fluxo com seção retangular	3,5

#### 4.6 FORÇA DE REBENTAÇÃO

Essa força é gerada a partir da dissipação de energia de uma onda ao rebentar num elemento. Ela pode ser ignorada nos cálculos referentes ao tsunami, pois só é importante em casos em que a onda rebenta diretamente no elemento estrutural, como numa contenção marítima ou em pilares de um cais. O tsunami acontece longe da costa marítima, isto é, a onda rebenta no oceano ou em alguns casos não há rebentação. As verificações apresentadas abaixo precisam ser realizadas somente para a análise do elemento estrutural em si, não sendo necessário contabilizar esta força na análise global da estrutura.

##### 4.6.1 FORÇA DE REBENTAÇÃO SOBRE PILAR

A norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017) indica a Equação 4.22 em casos em que a onda rebenta em um pilar isolado:

$$F_{bw} = \frac{1}{2} * \gamma * C_{db} * D * H_b^2 \quad (4.22)$$

Onde:

$\gamma$ : peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>)

$C_{ab}$ : coeficiente referente a forma do pilar

$D$ : diâmetro do pilar ou 1,4 vezes a maior dimensão do pilar (m)

$H_b$ : altura da onda a rebentar (m)

A norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017) recomenda que a altura da onda a rebentar,  $H_b$ , seja 78% da altura do fluxo de água. Os valores recomendados de  $C_{ab}$  são 1,75 e 2,25 para pilares redondos e quadrados, respetivamente.

#### 4.6.2 FORÇA DE REBENTAÇÃO SOBRE PAREDE ESTRUTURAL

A norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017) define as Equações 4.23 e 4.24 para calcular a pressão máxima e a força de rebentação sobre uma parede vertical, respetivamente. O coeficiente de pressão dinâmica varia de acordo com a categoria de risco do edifício, o qual pode ter os valores de 1,6 a 3,5.

$$P_{max} = C_p \gamma d_s + 1,2 \gamma d_s \quad (4.23)$$

$$F_t = 1,1 C_p \gamma d_s^2 + 2,4 \gamma d_s^2 \quad (4.24)$$

Onde:

$P_{max}$ : pressão dinâmica e estática combinada máxima exercida na parede

$C_p$ : coeficiente de pressão dinâmica

$\gamma$ : peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>)

$d_s$ : altura de inundação em relação à base da parede (m)

$F_t$ : força por unidade de comprimento na parede (kN/m)

#### 4.7 FORÇA DE ACUMULAÇÃO RESIDUAL

O tsunami carrega uma diversidade enorme de sedimentos com suas respectivas características e propriedades. A força de acumulação residual corresponde à força que o peso dos sedimentos realiza nos elementos estruturais, em que pode ser atuar verticalmente, nos casos das lajes, ou horizontalmente, em pilares e paredes estruturais. O projetista deve estar atento aos locais de possível acumulação residual dos elementos contidos na água, prever os carregamentos laterais e gravitacionais que podem ser gerados e calcular os resultados com base no peso próprio dos sedimentos e sua área de contato com a estrutura.

#### 4.8 FORÇA DE LEVANTAMENTO

A laje sofre uma força de baixo para cima ao ser inundada pela água devido a força que o líquido faz sobre a estrutura. Para situações em que o nível da água sobe rapidamente, a água exerce uma força em todos os elementos estruturais horizontais (vigas e lajes), que deve ser adicionada a impulsão hidrostática vertical (FEMA P-646, 2019). Os efeitos de levantamento em estruturas que possuem paredes e pilares estruturais, que podem ser obstruções do fluxo da água durante uma inundação, são muito significativos especialmente para elementos imediatamente na frente da obstrução (Robertson & Ge, 2010).

#### 4.9 CARGA DE ÁGUA RESIDUAL NAS LAJES

A norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017) define que todas as lajes abaixo da altura máxima de inundação devem ser dimensionadas para as cargas provenientes da água retida nos andares, que tem forte impacto nas forças gravitacionais do edifício e devem ser adicionadas às cargas permanentes. A pressão da água ( $F_r$ ) exercida na laje é definida pelas Equação 4.25.

$$F_r = \gamma h_r \quad (4.25)$$

Onde:

$\gamma$ : peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>)

$h_r$ : altura da água sob a laje (m)

#### 4.10 CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO DAS NORMAS

As combinações de ações são essenciais para o dimensionamento estrutural, já que as diversas forças calculadas para as situações em estudo não ocorrem todas simultaneamente. Porém, as ações devem ser cuidadosamente analisadas a fim de que a estrutura não seja subdimensionada ou sobredimensionada. A norma (ASCE/SEI 7-16, 2017) recomenda que a força de impacto causada por objetos contidos no fluxo de água não precisa ser contabilizada conjuntamente às outras forças originadas pelo tsunami nas combinações de ações. A seguir serão apresentadas as abordagens de cálculo da norma americana ASCE/SEI 7-16 e a diretriz japonesa de dimensionamento estrutural MLIT 2560.

##### 4.10.1 ASCE/SEI 7-16

A norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017) define que pelo menos três casos de carga sejam verificados em relação à carregamentos provenientes de tsunami:

- 1) A ocorrência simultânea da força hidrodinâmica e a força de impulsão hidrostática vertical deve ser analisada de acordo com o nível de água no interior do edifício.
- 2) Um escoamento em que a velocidade do fluxo de água é considerada máxima e a altura de inundação a ser considerada são dois terços da altura de inundação máxima
- 3) Um escoamento em que a altura de inundação é considerada máxima e a velocidade a ser considerada é um terço da velocidade máxima.

Esta norma define duas combinações de ações para eventos de tsunami, que estão apresentadas nas Equações 4.26 e 4.27.

$$1,2D + T + 0,5L + 0,2S + H \quad (4.26)$$

$$0,9D + T + H \quad (4.27)$$

Onde:

D: peso próprio + restante de cargas permanentes

L: sobrecarga de utilização

W: vento

T: tsunami

S: neve

H: força induzida pelo tsunami lateralmente na fundação

#### 4.10.2 MLIT

O artigo (Fukuyama et al., 2013) contém as diretrizes e atualizações adotadas pelo Japão na área de dimensionamento estrutural para edifícios de evacuação após o sismo de 2011, quando ocorreu o acidente nuclear de Fukushima. O estudo relata os procedimentos a serem levados em consideração:

- Calcular a pressão exercida pela onda do tsunami
- Calcular a força da onda do tsunami
- Calcular a força hidrostática vertical em relação a superestrutura e fundação
- Calcular a força de corte aplicada para cada pavimento
- Considerar as forças de impacto e a cavidade de erosão próximo à fundação
- Dimensionar a estrutura e fundação

A pressão ( $q_z$ ) e a força lateral ( $F_z$ ) produzidas por uma onda de tsunami são calculadas pela norma japonesa a partir das Equações 4.28 e 4.29, que leva em consideração uma carga

hidrostática horizontal equivalente, em que a altura de inundação é multiplicada por um fator ( $a$ ). Esse valor corresponde a 3 para situações onde a estrutura não está protegida por uma barreira de contenção de ondas e em que não há impacto de um objeto na estrutura. A Figura 4.6 contém um modelo representativo da força hidrostática equivalente atuante num edifício.

$$q_z = \rho g (ah - z) \quad (4.28)$$

$$F_z = \int_{z_1}^{z_2} \rho g B (ah - z) dz \quad (4.29)$$

Onde:

$\rho$ : massa volúmica do líquido (kg/m<sup>3</sup>)

$g$ : aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$a$ : coeficiente de majoração da altura de inundação

$h$ : altura de inundação (m)

$z$ : distância do ponto de atuação da carga do chão (m)

$B$ : largura da edificação (m)

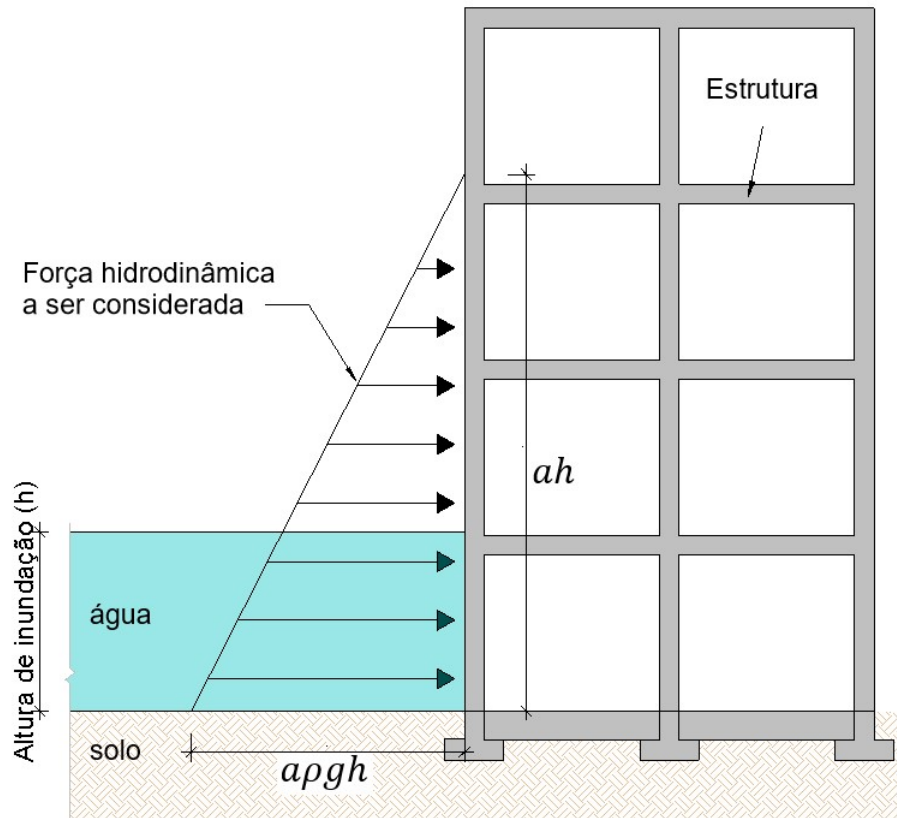


Figura 4.6 – Força hidrostática equivalente por MLIT 2570

O artigo (Macabuag et al., 2018) faz uma comparação entre as forças laterais produzidas por um tsunami em relação às normas americana, japonesa MLIT 2570 e o artigo de (Foster et al., 2017). Ele conclui que a força lateral distribuída calculada através da norma japonesa para situações onde não há contenção de ondas são maiores que as outras forças consideradas no estudo, como pode ser observado na Figura 4.7. Ela é um gráfico adaptado do artigo (Macabuag et al., 2018) e contém as forças laterais distribuídas em função da altura de inundação para os seguintes casos previstos:

- Norma japonesa MLIT 2570 para casos onde não há barreira de contenção ( $a=3$ )
- Normas americanas FEMA 646 e ASCE 7-16 para força impulsiva e hidrodinâmica
- Dois estudos de caso do artigo (Foster et al., 2017)

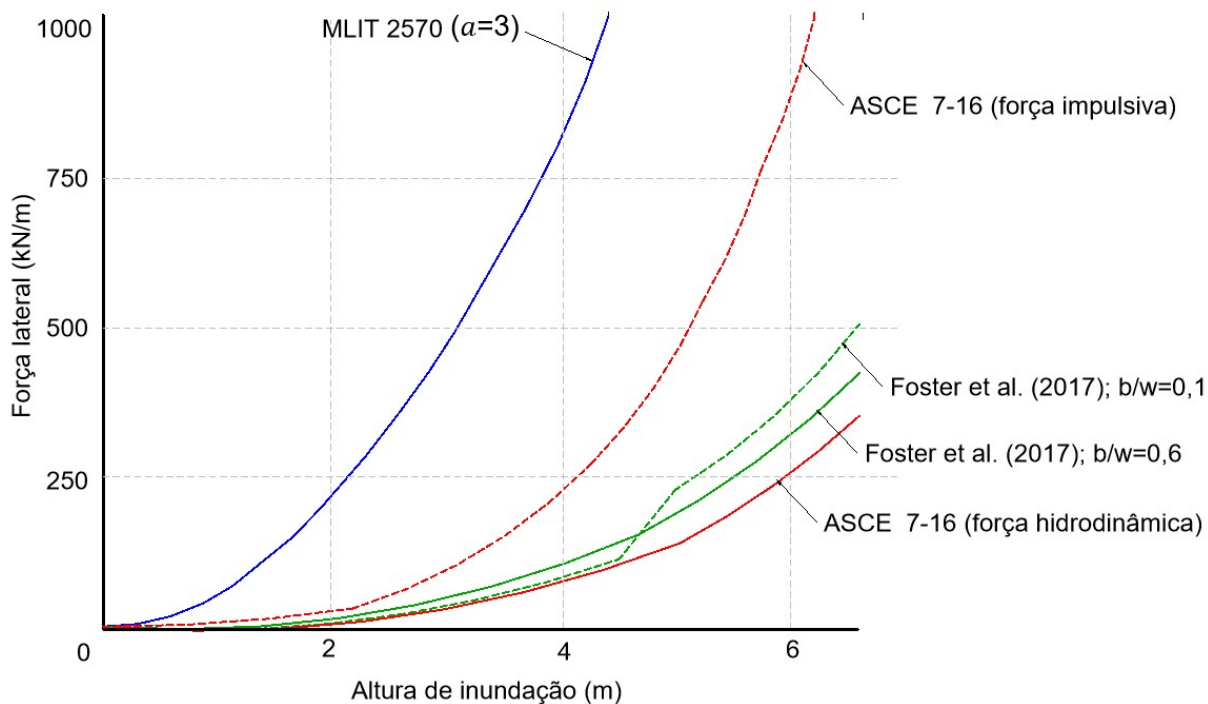


Figura 4.7 – Gráfico comparativo de forças laterais (adaptado de Macabuag et al., 2018)

## **5 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL PARA SISMO E TSUNAMI**

A escolha dos materiais empregados levou em consideração um edifício na zona costeira, próximo ao mar, caracterizado por uma classe de exposição XS1, definido na Tabela 5.1, pelo Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010). A cidade de Lagos foi escolhida pelo facto de estar localizada num ponto crítico em termos sísmicos, perto de falhas tectónicas e limites de placa, e possui um histórico de ocorrência de tsunamis. O sismo e o tsunami a serem considerados na análise e no dimensionamento estrutural pretendem reproduzir um cenário similar ao ocorrido em 1755.

Tabela 5.1 – Classe de exposição e seus ambientes (NP EN 1992-1-1, 2010)

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que poderão ocorrer as classes de exposição
<b>1 Nenhum risco de corrosão ou ataque</b>		
X0	Para betão sem armadura ou elementos metálicos embebidos: todas as exposições excepto em situação de gelo/degelo, abrasão ou ataque químico Para betão com armadura ou elementos metálicos embebidos: muito seco	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente muito baixa
<b>2 Corrosão induzida por carbonatação</b>		
XC1	Seco ou permanentemente húmido	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente baixa Betão permanentemente submerso em água
XC2	Húmido, raramente seco	Superfícies de betão sujeitas a contacto prolongado com água Um grande número de fundações
XC3	Humidade moderada	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente moderada ou elevada Betão exterior protegido da chuva
XC4	Alternadamente húmido e seco	Superfícies de betão sujeitas a contacto com água, não incluídas na classe de exposição XC2
<b>3 Corrosão induzida por cloretos</b>		
XD1	Humidade moderada	Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar
XD2	Húmido, raramente seco	Piscinas Elementos de betão expostos a águas industriais contendo cloretos
XD3	Alternadamente húmido e seco	Elementos de pontes expostos a pulverizações contendo cloretos Pavimentos Lajes de parques de estacionamento
<b>4 Corrosão induzida por cloretos presentes na água do mar</b>		
XS1	Exposto ao sal transportado pelo ar mas não em contacto directo com a água do mar	Estruturas próximas da costa ou na costa
XS2	Permanentemente submerso	Elementos de estruturas marítimas
XS3	Zonas sujeitas aos efeitos das marés, da rebentação e da neblina marítima	Elementos de estruturas marítimas
<b>5 Ataque gelo/degelo</b>		
XF1	Saturação moderada em água, sem produto descongelante	Superfícies verticais de betão expostas à chuva e ao gelo
XF2	Saturação moderada em água, com produto descongelante	Superfícies verticais de betão de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelantes transportados pelo ar
XF3	Saturação elevada em água, sem produtos descongelantes	Superfícies horizontais de betão expostas à chuva e ao gelo
XF4	Saturação elevada em água, com produtos descongelantes ou com água do mar	Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelantes Superfícies de betão expostas a pulverizações directas contendo produtos descongelantes e expostas ao gelo Zonas sujeitas aos efeitos da rebentação de estruturas marítimas expostas ao gelo
<b>6 Ataque químico</b>		
XA1	Ambiente químico ligeiramente agressivo, de acordo com a EN 206-1, ver o Quadro 2	Terrenos naturais e água do terreno
XA2	Ambiente químico moderadamente agressivo, de acordo com a EN 206-1, ver o Quadro 2	Terrenos naturais e água do terreno
XA3	Ambiente químico altamente agressivo, de acordo com a EN 206-1, ver o Quadro 2	Terrenos naturais e água do terreno

A escolha de um edifício com o piso térreo vazado e os demais pavimentos compostos com alvenaria de fechamento deve-se ao facto de ser importante estudar os mecanismos de dissipação de energia e capacidade de deformação quando os pilares da base não estão restringidos por alvenaria enquanto os demais andares contém alvenaria entre os pilares e vigas. Esse tipo de estrutura é muito encontrada atualmente nas cidades, em que os rés-de-chão são destinados a centros comerciais ou lojas e os demais andares são residenciais.

