

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE FERRAMENTAS BIM DE APOIO À VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO SÍSMICO DE PAREDES ESTRUTURAIS DE BA

PEDRO BERNARDES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Humberto Salazar Amorim Varum

JUNHO DE 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022*.

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

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

Dedico este trabalho aos meus pais e irmão

“What we anticipate seldom occurs; what we least expect generally happens”
Benjamin Disraeli

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não teria sido possível sem o apoio e acompanhamento de algumas pessoas, às quais gostaria de agradecer:

Ao meu orientador, Professor Doutor Humberto Varum, pela orientação neste trabalho, ensinamentos transmitidos e pela sua frequente disponibilidade demonstrada sempre que fosse necessário resolver um problema.

Ao meu orientador na empresa A400 – Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda., Engenheiro José Lopes, pela oportunidade proporcionada e acompanhamento ao longo deste trabalho.

Agradecer aos meus colegas de gabinete por me terem acolhido da melhor forma possível, estando sempre disponíveis para me ajudar aliado aos momentos de partilha e descontração proporcionados. Agradecer ao Engenheiro Fernando Miranda pela paciência e ensinamentos na área da programação, fundamentais para a realização do projeto.

Ao Engenheiro António Monteiro, por me ter recebido e dado a possibilidade de realizar a minha dissertação em ambiente empresarial.

Por fim, agradecer claro, aos meus pais, irmão e a todos os meus amigos que me acompanham sempre e me dão força e incentivo, guiando e apoiando em todas as minhas decisões.

RESUMO

A presente dissertação destina-se a desenvolver uma ferramenta computacional inserida no software de BIM, o Revit, com o objetivo de a mesma verificar e validar as normas prescritas no Eurocódigo 8 no dimensionamento sísmico de paredes estruturais de betão armado, para a classe de ductilidade média (DCM).

O programa criado bem como todo o trabalho inerente à concretização do objetivo final, foi realizado em ambiente empresarial, na A400 – Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda. Desta forma, inspirado em programas anteriormente desenvolvidos na empresa foi possível elaborar uma ferramenta nova em linguagem de programação avançada *C#*, no software *Microsoft Visual Studio*, permitindo a utilidade e o auxílio em projetos de engenharia sísmica.

Ao longo do documento são discriminados, segundo o Eurocódigo 8, as características da ação sísmica e as normas a cumprir para o dimensionamento de paredes resistentes, verificadas pelo programa produzido.

Foi ainda idealizado um edifício modelado tridimensionalmente em Revit para a aplicação da ferramenta criada e utilizado um programa de cálculo automático, ETABS, para caracterização da estrutura e dos esforços gerados devido à ação sísmica considerada.

Garantido o bom e correto funcionamento da ferramenta BIM gerada, é possível com alguma facilidade averiguar quais as regras que violam as condições do Eurocódigo 8, modificando ou reajustando a norma não verificada no modelo Revit até que o requisito seja cumprido. Percebe-se, portanto, a vantagem de uma ferramenta como esta em projetos de engenharia, proporcionando otimização de processos e tempo despendido.

PALAVRAS-CHAVE: Engenharia Sísmica, Eurocódigo 8, ETABS, BIM, *C#*.

ABSTRACT

The current dissertation aims to develop a computational tool inserted in the BIM software (Revit) in order to check and validate the prescribed norms into Eurocode 8 in the seismic dimensioning of reinforced concrete structural walls to the medium ductility class (DCM).

The program created as well as all the work inherent to the achievement of the final goal took place in a business environment at A400 – Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda. Thus, inspired by programs previously developed in the company, it was possible to elaborate a new tool in an advanced programming language C#, in Microsoft Visual Studio software, allowing an usefulness and assistance in seismic engineering projects.

Throughout the document are discriminated, according to Eurocode 8, the characteristics of the seismic action and the norms to respect the dimensioning of resistant walls, validated by the program created.

It was also idealized a building three-dimensionally modeled in Revit in order to test the tool created and used an automatic calculation program (ETABS) to feature the structure and the efforts generated by the seismic action.

Guaranteed the good and correct functionality of the BIM tool it was possible to ascertain which rules were violating the Eurocode 8 conditions, modify and readjust them in the Revit model until the requirement was achieved. Therefore, it was demonstrated the advantage of a tool like this in engineering projects as it provides a huge optimization in the process and time spent.

KEYWORDS: Seismic Engineering, Eurocode 8, ETABS, BIM, C#.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2 PRESSUPOSTOS DO EC8	3
2.1 INTRODUÇÃO.....	3
2.2 DESEMPENHO DA ESTRUTURA E CRITÉRIOS DE CONFORMIDADE	3
2.3 AÇÃO SÍSMICA.....	4
2.3.1 CONDIÇÕES DO TERRENO	4
2.3.2 ZONAS SÍSMICAS	4
2.3.3 CLASSES DE IMPORTÂNCIA E COEFICIENTES DE IMPORTÂNCIA	7
2.3.4 REPRESENTAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DA AÇÃO SÍSMICA	8
2.3.4.1 Espectro de resposta elástica	8
2.3.4.2 Espectro de cálculo para análise elástica	11
2.3.5 COMBINAÇÃO DA AÇÃO SÍSMICA COM OUTRAS AÇÕES	12
2.3.6 COMBINAÇÃO DE EFEITOS DAS COMPONENTES DA AÇÃO SÍSMICA	13
2.4 CONCESSÃO DE EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO	14
2.4.1 ASPETOS GERAIS DE CONCESSÃO	14
2.4.2 ELEMENTOS ESTRUTURAS SISMO-RESISTENTES	15
2.4.3 REGULARIDADE ESTRUTURAL	15
2.4.3.1 Critérios de regularidade em planta	15
2.4.3.2 Critérios de regularidade em altura	17
2.4.4 MODELAÇÃO	18
2.4.5 MÉTODOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL	19
2.4.5.1 Análise linear	19
2.4.5.2 Análise não linear	19
2.4.6 SISTEMAS ESTRUTURAIIS	19
2.4.7 DUCTILIDADE LOCAL	20

2.4.8	CLASSES DE DUCTILIDADE.....	21
2.4.9	COEFICIENTE DE COMPORTAMENTO.....	21
2.5	DIMENSIONAMENTO DE PAREDES PARA A CLASSE DCM.....	23
2.5.1	MATERIAIS	23
2.5.2	LIMITAÇÕES GEOMÉTRICAS	23
2.5.3	ESFORÇOS DE CÁLCULO	23
2.5.4	RESISTÊNCIA À FLEXÃO E AO ESFORÇO TRANSVERSO	25
2.5.5	DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS PARA DUCTILIDADE LOCAL	26
2.5.5.1	Zonas críticas	26
2.5.5.2	Requisito de ductilidade local.....	26
2.5.5.3	Comprimento do elemento de extremidade	28
2.5.5.4	Espessura das zonas confinadas.....	30
2.5.5.5	Armadura Transversal.....	30
2.5.5.6	Armadura longitudinal.....	31
2.6	RESUMO DAS VERIFICAÇÕES.....	32
3	CONSTRUÇÃO DO PROGRAMA	35
3.1	INTRODUÇÃO.....	35
3.2	FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA	35
3.2.1	PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS	35
3.2.2	RECOLHA DA INFORMAÇÃO.....	36
3.2.3	TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO.....	38
3.2.4	INTERFACE DO UTILIZADOR.....	40
4	CASO DE ESTUDO	43
4.1	INTRODUÇÃO.....	43
4.2	DESCRIÇÃO ESTRUTURAL	43
4.2.1	GEOMETRIA	43
4.2.2	MATERIAIS	45
4.2.3	AÇÕES.....	46
4.2.3.1	Ações verticais.....	46
4.2.3.2	Ação sísmica	46
4.3	MODELAÇÃO E ANÁLISE ESTRUTURAL	47
4.3.1	ANÁLISE MODAL.....	48
4.3.2	COMBINAÇÕES DE AÇÕES	49
4.3.3	VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA	50

4.4 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE COMPORTAMENTO	51
4.4.1 SISTEMA ESTRUTURAL	52
4.4.1.1 Pêndulo invertido	52
4.4.1.2 Torsionalmente flexível.....	52
4.4.2 CÁLCULO DO VALOR q	54
4.5 DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS	54
4.5.1 ESFORÇOS DE CÁLCULO	54
4.5.2 SOLUÇÃO DE ARMADURAS PARA AS PAREDES.....	56
5 VALIDAÇÃO E APLICAÇÃO DO PROGRAMA	61
5.1 INTRODUÇÃO.....	61
5.2 ARRANQUE DO PROGRAMA	61
5.2.1 INPUTS E SELEÇÃO DOS ELEMENTOS A VERIFICAR.....	62
5.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	63
5.3.1 ESTRUTURA E LEITURA DOS RESULTADOS	63
5.3.2 ELEMENTOS DE EXTREMIDADE.....	64
5.3.3 ELEMENTOS DA ALMA.....	65
6 CONCLUSÃO	67
6.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	67
6.2 PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS	A1
MÉTODOS DA CLASSE <i>REVITFUNCS</i>	A3
MÉTODOS DA CLASSE <i>MATERIAL</i> E <i>SEISMICPROP</i>	A7
MÉTODOS DA CLASSE <i>WALLDATA</i> , <i>WALLRESULTS</i> , <i>BOUNDARYELEMENTSRESULTS</i> E <i>WEBRESULTS</i>	A9
EXEMPLO DOS RESULTADOS OBTIDOS DO PROGRAMA <i>FLEXDESV</i> PARA PAREDES ESTRUTURAS	A15
DADOS PARA REALIZAÇÃO DAS VERIFICAÇÕES PELO EXCEL.....	A23
RESULTADOS DAS VERIFICAÇÕES REALIZADAS PELO EXCEL PARA ELEMENTOS DE EXTREMIDADE E ALMA DA PAREDE.....	A27
RESULTADOS DAS VERIFICAÇÕES REALIZADAS PELO PROGRAMA A TODAS AS PAREDES DO CASO DE ESTUDO PARA ELEMENTOS DE EXTREMIDADE E DE ALMA	A29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Zonamento sísmico em Portugal Continental. Ação sísmica Tipo 1 à esquerda e ação sísmica Tipo 2 à direita (NA-EC8, 2010).....	6
Figura 2.2 – Zonamento sísmico no Arquipélago da Madeira. Ação sísmica Tipo 1 (NA-EC8, 2010)...	6
Figura 2.3 – Zonamento sísmico no Arquipélago dos Açores. Ação sísmica Tipo 2 (NA-EC8, 2010) ...	7
Figura 2.4 – Forma do espectro de resposta elástica (EC8, 2010)	9
Figura 2.5 – Espectros de resposta elástica de Tipo 1 recomendados para terrenos dos tipos A a E, com 5% de amortecimento (EC8, 2010)	11
Figura 2.6 – Espectros de resposta elástica de Tipo 2 recomendados para terrenos dos tipos A a E, com 5% de amortecimento (EC8, 2010)	11
Figura 2.7 – Representação dos efeitos da ação devido à aplicação da ação sísmica segundo o eixo X e Y da estrutura	14
Figura 2.8 – Relação entre área do contorno do piso e a linha poligonal convexa que o envolve	16
Figura 2.9 – Dimensões máximas e mínimas em planta do edifício.....	16
Figura 2.10 – Modelo 2D por junção de bielas axialmente rígidas entre pórticos e/ou parede (Arêde, 2013)	18
Figura 2.11 – Modelo 3D de um sistema estrutural (Varum, 2021)	18
Figura 2.12 – Métodos de análise com diferentes graus de precisão, generalidade e complexidade .	19
Figura 2.13 – Envolvente de cálculo dos momentos fletores para sistemas de paredes (à esquerda) e sistemas mistos (à direita) (EC8, 2010)	24
Figura 2.14 – Envolvente de cálculo dos esforços transversos nas paredes de um sistema misto.....	25
Figura 2.15 – Armadura longitudinal nos elementos de extremidade (A_s) e na zona da alma (A_{sv})...	28
Figura 2.16 – Pormenor de distâncias nos elementos de extremidade.....	28
Figura 2.17 – Elemento de extremidade confinado de uma parede com bordos livres (EC8, 2010) ...	29
Figura 2.18 – Elemento de extremidade confiando desnecessário no caso de a parede ter um banzo transversal de grandes dimensões (EC8, 2010).....	30
Figura 2.19 – Espessura mínima de elementos de extremidade confinados (EC8, 2010).....	30
Figura 3.1 – Recolha da informação	36
Figura 3.2 – Exemplo de aplicação do <i>debug</i> para verificação do volume do núcleo de betão.....	36
Figura 3.3 – Trecho de código que armazena as informações provenientes do Revit.....	37
Figura 3.4 – Tratamento da informação	38
Figura 3.5 – Trecho de código para a classe <i>BoundaryElementsResults</i>	39
Figura 3.6 – Modelo de visualização principal	41
Figura 4.1 – Modelo 3D da estrutura (Revit).....	44

Figura 4.2 – Planta ao nível da Cobertura	44
Figura 4.3 – Planta ao nível da Fundação	44
Figura 4.4 – Corte 1-1	44
Figura 4.5 – Corte 2-2	45
Figura 4.6 – Corte 3-3	45
Figura 4.7 – Espectro de resposta de cálculo.....	47
Figura 4.8 – Modelo 3D da estrutura (ETABS)	47
Figura 4.9 – Primeiro modo de vibração (Translação em X)	48
Figura 4.10 – Segundo modo de vibração (Rotação)	49
Figura 4.11 – Terceiro modo de vibração (Translação em Y)	49
Figura 4.12 – Deslocamento do piso na direção Y	50
Figura 4.13 – Deslocamento do piso na direção X	50
Figura 4.14 – Deslocamento entre pisos na direção X	50
Figura 4.15 – Deslocamento entre pisos na direção Y	50
Figura 4.16 – Fluxograma para obtenção do valor q	51
Figura 4.17 – Nomenclatura e posição das paredes estruturais	55
Figura 4.18 – Envolvente de cálculo de momentos fletores (à esquerda) e esforço transversal (à direita) para as paredes Pa1 a Pa4.....	55
Figura 4.19 – Envolvente de cálculo de momentos fletores (à esquerda) e esforço transversal (à direita) para as paredes Pa5 e Pa6.....	56
Figura 4.20 – Nomenclatura das paredes por nível.....	56
Figura 4.21 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa1 a Pa4 para os níveis 1 e 2..	57
Figura 4.22 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa1 a Pa4 para o nível 3	57
Figura 4.23 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa1 a Pa4 para o nível 4	57
Figura 4.24 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa5 e Pa6 para o nível 1	58
Figura 4.25 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa5 e Pa6 para o nível 2	58
Figura 4.26 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa5 e Pa6 para os níveis 3 e 4..	58
Figura 4.27 – Vista 3D das armaduras em Revit	59
Figura 5.1 – Menu principal com o clique em “Walls Rebars”	61
Figura 5.2 – Inputs inseridos no programa	62
Figura 5.3 – Seleção dos elementos a verificar	63
Figura 5.4 – Exibição da cláusula do Eurocódigo	64
Figura 5.5 – Resultado das verificações para elementos de extremidade na parede Pa1	64
Figura 5.6 – Resultado das verificações para elementos da alma na parede Pa1	66

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Tipos de terreno	5
Quadro 2.2 – Aceleração máxima de referência agR (m/s ²) nas várias zonas sísmicas (EC8, 2010)...	6
Quadro 2.3 – Classes de importância para os edifícios (EC8, 2010)	8
Quadro 2.4 – Coeficientes de importância γI (NA-EC8, 2010)	8
Quadro 2.5 – Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para ação sísmica Tipo 1 (NA-EC8, 2010)	10
Quadro 2.6 – Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para ação sísmica Tipo 2 (NA-EC8, 2010)	10
Quadro 2.7 – Valores de φ para calcular $\Psi E, i$ (EC8, 2010)	13
Quadro 2.8 – Valor básico do coeficiente de comportamento q_0 para sistemas regulares em altura (EC8, 2010)	22
Quadro 2.9 – Valores para o fator de majoração $\alpha \alpha 1$ (EC8,2010)	22
Quadro 2.10 – Verificações de materiais	32
Quadro 2.11 – Verificações preliminares	33
Quadro 2.12 – Verificações na alma da parede.....	33
Quadro 2.13 – Verificações para elementos de extremidade da parede	34
Quadro 3.1 – Inputs e outputs de materiais e propriedades sísmicas.....	40
Quadro 4.1 – Dimensões dos elementos estruturais	43
Quadro 4.2 – Materiais e parâmetros	45
Quadro 4.3 – Ações verticais consideradas.....	46
Quadro 4.4 – Parâmetros para definição do espectro	47
Quadro 4.5 – Participações modais	48
Quadro 4.6 – Combinações usadas na análise	49
Quadro 4.7 – Massa nos pisos do edifício	52
Quadro 4.8 – Cálculo do fator I_s	52
Quadro 4.9 – Deslocamentos e rotações entre pisos (à esquerda); Valor das rigidezes translacionais e rotacionais (à direita)	53
Quadro 4.10 – Cálculo do fator r e verificação $r \geq I_s$	54
Quadro 5.1 – Dados considerados do modelo aplicados no programa.....	62
Quadro 5.2 – Informações da cláusula, do fator de segurança e do erro percentual do programa face a elementos de extremidade	65
Quadro 5.3 – Informações da cláusula, do fator de segurança e do erro percentual do programa face a elementos da alma	66

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

API	Application Programming Interface
BIM	Building Information Modeling
C#	Linguagem de programação
DCH	Ductility Class: High (Classe de Ductilidade Alta)
DCL	Ductility Class: Low (Classe de Ductilidade Baixa)
DCM	Ductility Class: Medium (Classe de Ductilidade Média)
EC0	Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas
EC1	Eurocódigo 1 – Ações em estruturas
EC2	Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão
EC8	Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos
Eq.	Equação
POO	Programação Orientada a Objetos
PP	Peso Próprio
RCP	Restantes Cargas Permanentes
3D	3 Dimensões
A_c	Área da secção transversal de betão
A_{sv}	Área total da armadura longitudinal na zona da alma
E_{cm}	Módulo de elasticidade secante do betão
E_s	Módulo de elasticidade do aço de uma armadura para betão armado
$E_{E,d}$	Valor de cálculo da ação sísmica
$G_{K,j}$	Valor característico da ação permanente j
I_s	Raio de giração da massa do piso em planta
J_{x_G}	Momento polar de inércia da massa do piso em planta em relação ao centro de gravidade do piso
$K_{torção}$	Rigidez de torção
K_w	Coeficiente que reflete o modo de colapso predominante nos sistemas estruturais
K_x	Rigidez lateral na direção x
K_y	Rigidez lateral na direção y
M	Massa do piso
M_{eff}	Massa modal efetiva
M_{Ed}	Valor de cálculo do momento fletor

M_{Ed}	Valor do momento fletor resultante da análise estrutural
M_{Rd}	Valor de cálculo do momento resistente
N_{Ed}	Valor de cálculo do esforço axial
N_{SPT}	Número de pancadas do ensaio de penetração SPT (Standard Penetration Test)
P_{tot}	Carga gravítica total devida a todos os pisos acima do piso considerado, incluindo este
Q_k	Sobrecarga
$Q_{K,i}$	Valor característico da ação variável i
$RZ_{piso\ i}$	Rotação nodal associado ao centro de massa do piso i
S	Coefficiente do solo
$S_d(T)$	Espetro de cálculo
$S_e(T)$	Espetro de resposta elástica
S_{max}	Máximo valor do coeficiente do solo
T	Período de vibração da estrutura
T_B	Limite inferior do período no ramo de aceleração espectral constante
T_C	Limite superior do período no ramo de aceleração espectral constante
T_D	Valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante
$UX_{piso\ i}$	Deslocamento nodal associado ao centro de massa do piso i
V_{Ed}	Valor de cálculo do esforço transversal
V_{Ed}	Valor do esforço transversal resultante da análise estrutural
V_{tot}	Força de corte sísmica total no piso considerado
a_g	Valor de cálculo da aceleração à superfície de um terreno do tipo A
a_{gR}	Valor de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno do tipo A
b_c, b_w	Largura bruta da secção transversal
b_o, h_o	Largura e altura do núcleo confinado, em relação ao eixo das cintas
b_{wo}	Espessura da alma de uma parede
c_u	Resistência ao corte não drenada do solo
d_{bL}	Diâmetro de um varão longitudinal
d_{bw}	Diâmetro de uma cinta
d_r	Valor de cálculo do deslocamento relativo entre pisos
e_{oi}	Distância entre o centro de rigidez e o centro de gravidade, medida segundo a direção i , perpendicular à direção de cálculo considerada
f_{cd}	Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
f_{ck}	Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 d de idade

f_{yd}	Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado
f_{yk}	Valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado
h	Altura entre pisos
h_{cr}	Altura da zona crítica acima da base da parede
h_s	Altura livre do piso
h_w	Altura da parede
l_c	Comprimento do elemento de extremidade
l_w	Comprimento da secção transversal da parede
n	Número total de varões longitudinais abraçados lateralmente por cintas ou ganchos
q	Coefficiente de comportamento
q_o	Valor básico do coeficiente de comportamento
r_x	Raio de torção na direção de cálculo y
r_y	Raio de torção na direção de cálculo x
s	Espaçamento entre armaduras transversais
s_v	Espaçamento ao longo do comprimento da secção transversal da parede
ω_v	Taxa mecânica de armadura vertical na zona da alma
ω_{wd}	Taxa mecânica volumétrica de armadura de confinamento
x_u	Profundidade do eixo neutro
α	Fator de eficácia do confinamento
α_0	Esbelteza predominante das paredes
α_1	Fator multiplicativo da ação sísmica horizontal de cálculo, na formação da primeira rótula plástica do sistema
α_u	Fator multiplicativo da ação sísmica horizontal de cálculo, na formação do mecanismo plástico global
β	Fração mínima de aceleração espectral de cálculo para análise elástica
γ_I	Coefficiente de importância
ϵ_{cu2}	Extensão última do betão não confinado
$\epsilon_{cu2,c}$	Extensão última do betão confinado
$\epsilon_{sy,d}$	Valor de cálculo da extensão de cedência do aço
η	Fator de correção de amortecimento, com valor médio unitário para 5% de amortecimento viscoso
θ	Coefficiente de sensibilidade ao deslocamento relativo entre pisos
μ_ϕ	Valor do fator de ductilidade em curvatura

ν	Coefficiente de redução que tem em conta o mais baixo período de retorno da ação sísmica
ν_d	Esforço normal reduzido
$\nu_{s,30}$	Velocidade média de propagação das ondas de corte, S, nos 30 metros superficiais do perfil do solo
p_h	Taxa de armadura horizontal
$p_{v,alma}$	Taxa de armadura longitudinal na zona da alma
$p_{v,EE}$	Taxa de armadura longitudinal para elementos de extremidade
Φ	Parâmetro adimensional dependendo do tipo de ocupação e atividades do edifício
$\Psi_{2,i}$	Fator para o valor quase-permanente da ação variável
$\Psi_{E,i}$	Coefficiente de combinação para ação variável i
ϕ_{cinta}	Diâmetro da cinta

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

Ao longo das décadas, a história da humanidade fica marcada pela perda de vidas humanas e edificações devido a múltiplos fenómenos de origem sísmica. Devido ao elevado grau de imprevisibilidade e a probabilidade de ocorrência num determinado local de um sismo, é importante que se considere nos edifícios uma boa resposta sísmica mitigando, assim, danos excessivos da estrutura que levem ao colapso total da mesma.