## **5.1 CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO**

Algumas informações importantes para o dimensionamento do edifício serão apresentadas a seguir:

- Estrutura em betão armado de 3 pavimentos
- Prédio residencial
- Classe estrutural S4
- Classe de exposição XS1
- Estrutura com regularidade em planta e em altura (NP EN 1998-1, 2010)
- Não há alvenaria no piso térreo, somente nos pavimentos 1 e 2
- Tipo de terreno C (NP EN 1998-1, 2010)
- Localizado em Lagos, Portugal
- Altura da laje é 15 centímetros
- Peso próprio do revestimento e acabamento é 5 kN/m<sup>2</sup>
- Peso próprio do betão é 25 kN/m<sup>2</sup>
- Distância entre pórticos é de 6 metros
- Amortecimento viscoso de 5%
- Massa concentrada com um grau de liberdade (horizontal) para cada pavimento
- Betão C30/37
- Armadura A500 (Classe B)

A estrutura a qual o pórtico pertence está representada na Figura 5.1, onde o pórtico a ser analisado por este estudo encontra-se destacado na cor vermelha (as vigas de fundação não foram representadas). Para o levantamento das cargas atuantes no pórtico a ser analisado foi considerado uma área de influência demonstrada na Figura 5.2, considerando a formação de linhas de rotura nas lajes.

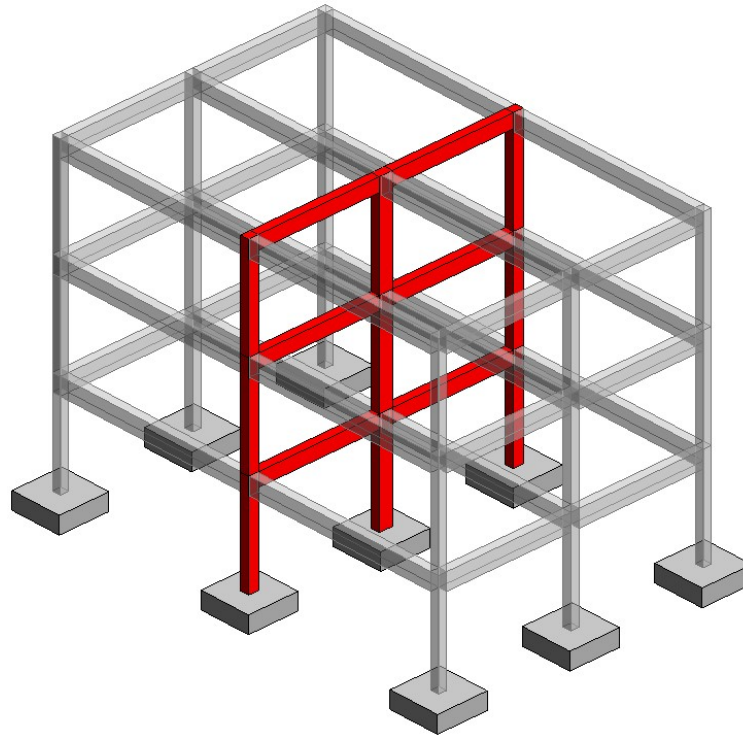


Figura 5.1- Modelo esquemático da estrutura e pórtico em destaque

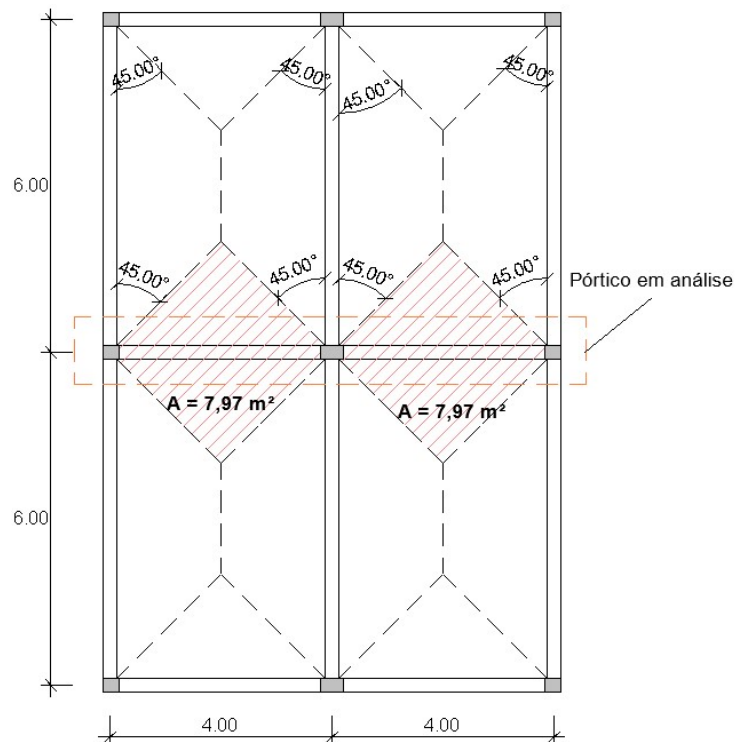


Figura 5.2 – Área de influência para carregamentos atuantes no pórtico

### **5.1.1 TSUNAMI**

O artigo (Omira et al., 2011) explicita uma modelação computacional do tsunami ocorrido em 1755. A simulação é feita com base numa distribuição uniforme de fricção na superfície e não é possível a modelação de todos os obstáculos e empreendimentos conforme a realidade, o que pode gerar resultados superestimados de velocidade de fluxo de água. Por outro lado, essas construções podem canalizar o fluxo e aumentar a velocidade localmente. Apesar dessas ressalvas, a modelação computacional é um modelo válido para estudar o comportamento de hidrodinâmico (Omira et al., 2011). Os resultados da modelação computacional sugerem que um sismo com magnitude entre 8,1 e 8,3 (Mw) com epicentro localizado no Golfo de Cádiz resulta em tsunamis na região do Algarve, que causam uma inundação na cidade de Lagos até 500 metros de distância da costa, com uma profundidade máxima de seis metros. Alvor sofreu uma profundidade de inundação máxima de 7,3 metros com distância máxima de inundação até 860 metros. Em Portimão, a altura da água chegou a oito metros com 100 metros de distância de inundação. O estudo concluiu que na ocorrência deste tsunami, a velocidade de fluxo de água na região de Lagos e Portimão é de três a oito metros por segundo (Omira et al., 2011).

O artigo (Bosnic et al., 2021) realiza duas simulações computacionais sobre o tsunami ocorrido em 1755. A simulação inversa consiste em estimar a velocidade de escoamento de um tsunami baseado na velocidade de fricção requerida para suspender a quantidade de sedimento observado dentro de um depósito de sedimentos oriundos do tsunami. A outra simulação é caracterizada pela solução das equações diferenciais que definem o comportamento dinâmico de um fluido sob escoamento. Para a primeiro tipo de simulação estima uma velocidade média entre 6,62 e 7,70 metros por segundo e a segunda simulação estipula que a velocidade seja de entre 6,15 e 7,87 metros por segundo para um sismo gerado na falha de Marquês de Pombal (velocidades menores foram obtidas para outros cenários do estudo).

O capítulo 5 do livro Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve (Tedim & Gonçalves, 2010) cita algumas referências de documentos históricos que relatam a morte de centenas de pessoas em várias cidades algarvias, assim como vastas situações de destruição. A partir das análises realizadas, o trabalho permite supor uma altura máxima entre dez a quinze metros de altura. Porém, é importante ressaltar que os fortes de Beliche, Baleeira e Arrifana estão a mais de trinta metros de altura e foram atingidos pelo tsunami, embora as fortalezas mais danificadas encontravam-se a alturas inferiores a quinze metros, como por exemplo a do Zavial, Burgau e Cacela (Tedim & Gonçalves, 2010). Ele também contém uma simulação da

área de inundação e conclui que as características morfológicas dos locais influenciam muito na extensão da inundação. A simulação da área de inundação apontou valores próximos aos contidos em descrições históricas, que relatam distâncias de inundação entre 400 e 800 metros de distância em relação à costa. A Tabela 5.2 foi feita com base nas informações disponíveis no capítulo 6 deste livro (Baptista et al., 2010).

Tabela 5.2 – *Run-up* e distância de inundação máxima adaptado de (Baptista et al., 2010)

Parâmetros do tsunami de 1755 ao longo da costa do Algarve		
Cidade	<i>Run-up</i> máximo (m)	Distância de inundação máxima (m)
Cabo de São Vicente	30	-
Sagres	10 - 30	-
Boca do Rio	11 - 13	2500
Lagos	8 - 11	700 - 900
Portimão	2,5	800 - 4000
Faro - Ilhas Barreira	10	-
Boliqueime	8	2000 - 2500

O artigo (Baptista & Miranda, 2009) é uma revisão do catálogo de tsunamis que ocorreram em Portugal. Ele explicita relatos condizentes ao tsunami de 1755, que relatam ondas de dez a quinze metros no Cabo de São Vicente, em Sagres, e ao longo do Golfo de Cádiz. Há evidências que a inundação chegou a uma distância de 250 metros de comprimento em Lisboa, sendo possível observar edificações totalmente inundadas pela água. O estudo apresenta relatos de que a água do mar entrou na cidade de Lagos com mais de quatorze metros de altura.

A base de dados (NOAA, 2023) é fornecida pela Administração Nacional Oceânica e Atmosférica, ligada ao governo estadunidense. Ela possui diversas informações sobre os tsunamis registados que ocorreram na história. As alturas de onda e distâncias de inundação máximas registadas no evento de 1755 em Portugal e em Cádiz estão na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Alturas de onda e distância de inundação máximas (NOAA, 2023)

Base de dados (NOAA)		
Local	Altura máxima da água (m)	Distância máxima de inundação (m)
Oeiras (Lisboa)	15,2	805
Alvor	9,1	-
Costa norte da Madeira	15,2	-
Lagos	11	900
Cabo de São Vicente	9,1	-
Cádiz	18,3	-
Ilha Terceira (Açores)	14,6	300

As análises estruturais para as cargas provenientes de um tsunami serão realizadas pelo método *pushover*, através do método de controlo de força.

### 5.1.2 SISMO

O levantamento das ações sísmicas e o dimensionamento estrutural serão realizados de acordo com a norma NP EN 1998-1:2010. Ele define dois tipos de sismo: um afastado, do tipo 1, e o outro próximo, do tipo 2. Para cada um deles, deve-se garantir que dimensionamento sísmico de uma estrutura seja realizado com base no período de retorno daquele evento, isto é, o tempo entre dois sismos consecutivos de magnitude semelhante. Para o cálculo de dimensionamento da estrutura em relação ao tsunami, somente o sismo tipo 1 deve ser considerado, já que o sismo tipo 2 ocorre próximo à costa e não produz ondas significativas. O período de retorno é determinado de acordo com a classe de importância do edifício, sendo eles 243, 475, 821 e 1303 anos para as classes de importância I, II, III e IV, respetivamente. A determinação da classe de importância é realizada de acordo com a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Classes de importância de edificações (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.

Os coeficientes referentes às classes de importância utilizados para o dimensionamento estrutural sísmico são determinados pelo anexo nacional da norma NP EN 1998-1:2010 e estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Coeficientes de importância (Anexo Nacional NP EN 1998-1:2010)

Classe de Importância	Acção sísmica Tipo 1	Acção 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

A norma NP EN 1998-1:2010 classifica os tipos de terreno de acordo com as propriedades do solo, a fim de que os valores dos espectros de resposta estejam mais próximos a realidade. Os tipos de solo e os seus respetivos parâmetros estão apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Valores referentes ao sismo tipo 1 (Anexo Nacional NP EN 1998-1:2010)

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

O sistema estrutural em estudo tem três graus de liberdade e sua análise modal foi realizada no Robot Structural Analysis (Autodesk, 2022). As Figuras 5.3 a 5.6 apresentam as configurações modais da estrutura e os valores apresentados são os deslocamentos em centímetros. As frequências e períodos dos modos 1, 2 e 3 estão apresentados na Tabela 5.7.

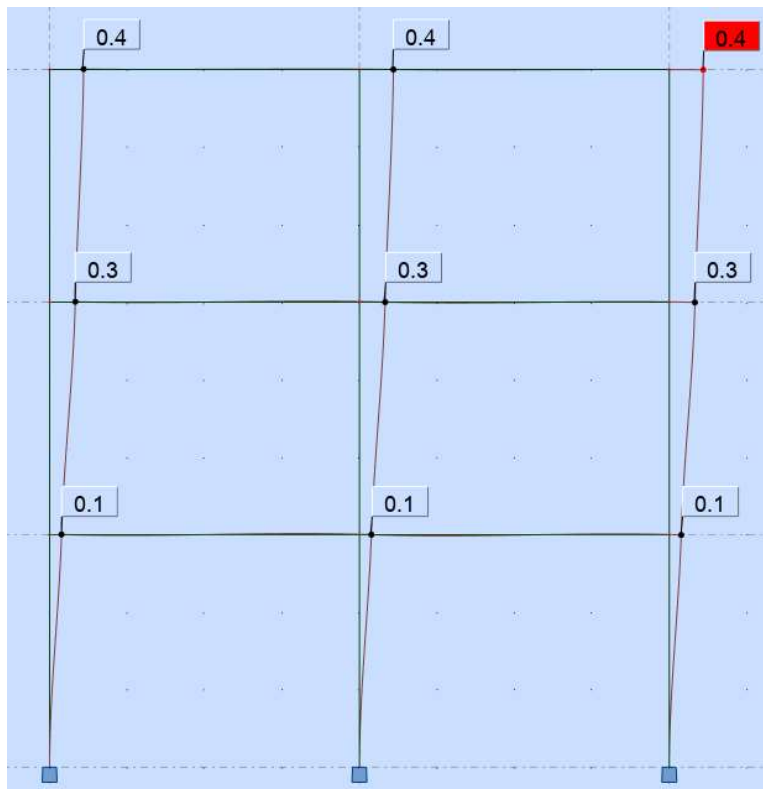


Figura 5.3 – Configuração modal (modo 1)

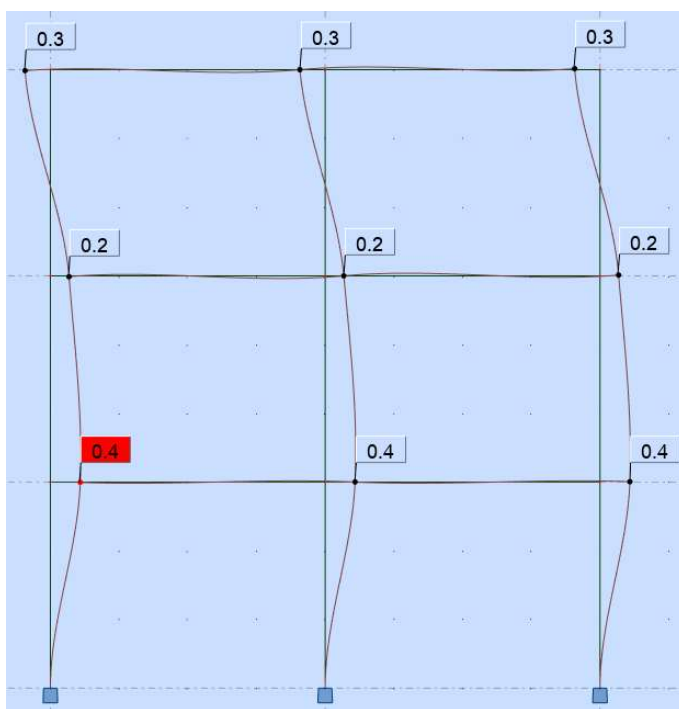


Figura 5.4 – Configuração modal (modo 2)