Face a esta premissa, foi aprovado pelo Comité Europeu de Normalização a EN 1998: Projeto de estruturas para resistência sísmica, usualmente designado de Eurocódigo 8, como sendo um conjunto de preâmbulos e regras que tal como o nome indica pretende idealizar uma estrutura sísmo-resistente, ou seja, uma estrutura resistente mas suficientemente dúctil aquando de um sismo. Nesta dissertação, utiliza-se a primeira de seis partes prescritas na norma (EN 1998-1), pormenorizando o dimensionamento de edifícios e obras de engenharia em zonas sísmicas.

No presente documento considera-se um conceito atual e inovador no projeto de planeamento e execução de um edifício, o *Building Information Modeling* (BIM). Trata-se de uma metodologia de trabalho a partir da criação de um modelo virtual 3D e equivalente ao edifício real, no qual os diferentes participantes de forma partilhada e contínua de informação, elaboram um modelo contendo todas as características físicas e operacionais relevantes para a obra. Sendo o BIM um processo de incorporação de informação e não um software, o Revit surge como uma ferramenta de valor e utilizada no corrente trabalho para a inserção e leitura de informação do modelo.

Aos dias de hoje, com o avanço constante e exponencial das tecnologias, a programação assume um papel principal nas diversas áreas de trabalho e a Engenharia Civil não é exceção. Assim, é importante que exista comunicação entre os demais ramos de engenharia, a fim de se desenvolver e criar ferramentas computacionais, visando melhorar a qualidade dos projetos de engenharia, os seus custos e ainda otimizar o tempo empregue nos mesmos.

1.2 OBJETIVOS

Desenvolvido em ambiente empresarial, na empresa A400 – Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda., a dissertação tem como propósito a criação de uma ferramenta computacional, inserida no software Revit, permitindo de forma fácil e automatizada no modelo 3D a verificação dos pressupostos do Eurocódigo 8 para paredes resistentes de betão armado, sujeitas à ação sísmica regulamentar.

Para a concretização do objetivo final, será necessário a construção de um caso de estudo para verificação do programa criado aplicável a qualquer estrutura, modelando um edifício tridimensional no programa de cálculo automático ETABS e em Revit, face algumas condicionantes.

O programa a produzir é escrito com recurso à linguagem de programação C# e inserido em Revit através de um *plug-in*, permitindo desta forma o melhoramento e valorização de uma ferramenta utilizada diariamente no projeto de edificações com base na engenharia sísmica.

O término do projeto será alcançado quando se verificar o correto funcionamento da ferramenta criada, na verificação das normas estabelecidas para paredes estruturais em edifícios resistentes ao sismo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em 6 capítulos, sendo o presente correspondente ao primeiro onde se faz um enquadramento do trabalho a desenvolver, os seus objetivos e a organização da dissertação.

No segundo capítulo é exposto e baseado no Eurocódigo 8 a caracterização da ação sísmica, os fundamentos para a concessão de um edifício de betão armado assim como as especificações para o dimensionamento de paredes estruturais para a classe de ductilidade média (DCM).

No terceiro capítulo é apresentada a construção do programa computacional, explicando como a recolha e o tratamento da informação é efetuado pelo programa e ainda a interface que o utilizador tem com o mesmo. São também apresentados alguns trechos de código empregues no desenvolvimento do algoritmo.

No quarto capítulo é exposto o caso de estudo fazendo-se uma descrição estrutural, a modelação, a análise estrutural realizada bem como o dimensionamento das armaduras. Acrescentar, determina-se e classifica-se o sistema estrutural para a obtenção do coeficiente de comportamento a aplicar na análise.

No quinto capítulo é apresentada a aplicação do programa ao caso de estudo do quarto capítulo, explicando o modo de inicialização do programa. São apresentados os resultados atingidos assim como a síntese da informação para cada norma do Eurocódigo, o fator de segurança e o erro percentual a cada verificação associado ao programa criado.

No sexto e último capítulo são enunciadas as conclusões resultantes do trabalho produzido e possíveis propostas para desenvolvimentos futuros.

2

PRESSUPOSTOS DO EC8

2.1 INTRODUÇÃO

Em Portugal, especialmente no arquipélago dos Açores e nas regiões centro e sul do país, o dimensionamento de um edifício tendo em consideração a atividade sísmica do local torna-se preponderante.

Nesse sentido, são estabelecidas normas e regras pelo “Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos”, salvaguardando/ mitigando efeitos que um sismo possa conferir sobre um determinado edifício, provocando perda de bens e materiais como perda de vidas humanas.

Sendo o objetivo desta dissertação o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que verifique e valide o dimensionamento sísmico em paredes de betão armado, são apresentados neste capítulo as disposições regulamentares para esse propósito.

2.2 DESEMPENHO DA ESTRUTURA E CRITÉRIOS DE CONFORMIDADE

O EC8 define, nas regiões sísmicas, dois requisitos fundamentais de desempenho que as estruturas devem apresentar face à ocorrência de uma ação sísmica, o requisito de não ocorrência de colapso, associado ao estado limite último, e o requisito de limitação de danos, referente ao estado de limitação de danos.

O requisito de não ocorrência de colapso determina que a estrutura projetada e construída deve manter a sua integridade estrutural e uma capacidade resistente residual depois do sismo, sem que a estrutura colapse (globalmente e localmente). Com vista a não pôr em perigo a segurança das pessoas, o EC8 define um estado limite último que deve verificar condições relativas a resistência, ductilidade, equilíbrio, estabilidade das fundações e juntas sísmicas. Acrescentar, não é necessário contabilizar efeitos de segunda ordem se o coeficiente de sensibilidade ao deslocamento entre pisos, θ , for inferior a 0,1 em todos os pisos. Se θ estiver compreendido entre 0,1 e 0,2 os efeitos de segunda ordem poderão ser avaliados de modo sintetizado, multiplicando os esforços sísmicos por um fator $1/(1-\theta)$. O coeficiente θ não deve ultrapassar o valor de 0,3.

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,1 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

em que:

- θ coeficiente de sensibilidade ao deslocamento relativo entre pisos;
- P_{tot} carga gravítica total devida a todos os pisos acima do piso considerado, incluindo este;
- d_r valor de cálculo do deslocamento relativo entre pisos;
- V_{tot} força de corte sísmica total no piso considerado;
- h altura entre pisos.

O requisito de limitação de danos determina que a estrutura deve, sem a ocorrência de danos de limitações de utilização, resistir a uma ação sísmica cuja probabilidade de ocorrência seja superior à ação sísmica de cálculo e que os custos sejam desproporcionalmente elevados em comparação com os da própria estrutura. O estado de limitação de danos está intrinsecamente associado a danos no qual a estrutura deixa de apresentar requisitos de utilização satisfatórias, com o EC8 a impor limites máximos no deslocamento entre pisos, designados de “drifts”, dado pela seguinte equação:

$$d_r \cdot v \leq 0,005h \quad (\text{Eq. 2.2})$$

em que:

- d_r valor de cálculo do deslocamento relativo entre pisos;
- h altura entre pisos;
- v coeficiente de redução que tem em conta o mais baixo período de retorno da ação sísmica. Os valores recomendados são 0,4 para as classes de importância III e IV e 0,5 para as classes de importância I e II.

2.3 AÇÃO SÍSMICA

2.3.1 CONDIÇÕES DO TERRENO

O tipo de terreno no qual o edifício está fundado, influenciará diretamente o comportamento das ações sísmicas sobre a estrutura, pois a velocidade de propagação das ondas varia com o meio em que se propagam. Para ter em conta as condições locais do terreno, o EC8 define vários tipos de terreno consoante o seu perfil estratigráfico e parâmetros geotécnicos determinados por ensaios in situ. No Quadro 2.1 está definido os tipos de terreno.

2.3.2 ZONAS SÍSMICAS

As autoridades nacionais dividem o território nacional em várias zonas sísmicas, dependendo do risco sísmico de um local. O Anexo Nacional presente no EC8, considera dois zonamentos sísmicos em função da proximidade ao epicentro (Figura 2.1 a Figura 2.3). Ter-se-á uma ação sísmica Tipo 1 num cenário em que se considera “afastado”, com epicentro na região Atlântica, e uma ação sísmica Tipo 2 para o cenário em que se considera “próximo”, com epicentro no território continental ou no arquipélago

dos Açores. Através dos mapas de zonamento a sismicidade é descrita por um valor de referência da aceleração máxima na base num terreno tipo A, a_{gR} (EC8, 2010) expresso no Quadro 2.2.

Quadro 2.1 – Tipos de terreno

Tipo de Terreno	Descrição do perfil estratigráfico	Parâmetros		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (pancadas/30 cm)	c_u (kPa)
A	Rocha ou formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material mais fraco à superfície.	> 800	–	–
B	Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade.	360 - 800	> 50	> 250
C	Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixo (cascalho) ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros.	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Depósitos de solos não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole e dura.	< 180	< 15	< 70
E	Perfil de solo com um estrado aluvionar superficial com valores de v_s do tipo C ou D e uma espessura entre cerca de 5 m e 20 m, situado sobre um estrato mais rígido com $v_s > 800$ m/s.			
S ₁	Depósitos constituídos ou contendo um estrato com pelo menos 10 m de espessura de argilas ou siltes moles com um elevado índice de plasticidade ($PI > 40$) e um elevado teor em água.	< 100 (indicativo)	–	10 - 20
S ₂	Depósitos de solo com potencial de liquefação, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terrenos não incluídos nos tipos A - E ou S ₁ .			

em que:

$v_{s,30}$ velocidade média de propagação das ondas de corte, S, nos 30 metros superficiais do perfil do solo;

N_{SPT} número de pancadas do ensaio de penetração SPT (Standard Penetration Test);

c_u resistência ao corte não drenada do solo.

Quadro 2.2 – Aceleração máxima de referência a_{gR} (m/s²) nas várias zonas sísmicas (EC8, 2010)

Ação sísmica Tipo 1 (afastado)		Ação sísmica Tipo 2 (próximo)	
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	–	–

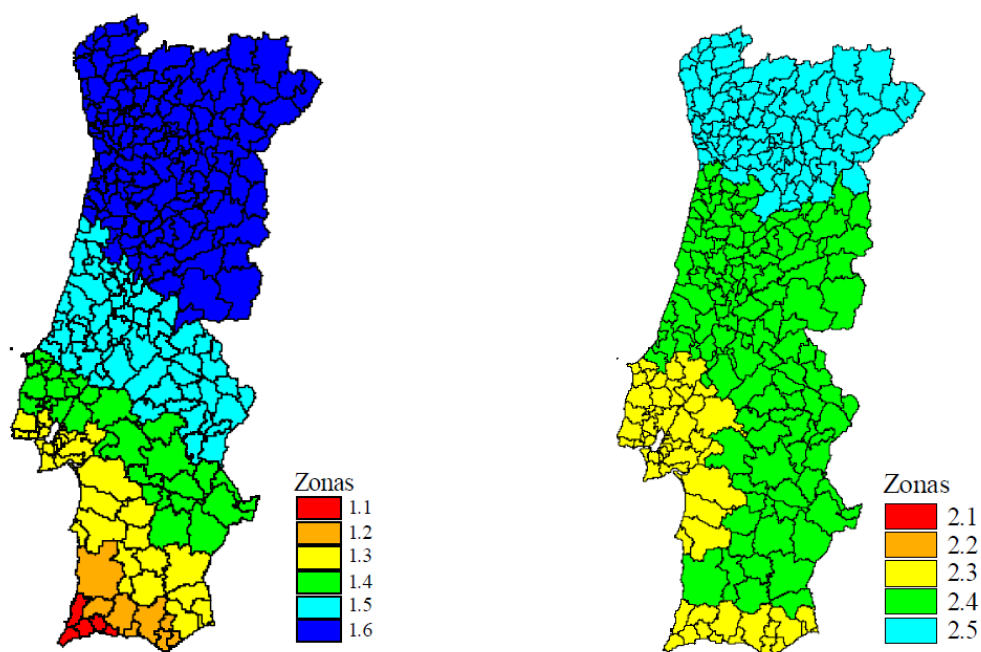


Figura 2.1 – Zonamento sísmico em Portugal Continental. Ação sísmica Tipo 1 à esquerda e ação sísmica Tipo 2 à direita (NA-EC8, 2010)

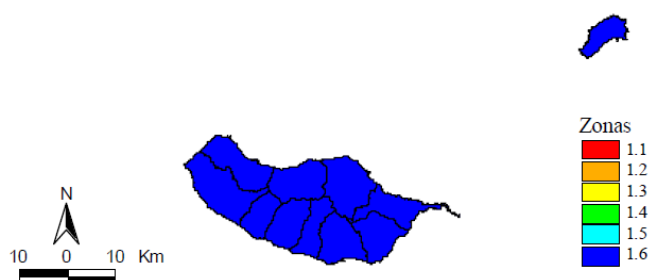


Figura 2.2 – Zonamento sísmico no Arquipélago da Madeira. Ação sísmica Tipo 1 (NA-EC8, 2010)

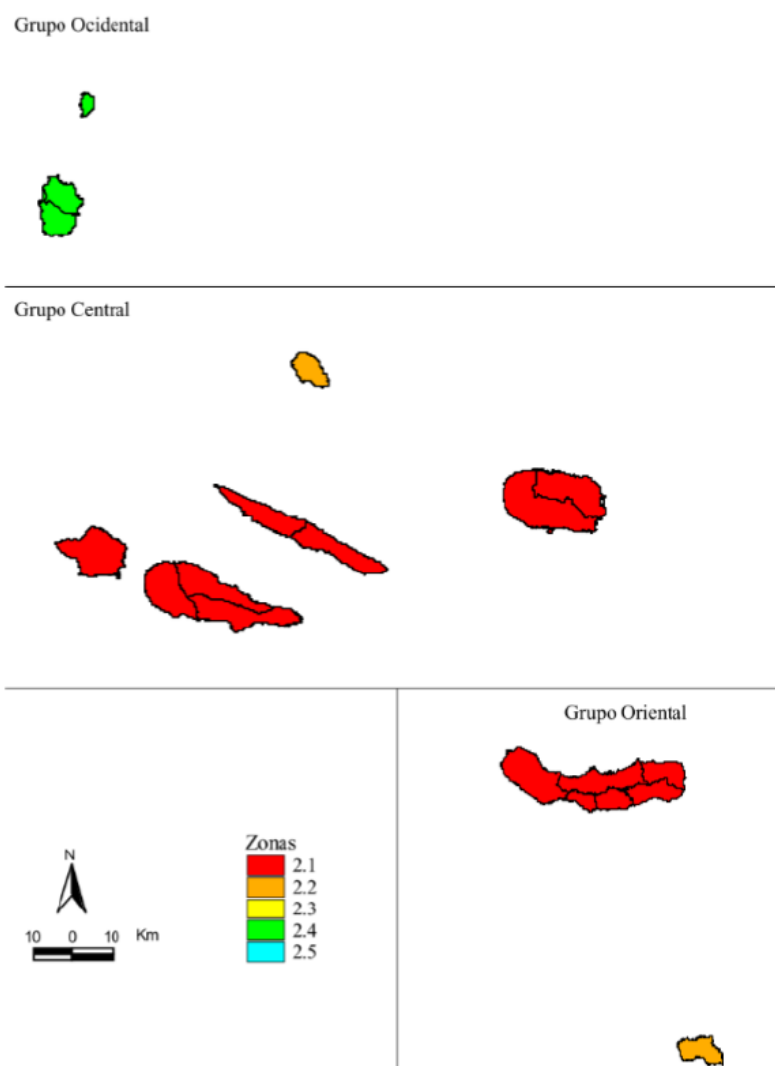


Figura 2.3 – Zonamento sísmico no Arquipélago dos Açores. Ação sísmica Tipo 2 (NA-EC8, 2010)

2.3.3 CLASSES DE IMPORTÂNCIA E COEFICIENTES DE IMPORTÂNCIA

A importância de um edifício garantir a sua operacionalidade na casualidade de ocorrência de um sismo está classificada segundo o EC8 em 4 classes de importância (Quadro 2.3). No Anexo Nacional são especificados coeficientes de importância associados a cada classe (Quadro 2.4), que multiplicado pelo valor a_{gR} , visam minorar ou majorar o valor de cálculo da aceleração à superfície de um terreno do tipo A, a_g (EC8, 2010), dada pela Eq. 2.3, usado na quantificação da ação sísmica, especificado em 2.3.4 da presente dissertação.

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Quadro 2.3 – Classes de importância para os edifícios (EC8, 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 proteção civil, como por exemplo hospitais, quartéis dos bombeiros, centrais elétricas, etc.

Quadro 2.4 – Coeficientes de importância γ_I (NA-EC8, 2010)

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

2.3.4 REPRESENTAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DA AÇÃO SÍSMICA

Com o propósito de se definir o movimento sísmico num dado ponto da superfície do terreno para o dimensionamento e verificação de estruturas sismo-resistentes, o EC8 define um espectro de resposta em termos de deslocamentos, velocidades ou acelerações, que caracteriza graficamente as respostas máximas do conjunto dos sistemas de 1 grau de liberdade.

2.3.4.1 Espectro de resposta elástica

Para representação das componentes horizontais e para os 2 tipos de ação sísmica, os 4 ramos do espectro de resposta elástica, $S_e(T)$ (EC8, 2010), retratado na Figura 2.4, é definido pelas seguintes expressões:

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (\text{Eq. 2.5})$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$$T_C \leq T \leq 4s: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \quad (\text{Eq. 2.7})$$

em que:

$S_e(T)$ valor do espectro de resposta elástica;

T período de vibração da estrutura;

a_g valor de cálculo da aceleração à superfície de um terreno do tipo A;

T_B limite inferior do período no ramo de aceleração espectral constante;

T_C limite superior do período no ramo de aceleração espectral constante;

T_D valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante;

S coeficiente do solo;

η fator de correção de amortecimento, com valor médio unitário para 5% de amortecimento viscoso.

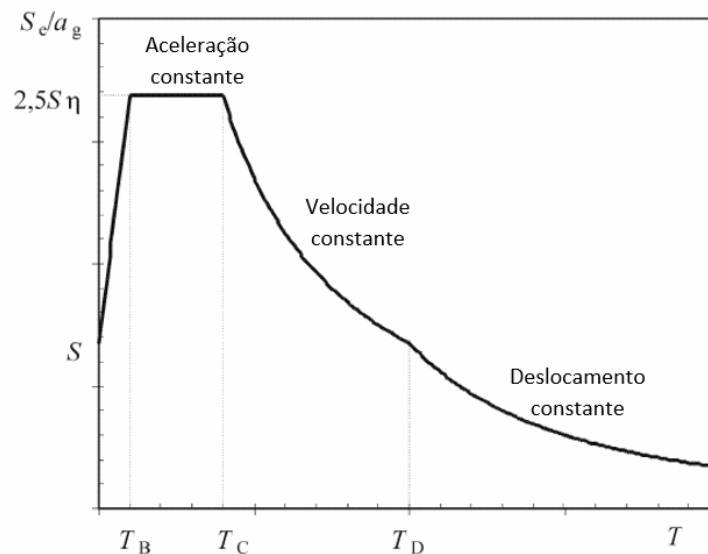


Figura 2.4 – Forma do espectro de resposta elástica (EC8, 2010)

Para a determinação do parâmetro S , é definido no Anexo Nacional a Eq. 2.8 tendo em conta o valor de cálculo da aceleração à superfície de um terreno do tipo A, a_g , através de:

$$\begin{cases} a_g \leq 1 \text{ m/s}^2 & S = S_{max} \\ 1 \text{ m/s}^2 < a_g < 4 \text{ m/s}^2 & S = S_{max} - \frac{S_{max} - 1}{3} (a_g - 1) \\ a_g \geq 4 \text{ m/s}^2 & S = 1,0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

em que:

a_g valor de cálculo da aceleração à superfície de um terreno do tipo A, em m/s^2 ;

S_{max} máximo valor do coeficiente do solo.

Os valores T_B , T_C , T_D e S_{max} são definidos no Anexo Nacional em função do tipo de ação sísmica e do terreno em que a estrutura se encontra, sendo retratados nos Quadro 2.5 e Quadro 2.6.

Quadro 2.5 – Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para ação sísmica Tipo 1 (NA-EC8, 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

Quadro 2.6 – Valores dos parâmetros definidores do espectro de resposta elástico para ação sísmica Tipo 2 (NA-EC8, 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

Com todos os parâmetros definidos em função do tipo de terreno e de ação sísmica, aplicando as Eq. 2.4 a Eq. 2.7, obtém-se os espectros de resposta elástica para terrenos dos tipos A a E, tanto para a ação sísmica tipo 1 como para a ação sísmica tipo 2 (Figura 2.5 e Figura 2.6).

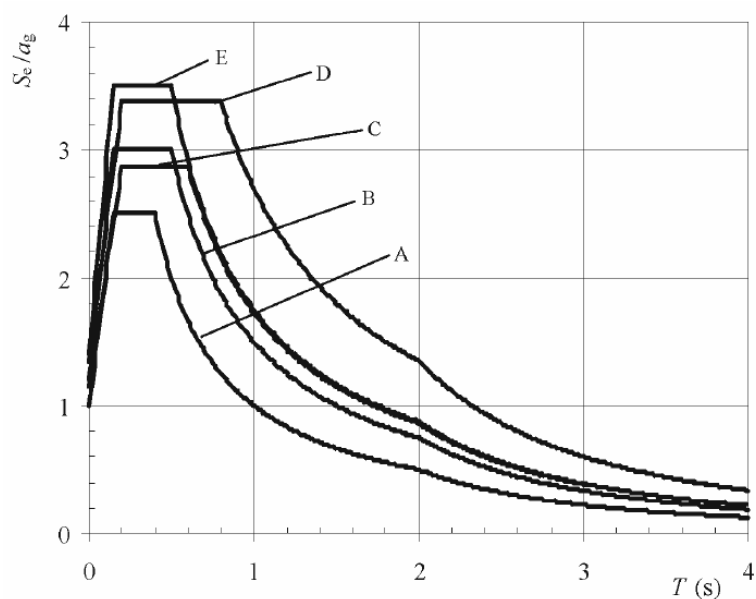


Figura 2.5 – Espectros de resposta elástica de Tipo 1 recomendados para terrenos dos tipos A a E, com 5% de amortecimento (EC8, 2010)

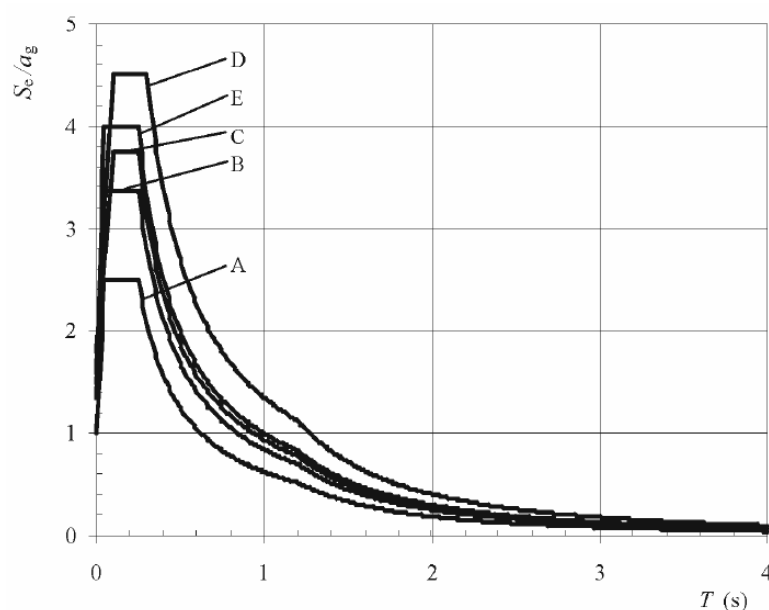


Figura 2.6 – Espectros de resposta elástica de Tipo 2 recomendados para terrenos dos tipos A a E, com 5% de amortecimento (EC8, 2010)

2.3.4.2 Espectro de cálculo para análise elástica

O facto de as estruturas serem constituídas por alguns materiais dúcteis como o aço, que geralmente apresentam uma reserva de resistência para além do limite elástico, leva a que a estrutura apresente mecanismos de dissipação de energia face ao surgimento de uma ação sísmica, ou seja, é possível realizar uma análise elástica linear no domínio não linear, considerando para o cálculo do espectro de

resposta elástica, de agora em diante designado de espectro de cálculo (EC8, 2010), ações sísmicas inferiores às que corresponderiam a uma resposta elástica linear, verificado anteriormente.

O espectro de cálculo, $S_d(T)$ (EC8,2010), para análise elástica resulta do espectro de resposta elástica, dividindo por um coeficiente de comportamento, q (EC8, 2010), que reduz as forças obtidas numa análise linear de modo a ter em conta a resposta não linear de um sistema estrutural, ajustado para 5% de amortecimento viscoso.

As funções que caracterizam o espectro de cálculo para as componentes horizontais da ação sísmica, são definidas pelas seguintes expressões:

$$0 \leq T \leq T_B \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (\text{Eq. 2.9})$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

$$T_D \leq T \quad S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

em que:

a_g, S, T, T_B, T_C e T_D definidos em 2.3.4.1;

$S_d(T)$ espectro de cálculo;

q coeficiente de comportamento;

β fração mínima de aceleração espectral de cálculo para análise elástica, com valor recomendado de 0,2.

2.3.5 COMBINAÇÃO DA AÇÃO SÍSMICA COM OUTRAS AÇÕES

Para o cálculo de massa da estrutura e de forma a avaliar os efeitos de inércia da ação sísmica de cálculo, o EC8 materializa um coeficiente de ocupação, φ e dado no Quadro 2.7, multiplicado pelo fator $\Psi_{2,i}$, resultando num coeficiente de combinação $\Psi_{E,i}$, dada pela Eq. 2.13, considerando desta forma a possibilidade de as cargas variáveis não estarem a atuar em toda a estrutura aquando da ocorrência de um sismo. Associado a este pressuposto, a combinação de ações é dada pela Eq. 2.14.

$$\Psi_{E,i} = \varphi \cdot \Psi_{2,i} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

em que:

φ parâmetro adimensional dependendo do tipo de ocupação e atividades do edifício;

$\Psi_{2,i}$ fator para o valor quase-permanente da ação variável, com valor de 0,3 para cargas variáveis da categoria de ocupação B (áreas de escritórios) e valor de 0 para ações de neve e vento (Anexo A1, EC0, 2002).

Quadro 2.7 – Valores de φ para calcular $\Psi_{E,i}$ (EC8, 2010)

Tipo de ação variável	Piso	φ
	Cobertura	1,0
Categorias A-C*	Pisos com ocupações correlacionadas	0,8
	Pisos com ocupações independentes	0,5
Categorias D-F* e arquivos		1,0

* Categorias definidas na EN 1991-1-1: 2002

$$\sum G_{K,j} + \sum \Psi_{E,i} \cdot Q_{K,i} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

em que:

$G_{K,j}$ valor característico da ação permanente j;

$Q_{K,i}$ valor característico da ação variável i;

$\Psi_{E,i}$ coeficiente de combinação para ação variável i,

" + " "a combinar com".

De modo a contemplar todas as ações que o sistema está exposto, define-se uma combinação global de ações para a situação de projeto sísmico, dada por:

$$\sum_{j \geq 1} G_{K,j} + E_{E,d} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{K,i} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

em que:

$E_{E,d}$ valor de cálculo da ação sísmica.

2.3.6 COMBINAÇÃO DE EFEITOS DAS COMPONENTES DA AÇÃO SÍSMICA

O EC8 define a ação sísmica horizontal por duas componentes ortogonais independentes que, em geral, atuam simultaneamente. Para tal, os esforços devidos à combinação das componentes horizontais são calculados pela Eq. 2.16 e Eq. 2.17, em que $E_{E,dx}$ e $E_{E,dy}$ representam os esforços devidos à aplicação da ação sísmica segundo o eixo X e Y da estrutura, respetivamente (Figura 2.7). De salientar, que cada combinação resulta de 100% da ação total nessa direção e 30% da ortogonal.

$$E_{E,dx} + 0,3 \cdot E_{E,dy} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

$$0,3 \cdot E_{E,dx} + E_{E,dy} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

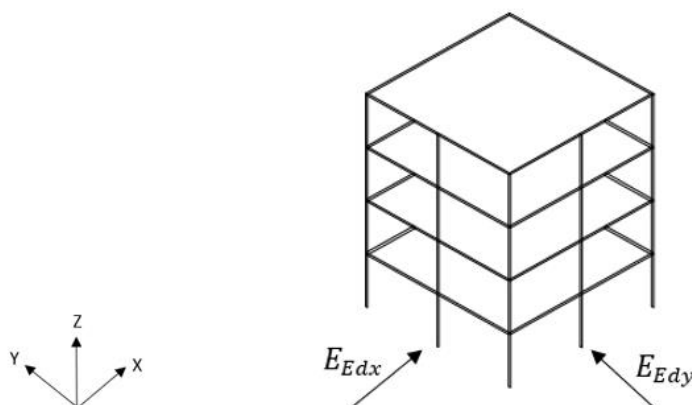


Figura 2.7 – Representação dos efeitos da ação devido à aplicação da ação sísmica segundo o eixo X e Y da estrutura

2.4 CONCESSÃO DE EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO

A concessão e pormenorização de um edifício são aspetos fundamentais para que este apresente um bom comportamento face a qualquer solicitação que possa surgir, estaticamente ou dinamicamente. Assim, neste subcapítulo são abordados e detalhados conceitos que se deve ter consideração aquando do dimensionamento de qualquer sistema estrutural.

2.4.1 ASPETOS GERAIS DE CONCESSÃO

A concessão de estruturas sismo-resistentes onde as ações horizontais tem um papel principal no comportamento da estrutura, é possível e com custos aceitáveis definir requisitos que visam otimizar o comportamento estrutural face às referidas ações, procurando implantá-los na definição arquitetónica do projeto, desde a fase inicial. Esses requisitos são (EC8, 2010):

- Simplicidade estrutural;
- Uniformidade, simetria e redundância estrutural;
- Resistência e rigidez nas duas direções;
- Resistência e rigidez à torção;
- Comportamento de diafragma rígido ao nível dos pisos;
- Fundações adequadas.

2.4.2 ELEMENTOS ESTRUTURAS SISMO-RESISTENTES

Os elementos classificados como estruturais são subdivididos em elementos primários e secundários, segundo o EC8. Segundo o livro “Desempenho sísmico de edifícios: lições de sismos recentes”, são considerados elementos primários, aqueles que fazem parte integrante do sistema resistente às ações sísmicas, fazendo parte do modelo estrutural de análise e sujeitos às regras de dimensionamento e detalhe especificado no regulamento EC8. Por outro lado, são considerados elementos secundários, aqueles que não precisam ser incluídos no modelo estrutural, mas no seu detalhe de projeto são dimensionados de forma atender aos deslocamentos impostos pelas ações sísmicas. A sua contribuição para a rigidez estrutural não deverá exceder 15% da que é conferida por todos os elementos sísmicos primários.

2.4.3 REGULARIDADE ESTRUTURAL

O EC8 sugere, tanto quanto possível, edifícios simples e regulares tanto em planta como em altura, isto porque, em sistemas estruturais mais complexos onde a regularidade é inexistente as variações de rigidez, resistência ou massa podem resultar em distribuições de forças horizontais e deformações significativamente diferentes comparativamente a um sistema regular.

A definição desta regularidade ou irregularidade estrutural, tem influência importante no modelo estrutural adotar (modelo plano simplificado ou modelo espacial), no método de análise (análise simplificada com espectros de resposta ou análise modal) e no valor do coeficiente de comportamento, sendo este mais reduzido no caso de estruturas irregulares em altura.

Os parâmetros que descrevem a regularidade em planta e em altura são discriminados nos seguintes subcapítulos.

2.4.3.1 Critérios de regularidade em planta

Um edifício diz-se regular em planta se as seguintes condições forem satisfeitas (EC8, 2010):

- A estrutura do edifício deve ser aproximadamente simétrica em planta em relação a dois eixos ortogonais;
- A configuração em planta deve ser compacta, ou seja, cada piso deve ser limitado por uma linha poligonal convexa. Se existirem recuos em relação a essa linha, a regularidade em planta pode ainda ser considerada, desde que os recuos não afetem a rigidez do piso no plano e se a área entre o contorno do piso e a linha poligonal convexa que o envolve, esquematicamente representado na Figura 2.8, não for superior a 5% da área do piso, dada pela Eq. 2.18;

$$\frac{A_r}{A_e} \leq 0,05 \quad (\text{Eq. 2.18})$$

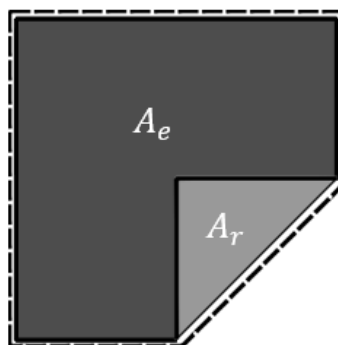


Figura 2.8 – Relação entre área do contorno do piso e a linha poligonal convexa que o envolve

- A rigidez em planta dos pisos deve ser suficientemente grande em relação à rigidez lateral dos elementos estruturais verticais. De forma a satisfazer a condição de diafragma rígido, formas L, C, H, I e X devem ser examinadas cuidadosamente;
- A esbelteza do edifício em planta não deve ser superior a 4, expresso na Eq. 2.19, sendo respetivamente, L_{max} e L_{min} a maior e a menor dimensão em planta do edifício, ilustrado na Figura 2.9.

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_{min}} \leq 4 \quad (\text{Eq. 2.19})$$

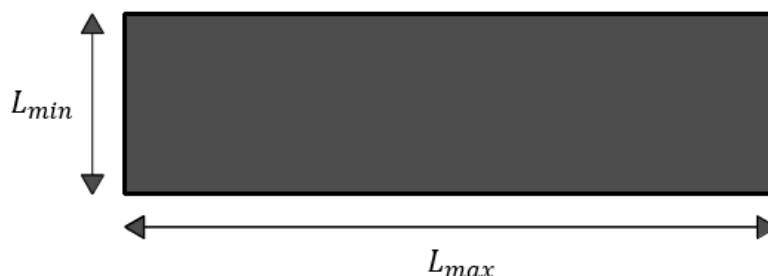


Figura 2.9 – Dimensões máximas e mínimas em planta do edifício

- Em cada nível e para cada direção de cálculo X e Y, a excentricidade estrutural e_0 e o raio de torção r devem estar de acordo com as condições abaixo:

Direção de cálculo y:

$$\begin{cases} e_{0x} \leq 0.3 \cdot r_x \\ r_x \geq I_s \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.20})$$

Direção de cálculo x:

$$\begin{cases} e_{0y} \leq 0.3 \cdot r_y \\ r_y \geq I_s \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.21})$$

em que:

e_{0x} distância entre o centro de rigidez e o centro de gravidade, medida segundo a direção x, perpendicular à direção de cálculo considerada;

e_{0y} distância entre o centro de rigidez e o centro de gravidade, medida segundo a direção y, perpendicular à direção de cálculo considerada;

r_x, r_y raio de torção na direção de cálculo y e x, respetivamente;

I_s raio de giração da massa do piso em planta.

Para que a rigidez à torção mínima seja garantida ($r \geq I_s$), nas duas direções, é necessário definir as variáveis envolvidas nessa verificação.

$$r_x = \sqrt{\frac{K_{torção}}{K_y}} \quad (\text{Eq. 2.22})$$

$$I_s = \sqrt{\frac{J_{xG}}{M}} \quad (\text{Eq. 2.23})$$

em que:

$K_{torção}$ rigidez de torção;

K_y rigidez lateral na direção y;

J_{xG} momento polar de inércia da massa do piso em planta em relação ao centro de gravidade do piso;

M massa do piso.

2.4.3.2 Critérios de regularidade em altura

Um edifício diz-se regular em altura se as seguintes condições forem satisfeitas (EC8, 2010):

- Todos os sistemas resistentes a ações laterais são contínuos desde a fundação até ao topo do edifício, ou se existirem andares recuados a alturas diferentes, até ao topo da zona relevante do edifício;
- Tanto os sistemas resistentes a ações laterais são contínuos desde a fundação até ao topo do edifício, ou se existirem andares recuados a alturas diferentes, até ao topo da zona relevante do edifício;

- Em edifícios com estrutura porticada, a relação entre a resistência real do piso e a resistência exigida pelo cálculo não deve variar desproporcionalmente entre pisos adjacentes.

2.4.4 MODELAÇÃO

Para a correta idealização de um sistema estrutural, o modelo a adotar para o edifício consoante o seu grau de simplicidade, sendo o modelo 3D mais complexo que o modelo 2D, deverá representar adequadamente a distribuição de rigidez e de massa de modo que todos os modos de deformação e modos de inércia sejam corretamente representados face à ação sísmica.

Para um modelo 2D, pode-se considerar a associação de subestruturas planas de contraventamento numa só direção anexando bielas axialmente rígidas como elemento de ligação entre pórticos e/ou paredes (Figura 2.10). Este modelo é adequado para estruturas simétricas e quando se pretende uma abordagem mais simplificada e prática comparativamente a uma modelagem 3D.

O modelo 3D ou espacial (Figura 2.11), exige dificuldade acrescida em analisar e sistematizar resultados, modelando vigas e pilares por elementos de barra com 6 graus de liberdade em cada nó e introdução de elementos finitos de laje e casca para lajes e paredes. Apesar da complexidade do modelo, é o mais comumente usado na prática e adequado para qualquer sistema estrutural, independentemente da sua geometria.

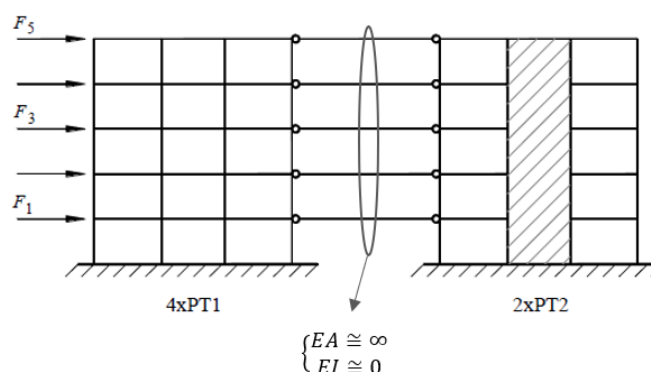


Figura 2.10 – Modelo 2D por junção de bielas axialmente rígidas entre pórticos e/ou parede (Arêde, 2013)

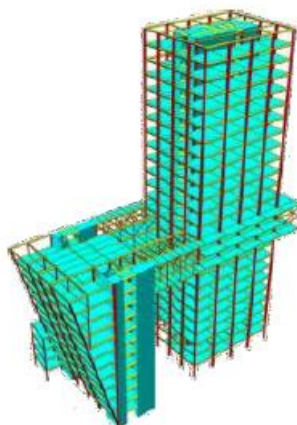


Figura 2.11 – Modelo 3D de um sistema estrutural (Varum, 2021)

2.4.5 MÉTODOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL

2.4.5.1 Análise linear

Sabendo que a natureza e o comportamento estrutural é não linear, no campo das estruturas a análise e a forma de pensar tende a ser linear. No entanto, esta premissa não é necessariamente um inconveniente, pois dada a complexidade de uma abordagem não linear, a linearização permite-nos enfrentar problemas mais complexos através da aproximação do comportamento real das estruturas. A análise linear assenta num conjunto de relações lineares quer no contexto da teoria da elasticidade (corpos encarados como contínuos deformáveis) ou de teorias estruturais como a teoria das peças lineares (vigas, estruturas reticuladas) ou teoria de peças laminares (placas, lajes ou cascas) (Corrêa, 2016).

Neste contexto e em função das características estruturais do edifício, poderá utilizar-se dois métodos de análise: método de análise por forças laterais e análise modal por espectro de resposta. Como método de referência para análise estrutural admite-se a análise modal por espectro de resposta, considerando uma análise elástica linear e o espectro de cálculo, exposto em 2.3.4.2.

Deste modo e para esta análise, devem ser consideradas as respostas de todos os modos de vibração que contribuem significativamente para a resposta global da estrutura, desde que, todos os modos com massas modais efetivas superiores a 5% da massa total e a soma das massas para os modos considerados superior a 90% da massa total da estrutura.

2.4.5.2 Análise não linear

Em alternativa a um método linear, poderão utilizar-se métodos não lineares, os quais preveem o melhor comportamento da estrutura face à ocorrência de um sismo. Apesar da sua complexidade em virtude de muitos aspetos que podem ou não ser contemplados e diversas formas de modelar cada um desses aspetos, recorrendo a mais ou menos idealizações/simplificações (Corrêa, 2016). O EC8 apresenta a análise estática não linear (*pushover*) e a análise temporal não linear como métodos de análise não linear, desde que as mesmas sejam devidamente fundamentadas face à ação sísmica, ao modelo construtivo utilizado e ao método de interpretação dos resultados de análise.

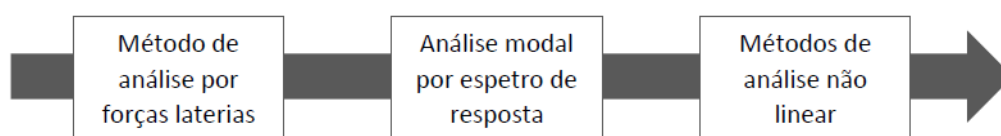


Figura 2.12 – Métodos de análise com diferentes graus de precisão, generalidade e complexidade

2.4.6 SISTEMAS ESTRUTURAIS

Os edifícios em virtude do seu comportamento sob as ações sísmicas horizontais são classificados segundo um sistema estrutural, que há exceção do sistema torsionalmente flexível, os edifícios podem ser classificados numa determinada direção por um sistema estrutural e segundo outra direção por outro tipo de sistema estrutural. Afeto a cada sistema estão associados parâmetros (classes de ductilidade, regularidade em altura, etc.) que permitem determinar o valor máximo do coeficiente de comportamento utilizado na quantificação da ação sísmica. Os sistemas estruturais são (EC8, 2010):

- **Sistema porticado:** Sistema em que a resistência é principalmente assegurada, tanto às ações verticais como às horizontais, por pórticos espaciais onde a resistência à força de corte na base é superior a 65% da resistência total à força de corte de todo o sistema estrutural;
- **Sistema de paredes:** Sistema em que a resistência é principalmente assegurada, tanto às ações verticais como às horizontais, por paredes estruturais verticais, acopladas ou não, onde a resistência à força de corte na base do edifício é superior a 65% da resistência total à força de corte de todo o sistema estrutural. Este sistema subdivide-se em dois, sistema de paredes acopladas e não acopladas. O primeiro, constituído por duas ou mais paredes simples ligadas por vigas de ductilidade adequada capazes de reduzir em pelo menos 25% a soma dos momentos flectores na base de cada parede caso as mesmas funcionassem isoladamente. Já o sistema de paredes não acoplado, apresenta apenas uma parede em cada direcção;
- **Sistema misto:** Sistema em que a resistência às ações verticais é garantida por pórticos espaciais e em relação às ações horizontais é assegurada em parte pelo sistema porticado e em parte por paredes estruturais, acopladas ou não. Este sistema é também subdividido em dois, um equivalente a sistema porticado, no qual a resistência do sistema porticado à força de corte na base do edifício é superior a 50% da resistência total à força de corte de todo o sistema estrutural; e um equivalente a sistema de paredes, onde a resistência das paredes à força de corte na base do edifício é superior a 50% da resistência sísmica de todo o sistema estrutural;
- **Sistema torsionalmente flexível:** Sistema misto ou sistema de paredes que não apresenta rigidez à torção mínima. Para o sistema não ser considerado torsionalmente flexível, a comparação ($r \geq I_s$), descrita em 2.4.3.1, deverá ser cumprida;
- **Sistema de pêndulo invertido:** Sistema que 50% ou mais da massa se localiza no terço superior da altura ou no qual o principal mecanismo de dissipação de energia tem lugar na base de um edifício de um único elemento do edifício.