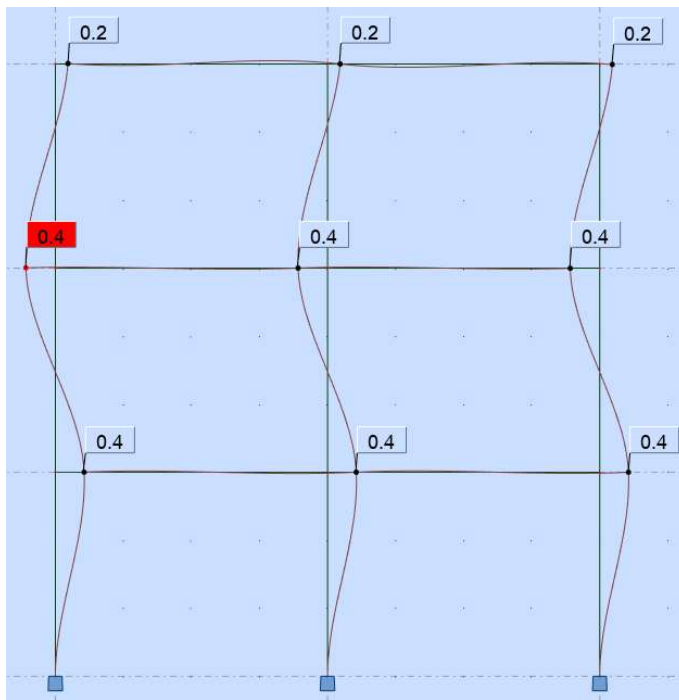


Figura 5.5 – Configuração modal (modo 3)

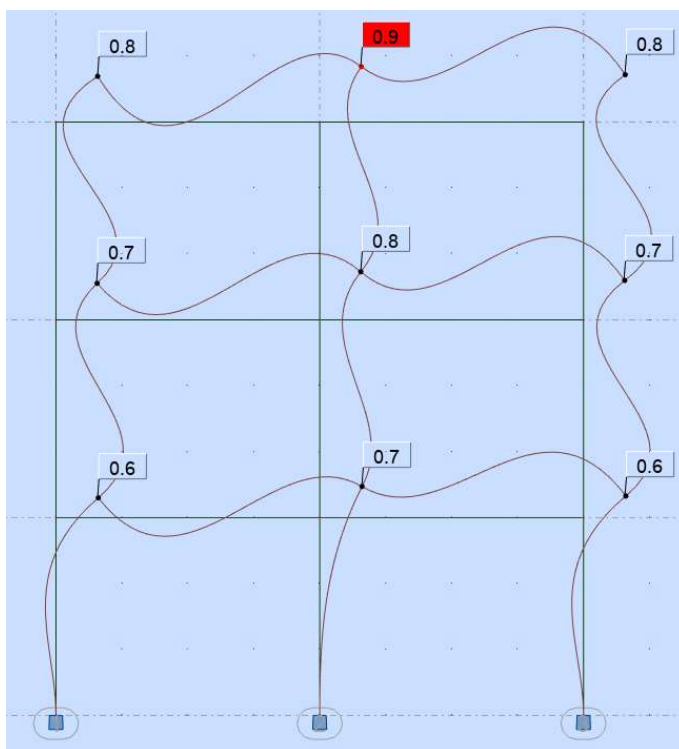


Figura 5.6 – Configuração quadrática modal (CQC)

Tabela 5.7 – Frequência e período das configurações modais

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	1,65	0,61
2	5,13	0,19
3	8,49	0,12

O gráfico do espectro de resposta, esquematizado na Figura 5.8, e o valor de cálculo da aceleração ( $a_g$ ) são definidos pela norma NP EN 1998-1:2010 a partir da Equação 5.1, em que  $\gamma_I$  é definido de acordo com a Tabela 5.5 e o valor de  $S$  é atribuído de acordo com as equações 5.2 a 5.4.

$$a_g = \gamma_I a_{gR} \quad (5.1)$$

$$(5.2)$$

$$S = \begin{cases} S_{max}; \text{para } a_g \leq 1 \\ S_{max} - \left(\frac{S_{max} - 1}{3}\right)(a_g - 1); \text{para } 1 < a_g < 4 \\ 1; \text{para } a_g \geq 4 \end{cases} \quad (5.3)$$

$$(5.4)$$

Onde:

$\gamma_I$ : coeficiente de importância da edificação

$a_{gR}$ : aceleração máxima de referência

$S_{max}$ : parâmetro cujo valor está indicado nas Tabelas 5.9 e 5.10

Os valores de aceleração máxima de referência ( $a_{gR}$ ) estão definidas na Tabela 5.8 de acordo com a zona sísmica em Portugal Continental demonstrada na Figura 5.7.

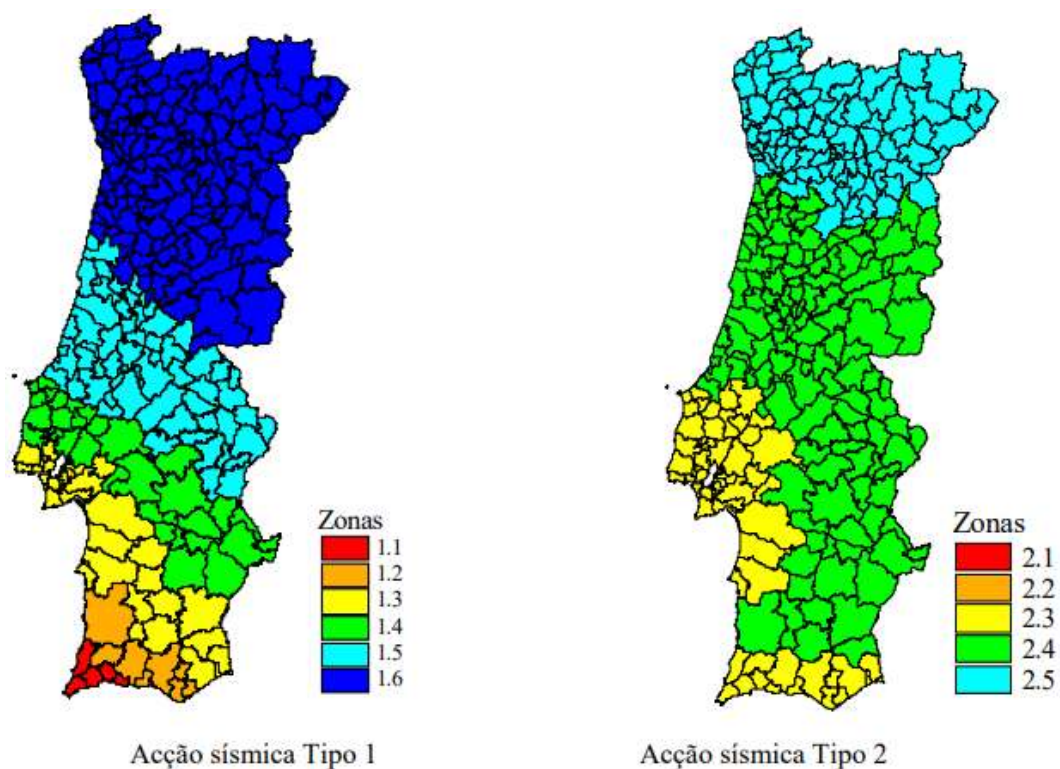


Figura 5.7 - Zonas sísmicas em Portugal Continental (Anexo Nacional NP EN 1998-1:2010)

Tabela 5.8 – Valores de  $a_{gR}$  para cada zona sísmica em Portugal Continental (NP EN 1998-1, 2010)

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

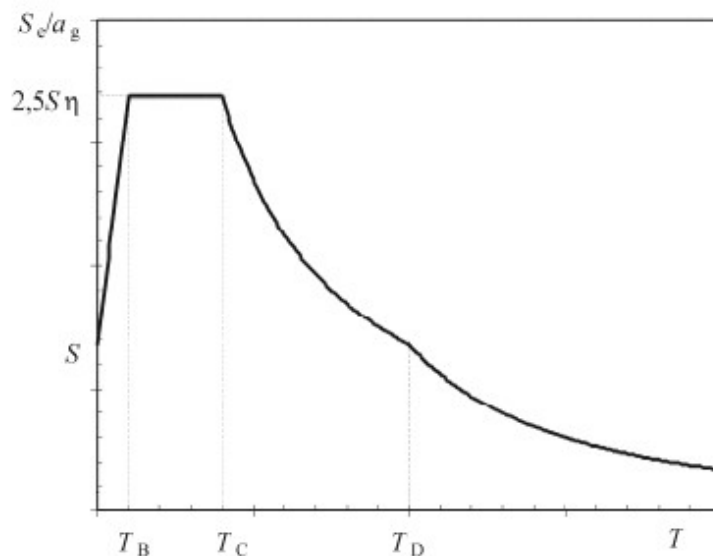


Figura 5.8 - Forma do espectro de resposta elástica (NP EN 1998-1, 2010)

A norma NP EN 1998-1:2010 estabelece as Equações 5.5 a 5.8 para o espectro de resposta elástica horizontal e as Equações 5.9 a 5.12 para o espectro de resposta de dimensionamento, o qual será usado no método de forças equivalentes para representar uma ação sísmica antes do tsunami.

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g S \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (2,5\eta - 1) \right]; & \text{para } 0 \leq T \leq T_B & (5.5) \\ 2,5\eta a_g S; & \text{para } T_B \leq T \leq T_C & (5.6) \\ 2,5\eta a_g S \left[ \frac{T_C}{T} \right]; & \text{para } T_C \leq T \leq T_D & (5.7) \\ 2,5\eta a_g S \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right]; & \text{para } T_D \leq T \leq 4s & (5.8) \end{cases}$$

$$S_d(T) = \begin{cases} a_g S \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left( \frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]; & \text{para } 0 \leq T \leq T_B & (5.9) \\ a_g S \frac{2,5}{q}; & \text{para } T_B \leq T \leq T_C & (5.10) \\ a_g S \frac{2,5}{q} \left[ \frac{T_C}{T} \right] \geq \beta a_g; & \text{para } T_C \leq T \leq T_D & (5.11) \\ a_g S \frac{2,5}{q} \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right] \geq \beta a_g; & \text{para } T_D \leq T \leq 4s & (5.12) \end{cases}$$

Onde:

$S_e(T)$ : espectro de resposta elástica

$S_d(T)$ : espectro de resposta de dimensionamento

$T$ : período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade

$\eta$ : coeficiente de correção do amortecimento ( $\eta=1$  para 5% de amortecimento viscoso)

$S$ : coeficiente de solo

$a_g$ : valor de cálculo da aceleração à superfície do terreno

$T_B$ ,  $T_C$  e  $T_D$ : limites de períodos no patamar de aceleração espectral constante

$q$ : coeficiente de comportamento

Os períodos  $T_B$ ,  $T_C$  e  $T_D$  e o espectro  $S_{max}$  são determinados pelo anexo nacional português do Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2010). Os valores definidos estão apresentados nas Tabelas 5.9 e 5.10 para os sismos tipo 1 e 2, respetivamente.

Tabela 5.9 – Valores referentes ao sismo tipo 1 (*Anexo Nacional da NP EN 1998-1:2010*)

Tipo de terreno	$S_{max}$	$T_B$ (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 5.10 – Valores referentes ao sismo tipo 2 (Anexo Nacional da NP EN 1998-1:2010)

Tipo de terreno	$S_{\max}$	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
A	1,0	0,1	0,25	2,0
B	1,35	0,1	0,25	2,0
C	1,6	0,1	0,25	2,0
D	2,0	0,1	0,3	2,0
E	1,8	0,1	0,25	2,0

A norma NP EN 1998-1:2010 define as Equações 5.13 a 5.16 para o cálculo do espectro de resposta elástico vertical. Porém, é importante destacar que esta norma define que as componentes verticais sísmicas só devem ser levadas em consideração nos seguintes casos: elementos estruturais horizontais ou quase horizontais com vãos iguais ou superiores a vinte metros ou consola com mais de cinco metros de comprimento, elementos pré-esforçados, vigas que suportam pilares e estruturas com isolamento de base. Como a estrutura em estudo não se enquadra a nenhum dos casos anteriores, as componentes verticais sísmicas e seus respetivos graus de liberdade associados não serão contabilizados. As acelerações verticais à superfície do terreno e os valores de  $T_B$ ,  $T_C$  e  $T_D$  usados para o cálculo do espectro de resposta vertical estão na Tabela 5.11.

$$S_{ve}(T) = \begin{cases} a_{vg} \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (3\eta - 1) \right]; & \text{para } 0 \leq T \leq T_B & (5.13) \\ 3\eta a_{vg}; & \text{para } T_B \leq T \leq T_C & (5.14) \\ 3\eta a_{vg} \left[ \frac{T_C}{T} \right]; & \text{para } T_C \leq T \leq T_D & (5.15) \\ 3\eta a_{vg} \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right]; & \text{para } T_D \leq T \leq 4s & (5.16) \end{cases}$$

Onde:

$S_{ve}(T)$ : espectro de resposta elástica vertical

$T$ : período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade

$\eta$ : coeficiente de correção do amortecimento ( $\eta=1$  para 5% de amortecimento viscoso)

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

$T_B$ ,  $T_C$  e  $T_D$ : limites de períodos no patamar de aceleração espectral constante

Tabela 5.11 – Valores referentes ao sismo vertical (Anexo Nacional NP EN 1998-1:2010)

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

O Eurocódigo 8 define o coeficiente de comportamento ( $q$ ) de uma estrutura, o qual representa uma aproximação da razão entre as forças sísmicas a que a estrutura ficaria sujeita se sua resposta fosse completamente elástica, com 5% de amortecimento viscoso, e as forças sísmicas que poderão ser adotadas no projeto, com um modelo de análise estrutural de resposta elástica (NP EN 1998-1, 2010). Ele pode ser calculado a partir da Equação 5.17 com auxílio da Tabela 5.12 para sistemas regulares em altura, como define o Eurocódigo 8. O valor de  $\alpha_U/\alpha_1$  é igual a 1,3 para sistemas porticados ou porticados mistos equivalentes a pórticos, considerando um edifício de vários andares com mais de um tramo. O coeficiente  $k_w$  é igual a 1 para o tipo de sistema em estudo.

$$q = q_o k_w \geq 1,5 \quad (5.17)$$

Onde:

$q$ : coeficiente de comportamento

$q_o$ : coeficiente de comportamento básico

$k_w$ : coeficiente que reflete o modo de rotura predominante nos sistemas estruturais de paredes

Tabela 5.12 – Valor básico do coeficiente de comportamento  $q_o$  (NP EN 1998-1, 2010)

Tipo estrutural	DCM	DCH
Sistema porticado, sistema misto, sistema de paredes acopladas	$3,0\alpha_v/\alpha_1$	$4,5\alpha_v/\alpha_1$
Sistema de paredes não acopladas	3,0	$4,0\alpha_v/\alpha_1$
Sistema torsionalmente flexível	2,0	3,0
Sistema de pêndulo invertido	1,5	2,0

O coeficiente de comportamento da estrutura é igual a 3,9. A estrutura resultante do dimensionamento sísmico realizado no Robot Structural Analysis (Autodesk, 2022) está apresentada na Figura 5.9 e suas secções transversais, que serão usadas como *input* no SeismoStruct (SeismoSoft, 2022) para análise não-linear, estão apresentadas nas Tabelas 6.1 e 6.2.

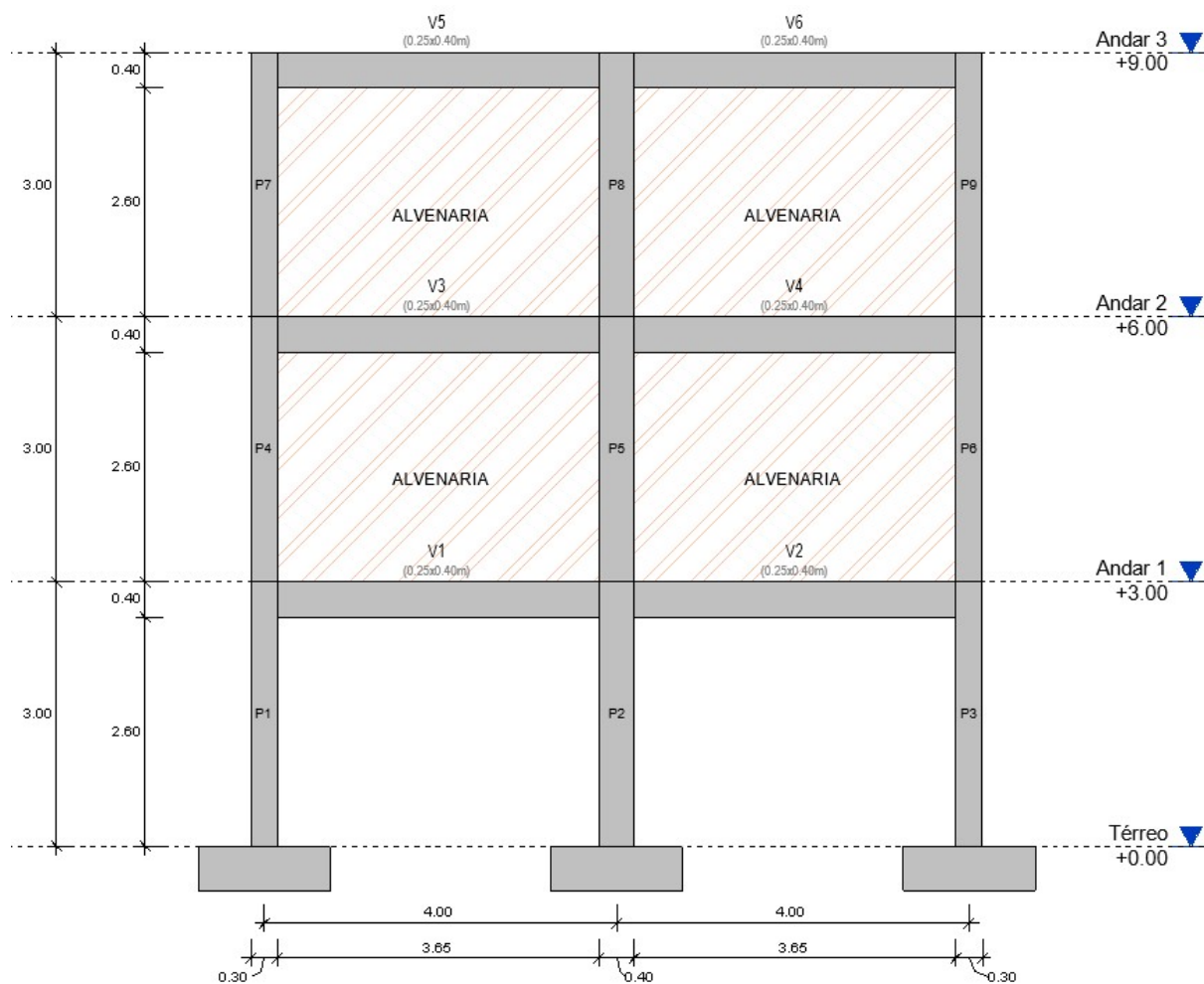


Figura 5.9 – Pórtico modelado no Revit e suas dimensões

O software SeismoStruct não permite uma análise sísmica com base no espectro de resposta seguida de *pushover*, então as forças sísmicas foram aplicadas como cargas estáticas horizontais equivalentes em cada pavimento previamente à análise *pushover*.