2.4.7 DUCTILIDADE LOCAL

Nas zonas de potencial formação de rótulas plásticas deve-se assegurar uma elevada capacidade de rotação plástica, isto é, em zonas críticas dos elementos sísmicos primários deve ser garantida uma ductilidade suficiente em curvatura, assim como, impedimento da encurvadura local das armaduras comprimidas. São também controladas qualidades adequadas do betão e do aço para satisfazer a ductilidade local (EC8, 2010):

- Nas zonas críticas dos elementos sísmicos primários o aço a empregar deverá ter uma extensão plástica uniforme elevada;
- Nas zonas críticas dos elementos sísmicos primários a relação entre a tensão de rotura à tração e a tensão do aço deverá ser superior à unidade;
- Nos elementos sísmicos primários o betão deverá apresentar uma resistência à compressão adequada e ainda uma extensão na rotura que exceda a extensão correspondente à resistência à compressão máxima.

É assegurada uma ductilidade suficiente em curvatura se o fator de ductilidade em curvatura, μ_ϕ (EC8, 2010), para cada zona crítica for, pelo menos, igual a uma das seguintes equações:

$$\mu_{\phi} = 2q_o - 1 \quad \text{se } T_1 \geq T_C \quad (\text{Eq. 2.24})$$

$$\mu_{\phi} = 1 + 2(q_o - 1) T_C / T_1 \quad \text{se } T_1 < T_C \quad (\text{Eq. 2.25})$$

em que:

q_o valor básico do coeficiente de comportamento;

T_1 período fundamental do edifício;

T_C limite superior do período no ramo de aceleração espectral constante.

2.4.8 CLASSES DE DUCTILIDADE

Aquando da ocorrência de um sismo, um sistema estrutural tem de ter uma adequada capacidade de dissipação de energia sem que a sua resistência global seja significativamente afetada. São então definidas, pelo EC8, três classes de ductilidade: a baixa (DCL), a média (DCM) e a alta (DCH)

Para situações de projeto no qual o local seja de baixa sismicidade, poderá considerar-se uma classe de ductilidade DCL (*Ductility Class: Low*) com o dimensionamento de estruturas de betão armado baseado nos pressupostos do EC2 sem qualquer exigência adicional do EC8.

Em casos que se exige um grau de flexibilidade e rigidez estrutural, respetivamente, mais elevado e mais reduzido, aplicam-se as classes DCM (*Ductility Class: Medium*) e DCL (*Ductility Class: High*) com o dimensionamento dos elementos estruturais segundo as disposições preconizadas no EC8.

Para cada classe de ductilidade, o espectro de resposta a utilizar é o principal aspeto diferenciador. Em estruturas de baixa ductilidade (estruturas rígidas) o espectro de resposta a utilizar é elástico. Para estruturas sísmo-resistentes de média e alta ductilidade é considerado um espectro de resposta elástica ajustado a um coeficiente de comportamento, q (EC8, 2010), tendo em conta a formação de rótulas plásticas nos elementos resistentes. O valor de q , que reduz ação sísmica significativamente, será tanto maior ou menor consoante a capacidade de dissipação de energia da estrutura, ou seja, quanto maior for o valor de q maior é ductilidade do sistema estrutural e menor é ação sísmica de cálculo.

2.4.9 COEFICIENTE DE COMPORTAMENTO

De forma a explorar as capacidades dissipativas dos materiais em regime não linear tendo em conta uma análise elástica linear, introduz-se um coeficiente de comportamento, q , sendo uma aproximação da razão entre as forças sísmicas a que a estrutura ficaria sujeita caso a resposta fosse apenas no domínio elástico, com 5% de amortecimento, e as forças sísmicas que poderão ser adotadas no projeto de dimensionamento.

O valor do coeficiente de comportamento é delimitado para as diferentes classes de ductilidade, com um valor máximo de 1,5 para a classe DCL e um valor superior a 1,5 para as classes DCM e DCH. Para estas duas últimas classes e para uma correta quantificação dos mecanismos de dissipação de energia, o coeficiente de comportamento deve ser determinado segundo o EC8, com base na Eq. 2.26.

$$q = q_o \cdot K_w \geq 1,5 \quad (\text{Eq. 2.26})$$

em que:

- q_0 valor básico do coeficiente de comportamento, dependente do sistema estrutural (Quadro 2.8);
 K_w fator que reflete o modo de rotura predominante nos sistemas estruturais de paredes.

Quadro 2.8 – Valor básico do coeficiente de comportamento q_0 para sistemas regulares em altura (EC8, 2010)

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

em que:

- α_u valor pelo qual a ação sísmica horizontal de cálculo é multiplicada para ser atingida pela primeira vez a resistência à flexão em qualquer elemento da estrutura, mantendo-se constantes todas as outras ações de cálculo;
 α_1 valor pelo qual a ação sísmica horizontal de cálculo é multiplicada para formar rótulas plásticas num número de secções suficiente para provocar a instabilidade global da estrutura, mantendo-se constantes todas as outras ações de cálculo.

Para sistemas não regulares em altura, o valor básico do coeficiente de comportamento deverá ser reduzido em 20 %, multiplicando os valores de referência por 0,8.

Quando o fator de majoração α_u/α_1 não estiver quantificado e para estruturas regulares em planta, poderão ser utilizados valores aproximados, apresentados no Quadro 2.9

Quadro 2.9 – Valores para o fator de majoração α_u/α_1 (EC8,2010)

Tipo estrutural	α_u/α_1	
Sistemas porticados ou sistemas mistos equivalentes a pórticos	Edifícios de um só piso	1,1
	Edifícios de vários pisos, pórticos com um só tramo	1,2
	Edifícios de vários pisos, pórticos ou sistemas mistos equivalentes a pórticos com vários tramos	1,3
Sistemas de paredes ou sistemas mistos equivalentes a paredes	Sistemas de paredes unicamente com duas paredes não acopladas em cada direção horizontal	1,0
	Outros sistemas de paredes não acopladas	1,1
	Sistemas mistos equivalentes a paredes ou sistemas de paredes acopladas	1,2

O modo de rotura predominante nos sistemas estruturais de paredes é dado pelo coeficiente K_w , determinado por (EC8, 2010):

$$k_w = \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ para sistemas porticados ou sistemas mistos equivalentes a pórticos} \\ \frac{1 + \alpha_0}{3} \leq 1, \text{ mas não inferior a } 0,5, \text{ para sistemas de paredes, sistemas} \\ \text{equivalentes a paredes e sistemas torsionalmente flexíveis} \end{array} \right\} \quad (\text{Eq. 2.27})$$

em que:

α_0 esbelteza predominante das paredes $\left(\frac{\sum h_{wi}}{\sum l_{wi}} \right)$.

2.5 DIMENSIONAMENTO DE PAREDES PARA A CLASSE DCM

2.5.1 MATERIAIS

O betão utilizado nos elementos primários deverá conter uma resistência à compressão adequada e uma extensão significativamente elevada. Assim, não se deve assumir uma classe de betão inferior a C16/20 (EC8, 2010). As armaduras de aço a empregar devem apresentar uma extensão plástica uniforme elevada, sendo o aço da classe B ou C, prescritas no Quadro C.1 do EC2. Importa salientar, nas zonas críticas dos elementos primários só é permitido o uso de varões nervurados, exceto se forem estribos fechados ou ganchos.

2.5.2 LIMITAÇÕES GEOMÉTRICAS

O EC8 define uma espessura mínima da alma da parede, dada pela seguinte expressão:

$$b_{wo} \geq \{0,15; h_s/20\} \quad (\text{Eq. 2.28})$$

em que:

b_{wo} espessura da alma;

h_s altura livre do piso.

2.5.3 ESFORÇOS DE CÁLCULO

Na determinação das envolventes de cálculo nas paredes, devem ser consideradas incertezas na distribuição de momentos fletores ao longo da altura de paredes sísmicas primárias esbeltas, com uma relação altura-comprimento da secção transversal superior a 2,0 (Eq. 2.29). Com isto, o EC8 propõe a construção de um diagrama para os valores de cálculo dos momentos fletores ao longo da altura da parede, obtido por uma envolvente do diagrama dos momentos fletores resultado da análise estrutural e deslocado verticalmente (“*tension shift*”), demonstrado na Figura 2.13.

$$\frac{h_w}{l_w} \geq 2,0 \quad (\text{Eq. 2.29})$$

em que:

h_w altura da parede;

l_w comprimento da secção transversal da parede.

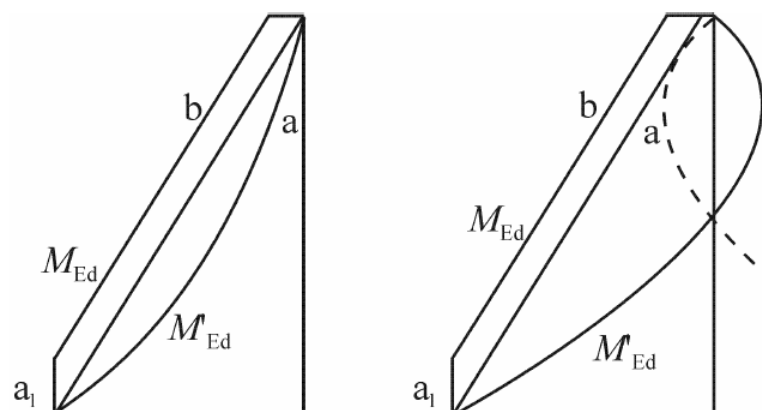


Figura 2.13 – Envolvente de cálculo dos momentos flectores para sistemas de paredes (à esquerda) e sistemas mistos (à direita) (EC8, 2010)

em que:

a diagrama dos momentos resultado da análise estrutural;

b envolvente de cálculo;

a_1 deslocamento vertical.

O esforço transversal segundo o EC8 deverá ser acautelado, ou seja, deve-se considerar a possibilidade de um aumento do seu valor após a formação de rótulas plásticas na base da parede. Em virtude desta condição, os valores de cálculo dos esforços transversos devem ser majorados em 50% em relação aos esforços transversos resultantes da análise estrutural.

$$V_{Ed} = 1,5 \cdot V'_{Ed} \quad (\text{Eq. 2.30})$$

em que:

V_{Ed} valor de cálculo do esforço transverso;

V'_{Ed} valor do esforço transverso resultante da análise estrutural.

No caso de sistemas mistos de paredes esbeltas, para a envolvente de cálculo dos esforços transversos deve-se utilizar o diagrama de acordo com a Figura 2.14, de forma a contabilizar as incertezas relacionadas com os efeitos dos modos mais elevados.

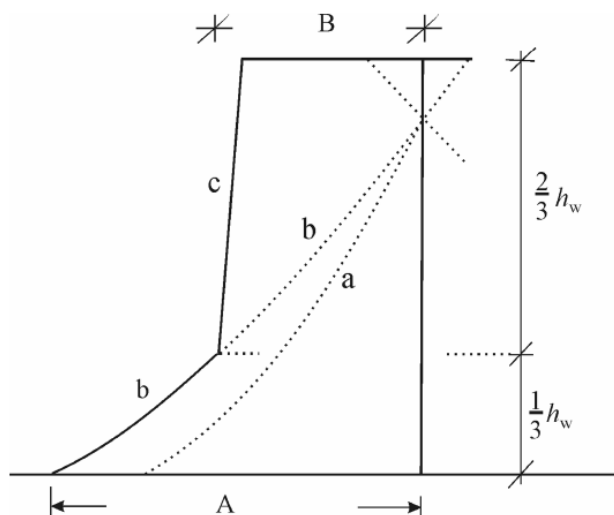


Figura 2.14 – Envolvente de cálculo dos esforços transversos nas paredes de um sistema misto

em que:

- a diagrama dos esforços transversos resultantes da análise estrutural;
- b diagrama dos esforços transversos majorados;
- c envolvente de cálculo;
- A esforço transverso da parede na base ($V_{parede,base}$);
- B esforço transverso da parede no topo ($V_{parede,topo} \geq V_{parede,base}/2$).

2.5.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO E AO ESFORÇO TRANSVERSO

Para que seja garantida uma ductilidade adequada e os efeitos de encurvadura local da parede reduzidos, o valor do esforço normal reduzido nas paredes sísmicas primárias não deverá ser superior a 0,4 (EC8, 2010):

$$v_d = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} \leq 0,4 \quad (\text{Eq. 2.31})$$

em que:

- v_d esforço normal reduzido;
- N_{Ed} valor de cálculo do esforço axial;
- A_c área da secção transversal de betão;

f_{cd} valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão.

2.5.5 DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS PARA DUCTILIDADE LOCAL

2.5.5.1 Zonas críticas

São consideradas zonas críticas o local onde, devido aos esforços mais significativos, se poderá formar rótulas plásticas e em que se define a sua altura como sendo o desenvolvimento h_{cr} a partir da base da parede, estabelecido por (EC8, 2010):

$$h_{cr} = \max\{l_w; h_w/6\} \quad (\text{Eq. 2.32})$$

em que:

h_{cr} altura da zona crítica acima da base da parede;

l_w comprimento da secção transversal da parede.

h_w altura da parede;

Contudo, o EC8 prescreve uma altura máxima da zona crítica dada pela Eq. 2.33.

$$h_{cr} \leq \min \begin{cases} 2 \cdot l_w & n \leq 6 \text{ pisos} \\ h_s & n \geq 7 \text{ pisos} \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.33})$$

em que:

h_s altura livre do piso e onde a base é definida como nível da fundação ou o topo de caves com diafragmas rígidos e paredes periféricas.

2.5.5.2 Requisito de ductilidade local

Para que seja satisfeito o requisito de ductilidade nas zonas críticas das paredes deverá utilizar-se um fator de ductilidade em curvatura μ_ϕ , descrito em 2.4.7, no qual o valor básico do coeficiente de comportamento q_o é substituído pelo produto q_o pelo valor máximo da relação M_{Ed}/M_{Rd} na base da parede, sendo M_{Ed} e M_{Rd} , respetivamente, o valor de cálculo do momento fletor resultado da análise e o valor de cálculo do momento resistente (EC8, 2010).

O fator de ductilidade em curvatura pode, no entanto, ser garantido por meio de armaduras de confinamento nas zonas de bordo da secção transversal, designadas por elementos de extremidade (EE), cuja extensão desde cada uma das extremidades da parede é definida por um comprimento l_c . Para a zona crítica na base das paredes sísmicas primárias, a taxa mecânica volumétrica de armadura de confinamento, ω_{wd} , nos elementos de extremidade deve cumprir a Eq. 2.34. O EC8 estabelece um valor mínimo de ω_{wd} igual a 0,08.

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_{\phi} \cdot (v_d + \omega_v) \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_o} - 0,035 \quad (\text{Eq. 2.34})$$

$$\omega_{wd} = \frac{\text{volume de cintas}}{\text{volume do núcleo de betão}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \quad (\text{Eq. 2.35})$$

$$\text{vol. cintas} = \frac{\pi \cdot \phi_{cinta}^2}{4} \cdot \sum l_{cinta} \quad (\text{Eq. 2.36})$$

$$\text{vol. núcleo} = b_o \cdot h_o \cdot s \quad (\text{Eq. 2.37})$$

$$\omega_v = \frac{\rho_{v,alma} \cdot f_{yd}}{f_{cd}} \quad (\text{Eq. 2.38})$$

$$\rho_{v,alma} = \frac{A_{sv}}{b_w \cdot s_v} \quad (\text{Eq. 2.39})$$

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s \quad (\text{Eq. 2.40})$$

Para secções transversais retangulares (paredes):

$$\alpha_n = 1 - \sum_i^n \frac{b_i^2}{6 \cdot b_o \cdot h_o} \quad (\text{Eq. 2.41})$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2 \cdot b_o}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2 \cdot h_o}\right) \quad (\text{Eq. 2.42})$$

em que:

- α fator de eficácia do confinamento;
- ω_{wd} taxa mecânica volumétrica de armadura de confinamento;
- μ_{ϕ} valor do fator de ductilidade em curvatura;
- v_d esforço normal reduzido;
- ω_v taxa mecânica de armadura vertical na zona da alma;
- $\varepsilon_{sy,d}$ valor de cálculo da extensão de cedência do aço (f_{yd}/E_s);
- f_{yd} valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado;
- f_{cd} valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão;

- b_c, b_w largura bruta da secção transversal;
- b_o, h_o largura e altura do núcleo confinado, em relação ao eixo das cintas;
- ϕ_{cinta} diâmetro da cinta;
- l_{cinta} comprimento da cinta, em relação ao eixo;
- s espaçamento entre armaduras transversais;
- $\rho_{v,alma}$ taxa de armadura longitudinal na zona da alma;
- A_{sv} área total da armadura longitudinal na zona da alma;
- s_v espaçamento ao longo do comprimento da secção transversal da parede;
- n número total de varões longitudinais abraçados lateralmente por cintas ou ganchos.

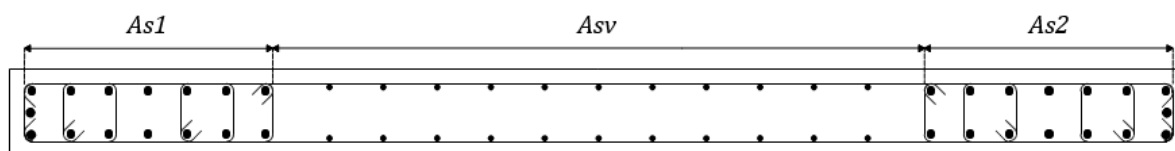


Figura 2.15 – Armadura longitudinal nos elementos de extremidade (A_s) e na zona da alma (A_{sv})

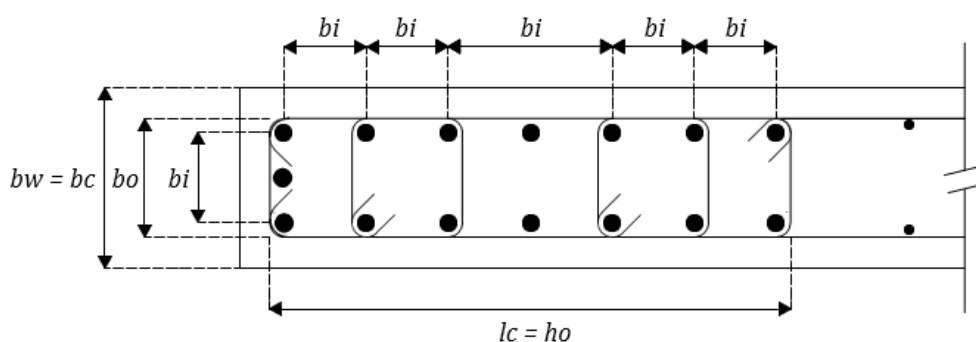


Figura 2.16 – Pormenor de distâncias nos elementos de extremidade

2.5.5.3 Comprimento do elemento de extremidade

Medido horizontalmente desde a fibra mais comprimida da parede até ao ponto onde devido às grandes extensões de compressão o betão não confinado possa destacar-se, o comprimento do elemento de extremidade, l_c , define-se por:

$$l_c = x_u \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2,c}}\right) \quad (\text{Eq. 2.43})$$

$$x_u = (v_d + \omega_v) \cdot \frac{l_w \cdot b_w}{b_o} \quad (\text{Eq. 2.44})$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = 0,0035 + 0,1 \cdot \alpha \cdot \omega_{wd} \quad (\text{Eq. 2.45})$$

em que:

l_c comprimento do elemento de extremidade;

x_u profundidade do eixo neutro;

ε_{cu2} extensão última do betão não confinado ($\varepsilon_{cu2} = 0,0035$);

$\varepsilon_{cu2,c}$ extensão última do betão confinado.

O comprimento do elemento de extremidade deverá ser superior a $0,15l_w$ ou a $1,50b_w$, respeitando assim o requisito do EC8.

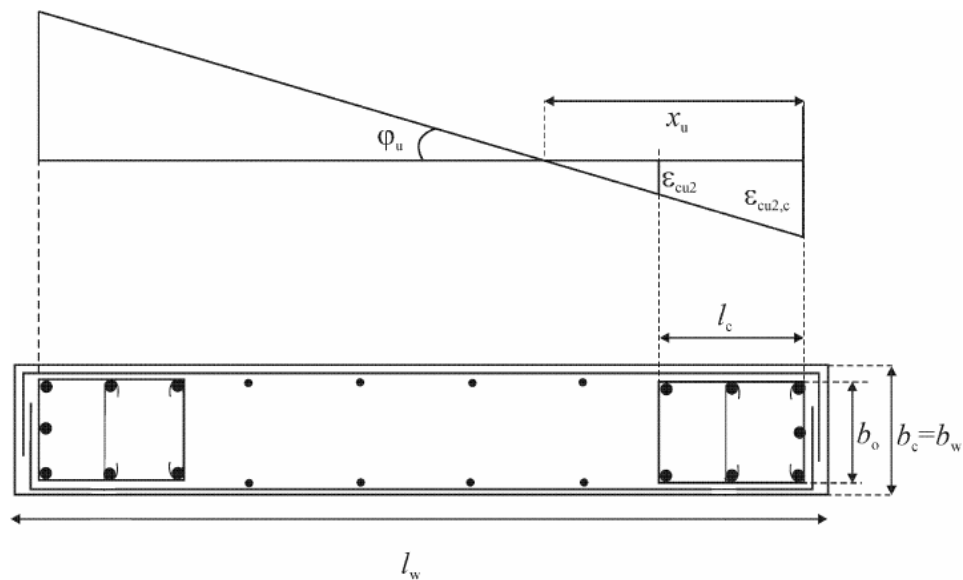


Figura 2.17 – Elemento de extremidade confinado de uma parede com bordos livres (EC8, 2010)

Em caso de uma parede com espessura b_f e largura l_f nos banzos superiores a $h_s/15$ e $h_s/5$, respetivamente, não é necessário um elemento de extremidade confinado nos banzos, como representado na Figura 2.18 (EC8, 2010).

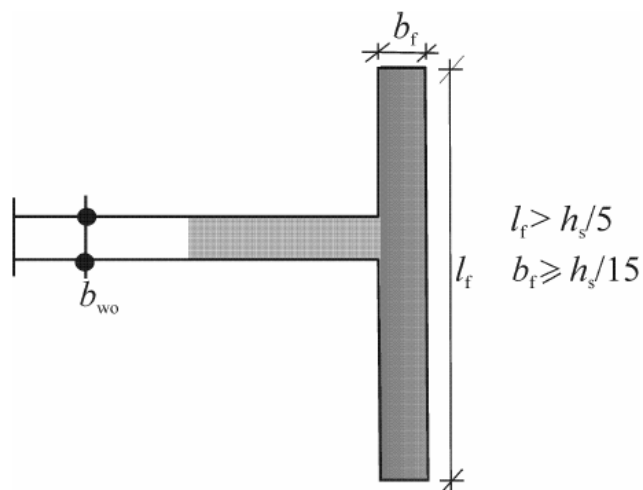


Figura 2.18 – Elemento de extremidade confiando desnecessário no caso de a parede ter um banzo transversal de grandes dimensões (EC8, 2010)

2.5.5.4 Espessura das zonas confinadas

Nos elementos de extremidade a espessura das partes confinadas da secção da parede, b_w , deverá no mínimo ser superior a 200 mm. Acrescentar, o EC8 limita a espessura de b_w consoante o comprimento da parte confinada l_c e associado à altura do piso, b_w . As condições impostas são pormenorizadas na Figura 2.19 e Figura 2.20.

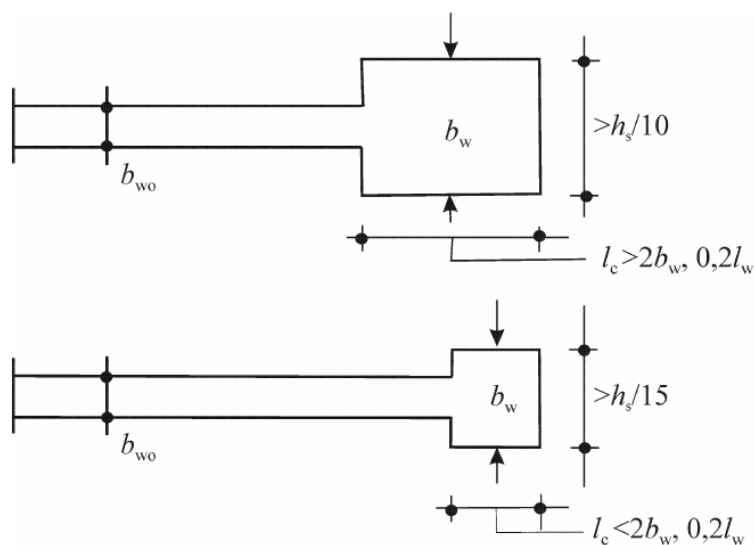


Figura 2.19 – Espessura mínima de elementos de extremidade confinados (EC8, 2010)

2.5.5.5 Armadura Transversal

Para os elementos de extremidade e onde a taxa de armadura longitudinal, $\rho_{v,EE}$, for superior a 2%, o EC8 sugere que o espaçamento da armadura transversal possa ser calculado de acordo com as disposições presentes no EC2 (Projeto de Estruturas de Betão), se uma das seguintes condições for validada:

- O valor do esforço normal reduzido, v_d , não é superior a 0,15;
- O valor v_d não é superior a 0,2 e o coeficiente q utilizado no cálculo é reduzido em 15%.

Verificada umas destas condições, o espaçamento das armaduras transversais pode ser determinado por:

- Até uma distância $4b_w$ acima ou abaixo de uma viga ou laje:

$$s \leq \min\{12d_{bL}; 0,6b_{wo}; 240mm\} \quad (\text{Eq. 2.46})$$

em que:

- s espaçamento armadura transversal;
- d_{bL} diâmetro mínimo dos varões longitudinais (milímetros);
- b_{wo} espessura da alma de uma parede.

- Além de uma distância $4b_w$:

$$s \leq \min\{20d_{bL}; b_{wo}; 400mm\} \quad (\text{Eq. 2.47})$$

Em alternativa, o referido espaçamento pode ser determinado pela Eq. 2.48, regulamentado no EC8, permitindo que se garanta um mínimo de ductilidade e travamento da encurvadura local dos varões verticais (EC8, 2010). Nestes elementos, deve-se utilizar uma armadura transversal constituída por pelo menos 4 estribos por m^2 da área da parede com cintas e ganchos de diâmetro d_{bw} superior ou igual a 6 milímetros ou a um quarto do diâmetro máximo dos varões longitudinais, d_{bL} (EC2, 2010).

$$s \leq \min\left\{\frac{b_o}{2}; 175mm; 8d_{bL}\right\} \quad (\text{Eq. 2.48})$$

De modo que o reforço ao corte na parede seja satisfatório, é necessário introduzir armaduras horizontais paralelas aos paramentos e aos bordos livres da parede em ambas as faces. A taxa de armadura horizontal, p_h , não deverá ser inferior ao máximo de 25% da taxa de armadura vertical na alma ou a 0,1% (EC2, 2010), com a distância recomendada entre dois varões horizontais adjacentes inferior a 400 milímetros.

$$p_h > \max\{25\% \cdot p_{v,alma}; 0,1\%\} \quad (\text{Eq. 2.49})$$

2.5.5.6 Armadura longitudinal

A taxa de armadura longitudinal para elementos de extremidade, $p_{v,EE}$, deverá estar compreendida entre 0,2% a 4%, referente à área mínima e máxima de armaduras verticais ($A_{sv,min}$ e $A_{sv,max}$) regulamentada

pelo EC2. Porém, nos elementos de extremidade, a taxa de armadura vertical não deverá ser inferior a 0,5% (EC8, 2010).

$$0,5\% \leq p_{v,EE} \leq 4\% \quad (\text{Eq. 2.50})$$

Na zona da alma da parede a taxa de armadura longitudinal segue as mesmas condicionantes do parágrafo anterior. Contudo, para situação de projeto sísmico quando a extensão de compressão ϵ_c é superior a 0,002 em partes da secção, deve-se adotar uma taxa mínima de armadura longitudinal igual a 0,005:

$$0,2\% \leq p_{v,alma} \leq 4\% \quad (\text{Eq. 2.51})$$

Entre dois varões verticais adjacentes a distância deve ser no máximo igual ao menor dos valores:

$$s \leq \min\{3b_w; 400\text{mm}\} \quad (\text{Eq. 2.52})$$

Em elementos de extremidade a distância máxima entre dois varões verticais consecutivos abraçados por cintas ou por ganchos não deve exceder os 200 milímetros.

2.6 RESUMO DAS VERIFICAÇÕES

Nos Quadros 2.10 a 2.13 sintetiza-se a informação abordada e detalhada ao longo do capítulo, que será a base para a concretização do código descrito no Capítulo 3.

Quadro 2.10 – Verificações de materiais

Materiais	Betão	Classe betão \geq C16/20
	Aço	Aço da classe B ou C (EC2) Varões nervurados nas zonas críticas

Quadro 2.11 – Verificações preliminares

Comprimento da região crítica acima da base da parede	h_{cr}	$h_{cr} = \max\{l_w; h_w/6\}$
		$h_{cr} \leq \min \begin{cases} 2 \cdot l_w & n \leq 6 \text{ pisos} \\ 2 \cdot h_s & n \geq 7 \text{ pisos} \end{cases}$
Ductilidade local	Se $T_1 \geq T_c$	$\mu_\phi = 2 \cdot q_o \cdot \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} - 1$
	Se $T_1 < T_c$	$\mu_\phi = 1 + 2 \left(q_o \cdot \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} - 1 \right) \cdot \frac{T_c}{T_1}$

Quadro 2.12 – Verificações na alma da parede

Alma da parede	Espessura	$b_{wo} \geq \{0,15; h_s/20\}$
	Taxa de armadura longitudinal	$0,2\% \leq p_{v,alma} \leq 4\%$
	Distância máxima entre 2 varões longitudinais	$s \leq \min\{3b_w; 400mm\}$
	Armadura horizontal	Taxa de armadura $p_h > \max \begin{cases} 25\% \cdot p_{v,alma} \\ 0,1\% \end{cases}$
	Distância entre 2 varões adjacentes	máx 4mm

Quadro 2.13 – Verificações para elementos de extremidade da parede

Elementos de extremidade da parede	Comprimento	$l_c = x_u \cdot \left(1 - \frac{\epsilon_{cu2}}{\epsilon_{cu2,c}}\right)$
		$l_c \geq \max \left\{ \begin{array}{l} 0,15l_w \\ 1,5b_w \end{array} \right.$
	Espessura	$b_w \geq 200mm$
		$\begin{cases} \text{Se } l_c \geq 2b_w; 0,2l_w \\ b_w > h_s/10 \\ \text{Senão } b_w > h_s/15 \end{cases}$
	Taxa de armadura longitudinal	$0,5\% \leq p_{v,EE} \leq 4\%$
	Distância máxima entre 2 varões longitudinais cintados	$b_i \leq 200mm$
		$\begin{aligned} &\text{Se } p_{v,EE} > 2\% \\ &e (v_d \leq 0,15 \text{ ou } v_d \leq 0,2 + q \text{ reduzido de } 15\%) \end{aligned}$
	Espaçamento máximo estribos	$\text{EC2} \quad \left\{ \begin{array}{l} s \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 12d_{bL} \\ 0,6b_{wo} ; \text{dist. laje} \leq 4b_w \\ 240mm \end{array} \right. \\ s \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 20d_{bL} \\ b_{wo} ; \text{dist. laje} \geq 4b_w \\ 400mm \end{array} \right. \end{array} \right.$
		$\text{EC8} \quad s \leq \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{b_o}{2} \\ 175mm \\ 8d_{bL} \end{array} \right.$
	Diâmetro mínimo estribos	$d_{bw} \geq \max \left\{ \begin{array}{l} 6mm \\ d_{bL}/4 \end{array} \right.$
Nº mínimo de estribos	$4/m^2 \text{ de parede}$	
Taxa mecânica volumétrica de armadura de confinamento	$\omega_{wd} = \frac{\text{volume de cintas}}{\text{volume do núcleo de betão}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$ $\omega_{wd} \geq 0,08$	
Verificação do fator de ductilidade	$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_\phi \cdot (v_d + \omega_v) \cdot \epsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_o} - 0,035$	

3

CONSTRUÇÃO DO PROGRAMA

3.1 INTRODUÇÃO

Foi desenvolvido no software *Microsoft Visual Studio* e com recurso à linguagem de programação *C#*, integrada na plataforma *.NET Framework* para desenvolvimento de aplicativos, um programa de verificação e validação das regras estabelecidas pelo EC8 para as paredes estruturais, pormenorizado no capítulo anterior.

Com recurso à API do Revit (*Application Programming Interface*) e por meio de *plug-ins*, insere-se o programa como *Add-in* (acessível dentro do software) que faz expandir os recursos e capacidades de um software existente, neste caso o Revit.

Neste capítulo apresenta-se o funcionamento do programa assim como a interação que o mesmo tem com o Revit. Em anexo (A1 a A3) são exibidas algumas das linhas de código essenciais à concretização do programa.

3.2 FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA

3.2.1 PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS

Ao desenvolver um programa é possível optar por diversos paradigmas de programação, ou seja, as formas de como se decide resolver um determinado problema. Neste sentido, a programação orientada a objetos (POO) surge como uma abordagem centrada em objetos, classes, variáveis e métodos que se destaca da programação tradicional, isto é, surge a capacidade de expandir um programa adicionando simplesmente “linhas” de código, sem que o anteriormente programado seja alterado.

A POO assenta sobre três pilares fundamentais:

- **Encapsulamento:** Não é necessário conhecer a implementação interna de um objeto para poder usá-lo;
- **Herança:** Relacionamento entre classes, no qual a classe herda variáveis e métodos de outra classe. Existe reaproveitamento de código sem que seja necessário repeti-lo;
- **Polimorfismo:** Um mesmo método pode ser usado em diferentes objetos, de diferentes classes.

Deste modo, depreende-se que a POO é um procedimento sensato para a elaboração do programa, permitindo uma ordenação de ideias e deteção de erros mais clarificados e conseqüentemente otimização do tempo gasto.

3.2.2 RECOLHA DA INFORMAÇÃO

O funcionamento do algoritmo inicializa-se pela identificação dos elementos estruturais que são seleccionados pelo utilizador no modelo Revit, armazenando essa informação numa classe *WallData* que será posteriormente utilizada no processo de verificação. Na Figura 3.1 encontra-se ilustrado de forma didática o método de recolha da informação.



Figura 3.1 – Recolha da informação

De toda a sequência na construção do algoritmo esta é das etapas que exige um grau de precisão e de detalhe mais significativo, no sentido que existe contato direto com o Revit na recolha dos dados pretendidos. Com o intuito de minimizar perdas e erros na leitura dos elementos, foi feita de forma contínua e repetitiva a depuração do programa, ou seja, com o *debug* (item do software C#) visualizar a interação entre o algoritmo e o Revit, constatando se o dado armazenado é o correto ou não (Figura 3.2).

Nesta fase, há parâmetros já definidos na base de dados do elemento seleccionado em Revit que transitam diretamente para as variáveis em C#, sem necessitar de tratamento adicional. No entanto, existem inúmeros parâmetros que são resultado do tratamento prévio de dados obtidos de forma direta ou então de dados já tratados e reaproveitados para definir novos parâmetros. Na Figura 3.3 é apresentado o trecho de código das informações provenientes do Revit, guardadas na classe *WallData*.

```
493  
494  
495  
496  
497  
498  
499  
500
```

```
1 referência  
public static double GetVolumeConcreteCore (Element el, Document doc)  
  
    var bo = GetConfinedWidth (el, doc);  
    var ho = GetConfinedLength (el, doc);  
  
    return bo * ho;
```

≤ 1ms decorridos bo * ho 0.113124

Figura 3.2 – Exemplo de aplicação do *debug* para verificação do volume do núcleo de betão

```
1
2 using Autodesk.Revit.ApplicationServices;
3 using Autodesk.Revit.DB;
4 using Autodesk.Revit.DB.Architecture;
5 using Autodesk.Revit.DB.Events;
6 using Autodesk.Revit.DB.ExtensibleStorage;
7 using Autodesk.Revit.DB.Structure;
8 using Autodesk.Revit.UI;
9 using System;
10 using System.Collections.Generic;
11 using System.Linq;
12 using System.Windows;
13 using RevitCommon;
14 using RevitWalls.R2022.RevitCommands;
15
16
17 namespace RevitWalls.Addin
18 {
19     public class RevitFuncs
20     {
21         internal static List<WallData> GetElementsWallData(UIDocument uiDoc)
22         {
23             var doc = uiDoc.Document;
24             var klen = RevitUnits.ConvertToDisplayUnitsLength(doc);
25             var wlst = new List<WallData>();
26
27             using (var t = new Transaction(doc, "getSelectedWalls"))
28             {
29                 t.Start();
30
31                 foreach(var id in uiDoc.Selection.GetElementIds())
32                 {
33                     var el = doc.GetElement(id);
34                     var w = new WallData();
35
36                     if (el.Category == null) continue;
37                     if (el.Category.Name == "Walls")
38                     {
39                         w.h = GetWallHeight(el, doc);
40                         if (w.h > 0)
41                         {
42                             w.RevitId = el.UniqueId;
43                             w.RevitCategory = el.Category.Name;
44                             w.WallName = GetWallName(el, doc);
45                             w.WallElevation = GetWallElevation(el, doc);
46                             w.Orientation = GetWallOrientation(el, doc);
47                             w.rebars_hor.AddRange(GetRebarsHor(el, doc));
48                             w.rebars_ver.AddRange(GetRebarsVer(el, doc));
49                             w.bw = GetWallWidth(el, doc);
50                             w.lw = GetWallLength(el, doc);
51                             w.scArea = GetSectionArea(el, doc);
52                             w.hcr = GetWallCriticalHeight(el, doc);
53                             w.hs = GetClearStoryHeight(el, doc);
54                             w.cover = GetConcCover(el, doc);
55                             w.bo = GetConfinedWidth(el, doc);
56                             w.ho = GetConfinedLength(el, doc);
57                             w.lc = w.ho;
58                             w.pv_web = GetRatioVerticalReinforcementWeb(el, doc);
59                             w.pv_BE = GetRatioVerticalReinforcementBE(el, doc);
60                             w.ph = GetRatioHorizontalReinforcement(el, doc);
61                             w.vConcreteCore = GetVolumeConcreteCore(el, doc);
62                             w.vHoops = GetVolumeOfCofiningHoops(el, doc);
63                             w.alpha = GetConfinementEffectivenessFactor(el, doc);
64                             w.bi = GetDistanceBetweenBarsVer(el, doc);
65                             w.Msd = GetBendingMomentsSd(el, doc);
66                             w.Mrd = GetBendingMomentsRd(el, doc);
67                             w.Vsd = GetShearForcesSd(el, doc);
68                             w.Vrd = GetShearForcesRd(el, doc);
69                             w.Nsd = GetAxialForces(el, doc);
70
71                             wlst.Add(w);
72                         }
73                     }
74                 }
75                 t.Commit();
76             }
77             return wlst;
78         }
79     }
80 }
```

Figura 3.3 – Trecho de código que armazena as informações provenientes do Revit

3.2.3 TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Na posse de todos os elementos e parâmetros oriundos do modelo 3D, deixa de haver contato direto com o Revit, em virtude de as informações ficarem armazenadas na classe *WallData*, servindo de base para a realização das verificações segundo 2.6 (Capítulo 2). Cada verificação, seja ela verificada ou não, é guardada numa nova classe denominada *WallResults*, contendo os resultados posteriormente exigidos no modelo de visualização principal.

A classe *WallResults* é expandida em duas classes consoante a zona da parede, verificando-se as regras impostas para os elementos de extremidade e alma da parede (Figura 3.5). Tal como em 3.2.2 a Figura 3.4 apresenta de forma simples o tratamento da informação por parte do programa.



Figura 3.4 – Tratamento da informação

```

1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5 using System.Threading.Tasks;
6
7 namespace RevitCommon.RevitCommon
8 {
9     public class BoundaryElementsResults : WallResults
10    {
11        public Verification VerMinimumLengthConfinedBoundaryElements { get; private set; }
12        public Verification VerExtensionConfinedBoundaryElements { get; private set; }
13        public Verification VerThicknessConfinedBoundaryElements { get; private set; }
14        public Verification VerSpacingHoops { get; private set; }
15        public Verification VerDistanceBetweenConsecutiveLongitudinalBars { get; private set; }
16        public Verification VerMinimumDiameterHoops { get; private set; }
17        public Verification VerMechanicalVolumetricRatio { get; private set; }
18        public Verification VerDuctilityFactor { get; private set; }
19        public Verification VerLongitudinalRebarMinimumRatioBE { get; private set; }
20        public Verification VerLongitudinalRebarMaximumRatioBE { get; private set; }
21
22        public override void Calculate()
23        {
24            base.Calculate();
25
26            VerMinimumLengthConfinedBoundaryElements = VerifyMinimumLengthConfinedBoundaryElements();
27            VerExtensionConfinedBoundaryElements = VerifyExtensionConfinedBoundaryElements();
28            VerThicknessConfinedBoundaryElements = VerifyThicknessConfinedBoundaryElements();
29            VerSpacingHoops = VerifySpacingHoops();
30            VerDistanceBetweenConsecutiveLongitudinalBars = VerifyDistanceBetweenConsecutiveLongitudinalBars();
31            VerMinimumDiameterHoops = VerifyMinimumDiameterHoops();
32            VerMechanicalVolumetricRatio = VerifyMechanicalVolumetricRatio();
33            VerDuctilityFactor = VerifyDuctilityFactor();
34            VerLongitudinalRebarMinimumRatioBE = VerifyLongitudinalRebarMinimumRatioBE();
35            VerLongitudinalRebarMaximumRatioBE = VerifyLongitudinalRebarMaximumRatioBE();
36        }
37        public BoundaryElementsResults(WallData wall, MatConcrete concrete, MatSteel steel, SeismicProp
38        seismicProp) : base(wall, concrete, steel, seismicProp)

```

```

39
40 }
41 //-----VERIFICATIONS-----
42 public Verification VerifyMinimumLengthConfinedBoundaryElements()
43 {
44     bool ver;
45     double ratio;
46     var txt = "EC8 5.4.3.4.2(6) - Minimum length of the confined boundary elements";
47
48     var max = Math.Max(0.15 * Wall.lw, 1.5 * Wall.bw);
49     ratio = Wall.lc / max;
50
51     if (Wall.lc < max)
52     {
53         ver = false;
54         FailedVerificaton++;
55     }
56     else
57         ver = true;
58
59     return new Verification(ver, ratio, txt);
60 }
61 public Verification VerifyExtensionConfinedBoundaryElements()
62
63
64 public Verification VerifyThicknessConfinedBoundaryElements()
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84 public Verification VerifySpacingHoops()
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102 public Verification VerifyDistanceBetweenConsecutiveLongitudinalBars()
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129 public Verification VerifyMinimumDiameterHoops()
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157 public Verification VerifyMechanicalVolumetricRatio()
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184 public Verification VerifyDuctilityFactor()
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203 public Verification VerifyLongitudinalRebarMinimumRatioBE()
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229 public Verification VerifyLongitudinalRebarMaximumRatioBE()
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247

```

Figura 3.5 – Trecho de código para a classe *BoundaryElementsResults*

Pormenorizando a classe *Verification*, são caracterizados três tipos de dados (variáveis) consoante o objetivo da informação a executar:

- **Variável do tipo *String* (txt):** Fornece e exhibe uma mensagem de texto relativamente ao pressuposto definido no Eurocódigo;
- **Variável do tipo *Double* (ratio):** Calcula e apresenta um rácio concordante com a exigência mínima ou máxima preconizada no regulamento (respetivamente Eq. 3.1 e 3.2), ou seja, fornece um fator segurança (FS) com valor verdadeiro superior a 1,00 e tanto maior quanto a veracidade da condição. O mesmo fator apresenta um valor inferior a 1,00 quando o critério não é cumprido e tanto menor quanto mais afastado estiver o cumprimento da condição;

$$FS = \frac{1}{\frac{\text{condição}_{\min}(\text{Eurocódigo})}{\text{valor}_{\text{optado}}}} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$FS = \frac{1}{\frac{\text{valor}_{\text{optado}}}{\text{condição}_{\max}(\text{Eurocódigo})}} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

- **Variável do tipo Bool (ver):** Indica se a exigência é verificada, ou não, armazenado valores “True” ou “False”.