Esse método compreende em atribuir à ação sísmica valores de forças horizontais nas alturas de cada pavimento da estrutura. Para efeitos práticos no SeismoStruct, ele serve para adicionar um deslocamento antes da ação dinâmica do líquido em contato com a estrutura. A força de corte na base ( $F_b$ ) é definida pela Equação 5.18 e o fator de correção ( $\lambda$ ) contida nela é igual a 0,85.

O período do modo 1 da estrutura está de acordo com a condição estipulado pela norma para validar este método, que indica que o valor do período do modo 1 ( $T_1$ ) seja menor que quatro vezes o  $T_c$  e dois segundos.

$$F_b = S_d(T_1)m\lambda \quad (5.18)$$

Onde:

$S_d(T_1)$ : ordenada do espectro de cálculo para o período  $T_1$

$m$ : massa total do edifício acima da fundação

$\lambda$ : fator de correção

A força atuante em cada pavimento é calculada de acordo com a altura e a massa de cada pavimento pela Equação 5.19.

$$F_i = F_b \frac{m_i z_i}{\sum m z} \quad (5.19)$$

Onde:

$F_b$ : força de corte na base (kN)

$m_i$ : massa do pavimento  $i$  (ton)

$z_i$ : altura do pavimento  $i$  em relação ao solo (m)

$m$ : massa total do edifício acima da fundação (ton)

$z$ : altura total do edifício (m)

## 5.2 RESULTADOS DAS FORÇAS ATUANTES E COMBINAÇÕES DE CARGA

As forças resultantes das respectivas situações de projeto determinadas para a ação de um tsunami levam em consideração as cargas permanentes, força de impulsão vertical, força hidrodinâmica, de impacto e sísmica. Os valores calculados com base nas equações

apresentadas do Capítulo 4 para essas cargas atuantes na estrutura estão apresentados a seguir.

### 5.2.1 CARGAS PERMANENTES E SOBRECARGA

As cargas permanentes e de sobrecarga atuantes nas vigas do pórtico foram calculadas de acordo com a Tabela 5.13, porém somente as cargas permanentes foram contabilizadas na análise *pushover* realizada no SeismoStruct com a finalidade de analisar a capacidade de deformação da estrutura. A sobrecarga somente foi considerada no cálculo das armaduras no Robot Structural Analysis.

Tabela 5.13 – Cargas permanentes e sobrecarga

	Carga Permanente	Sobrecarga
Carga por área (kN/m <sup>2</sup> )	5,00	3,00
Area de influência (m <sup>2</sup> )	7,97	7,97
Comprimento da viga (m)	4,00	4,00
Força distribuída (kN/m)	9,96	5,98

### 5.2.2 CARGAS HIDRODINÂMICA E IMPULSIVA

Os casos 2 e 3 são definidos pela norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017) e foram explicados no capítulo anterior. De acordo com as equações apresentadas no Capítulo 4, podem calcular-se as forças hidrodinâmica e impulsiva atuantes no pórtico em estudo. O caso máximo considera a velocidade do escoamento e altura de inundação máximas.

- Para tsunami com três metros de altura

As propriedades a serem consideradas para o cálculo e os resultados estão apresentados nas Tabelas 5.14 e 5.15.

Tabela 5.14 – Propriedades para o tsunami de três metros

Velocidade máxima (m/s)	10
Altura de inundação (m)	3
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	1127,5
Largura do edifício (m)	12
Área de pilares (m <sup>2</sup> )	2,25
Área de vigas (m <sup>2</sup> )	5,75
Área de paredes (m <sup>2</sup> )	0
$C_{cx}$	0,302
$C_d$	1,25
$I_{tsu}$	1

Tabela 5.15 – Força hidrodinâmica e impulsiva de um tsunami de três metros

Propriedades	Caso 2	Caso 3	Caso Máximo
Altura da água (m)	2,00	3,00	3,00
Velocidade da água(m/s)	10,00	3,33	10,00
$F_{dx}$ atuante no edifício (kN)	510,90	85,15	766,35
$F_{dx}$ resultante do pórtico (kN)	255,45	42,57	383,17
Força impulsiva no pórtico (kN)	383,17	63,86	574,76

- Para tsunami com nove metros de altura

As propriedades a serem consideradas para o cálculo e os resultados estão apresentados nas Tabelas 5.16 e 5.17, respetivamente.

Tabela 5.16 – Propriedades para tsunami de nove metros

Velocidade máxima (m/s)	10
Altura de inundação (m)	9
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	1127,5
Largura do edifício (m)	12
Área de pilares (m <sup>2</sup> )	6,75
Área de vigas (m <sup>2</sup> )	17,25
Área de paredes (m <sup>2</sup> )	0
$C_{cx}$	0,3020833
$C_d$	1,25
$I_{tsu}$	1

Tabela 5.17 – Força hidrodinâmica e impulsiva de um tsunami de nove metros

Propriedades	Caso 2	Caso 3	Caso Máximo
Altura da água (m)	2,33	9,00	9,00
Velocidade da água (m/s)	10,00	3,33	10,00
Fdx atuante no edifício (kN)	595,96	255,45	2299,04
Fdx resultante do pórtico (kN)	297,98	127,72	1149,52
Força impulsiva no pórtico (kN)	446,97	191,59	1724,28

### 5.2.3 CARGAS DE IMPACTO

A força de impacto é igual para os tsunamis de três e nove metros, já que este valor não depende da altura de inundação. As forças de impacto consideram as recomendações da norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017) e os resultados estão apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Força de impacto de um contentor

	Contentor vazio com 6,1 metros	Contentor vazio com 12,2 metros
Velocidade máxima (m/s)	10	
Rigidez (N/m)	42900000	29800000
Massa (kg)	2270	3810
$F_{ni}$ (kN)	3120,62	3369,54
$F_{ni}$ máximo (kN)	980	
$C_o$	0,65	
$I_{tsu}$	1	1
$F_i$ (kN)	637	637
Força simplificada $F_{i,si}$ (kN)	955,50	

### 5.2.4 IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL

Esta força só foi considerada no caso em que a altura da onda é de nove metros, já que o edifício é vazado no rés de chão. A tipologia do edifício garante que para um tsunami de três metros, a água conseguirá passar através dele sem grandes problemas e não haverá espaço vazio neste andar, isto é, o volume de líquido deslocado é nulo. Com isso, pode concluir-se que a força de impulsão hidrostática vertical para o tipo de edifício em estudo a sofrer uma inundação de três metros proveniente de um tsunami será próxima de zero.

A estrutura possui janelas com vãos de um metro de altura e três metros de largura com distância de um metro do seu topo até a laje superior. Para o estudo de caso, foi considerado que as janelas não resistem às cargas impostas pelo tsunami, isto é, a água tende a entrar no volume interno do edifício. A norma (ASCE/SEI 7-16, 2017) indica que esta carga deve ser avaliada conjuntamente à força hidrodinâmica para situações em que a altura de inundação seja superior ao primeiro nível de pavimento e menor que a altura máxima de inundação. As situações críticas observadas seriam com as alturas de inundação ao mesmo nível da base dos vãos pertencentes ao segundo e terceiro piso, isto é, uma altura de quatro e sete metros, respectivamente, pois há maior volume deslocado nestas situações. Isto ocorre, já que a alvenaria de fechamento foi considerada resistente à inundação causada pelo tsunami, enquanto as janelas não foram consideradas como tal. Os carregamentos de impulsão hidrostática vertical foram considerados distribuídos em todos os pavimentos e os cálculos realizados para a obtenção dos resultados estão apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Força de impulsão hidrostática vertical para situação mais crítica

Altura de inundação de 7 metros	
	Volume
Pilares (m <sup>3</sup> )	1,75
Vigas (m <sup>3</sup> )	2,44
Lajes (m <sup>3</sup> )	12,94
Fundações (2x2x0,5) (m <sup>3</sup> )	6,00
Total de elementos estruturais (m <sup>3</sup> )	23,12
Volume deslocado (m <sup>3</sup> )	48,00
Peso específico da água (kN/m <sup>3</sup> )	11,25
Impulsão hidrostática vertical (kN)	800,16
Carga distribuída (kN/m)	100,02
Carga distribuída por pavimento (kN/m)	33,34

Para a situação de tsunami com altura de inundação igual a três metros, a impulsão hidrostática vertical leva em consideração o volume dos elementos estruturais submersos na água e seu resultado está apresentado na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 – Força de impulsão hidrostática vertical tsunami de 3 metros

Altura de inundação de 3 metros	
	Volume
Pilares (m <sup>3</sup> )	0,75
Vigas (m <sup>3</sup> )	0,94
Lajes (m <sup>3</sup> )	0,00
Fundações (2x2x0,5) (m <sup>3</sup> )	6,00
Total de elementos estruturais (m <sup>3</sup> )	7,69
Volume deslocado (m <sup>3</sup> )	0,00
Peso específico da água (kN/m <sup>3</sup> )	11,25
Impulsão hidrostática vertical (kN)	86,48
Carga distribuída (kN/m)	10,81

### 5.2.5 FORÇAS SÍSMICAS

As cargas horizontais equivalentes ao sismo foram calculadas de acordo com o método de forças horizontais. Os valores utilizados e os resultados gerados estão apresentados na Tabela 5.21. As forças F9, F6 e F3 representam as forças horizontais sísmicas equivalentes nos níveis dos pavimentos, os quais são nove, seis e três metros, respetivamente.

Tabela 5.21 – Forças horizontais sísmicas

Forças horizontais sísmicas	
$a_g$ (m/s <sup>2</sup> )	2,5
$T_c$ (s)	0,6
$q$	3,9
$S$	1,3
$T_1$ (s)	0,61
$Sd$ (T1)	2,05
$m$ (ton)	108,30
$\lambda$	0,85
$F_b$ (kN)	188,64
$m$ pavimento (ton)	36,10
$\sum mz$	649,80
F9 (kN)	94,32
F6 (kN)	62,88
F3 (kN)	31,44

### 5.2.6 SITUAÇÕES DE PROJETO E COMBINAÇÕES DE CARGA

A análise estrutural contém algumas situações de projeto que serão utilizadas neste trabalho, nas quais as cargas permanentes são iguais. A resistência dos pilares para as forças de impacto e hidrodinâmica deve ser verificada para cada elemento, mas não serão realizadas nesta dissertação por serem uma análise linear do comportamento do elemento estrutural. As análises contidas neste trabalho estão apresentadas abaixo.

- Tsunami de três metros de altura
  - Força de impacto
  - Força de impacto precedida de sismo
- Tsunami de nove metros de altura
  - Força de impacto e impulsão hidrostática vertical
  - Força de impacto e impulsão hidrostática vertical precedidas de sismo
  - Força hidrodinâmica e impulsão hidrostática vertical
  - Força hidrodinâmica e impulsão hidrostática vertical precedidas de sismo

### 5.3 ANÁLISE *PUSHOVER*

A análise *pushover* é uma análise estática não linear sob forças gravíticas constantes e cargas horizontais de crescimento monotónico (NP EN 1998-1, 2010). Para os edifícios que são regulares em planta e altura, a análise pode ser feita utilizando dois modelos planos em cada direção principal.

As distribuições verticais de cargas laterais deverão ser uniformes, cuja aceleração de resposta é uniforme, e modal, que é proporcional às forças laterais correspondentes à distribuição das forças laterais. As cargas verticais devem ser aplicadas nos locais de modelação de massa, ou seja, no mesmo nível dos andares do edifício.

A determinação do deslocamento alvo é realizada para um sistema de um grau de liberdade e é determinado pelo anexo B do eurocódigo NP EN 1998-1:2010. A transformação num sistema equivalente de um só grau de liberdade e o cálculo do deslocamento-alvo são efetuados de acordo com as equações apresentadas a seguir. A massa do sistema equivalente ( $m^*$ ) é definida pela Equação 5.20.

$$m^* = \sum m_i \Phi_i = \sum F_i \quad (5.20)$$

Onde:

$m^*$ : massa do sistema equivalente

$\Phi_i$ : deslocamentos normalizados

$m_i$ : massa do piso i

$F_i$ : forças laterais normalizadas

O coeficiente de transformação ( $\Gamma$ ) é definido pela Equação 5.21:

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} = \frac{\sum F_i}{\sum \left( \frac{F_i^2}{m_i} \right)} \quad (5.21)$$

A força ( $F^*$ ) e o deslocamento ( $d^*$ ) do sistema equivalente de um grau de liberdade são definidos pelas equações 5.22 e 5.23, respetivamente.

$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma} \quad (5.22)$$

$$d^* = \frac{d_n}{\Gamma} \quad (5.23)$$

Onde:

$F_b$ : força de corte na base

$\Gamma$ : coeficiente de transformação

$d_n$ : deslocamento do nó de controlo para o sistema com vários graus de liberdade

Com base numa consideração idealizada de uma relação força/deslocamento elasto-perfeitamente plástica, a Equação 5.24 pode ser usada para calcular o deslocamento no limite da plasticidade do sistema com um só grau de liberdade ( $d_y^*$ ).

$$d_y^* = 2 \left( d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right) \quad (5.24)$$

Onde:

$d_m^*$ : deslocamento correspondente a força  $F_y^*$

$E_m^*$ : energia de deformação real até à formação do mecanismo plástico

$F_y^*$ : força de cedência ou resistência última do sistema idealizado

A energia de deformação real até a formação do mecanismo plástico ( $E_m^*$ ) pode ser interpretada como a área do gráfico de força pelo deslocamento, até a respetiva força máxima, delimitada pela capacidade de resistência/deformação do elemento, como apresentado na Figura 5.10.

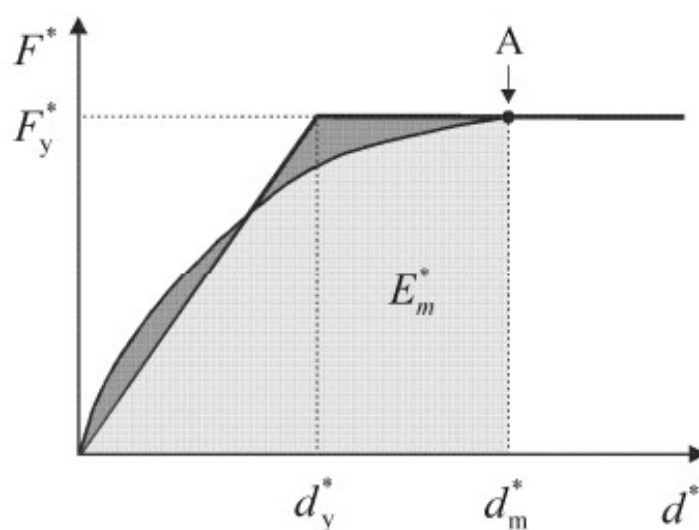


Figura 5.10 – Relação idealizada de força/deslocamento (NP EN 1998-1, 2010)

O cálculo do período referente ao sistema com um só grau de liberdade ( $T^*$ ) é determinado pela Equação 5.25 e a determinação do deslocamento-alvo ( $d_t^*$ ) para esse sistema é realizada a partir das equações 5.26 a 5.30.