3.2.4 INTERFACE DO UTILIZADOR

A maneira com que o utilizador interage com o programa, representa um aspeto fundamental na criação do mesmo, isto é, um modelo de visualização que não seja perceptível e intuitivo originará a erros de implantação e leitura de dados. Neste sentido, elaborou-se uma interface básica, sucinta e funcional, conferindo ao usuário todos os meios e ferramentas necessárias a fim de atingir todas as verificações nas paredes estruturais para a classe de ductilidade média (DCM).

Na Figura 3.6 está representado o modelo de visualização principal onde são selecionadas características dos materiais e propriedades sísmicas, servindo de *input* para o cálculo das verificações e definidoras do espetro de resposta (Quadro 3.1). Acrescentar e consoante opção de projeto, o ângulo θ das escoras inclinadas deve ser definido para posterior verificação do não esmagamento das escoras comprimidas.

Quadro 3.1 – Inputs e outputs de materiais e propriedades sísmicas

		Input	Output	
Materiais	Betão	[C12/15, C16/20, ..., C80/95, C90/105]	[f_{ck} , f_{cd} , E_{cm}]	
	Aço	[A235, A400, A500]	[f_{yk} , f_{yd} , E_s]	
			Parâmetros definidores do espetro de resposta	Ductilidade local
Propriedades Sísmicas	Solo	[A, B, C, D, E, F]	×	×
	Zona sísmica T1	[1.1, 1.2, ..., 1.5, 1.6]	×	
	Zona sísmica T2	[2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5]	×	
	Período			×
	Coeficiente de comportamento		×	×

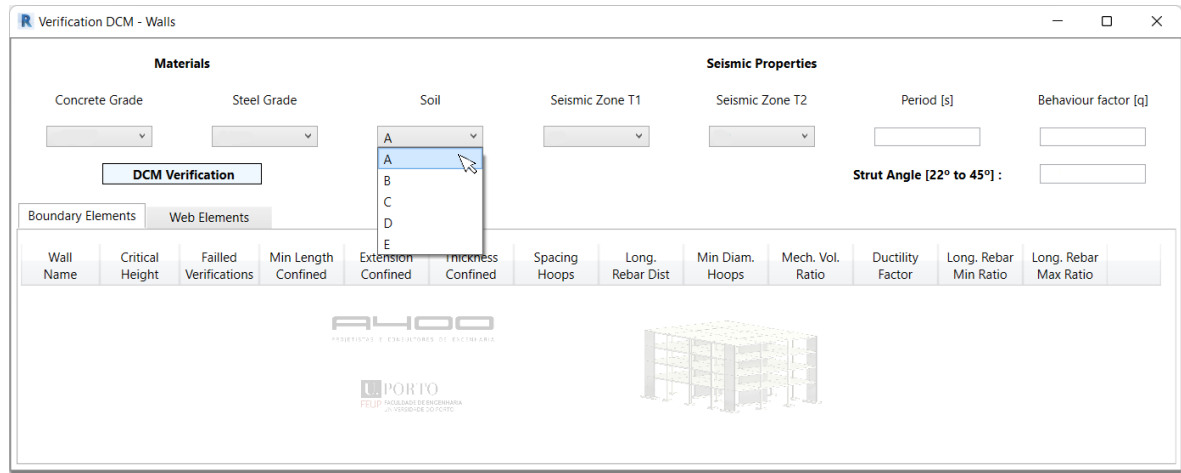


Figura 3.6 – Modelo de visualização principal

4

CASO DE ESTUDO

4.1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de aferir e aprovar a veracidade do programa desenvolvido no capítulo anterior, desenvolveu-se uma estrutura simples modelada devidamente em Revit e no programa de cálculo ETABS.

Paralelamente são apresentadas as cargas, as combinações sísmicas e os esforços utilizados para obtenção e dimensionamento das armaduras a empregar nas paredes de betão armado.

4.2 DESCRIÇÃO ESTRUTURAL

4.2.1 GEOMETRIA

O edifício em estudo apresenta uma forma retangular, regular em planta e em altura, constituído por 3 pisos, todos acima do nível do solo, mais cobertura com 4 metros de pé-direito no 1º Piso e 3 metros para os restantes.

No Quadro 4.1 são descritas as dimensões dos elementos estruturais e nas Figuras 4.1 a 4.6 o modelo 3D, plantas e vistas em corte da estrutura.

Quadro 4.1 – Dimensões dos elementos estruturais

Elemento Estrutural	Secções	Pisos
Parede	Canto	Fund. – Cob.
	Central	Fund. – Cob.
Pilar	400 mm × 400 mm	Fund. – Cob.
Laje	e = 250 mm	1º – Cob.

O recobrimento empregue em todos os elementos foi de 30 milímetros.

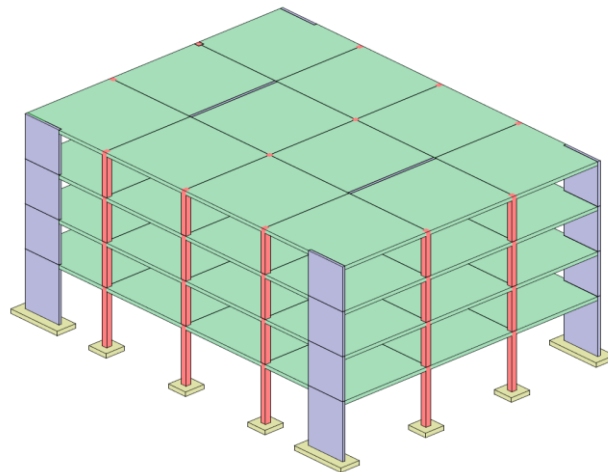


Figura 4.1 – Modelo 3D da estrutura (Revit)

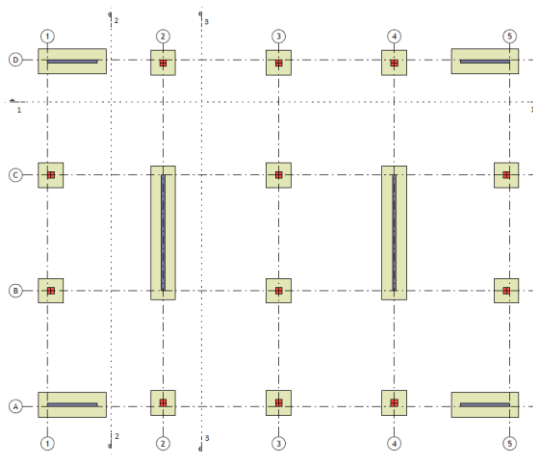


Figura 4.3 – Planta ao nível da Fundação

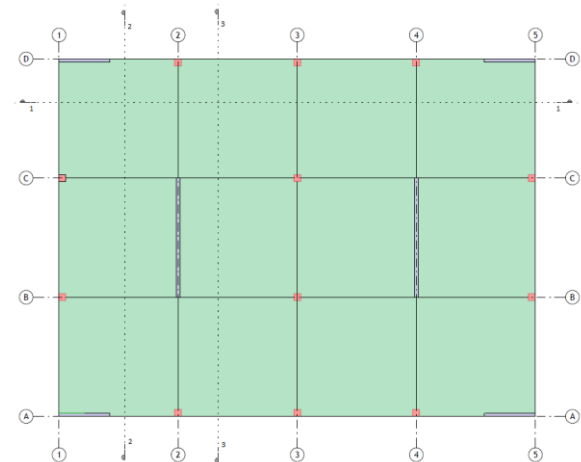


Figura 4.2 – Planta ao nível da Cobertura

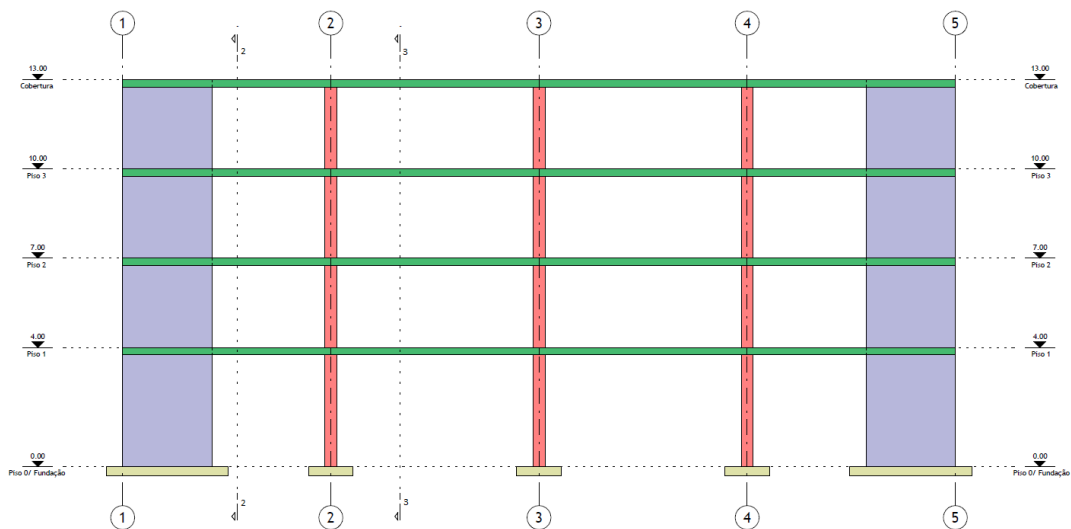


Figura 4.4 – Corte 1-1

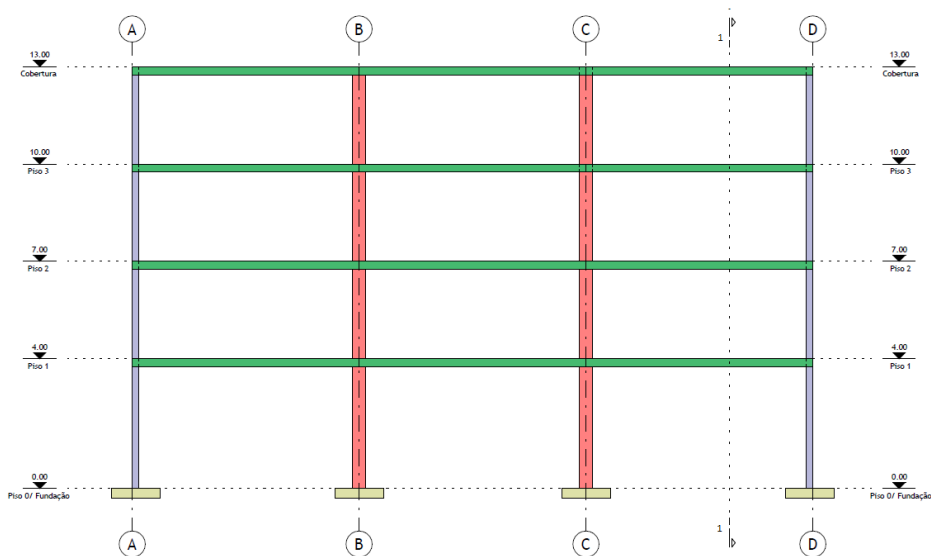


Figura 4.5 – Corte 2-2

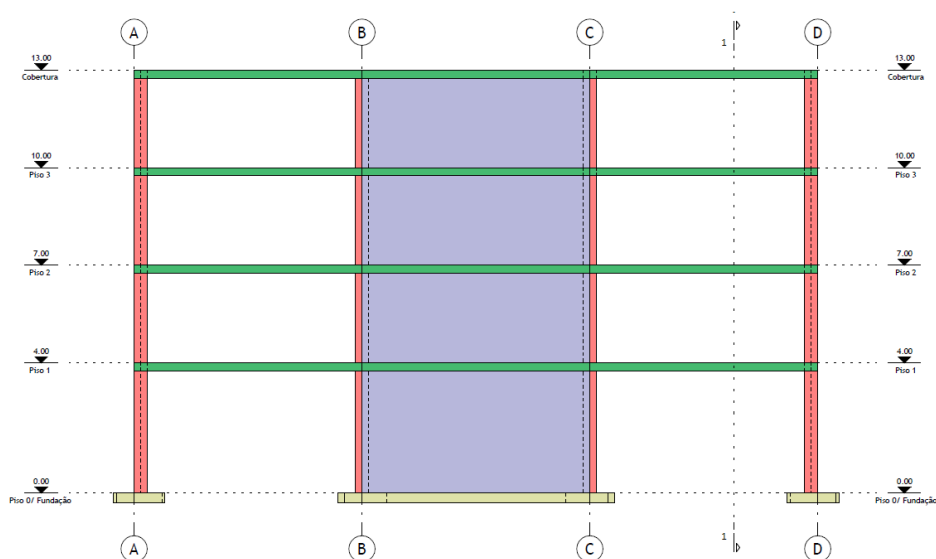


Figura 4.6 – Corte 3-3

4.2.2 MATERIAIS

A classe de betão e aço usados, assim como os seus parâmetros, estão materializados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Materiais e parâmetros

Betão C30/37		Aço A400	
$f_{ck} = 30$ (MPa)	$f_{cd} = 20$ (MPa)	$f_{yk} = 400$ (MPa)	$f_{yd} = 347,8$ (MPa)
$E_{cm} = 33$ (GPa)		$E_s = 200$ (GPa)	

4.2.3 AÇÕES

O edifício foi sujeito a um conjunto de ações verticais e ações sísmicas segundo as especificações presentes no EC0 (Bases para o projeto de estruturas), EC1 (Ações em estruturas), EC2 (Projeto de estruturas de betão) e o EC8 (Projeto de estruturas para resistência aos sismos).

4.2.3.1 Ações verticais

Foram consideradas como ações verticais o peso próprio em toda a estrutura (PP), as restantes cargas permanentes (RCP) e as sobrecargas (Q_k).

Quadro 4.3 – Ações verticais consideradas

Carga	Valor	Pisos
PP	25 kN/m ³	1º – Cob.
RCP	2 kN/m ²	1º – Cob.
Q_k	2 kN/m ²	1º – 3º
	1 kN/m ²	Cob.
Valores coeficientes ψ para edifícios		
ψ_0	0,7	1º – 3º
	0	Cob.
ψ_1	0,5	1º – 3º
	0	Cob.
ψ_2	0,3	1º – 3º
	0	Cob.

4.2.3.2 Ação sísmica

Para a caracterização da ação sísmica foi definido que a estrutura se encontra em Lisboa, num terreno do tipo B e classe de importância II (edifício corrente). Deste modo, existem duas diferentes zonas sísmicas com o valor 1,3 e 2,3 para ação sísmica do tipo 1 e tipo 2, respetivamente. Com os dados presentes no Quadro 4.4 e para um coeficiente de comportamento 1,9 (explicado em 4.4), obtém-se dois espectros de resposta ilustrado na Figura 4.7.

Quadro 4.4 – Parâmetros para definição do espectro

	a_{gR} (m/s^2)	S_{max}	S	T_B	T_C	T_D
Tipo 1	1,50	1,35	1,29	0,10	0,60	2,00
Tipo 2	1,70	1,35	1,27	0,10	0,25	2,00

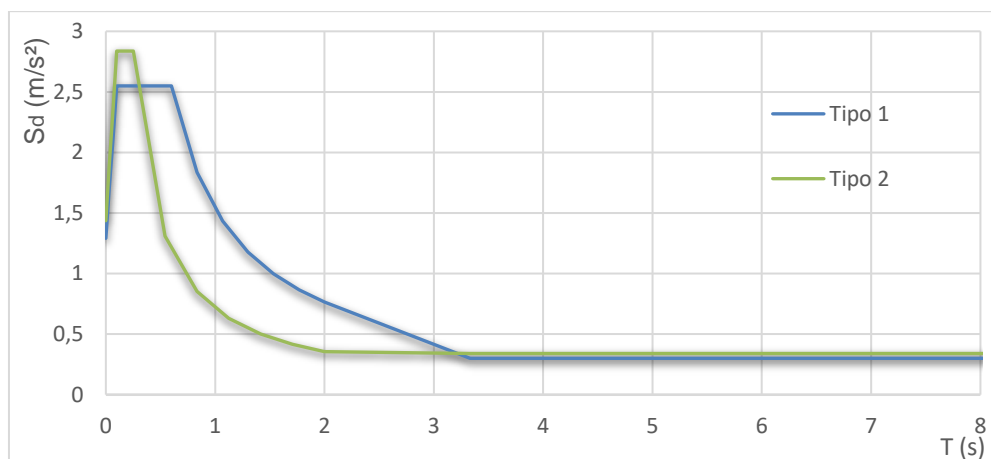


Figura 4.7 – Espectro de resposta de cálculo

4.3 MODELAÇÃO E ANÁLISE ESTRUTURAL

Recorrendo ao ETABS, um software de análise estrutural e de dimensionamento de edifícios, modelou-se o edifício em estudo para obtenção dos modos de vibração e dos esforços internos da estrutura que serão necessários para o dimensionamento das armaduras posteriormente.

De modo a ter em conta o efeito da fendilhação dos elementos primários e segundo o EC8, considera-se 50% do valor da rigidez, ou seja, metade do valor do módulo de elasticidade quando esses mesmos elementos estão não fendilhados.

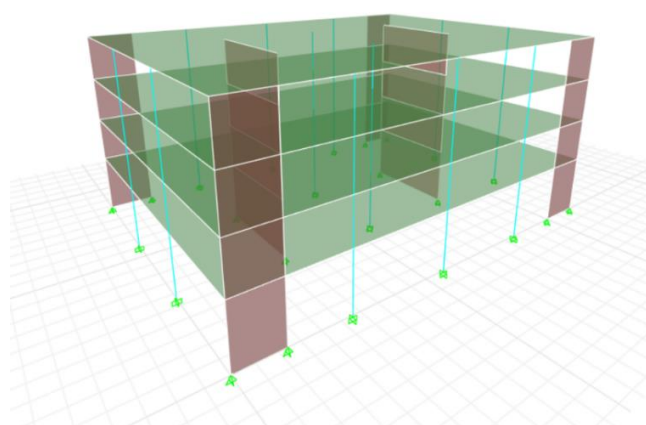


Figura 4.8 – Modelo 3D da estrutura (ETABS)

4.3.1 ANÁLISE MODAL

De modo a descrever o comportamento dinâmico da estrutura aquando de um sismo, recorre-se a uma análise modal analisando os períodos assim como as participações modais.

Quadro 4.5 – Participações modais

Modo	Período (s)	$M_{eff,UX}$ (%)	$M_{eff,UY}$ (%)	$M_{eff,RZ}$ (%)
1	0,717	76,600	0,000	0,000
2	0,439	0,000	0,000	77,080
3	0,374	0,000	78,720	0,000
4	0,156	18,640	0,000	0,000
5	0,103	0,000	0,000	18,660
6	0,094	0,000	18,200	0,000
$\sum M_{eff}$		95,240	96,920	95,740

em que:

M_{eff} massa modal efetiva.

Do Quadro 4.5 constata-se que logo no segundo modo de vibração a estrutura apresenta torção, com participação modal nula nas duas direções (Figura 4.10). Já o primeiro e o terceiro modo de vibração são exclusivamente translacionais (Figura 4.9 e Figura 4.11). De notar que os primeiros modos são os que condicionam mais a estrutura, uma vez que após a ocorrência do terceiro modo de vibração a participação da massa em cada modo de vibração reduz-se significativamente.

Acrescentar, conclui-se que é possível utilizar uma análise modal por espectro de resposta (descrito em 2.4.5.1) uma vez que todos os modos exibem massas modais efetivas superiores a 5% e o somatório das massas modais efetivas dos modos utilizados representa mais de 90% da massa total da estrutura.

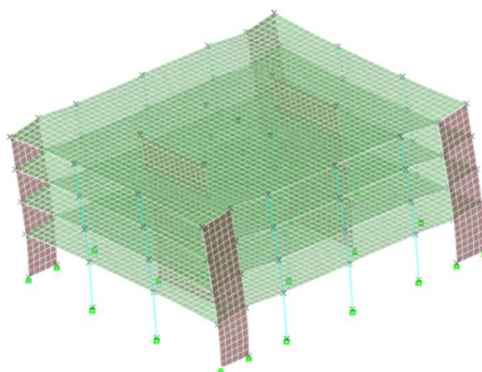


Figura 4.9 – Primeiro modo de vibração (Translação em X)

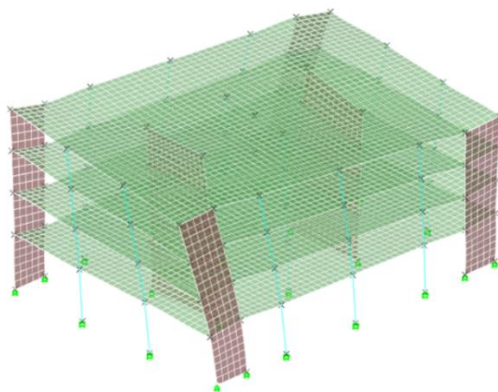


Figura 4.10 – Segundo modo de vibração (Rotação)

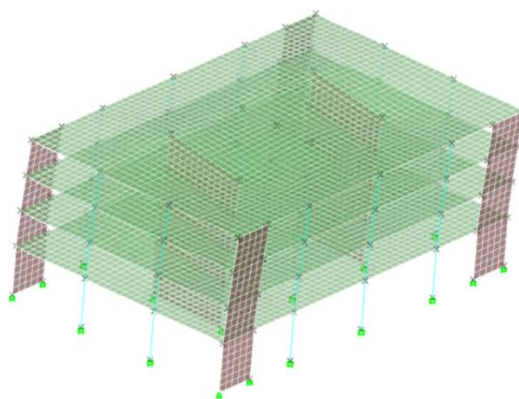


Figura 4.11 – Terceiro modo de vibração (Translação em Y)

4.3.2 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Como exposto no Capítulo 2, para se obter o valor dos esforços relativos à combinação sísmica, deve-se considerar que o sismo se manifesta segundo as duas direções (X e Y). Deste modo e associando as Equações 2.15 a 2.17, obtém-se as seguintes combinações empregues na análise estrutural:

Quadro 4.6 – Combinações usadas na análise

Sismo Tipo 1X	$PP + RCP + 0,3 \cdot Q_k + Sismo X(tipo 1) + 0,3 \cdot Sismo Y(tipo 1)$
Sismo Tipo 1Y	$PP + RCP + 0,3 \cdot Q_k + 0,3 \cdot Sismo X(tipo 1) + Sismo Y(tipo 1)$
Sismo Tipo 2X	$PP + RCP + 0,3 \cdot Q_k + Sismo X(tipo 2) + 0,3 \cdot Sismo Y(tipo 2)$
Sismo Tipo 2Y	$PP + RCP + 0,3 \cdot Q_k + 0,3 \cdot Sismo X(tipo 2) + Sismo Y(tipo 2)$

4.3.3 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA

O critério limitação de danos impõe limites máximos no deslocamento entre pisos de maneira que sejam satisfeitos requisitos mínimos de utilização após ação sísmica. Observando as Figuras 4.14 e 4.15 e sabendo que para a classe de importância II o valor do coeficiente de redução é igual a 0,5 verifica-se o cumprimento da Eq. 2.2 para ambas direções ortogonais.

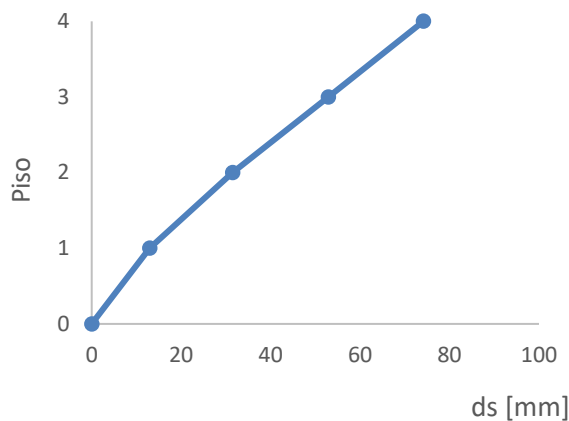


Figura 4.13 – Deslocamento do piso na direção X

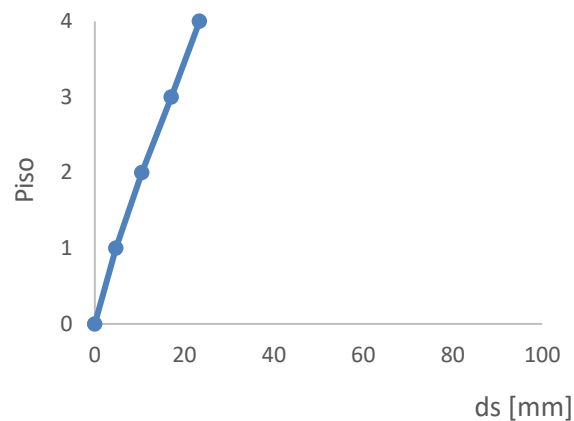


Figura 4.12 – Deslocamento do piso na direção Y

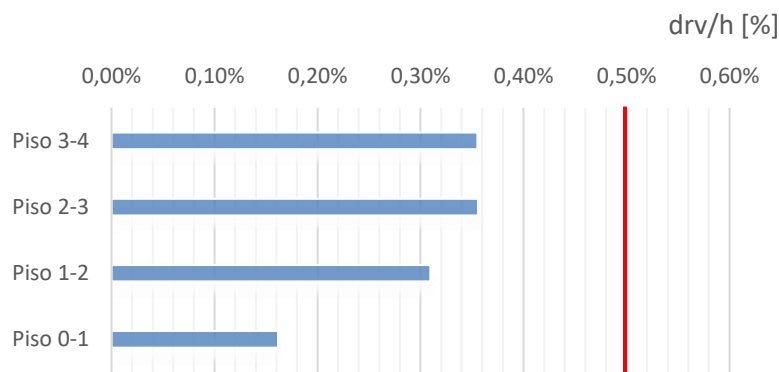


Figura 4.14 – Deslocamento entre pisos na direção X

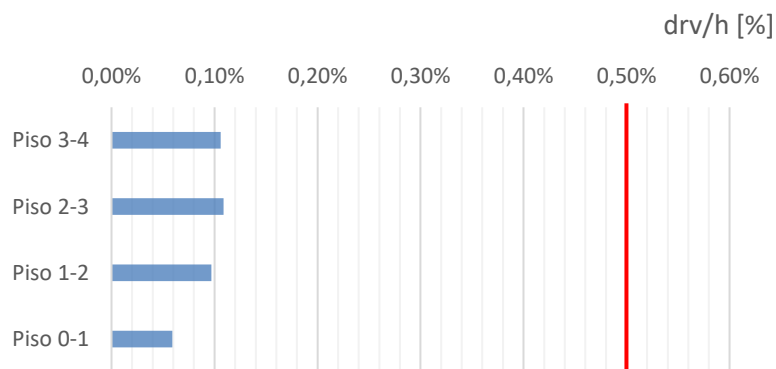


Figura 4.15 – Deslocamento entre pisos na direção Y

4.4 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE COMPORTAMENTO

Com a finalidade de estimar um coeficiente de comportamento adequado a empregar na análise linear para cada uma das direções, deve-se ter em consideração a Figura 4.16 onde é esquematizado o processo de obtenção do valor q que depende do sistema estrutural, da regularidade em altura, do rácio K_w e α_u/α_1 .

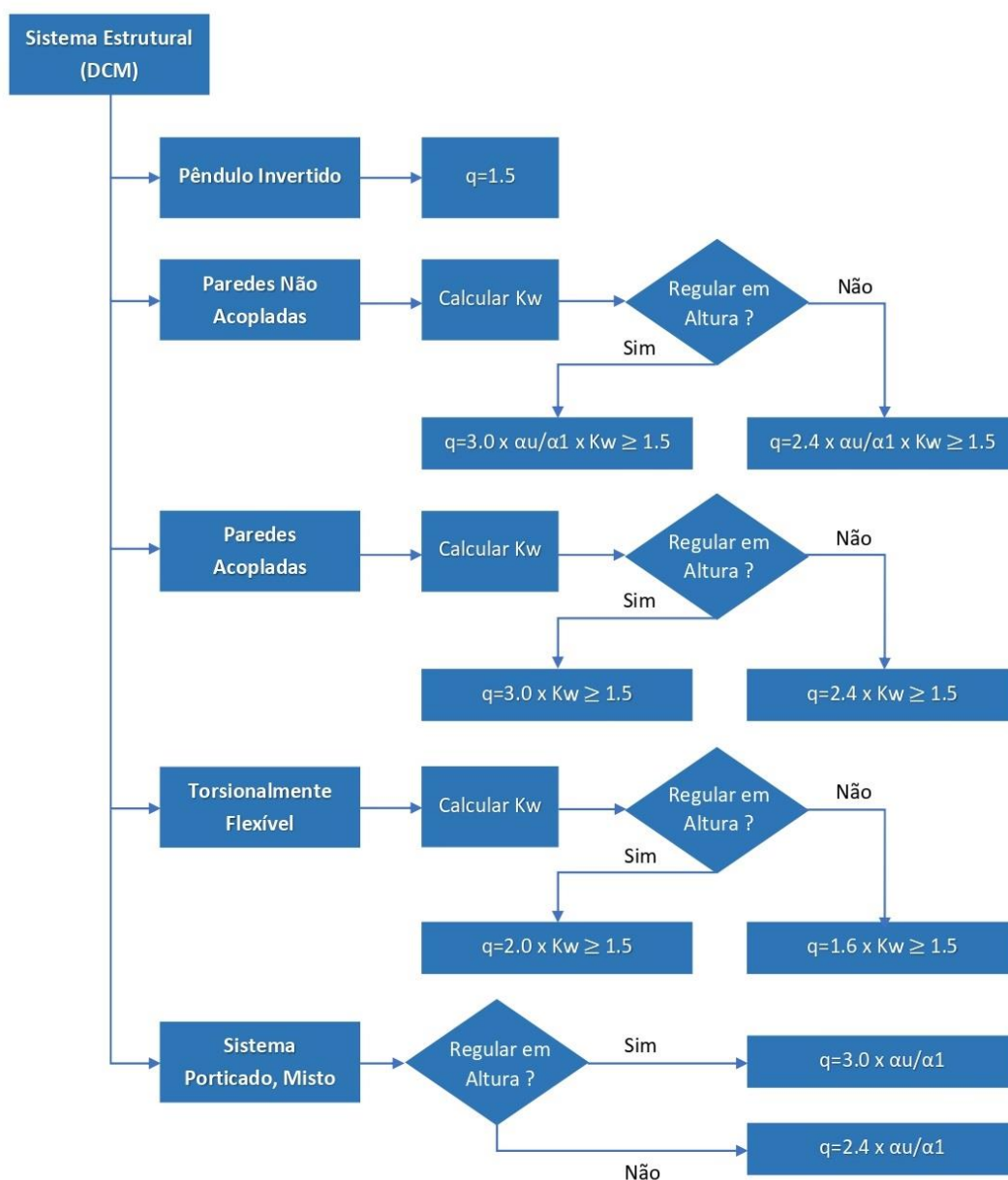


Figura 4.16 – Fluxograma para obtenção do valor q

4.4.1 SISTEMA ESTRUTURAL

4.4.1.1 Pêndulo invertido

Para que este sistema seja validado tem-se de garantir que no terço superior do edifício exista mais de 50% da massa total do edifício. Posto isto, obtém-se as seguintes verificações.

Quadro 4.7 – Massa nos pisos do edifício

Piso	UX = UY (kg)	Altura (m)
1	548222,43	4,00
2	545965,15	7,00
3	545965,15	10,00
4	505869,17	13,00
$\Sigma M = 2241439,18$		

Sendo a soma no terço superior igual a 1083640,08 kg (Piso 3 e 4), verifica-se que 48% da massa se localiza nessa extensão, não cumprindo o requisito estabelecido no EC8, logo não é classificado como pêndulo invertido.

4.4.1.2 Torsionalmente flexível

Dado que o sistema estrutural anterior não foi verificado, ver-se-á agora de acordo com 2.4.6 se a relação $r \geq I_s$ é cumprida, para cada piso e para cada direção de forma independente.

Assim, vamos verificar e calcular:

- Rigidez torsional para cada piso ($K_{torção}$);
- Rigidez lateral para cada piso e para cada direção (K_x e K_y);
- Momento polar de inércia sobre o centro de massa de cada piso (I_s);
- Massa total de cada piso (M).

Os valores do fator I_s foram calculados segundo a Eq. 2.23 e são exibidos no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 – Cálculo do fator I_s

Piso	UX = UY (kg)	J_{x_G} (ton.m ²)	I_s
1	548222,43	57110,44	10,21
2	545965,15	56789,56	10,20
3	545965,15	56789,56	10,20
4	505869,17	52195,05	10,16

De forma a quantificar a rigidez lateral e rotacional implícita em cada piso, aplica-se nas duas direções independentes e no centro de rigidez do piso superior (coincidente com o centro de massa) duas cargas translacionais de intensidade 10^6 kN e uma carga rotacional sobre o eixo vertical de intensidade 10^6 kN.m. Definidas estas condições, determina-se os deslocamentos relativos entre pisos com base nas Equações 4.1 a 4.3 que serão posteriormente utilizados para o cálculo do fator r (Eq. 2.22), apresentado no Quadro 4.10.

$$K_x = \frac{1 \cdot 10^6}{UX_{piso\ i} - UX_{piso\ i-1}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$K_y = \frac{1 \cdot 10^6}{UY_{piso\ i} - UY_{piso\ i-1}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$K_{torção} = \frac{1 \cdot 10^6}{RZ_{piso\ i} - RZ_{piso\ i-1}} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

em que:

$UX_{piso\ i}$, $UY_{piso\ i}$ deslocamento nodal associado ao centro de massa do piso i ;

$RZ_{piso\ i}$ rotação nodal associado ao centro de massa do piso i .

Quadro 4.9 – Deslocamentos e rotações entre pisos (à esquerda); Valor das rigidezes translacionais e rotacionais (à direita)

	Piso	UX (mm)	UY (mm)	RZ (rad)	K_x (kN/m)	K_y (kN/m)	$K_{TORÇÃO}$ (kN.m/m)
Fx	4	14277,475	0,00	0,00	220051,391	–	–
	3	9733,082	0,00	0,00	237171,568	–	–
	2	5516,725	0,00	0,00	297118,280	–	–
	1	2151,062	0,00	0,00	464886,647	–	–
Fy	4	0,00	3799,407	0,00	–	841782,019	–
	3	0,00	2611,451	0,00	–	912796,031	–
	2	0,00	1515,916	0,00	–	1134662,931	–
	1	0,00	634,597	0,00	–	1575803,226	–
M	4	0,00	0,00	0,050	–	–	62640942,120
	3	0,00	0,00	0,034	–	–	67833401,167
	2	0,00	0,00	0,020	–	–	84702693,546
	1	0,00	0,00	0,008	–	–	126662444,585

Quadro 4.10 – Cálculo do fator r e verificação $r \geq I_s$

Piso	Direção Y		Direção X	
	r_x	Rácio r_x/I_s	r_y	Rácio r_y/I_s
4	8,63	0,85	16,87	1,66
3	8,62	0,85	16,91	1,66
2	8,64	0,85	16,88	1,66
1	8,97	0,88	16,51	1,62
		KO		OK

Da análise do Quadro 4.10 conclui-se que a estrutura é não torsionalmente flexível na direção X e torsionalmente flexível na direção Y que, de certa forma, faz sentido visto existirem 2 paredes estruturais de grande envergadura próximas do centro de rigidez na direção Y, contribuindo para que a rigidez à torção mínima seja reduzida significativamente.

Tratando-se de um sistema torsionalmente flexível na direção Y e os edifícios a poderem ser classificados de forma independente em cada uma das direções, ter-se-ia neste momento avaliar qual o sistema estrutural para a direção X. No entanto, segundo a cláusula 5.2.2 do eurocódigo 8, sempre que uma das direções for assumida como torsionalmente flexível a outra direção terá de ser também classificada como torsionalmente flexível (EC8, 2010).

4.4.2 CÁLCULO DO VALOR q

De acordo com a Eq. 2.27 e seguindo o fluxograma, foi adotado um coeficiente K_w igual a 0,95. Como já mencionado a estrutura é regular em altura, perfazendo-se um valor do coeficiente de comportamento a empregar na análise de 1,9.

4.5 DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS

4.5.1 ESFORÇOS DE CÁLCULO

Uma vez definido corretamente todo o modelo estrutural e as combinações sísmicas a empregar, retira-se do programa de cálculo os valores do esforço axial, esforço transversal e momento fletor. Estes dois últimos devem ser ajustados, como descrito em 2.5.3, por uma envolvente de cálculo de modo a ter em consideração o *capacity design*.

Com o intuito de reduzir a quantidade de armaduras transversais aquando do seu dimensionamento, considera-se um ângulo nas escoras de $26,56^\circ$ para obtenção da envolvente dos momentos fletores. Os diagramas de cálculo são dados pelas Figuras 4.18 e 4.19. Na Figura 4.17 é ilustrado a nomenclatura das 6 paredes estruturais bem como a sua posição em planta.

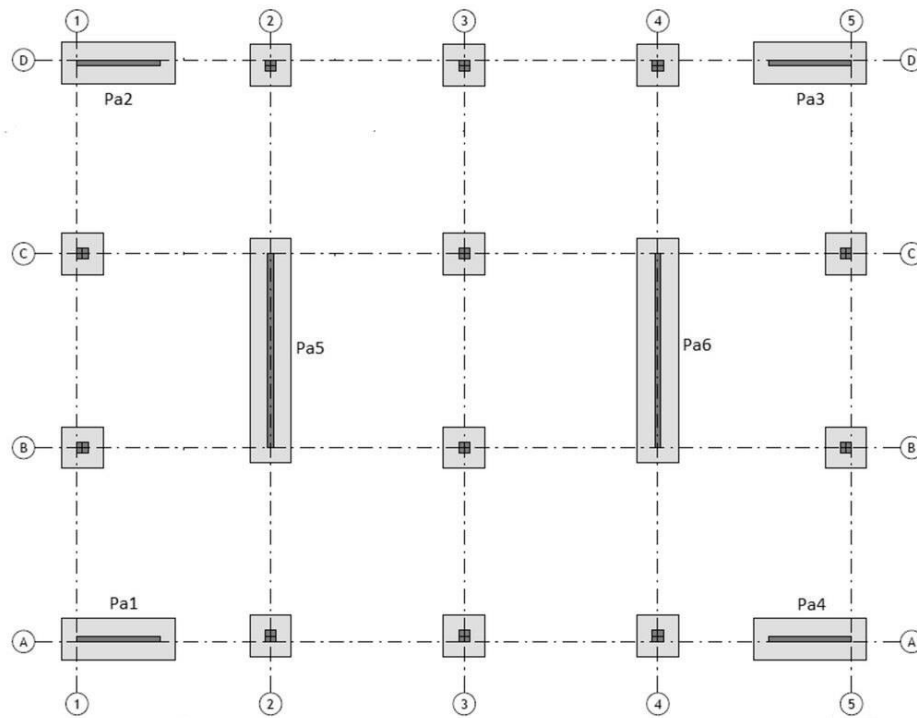


Figura 4.17 – Nomenclatura e posição das paredes estruturais

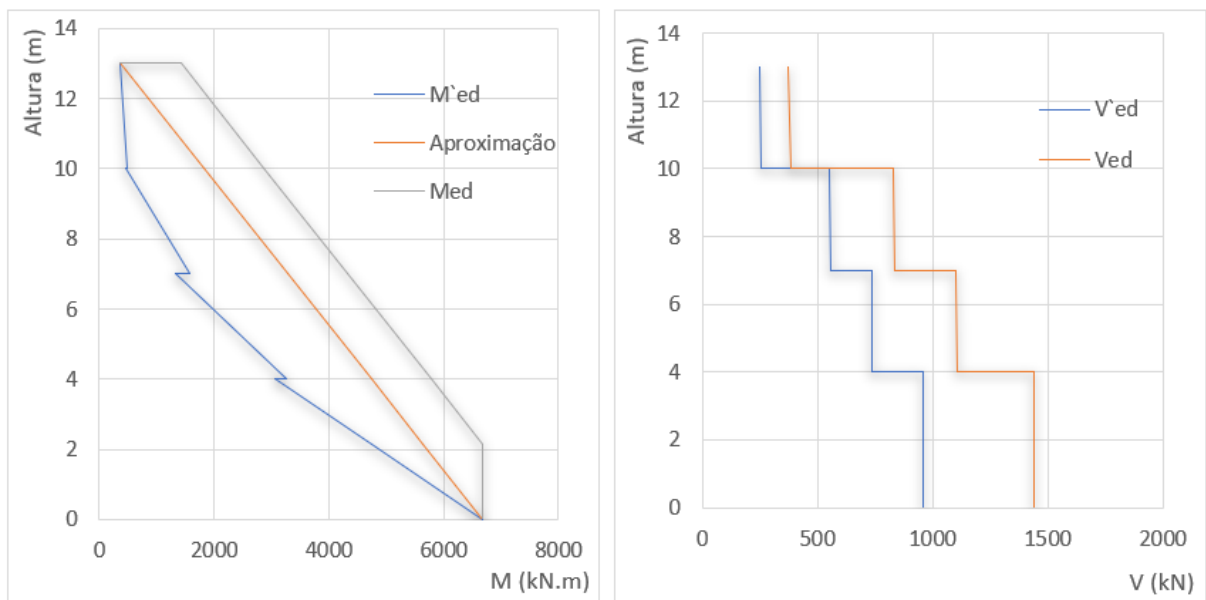


Figura 4.18 – Envolvente de cálculo de momentos fletores (à esquerda) e esforço transversal (à direita) para as paredes Pa1 a Pa4

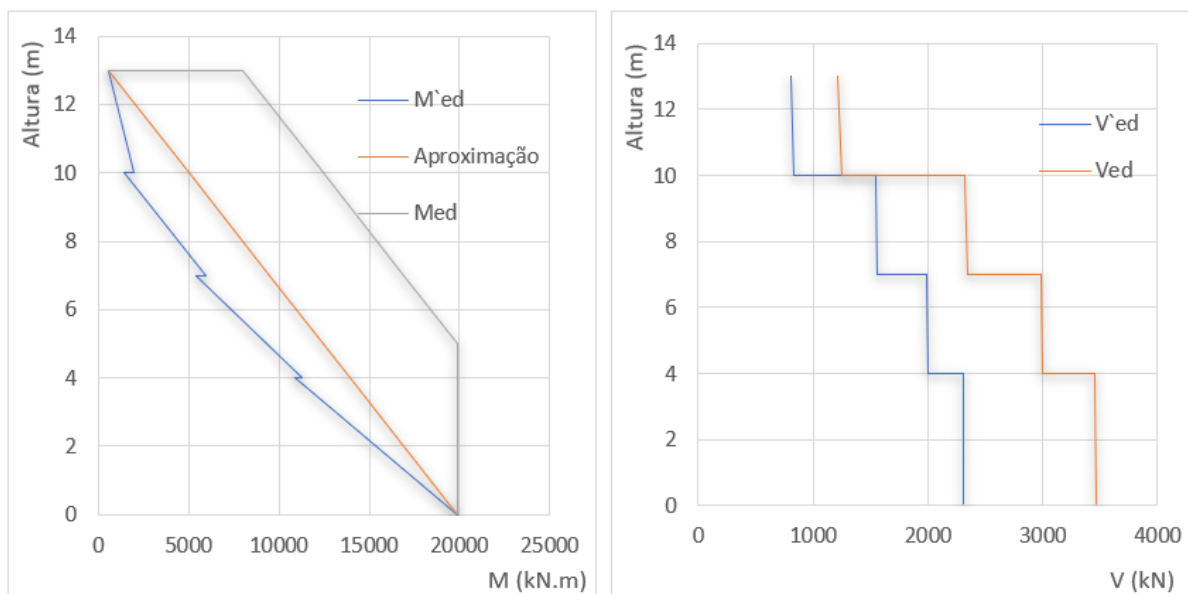


Figura 4.19 – Envolvente de cálculo de momentos fletores (à esquerda) e esforço transverso (à direita) para as paredes Pa5 e Pa6

4.5.2 SOLUÇÃO DE ARMADURAS PARA AS PAREDES

Com ajuda do *FlexDesv* (programa interno da empresa A400 – Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda.) foi possível dimensionar à flexão desviada armaduras longitudinais e transversais, de forma iterativa e otimizada, com base nos esforços resultantes e ajustados da análise, visto anteriormente. Para que o dimensionamento seja validado, o programa exibe um fator de segurança (FS) em que $FS < 1$, solução KO, $FS \geq 1$, solução OK.