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* d_y^*}{F_y^*}} \quad (5.25)$$

$$d_{et}^* = S_e(T^*) \left[ \frac{T^*}{2\pi} \right]^2 \quad (5.26)$$

Onde:

$m^*$ : massa do sistema equivalente

$d_y^*$ : deslocamento no limite de plasticidade do sistema idealizado

$F_y^*$ : força de cedência ou resistência última do sistema idealizado

$S_e(T^*)$ : espectro de resposta elástica no período do sistema idealizado

$T^*$ : período do sistema idealizado

O cálculo do deslocamento-alvo para o sistema de um grau de liberdade ( $d_t^*$ ) é realizado a partir das equações 5.27 a 5.30, que dependem do valor relativo dos períodos  $T^*$  e  $T_c$ .

- $T^* < T_c$  (períodos curtos)

Se  $F_y^* / m^* \geq S_e(T^*)$ :

$$d_t^* = d_{et}^* \quad (5.27)$$

Se  $F_y^* / m^* < S_e(T^*)$ :

$$d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} \left[ 1 + (q_u - 1) \frac{T_c}{T^*} \right] \geq d_{et}^* \quad (5.28)$$

$$q_u = \frac{S_e(T^*) m^*}{F_y^*} \quad (5.29)$$

- $T^* \geq T_c$  (período médios e longos)

$$d_t^* = d_{et}^* \quad (5.30)$$

Onde:

$d_{et}^*$ : deslocamento-alvo para o sistema equivalente com um só grau de liberdade

$q_u$ : relação entre a aceleração na estrutura com comportamento elástico ilimitado  $S_e(T^*)$  e outra estrutura com resistência limitada  $F_y^*/m^*$

$S_e(T^*)$ : espectro de resposta elástica no período do sistema idealizado

$m^*$ : massa do sistema equivalente

$F_y^*$ : força de cedência ou resistência última do sistema idealizado

O valor do deslocamento-alvo para sistema com mais de um grau de liberdade ( $d_t$ ) é calculado através da multiplicação do valor do deslocamento-alvo para um sistema com um grau de liberdade pelo coeficiente de transformação, como demonstrado pela Equação 5.31.

$$d_t = \Gamma d_t^* \quad (5.31)$$

Onde:

$\Gamma$ : coeficiente de transformação

$d_t^*$ : deslocamento-alvo de um sistema com um grau de liberdade

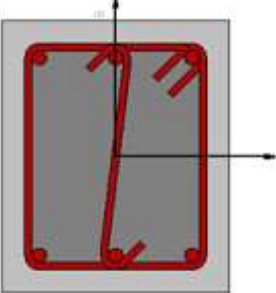
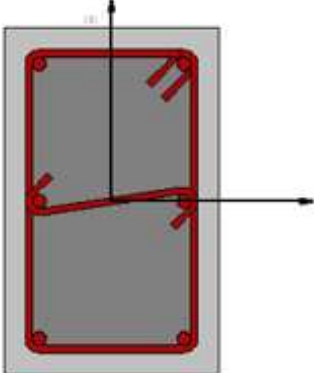
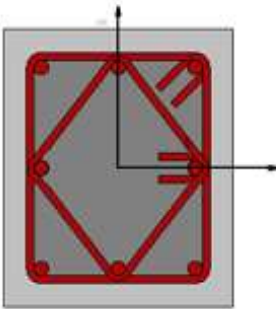
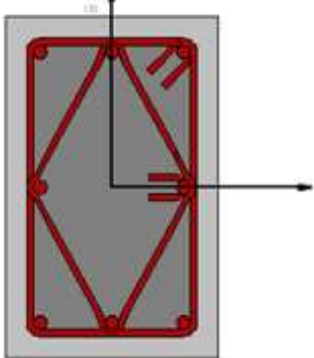
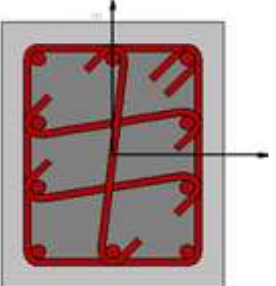
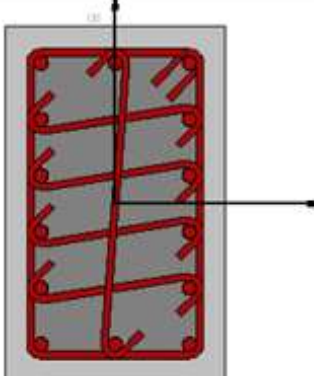
## **6 ANÁLISE NÃO LINEAR – SEISMOSTRUCT**

O edifício escolhido como estudo de caso está localizado em Lagos, é constituído de 3 andares, possui uma estrutura porticada e foi construído em betão armado. O pavimento térreo é considerado vazado, isto é, não possui alvenaria de fechamento entre os elementos estruturais. A localização do empreendimento considerada é na primeira linha de impacto do tsunami, ou seja, é o edifício mais próximo do mar.

O dimensionamento estrutural foi realizado no Robot Structural Analysis com base nas normas NP EN 1990-1-1:2009, NP EN 1992-1-1:2010 e NP EN 1998-1:2010. O resultado obtido através do dimensionamento foi usado para introduzir as propriedades das secções transversais e as armaduras no SeismoStruct, a fim de estudar o comportamento de uma estrutura dimensionada para os padrões normativos atuais em casos de tsunami.

As secções transversais dos elementos e as armaduras necessárias obtidas através do dimensionamento estrutural no Robot Structural Analysis e introduzidas no SeismoStruct estão apresentadas na Tabela 6.1. Todos os varões longitudinais dos pilares apresentados nesta tabela têm diâmetro de 16 milímetros e os estribos/ganchos tem de 8 milímetros e estão espaçados a 7,5 centímetros.

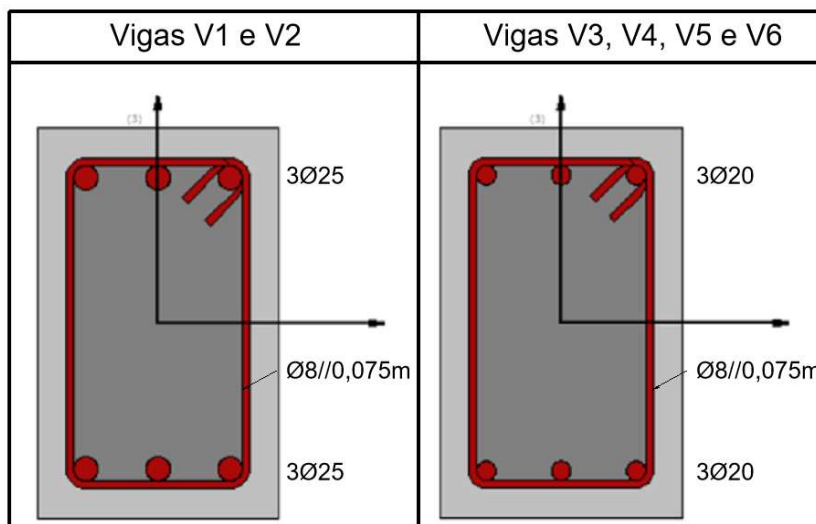
Tabela 6.1 – Secções transversais dos pilares e suas armaduras no SeismoStruct

	Pilares P1 e P3 (30x25)	Pilar P2 (40x25)
3° pavimento	 <p>6Ø16 estribos/ganchos: 2x Ø8//0,075m</p>	 <p>6Ø16 estribos/ganchos: 2x Ø8//0,075m</p>
2° pavimento	 <p>8Ø16 estribos: 2x Ø8//0,075m</p>	 <p>8Ø16 estribos: 2x Ø8//0,075m</p>
1° pavimento	 <p>10Ø16 estribos/ganchos: 4x Ø8//0,075m</p>	 <p>14Ø16 estribos/ganchos: 6x Ø8//0,075m</p>

As secções transversais das vigas estão apresentadas na Tabela 6.2, com dimensões de 25 e 50 centímetros de largura e altura, respetivamente. Todos os estribos das vigas possuem um espaçamento entre si de 7,5 centímetros. Os varões longitudinais das vigas V1 e V2 tem

diâmetro de 25 milímetros e os varões longitudinais das vigas V3, V4, V5 e V6 possuem diâmetro de 20 milímetros.

Tabela 6.2 – Secções transversais das vigas e suas armaduras no SeismoStruct



O pórtico no SeismoStruct está apresentado na Figura 6.1 e as cargas distribuídas nas vigas são permanentes, calculadas na Secção 5.2.1. As análises foram realizadas pelo método *pushover*, o qual uma carga é aplicada localmente e é multiplicada por um fator que aumenta com o tempo. Com esse método, podemos analisar a capacidade máxima de carga de uma estrutura e o deslocamento do nó de controlo. Para que o fator de carga de uma estrutura seja igual a força imposta nela, o somatório das forças incrementais do SeismoStruct deve ser igual a um. Nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 pode observar-se a colocação de cargas incrementais referentes ao impacto em um tsunami de três metros, impacto em um tsunami de nove metros e a carga hidrodinâmica de um tsunami de nove metros, respetivamente.

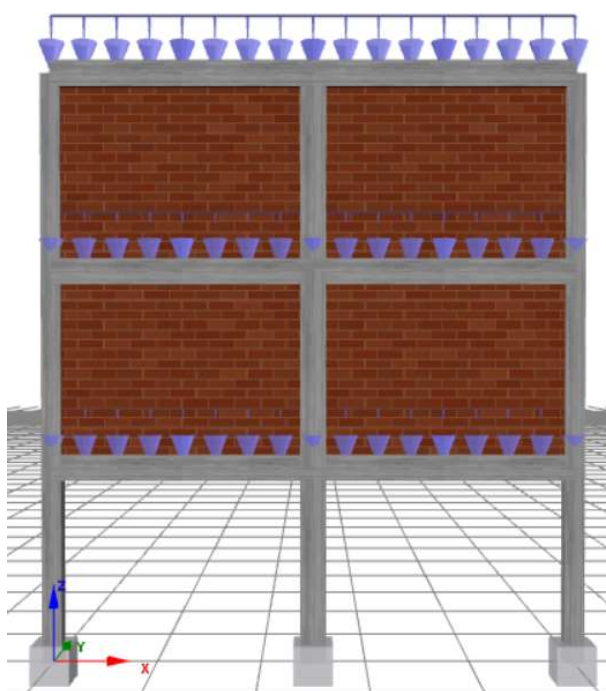


Figura 6.1 – Pórtico e cargas permanentes no SeismoStruct (SeismoSoft, 2022)

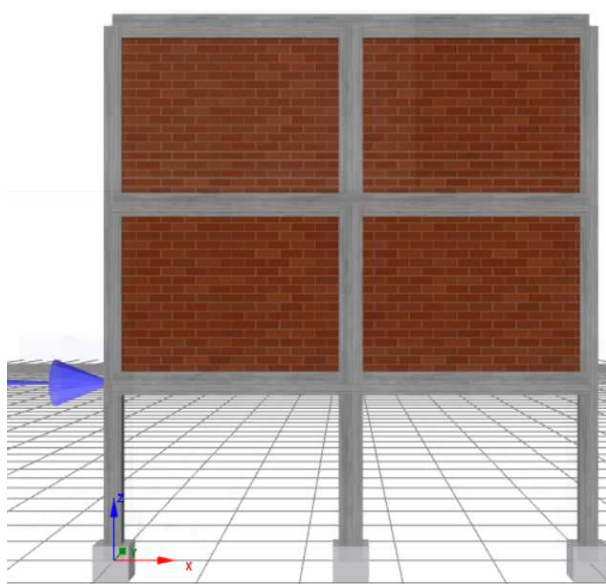


Figura 6.2 – Carga unitária da análise *pushover* para impacto a 3 metros de altura (SeismoSoft, 2022)

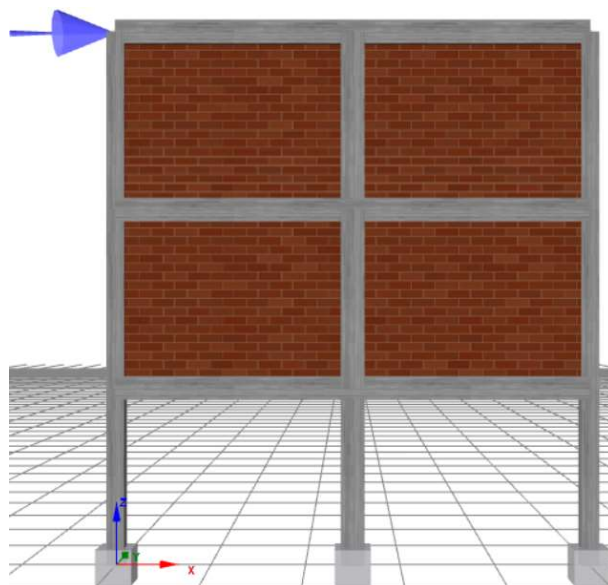


Figura 6.3 – Carga unitária da análise *pushover* para impacto a 9 metros de altura (SeismoSoft, 2022)

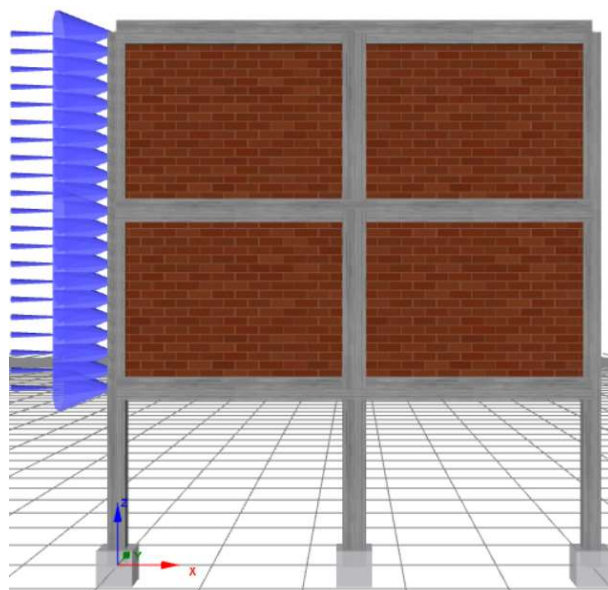


Figura 6.4 – Cargas incrementais da força hidrodinâmica para tsunami de 9 metros (SeismoSoft, 2022)

A força de impulsão hidrostática vertical está representada nas Figuras 6.5 e 6.6 para as situações de tsunami com altura de três e nove metros respectivamente, e seus valores foram calculados na Seção 5.2.4.

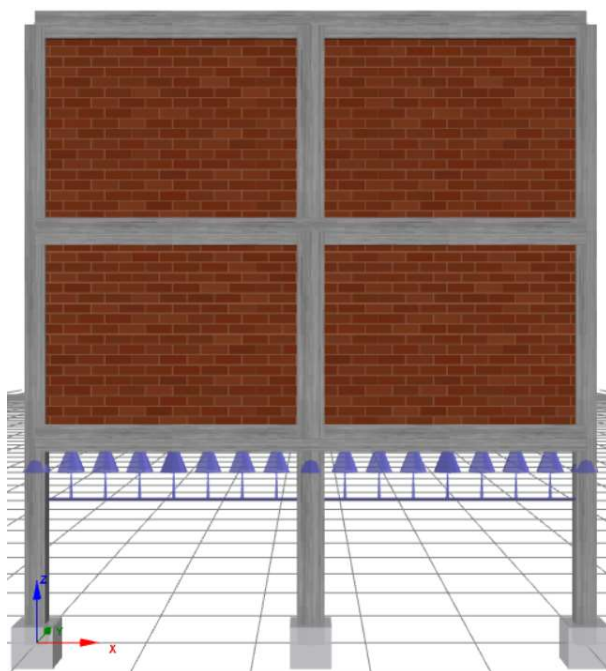


Figura 6.5 – Cargas de impulsão hidrostática vertical para tsunami de 3 metros (SeismoSoft, 2022)

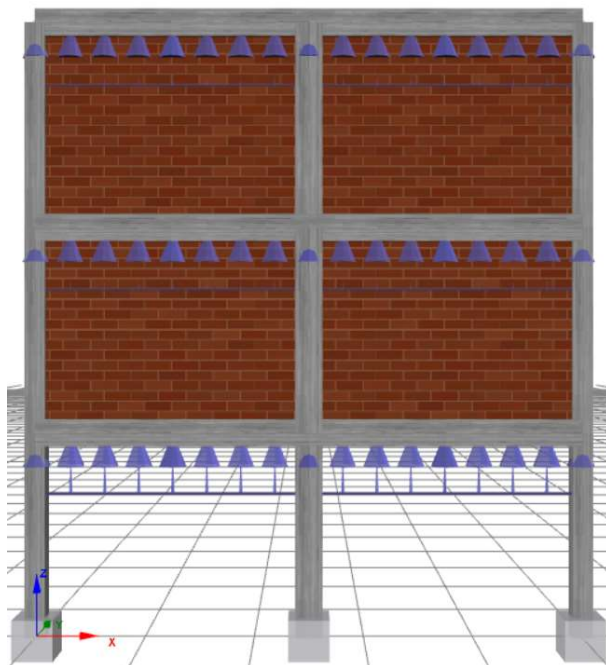


Figura 6.6 – Cargas de impulsão hidrostática vertical para tsunami de 9 metros (SeismoSoft, 2022)

O método de cargas equivalentes horizontais foi utilizado para as análises estruturais de sismo seguido por tsunami. As posições das cargas em cada nível de pavimento no SeismoStruct estão demonstradas na Figura 6.7 e valores foram calculados na Secção 5.2.5.

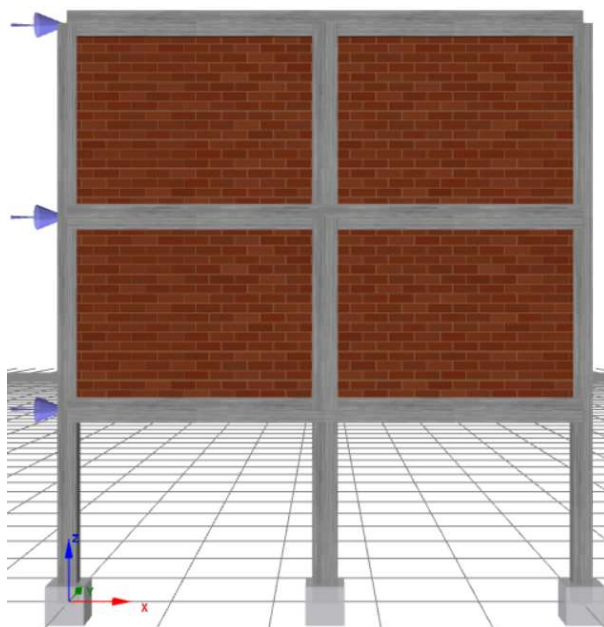


Figura 6.7 – Cargas horizontais sísmicas equivalentes no SeismoStruct (SeismoSoft, 2022)

As análises podem ser divididas em relação às alturas das ondas, as quais são três e nove metros de altura, representadas nas Figuras 6.8 e 6.13, respetivamente. Para as duas situações, a capacidade de deformação da estrutura será analisada para as forças de impacto, de impulsão hidrostática vertical e hidrodinâmica, tendo em vista que as análises também serão realizadas para a ocorrência prévia de sismo em relação as cargas citadas anteriormente.

## 6.1 ANÁLISE ESTRUTURAL PARA TSUNAMI DE TRÊS METROS

As análises do comportamento da estrutura sob os efeitos dos carregamentos citados anteriormente e suas combinações estão apresentadas nesta secção. As Figuras 6.9 a 6.12 demonstram os deslocamentos em X e as rotações em Y para a situação de carga máxima que a estrutura suporta. O fator de deformação introduzido no SeismoStruct para uma melhor visualização dos resultados foi de quatro vezes.

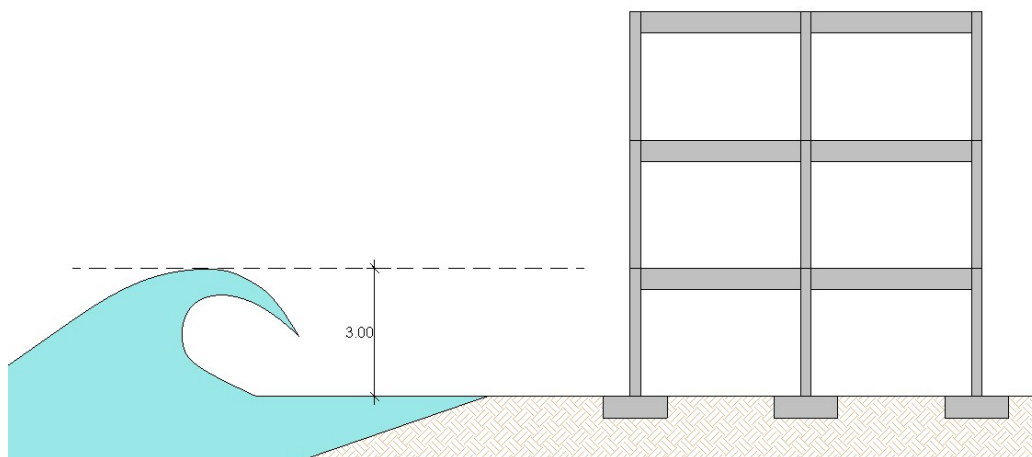


Figura 6.8 – Modelo esquemático do caso do tsunami com 3 metros de altura

### 6.1.1 IMPACTO E IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL

Os valores dos deslocamentos na direção X e rotação no eixo Y dos nós da estrutura para a situação em que a estrutura sofre a ação da força de impacto e impulsão hidrostática vertical de um tsunami com três metros de altura nas Figuras 6.9 e 6.10, respetivamente.

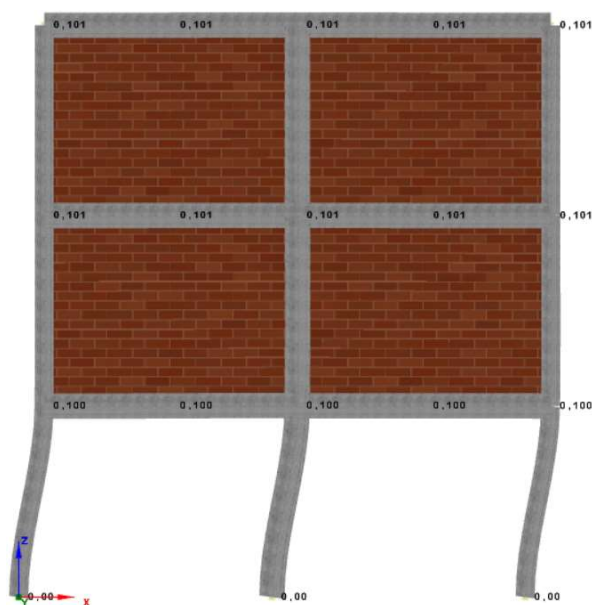


Figura 6.9 – Deslocamento em X dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022)

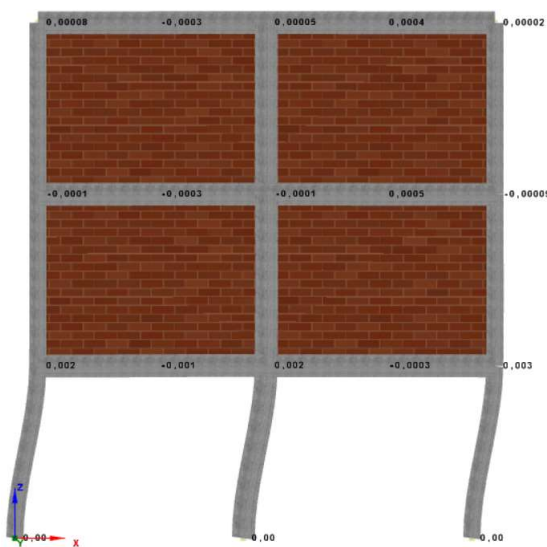


Figura 6.10 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022)

### 6.1.2 IMPACTO, IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL E SISMO

Os valores dos deslocamentos na direção X e rotação no eixo Y dos nós da estrutura para a situação em que a estrutura sofre a ação da força de impacto e impulsão hidrostática vertical de um tsunami com três metros de altura após um sismo estão demonstrados nas Figuras 6.11 e 6.12, respetivamente.

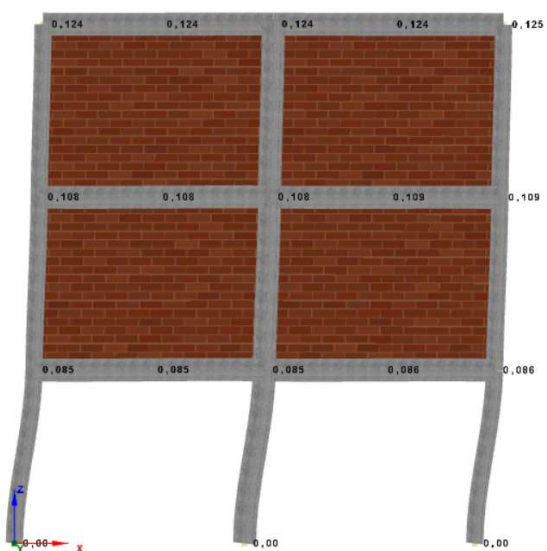


Figura 6.11 – Deslocamento em X dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022)

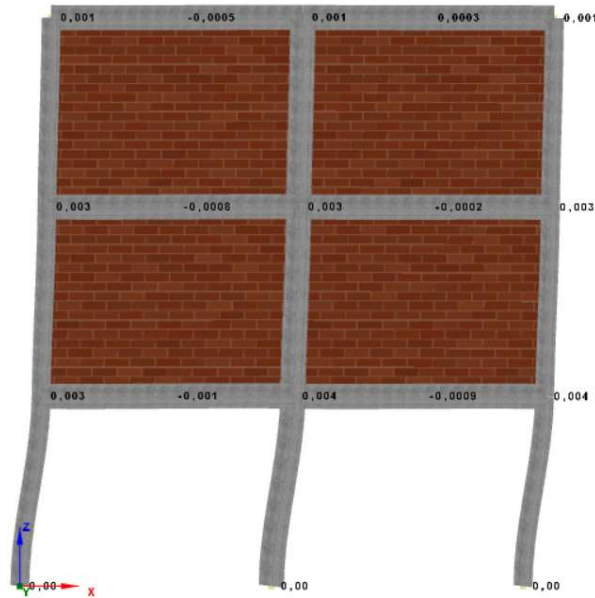


Figura 6.12 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022)

## 6.2 ANÁLISE ESTRUTURAL PARA TSUNAMI DE NOVE METROS

As análises do comportamento da estrutura sob os efeitos dos carregamentos citados anteriormente e suas combinações estão apresentadas nesta seção. As Figuras 6.14 a 6.21 demonstram os deslocamentos em X e as rotações em Y para a situação de carga máxima que a estrutura suporta. O fator de deformação introduzido no SeismoStruct para a visualização dos resultados foi de quatro vezes.

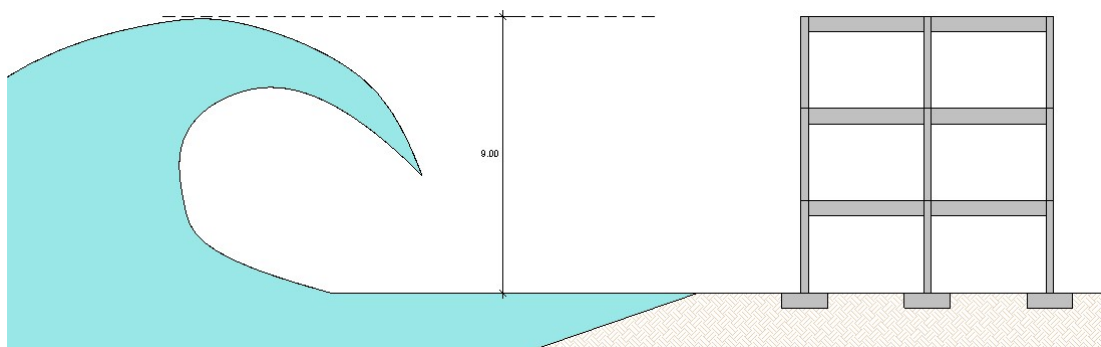


Figura 6.13 – Modelo esquemático do caso do tsunami com 9 metros de altura

### 6.2.1 HIDRODINÂMICA E IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL

Os valores dos deslocamentos na direção X e rotação no eixo Y dos nós da estrutura para a situação em que a estrutura sofre a ação da força hidrodinâmica e impulsão hidrostática vertical de um tsunami com nove metros de altura estão demonstrados nas Figuras 6.14 e 6.15, respetivamente.

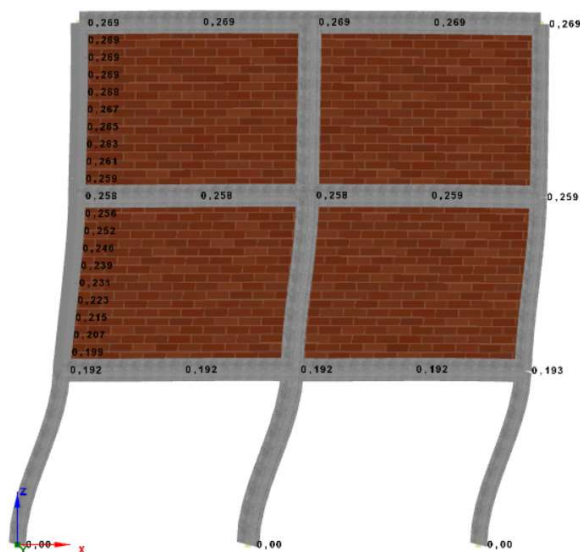


Figura 6.14 – Deslocamento em X da estrutura (SeismoSoft, 2022)

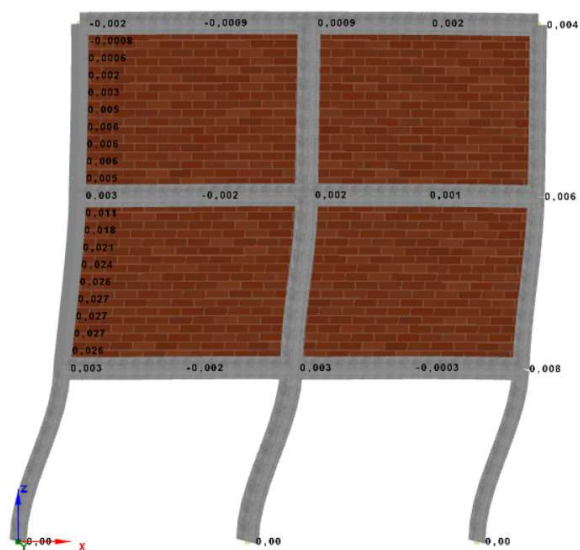


Figura 6.15 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022)

## 6.2.2 HIDRODINÂMICA, IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL E SISMO

Os valores dos deslocamentos na direção X e rotação no eixo Y dos nós da estrutura para a situação em que a estrutura sofre a ação da força hidrodinâmica e impulsão hidrostática vertical de um tsunami com nove metros de altura após um sismo estão demonstrados nas Figuras 6.16 e 6.17, respetivamente.

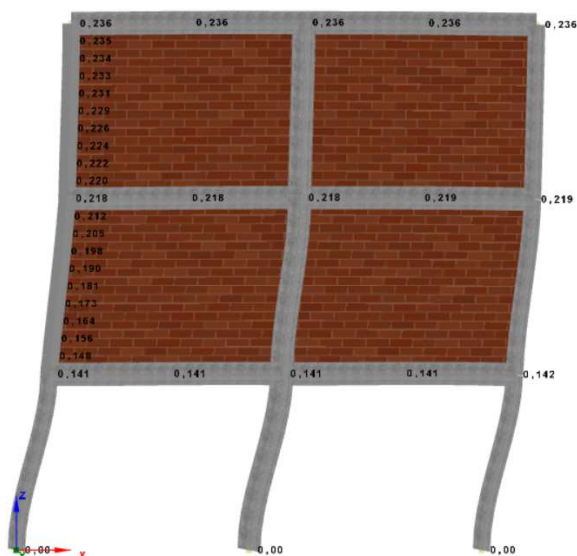


Figura 6.16 – Deslocamento em X da estrutura (SeismoSoft, 2022)

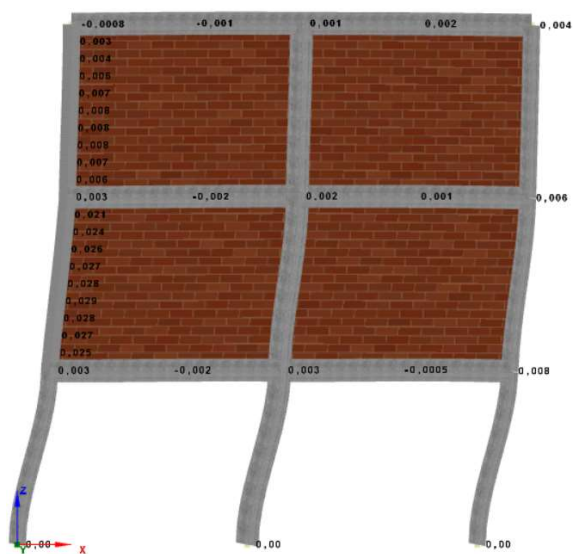


Figura 6.17 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022)

### 6.2.3 IMPACTO E IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL

Os valores dos deslocamentos na direção X e rotação no eixo Y dos nós da estrutura para a situação em que a estrutura sofre a ação da força de impacto e impulsão hidrostática vertical de um tsunami com nove metros de altura estão demonstrados nas Figuras 6.18 e 6.19, respetivamente.

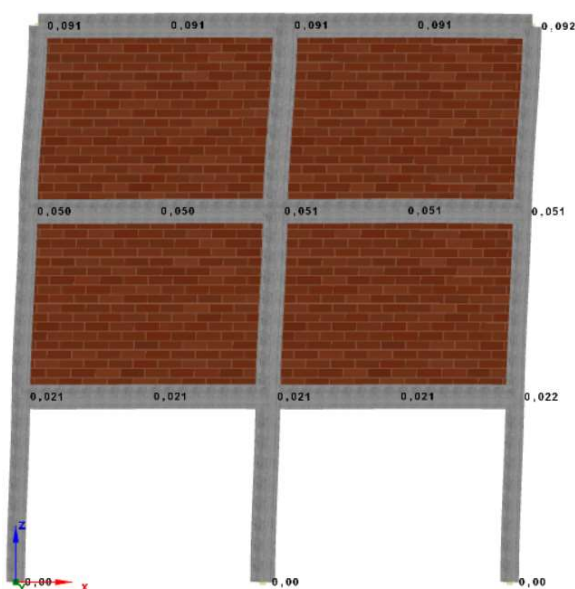


Figura 6.18 – Deslocamento em X da estrutura (SeismoSoft, 2022)

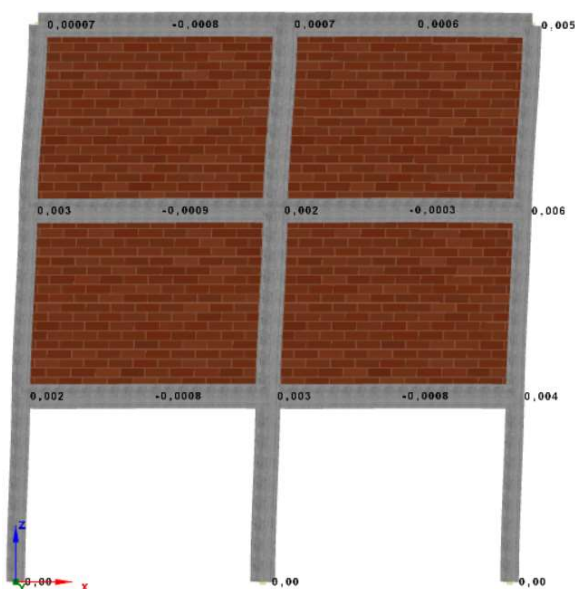


Figura 6.19 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022)

### 6.2.4 IMPACTO, IMPULSÃO HIDROSTÁTICA VERTICAL E SISMO

Os valores dos deslocamentos na direção X e rotação no eixo Y dos nós da estrutura para a situação em que a estrutura sofre a ação da força de impacto e impulsão hidrostática vertical de um tsunami com nove metros de altura após um sismo estão demonstrados nas Figuras 6.20 e 6.21, respetivamente.

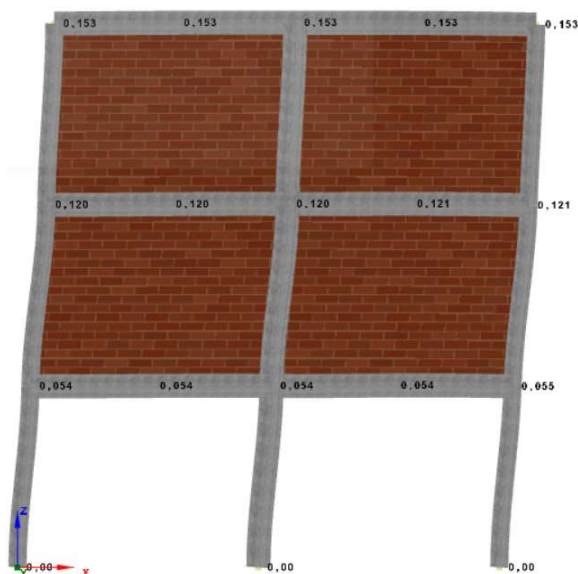


Figura 6.20 – Deslocamento em X da estrutura (SeismoSoft, 2022)

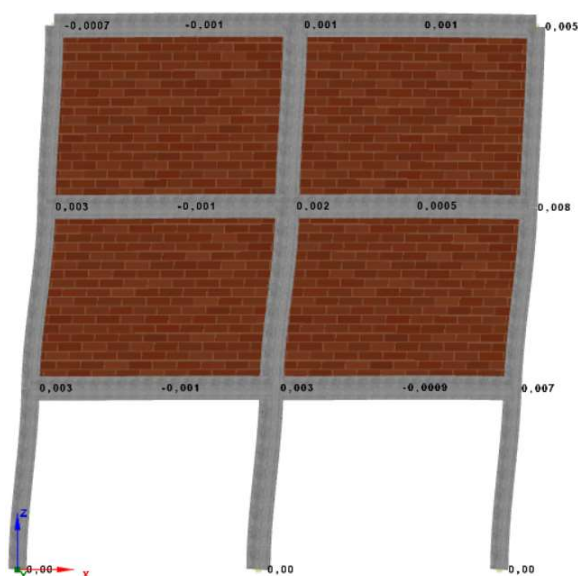


Figura 6.21 – Rotação em Y dos nós da estrutura (SeismoSoft, 2022)

## 7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Após a disposição das cargas no SeismoStruct para as situações apresentadas no capítulo anterior, pode obter-se o gráfico do fator de carregamento pelo deslocamento do nó de controlo na direção X. A Figura 7.1 corresponde a seis gráficos referentes a um pórtico com alvenaria de fechamento somente nos dois últimos pavimentos, a considerar que o rés-de-chão é aberto. Pelo facto de o somatório das forças laterais incrementais ser um em todos os casos, o fator de carregamento pode ser interpretado como a força de corte da base.

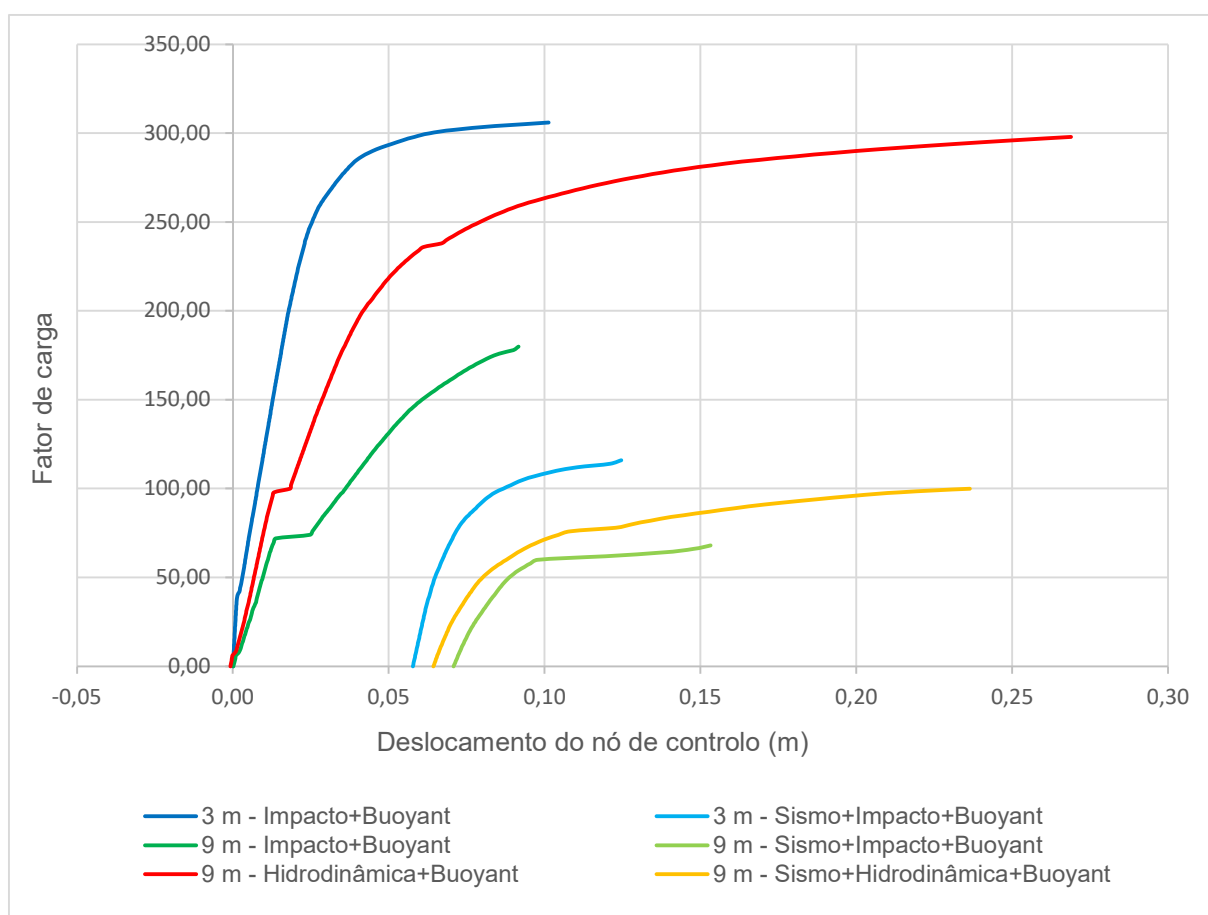


Figura 7.1 – Capacidade estrutural das situações estudadas para tsunamis de 3 e 9 metros

O gráfico pertencente a Figura 7.1 permite concluir, para o caso em estudo, as forças máximas resistidas pela estrutura para cada tipo de situação. No SeismoStruct, o método de controlo

de força foi adotado para que a capacidade máxima de resistência fosse obtida, assim como seu respectivo deslocamento associado. Pode perceber-se que nas situações onde ocorre um sismo previamente ao tsunami, o deslocamento inicial é diferente de zero, já que a atividade sísmica impôs um deslocamento ou deformação previamente ao tsunami.

Os gráficos das Figuras 7.2 a 7.4 apresentam a relação entre a capacidade de carga da estrutura e a exigência definida no Capítulo 5 desta dissertação. A força de impacto máxima considerada é de 980 kN e a força hidrodinâmica para um tsunami de nove metros de altura será analisada para o caso máximo e o caso 2 da norma americana (ASCE/SEI 7-16, 2017). Os valores calculados foram de 1149,52 e 766,35 kN, respectivamente. Para que a estrutura seja considerada resistente, a percentagem deve ser maior que 100%, logo pode concluir-se que a capacidade máxima de resistência da estrutura é muito inferior à força imposta pelo tsunami, a considerar a atuação das cargas separadamente.

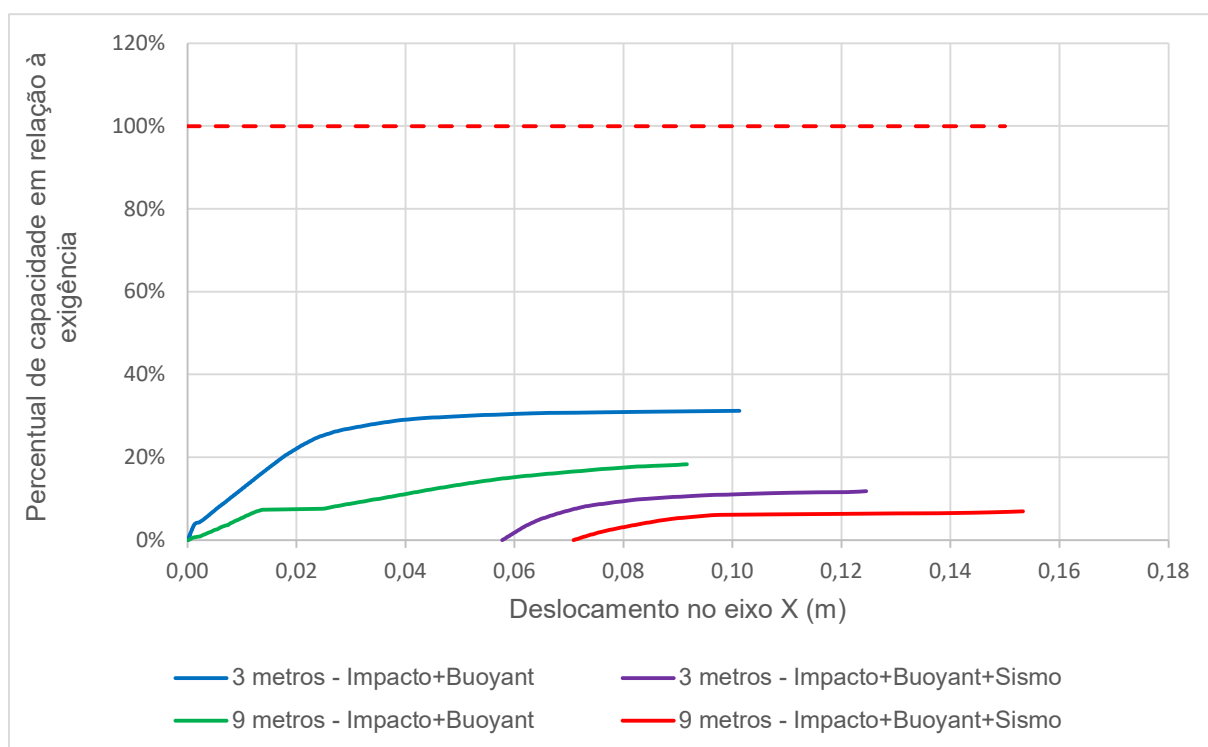


Figura 7.2 – Relação entre capacidade e exigência para a força de impacto

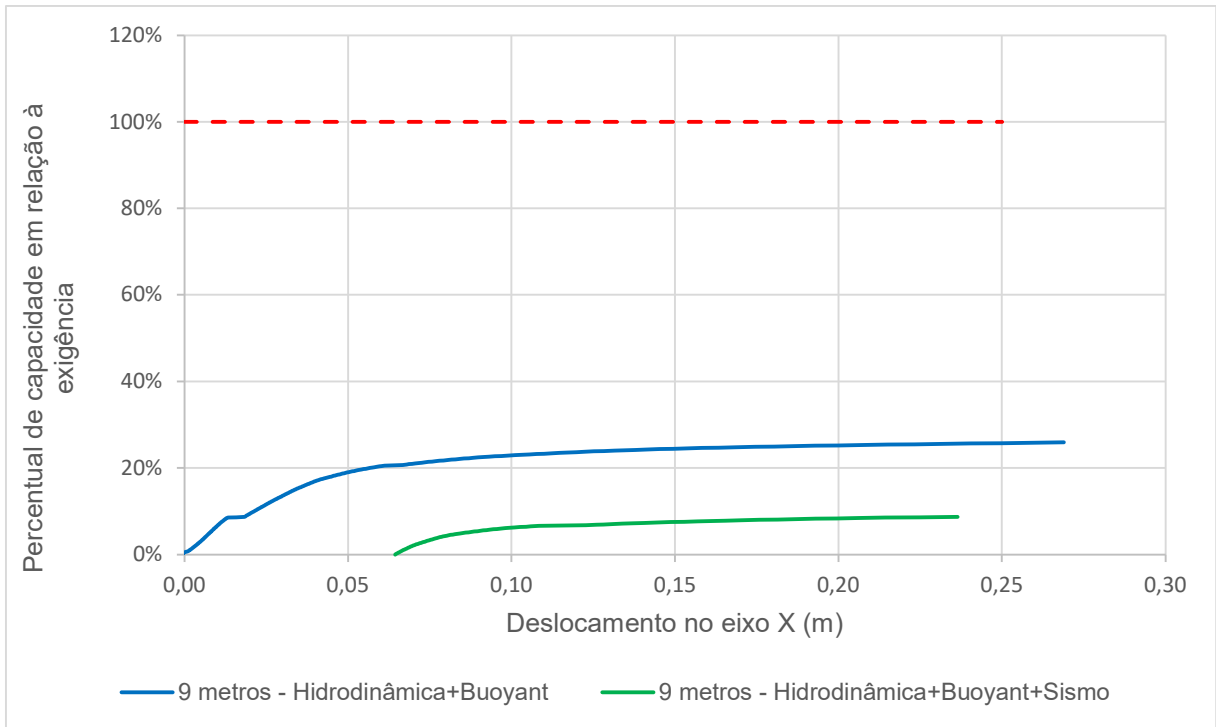


Figura 7.3 – Relação entre capacidade e exigência para força hidrodinâmica no caso máximo

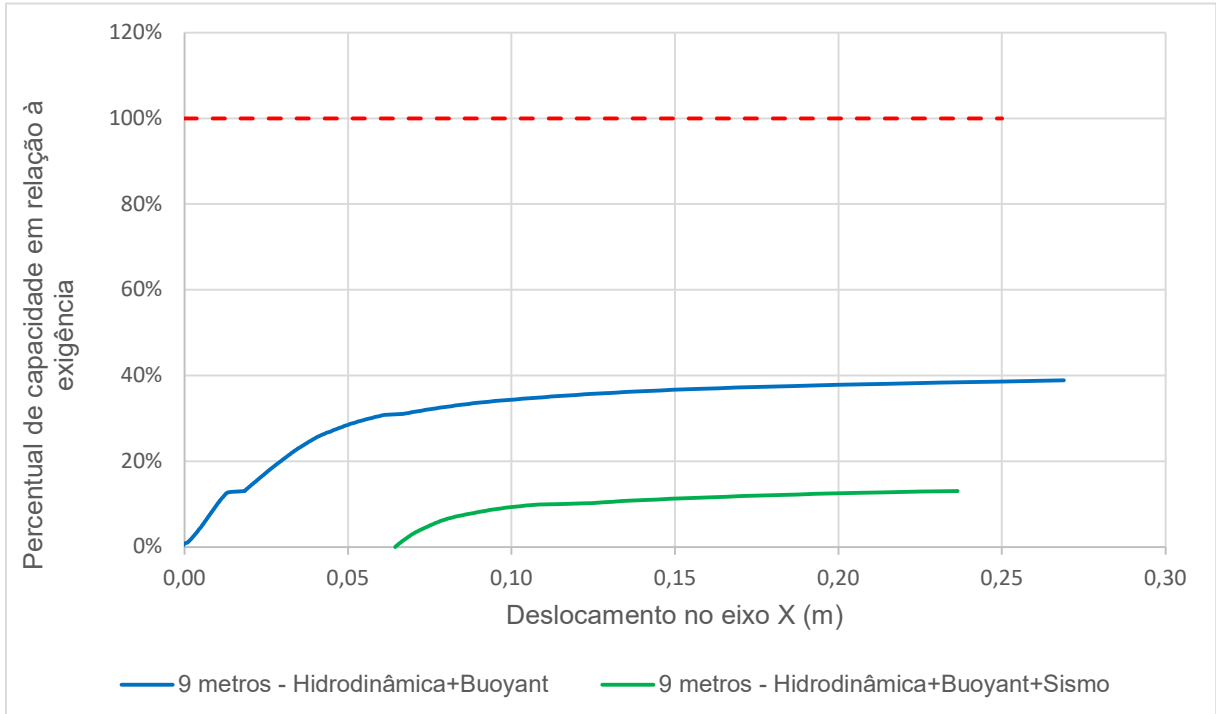


Figura 7.4 – Relação entre capacidade e exigência para força hidrodinâmica no caso 2 da ASCE 7-16

A partir dos resultados observados, foi realizado o cálculo da maior altura de água que a estrutura pode suportar. A força hidrodinâmica máxima resistida pelo pórtico foi de 298 kN para uma onda de nove metros de altura. A Tabela 7.1 contém as propriedades consideradas e o resultado da altura máxima de água que a estrutura resiste, a considerar somente a força hidrodinâmica.

Tabela 7.1 – Altura máxima de água que a estrutura resiste

Maior onda resistida	
Velocidade máxima (m/s)	10,00
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	1127,50
Largura do edifício (m)	12,00
Área de pilares (m <sup>2</sup> )	6,75
Área de vigas (m <sup>2</sup> )	17,25
Área de paredes (m <sup>2</sup> )	0,00
$C_{cx}$	0,30
$C_d$	1,25
$I_{tsu}$	1,00
Força hidrodinâmica máxima (N)	298000
Altura máxima da onda (m)	2,33

A condição da estrutura ser vazada no rés-de-chão implica que uma onda de 2,33 metros de altura impõe um carregamento quase nulo à estrutura, já que a água conseguiria passar livremente através da estrutura. Logo, a força hidrodinâmica máxima resistida pela estrutura sem a consideração da sobrecarga de utilização corresponde a uma altura de inundação de aproximadamente 5,33 metros.

## 8 CONCLUSÕES

### 8.1 CONCLUSÕES PRINCIPAIS

As conclusões desta dissertação estão apresentadas a seguir:

- O sismo diminui significativamente a resistência da estrutura para efeitos de tsunami, já que a estrutura se encontra deslocada e danificada antes das cargas provenientes do tsunami atuarem.
- Os casos de carga que um tsunami pode originar são diversos, o que obriga à análise da estrutura para vários tipos de ações e em tempos diferentes.
- A força gerada pelo impacto de um contentor na estrutura tem o maior valor, por comparação com as outras forças consideradas, o que obriga à construção de elementos estruturais com grande secção transversal e com elevada percentagem de armaduras. Esta carga deve ser avaliada para construções de grande importância, como hospitais, centrais nucleares, escolas e edifícios de evacuação vertical, já que para habitações comuns, a consideração desta força impossibilitaria a construção de residências para a maioria da população devido ao alto custo financeiro.
- Os planos de evacuação são extremamente necessários para as regiões do Algarve, Lisboa e Açores, já que essas regiões sofreram com este fenómeno catastrófico no passado. A construção de edifícios resistentes ao tsunami impossibilita muitas vezes a realização do empreendimento devido ao alto custo. Assim, é necessário que edifícios de evacuação vertical (resistentes às cargas sísmicas e do tsunami) sejam construídos em pontos estratégicos, que haja investimento em mecanismos que tornem a evacuação horizontal eficiente e que barreiras de contenção sejam construídas para que a força da água seja parcialmente dissipada.
- As cargas provenientes de um tsunami são muito menores quando o fluxo de água consegue passar através do edifício de um lado para o outro, isto é, quando a água não fica retida em uma porção da estrutura. Esta dissertação sugere que os primeiros níveis de um edifício, que esteja sobre alto risco de tsunami, tenham alvenarias de fechamento com pouca resistência à carga lateral para que na situação de um tsunami o fluxo de água consiga passar através do edifício, e assim exercer menos pressão na estrutura. Contudo, esta estratégia irá originar estruturas com piso térreo flexível, que apresentam pior desempenho sísmico, o qual deve ser acautelado na fase de dimensionamento. Para que essa metodologia seja aplicada é necessário que algum

andar do edifício esteja acima do nível máximo de inundação ou que o empreendimento esteja próximo a um edifício de evacuação vertical, para que os utilizadores dos andares que serão inundados consigam sair para um lugar seguro.

- O dimensionamento estrutural depende da distribuição espacial dos elementos estruturais, do comprimento dos vãos, da presença de alvenaria de fechamento, das rigidezes dos elementos, entre outros fatores. Assim, os valores obtidos nesta dissertação são exclusivamente referentes à estrutura tipo apresentada. Para o dimensionamento estrutural de outras edificações, novas análises não-lineares deverão ser realizadas para que os valores corretos dos esforços atuantes sejam obtidos. As cargas poderão ser obtidas pelas abordagens apresentadas no Capítulo 4, que devem ser avaliadas por um projetista estrutural competente.
- Pelo facto das cargas provenientes do tsunami serem de grande magnitude e horizontais, há uma grande probabilidade de alguns pilares da estrutura sofrerem esforços de tração.
- As cargas de um tsunami, para um cenário como o de 1755, são muito maiores que as cargas consideradas pelos eurocódigos atuais (estabelecidas para um período de retorno de 475 anos, que é muito inferior ao que é espectável para um evento sísmico como o ocorrido 1755), o que destaca a grande importância deste tema para o desenvolvimento da engenharia em Portugal. Com isso, é sugerido que novos materiais e outras tipologias de estruturas sejam avaliadas para que novas conclusões sejam obtidas.
- A instalação de boias medidoras do nível do mar, a criação de um programa que envia mensagens simultâneas de alerta para as populações em perigo de acordo com suas respetivas localizações, a instalação de sirenes de alerta e a criação de rotas de fuga bem sinalizadas são ações que devem ser implementadas para que os impactos sociais sejam os menores possíveis.
- As situações de projeto foram tomadas a considerar um edifício localizado na primeira linha de impacto de um tsunami, isto é, edificações que estejam à beira-mar. Os edifícios localizados mais no interior do continente podem sofrer esforços diferentes aos considerados nesta dissertação, provenientes de fluxos de água com diferentes direções causadas pela canalização do escoamento do líquido.

## **8.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Para o desenvolvimento deste tema, é sugerido que haja mais estudos sobre os pontos destacados a seguir:

- Analisar a força hidrodinâmica num edifício com o auxílio de programas de simulação computacional que consideram a dinâmica dos fluidos.
- Estudar a resistência de diferentes metodologias construtivas e suas possíveis melhorias.
- Analisar o comportamento tridimensional de uma estrutura em interação com fluxos de água em diversas direções, conjuntamente com uma análise sísmica dinâmica não-linear da estrutura.
- Analisar estruturas em betão armado com disposições diferentes de elementos estruturais.

## 9 REFERÊNCIAS

- Andrade, C., Borges, P., & Freitas, M. C. (2006). Historical tsunami in the Azores archipelago (Portugal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 156, 172–185. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.03.014>
- ASCE/SEI 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (2017).
- Autodesk, *Robot Structural Analysis* (2022).
- Baptista, M. A., & Miranda, J. M. (2009). Revision of the Portuguese catalog of tsunamis. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 9, 25–42. [www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/25/2009/](http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/25/2009/)
- Baptista, M. A., Miranda, J. M., Lopes, F. C., & Luis, J. F. (2007). The source of the 1722 Algarve earthquake: Evidence from MCS and Tsunami data. *Journal of Seismology*, 11(4), 371–380. <https://doi.org/10.1007/s10950-007-9058-y>
- Baptista, M. A., Miranda, J. M., & Luís J. (2010). Cartografia do Risco de Tsunami. Em *Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve* (pp. 71–84). Autoridade Nacional de Proteção Civil.
- Baptista, M. A., Miranda, J. M., & Luis, J. F. (2006). In search of the 31 March 1761 earthquake and tsunami source. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(2), 713–721. <https://doi.org/10.1785/0120050111>
- Baptista, M. A., & Miranda, P. M. (1992). Maximum entropy analysis of Portuguese tsunami data: The tsunamis of 28.02.1969 and 26.05.1975. *Science of Tsunami Hazards*, 10.
- Borges, J. F., Bezzeghoud, M., Buforn, E., Pro, C., & Fitas, A. (2007). The 1980, 1997 and 1998 Azores earthquakes and some seismo-tectonic implications. *Tectonophysics*, 435(1–4), 37–54. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.01.008>
- Bosnic, I., Costa, P. J. M., Dourado, F., La Selle, S. P., & Gelfenbaum, G. (2021). Onshore flow characteristics of the 1755 CE Lisbon tsunami: Linking forward and inverse numerical modeling. *Marine Geology*, 434. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106432>

- Brocher, T. M., Filson, J. R., Fuis, G. S., Haeussler, P. J., Holzer, T. L., Plafker, G., & Blair, J. L. (2014). *The 1964 Great Alaska Earthquake and Tsunamis - A Modern Perspective and Enduring Legacies*. <https://doi.org/10.3133/fs20143018>
- European Committee For Standardization, EN 1991-1-7, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions (2006).
- Fathianpour, A., Evans, B., Jelodar, M. B., & Wilkinson, S. (2023). Tsunami evacuation modelling via micro-simulation model. *Progress in Disaster Science*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2023.100277>
- FEMA P-55, Coastal Construction Manual Principles and Practices of Planning, Siting, Designing, Constructing, and Maintaining Residential Buildings in Coastal Areas (Fourth Edition) (2011).
- FEMA P-646, Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis (2019).
- Fine, I. V., Rabinovich, A. B., Bornhold, B. D., Thomson, R. E., & Kulikov, E. A. (2005). The Grand Banks landslide-generated tsunami of November 18, 1929: Preliminary analysis and numerical modeling. *Marine Geology*, 215(1-2 SPEC. ISS.), 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.11.007>
- Foster, A. S. J., Rossetto, T., & Allsop, W. (2017). An experimentally validated approach for evaluating tsunami inundation forces on rectangular buildings. *Coastal Engineering*, 128, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.07.006>
- freepik.com*. (2023, Março 30).
- Fukuyama, H., Kato, H., Ishihara, T., Tajiri, S., Tani, M., Okuda, Y., Kabeyasawa, T., & Nakano, Y. (2013). *Structural Design Requirement on the Tsunami Evacuation Buildings*.
- Google Earth*. (2023).
- Haehnel, R. B., & Daly, S. F. (2002). Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(2), 112–120. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2004\)130:2\(112\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2004)130:2(112))

- Kusumoto, S., Goto, T., Sugai, T., Omori, T., & Satake, K. (2018). Geological evidence of tsunamis in the past 3800 years at a coastal lowland in the Central Fukushima Prefecture, Japan. *Marine Geology*, 404, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.07.004>
- Lario, J., Zazo, C., Goy, J. L., Silva, P. G., Bardaji, T., Cabero, A., & Dabrio, C. J. (2011). Holocene palaeotsunami catalogue of SW Iberia. *Quaternary International*, 242(1), 196–200. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.01.036>
- León, T., Lau, A. Y. A., Easton, G., & Goff, J. (2023). A comprehensive review of tsunami and palaeotsunami research in Chile. Em *Earth-Science Reviews* (Vol. 236). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104273>
- Macabuag, J., Raby, A., Pomonis, A., Nistor, I., Wilkinson, S., & Rossetto, T. (2018). Tsunami design procedures for engineered buildings: A critical review. Em *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering* (Vol. 171, Número 4). ICE Publishing. <https://doi.org/10.1680/jcien.17.00043>
- Martins, I., & Mendes Víctor, L. A. (2001). *Contribuição para o Estudo da Sismicidade da Região Oeste da Península Ibérica*.
- Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T., & Yanagisawa, H. (2011). Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up. *Geophysical Research Letters*, 38. <https://doi.org/10.1029/2011GL049210>
- NOAA. (2023, Abril 18). *National Centers for Environmental Information*. [www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search](http://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search)
- IPQ - NP EN 1992-1-1. Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Instituto Português de Qualidade, Caparica, Portugal. (2010).
- IPQ - NP EN 1998-1. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal. (2010).
- Omira, R., Baptista, M. A., & Miranda, J. M. (2011). Evaluating Tsunami impact on the Gulf of Cadiz Coast (Northeast Atlantic). *Pure and Applied Geophysics*, 168(6–7), 1033–1043. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0217-7>

- Omira, R., Neres, M., & Batista, L. (2018). The gloria transform fault-ne atlantic: Seismogenic and tsunamigenic potential. Em *Transform Plate Boundaries and Fracture Zones* (pp. 157–167). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812064-4.00008-6>
- Qi, Z. X., Eames, I., & Johnson, E. R. (2014). Force acting on a square cylinder fixed in a free-surface channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 756, 716–727. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.455>
- Ramsden, J. D. (1993). *Tsunamis: Forces On A Vertical Wall Caused By Long Waves, Bores, And Surges On A Dry Bed*.
- Robertson, I. N., & Ge, M. (2010). *Uplift loading on elevated floor slab due to a tsunami bore*.
- Rossetto, T., Peiris, N., Pomonis, A., Wilkinson, S. M., Del Re, D., Koo, R., & Gallocher, S. (2007). The Indian Ocean tsunami of December 26, 2004: Observations in Sri Lanka and Thailand. *Natural Hazards*, 42(1), 105–124. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9064-3>
- SeismoSoft, *SeismoStruct 2022 Release-2*. [www.seismosoft.com](http://www.seismosoft.com) (2022).
- Syamsidik, Rasyif, T. M., Suppasri, A., Fahmi, M., Al'ala, M., Akmal, W., Hafli, T. M., & Fauzia, A. (2020). Challenges in increasing community preparedness against tsunami hazards in tsunami-prone small islands around Sumatra, Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101572>
- Tedim, F., & Gonçalves, J. (2010). Simulação da Área Potencialmente Inundada Pelo Tsunami de 1 de Novembro de 1755 no Algarve. Em *Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve* (pp. 55–70).
- Vigliotti, L., Andrade, C., Conceição, F., Capotondi, L., Gallerani, A., & Bellucci, L. G. (2019). Paleomagnetic, rock magnetic and geochemical study of the 1755 tsunami deposit at Boca do Rio (Algarve, Portugal). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 514, 550–566. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.10.030>
- Vizcaino, A., Grácia, E., Pallàs, R., Garcia-Orellana, J., Escutia, C., Casas, D., Willmott, V., Diez, S., Asioli, A., & Dañobeitia, J. (2006). Sedimentology, physical properties and ages of mass-transport deposits associated to the Marquês de Pombal Fault, Southwest Portuguese Margin. *Norwegian Journal of Geology*, 177–186.

Yeh, H., Barbosa, A. R., Ko, H., & Cawley, J. G. (2014). Tsunami Loadings On Structures: Review And Analysis. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 4. <https://doi.org/10.9753/icce.v34.currents.4>

Zhang, H., Shi, Y., Yuen, D. A., Yan, Z., Yuan, X., & Zhang, C. (2008). Modeling and visualization of tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*, 165(3–4), 475–496. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0324-x>