O referido dimensionamento foi efetuado para cada parede e para cada nível da parede de forma independente (Figura 4.20), com a finalidade de otimizar e poupar armadura em alturas superiores da parede onde os valores de momentos fletores e esforços transversos são mais reduzidos. No anexo A4 é exposto para o caso da parede Pa1 os vários e muitos resultados que o programa fornece.

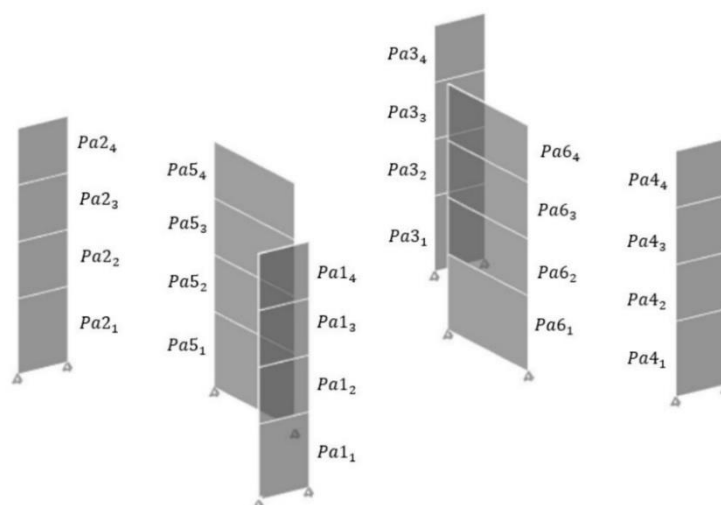


Figura 4.20 – Nomenclatura das paredes por nível

Nas Figuras 4.21 a 4.26 ilustra-se em corte as armaduras longitudinais e transversais optadas para as diversas paredes e na Figura 4.27 a modelação 3D das armaduras em Revit.

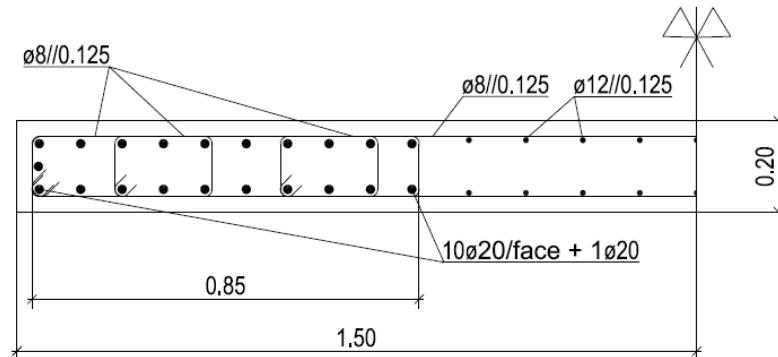


Figura 4.21 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa1 a Pa4 para os níveis 1 e 2

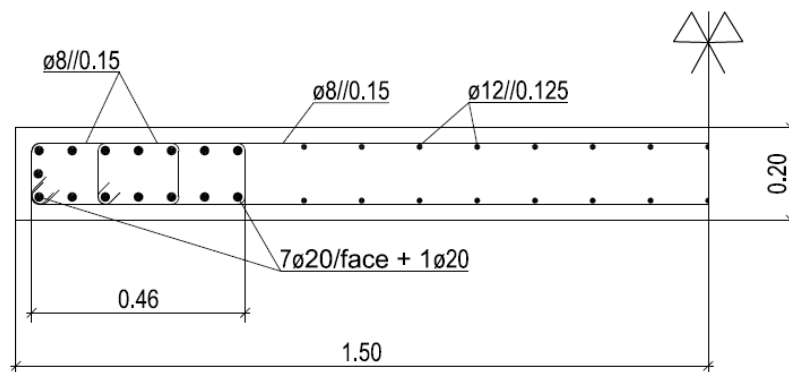


Figura 4.22 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa1 a Pa4 para o nível 3

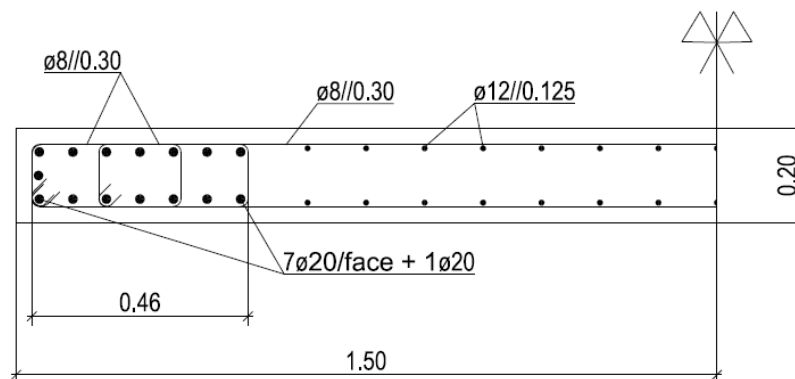


Figura 4.23 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa1 a Pa4 para o nível 4

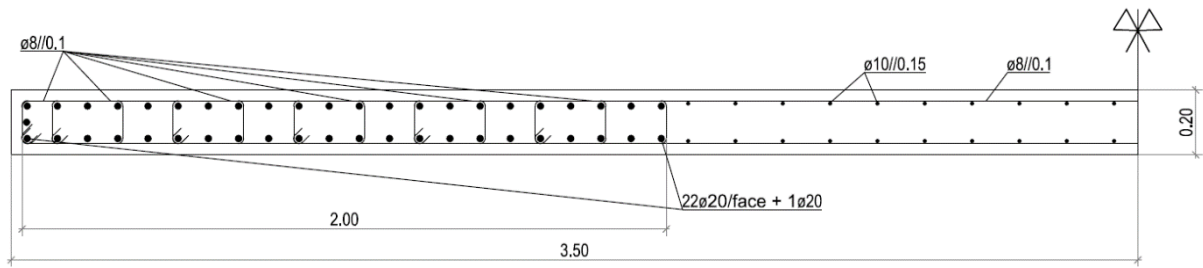


Figura 4.24 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa5 e Pa6 para o nível 1

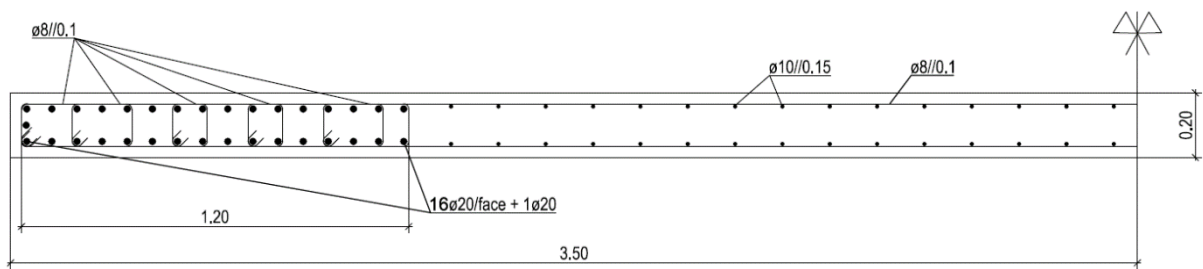


Figura 4.25 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa5 e Pa6 para o nível 2

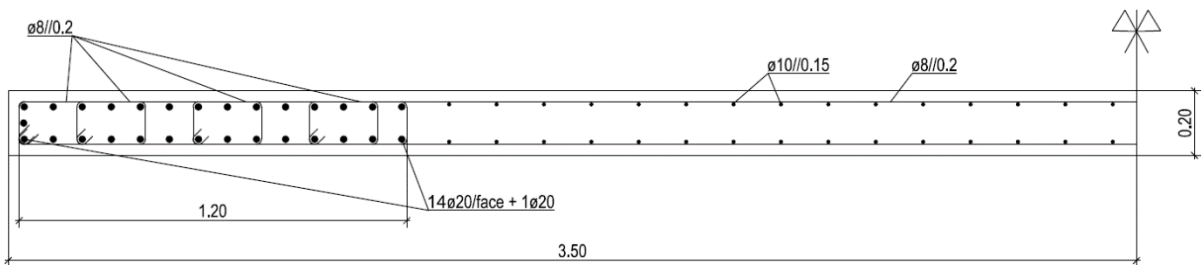


Figura 4.26 – Armadura longitudinal e transversal para as paredes Pa5 e Pa6 para os níveis 3 e 4

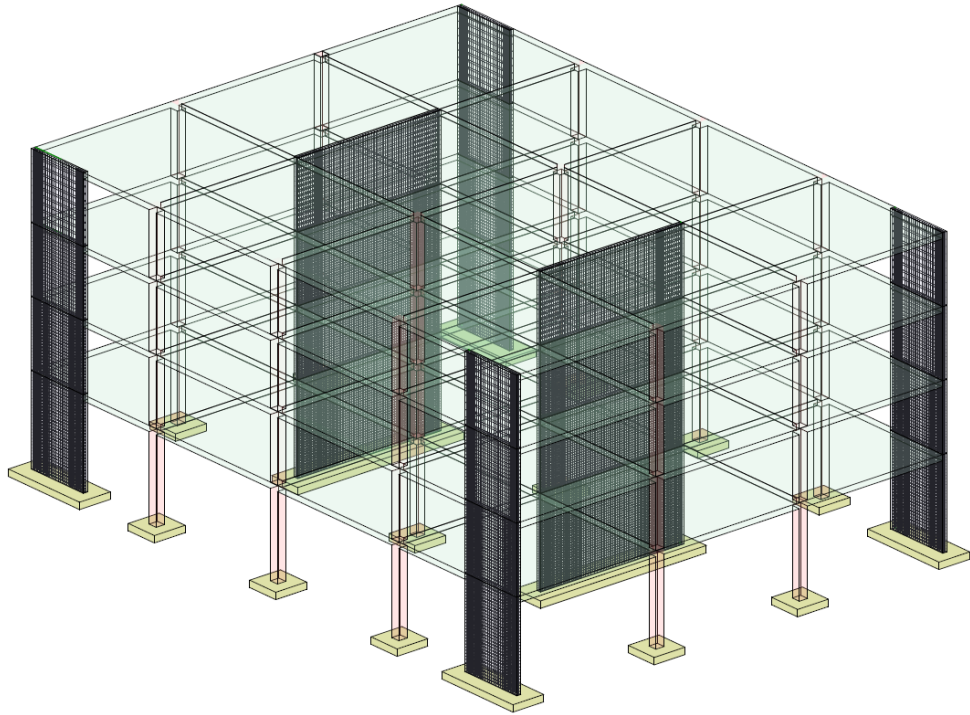


Figura 4.27 – Vista 3D das armaduras em Revit

5

VALIDAÇÃO E APLICAÇÃO DO PROGRAMA

5.1 INTRODUÇÃO

Produzido no Capítulo 3 o programa de apoio à verificação do dimensionamento sísmico de paredes estruturais para a classe de ductilidade média (DCM) com base nos pressupostos do EC8 do Capítulo 2, resta agora validar e aplicar a ferramenta desenvolvida ao caso de estudo do capítulo anterior.

É assim apresentado, no presente capítulo, o arranque do programa bem como os valores atingidos, consequentes das verificações impostas.

5.2 ARRANQUE DO PROGRAMA

No modelo Revit dá-se a inicialização do programa a partir da aba “A400-Apps” (na barra superior) onde introduziu-se um *Add-in* com o nome “Walls Rebars”. Dando um clique, abre-se no centro do software o menu principal do programa de verificação (Figura 5.1).

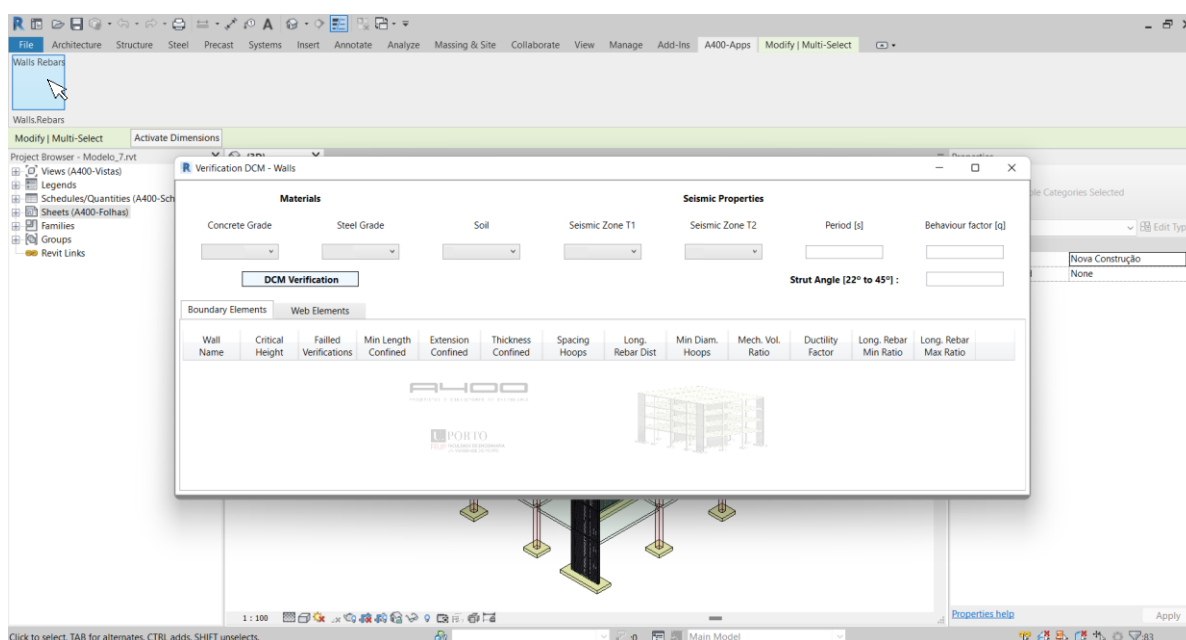


Figura 5.1 – Menu principal com o clique em “Walls Rebars”

5.2.1 INPUTS E SELEÇÃO DOS ELEMENTOS A VERIFICAR

Como mencionado em 3.2.4 (Capítulo 3) o utilizador necessita de fornecer elementos adicionais, denominados de *inputs*, para que o programa funcione corretamente.

Deste modo e de forma sucinta, para o caso de estudo analisado anteriormente, considerou-se os dados do Quadro 5.1 para materiais, propriedades sísmicas e ainda o valor do ângulo θ das escoras inclinadas, sendo ilustrado pela Figura 5.2 todos os *inputs* do programa.

Quadro 5.1 – Dados considerados do modelo aplicados no programa

Inputs	
Materiais	
Betão	C 30/37
Aço	A 400
Propriedade sísmicas	
Solo	B
Zona sísmica Tipo1	1.3
Zona sísmica Tipo 2	2.3
Período (s)	0.717
Coefficiente de comportamento	1.9
Ângulo das escoras (°)	26.56

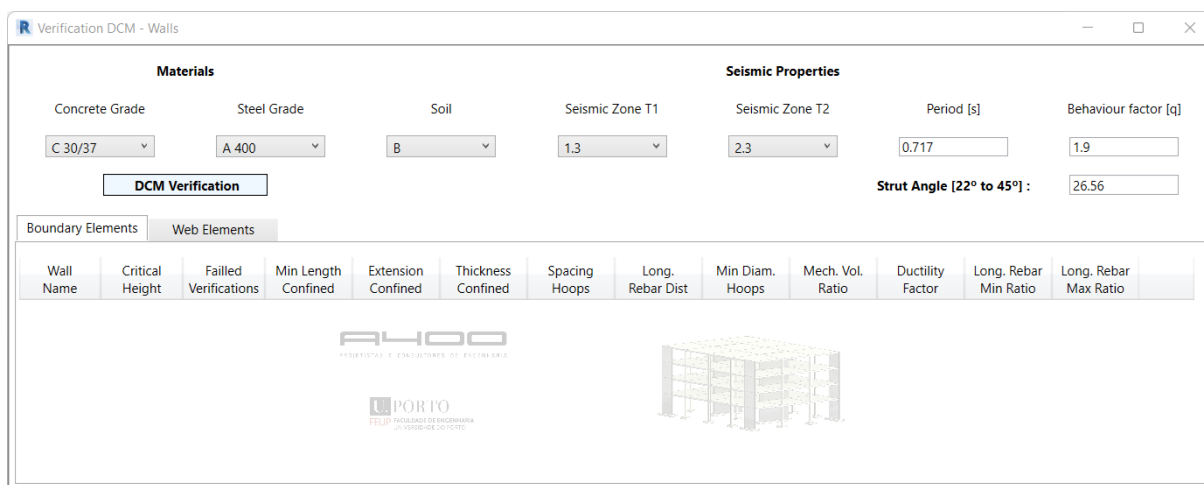


Figura 5.2 – Inputs inseridos no programa

Definidas todas as pré-seleções aquando da abertura do programa e seguidamente clicando no botão “DCM Verification” são exibidas todas as verificações, nas duas abas abaixo, para elementos de extremidade e alma da parede.

Contudo compete ao utilizador seleccionar os elementos que pretende verificar como sugerido pela Figura 5.3. A seleção de qualquer elemento que não corresponda à designação “wall” no Revit não invalida o funcionamento do programa, ou seja, seleccionando um elemento, como por exemplo um pilar ou laje, o programa exclui automaticamente informações provenientes desses elementos concentrando-se apenas nos elementos do tipo parede e as respetivas armaduras.

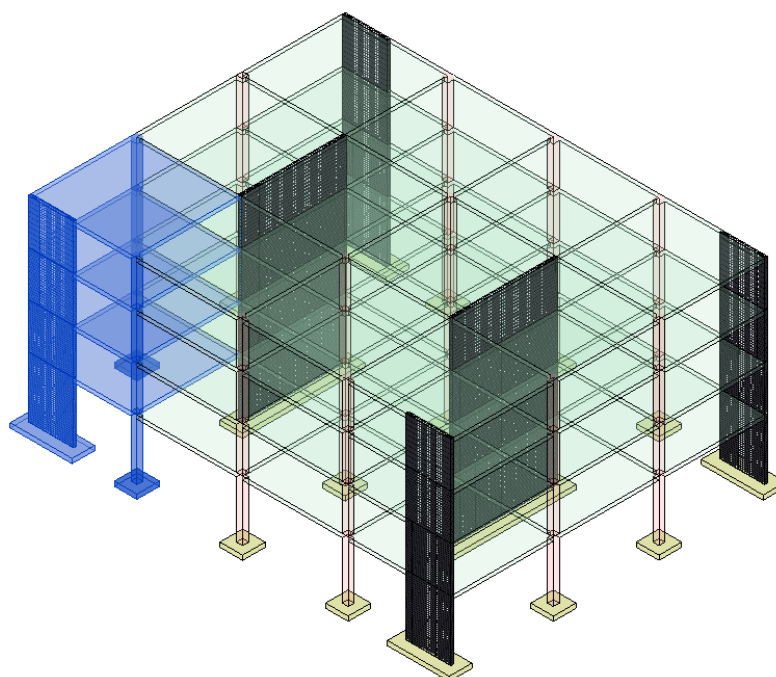


Figura 5.3 – Seleção dos elementos a verificar

5.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

No segmento inferior do menu de visualização são exibidos os valores das verificações para a região seleccionada, tanto para elementos de extremidade como para a alma da parede, com a designação de “Boundary Elements” e “Web Elements”, respetivamente em cada aba.

5.3.1 ESTRUTURA E LEITURA DOS RESULTADOS

Cada aba é estruturada e organizada por três colunas iniciais meramente informativas, com as restantes a surgirem em concordância com a quantidade de verificações a efetuar para cada zona da parede.

As colunas informativas são:

- Nome da parede, *Wall Name*;
- Altura crítica, *Critical Height* (calculada conforme 2.5.5.1, indicando a zona onde se vai dar as verificações);

- Número de verificações falhadas, *Failed Verifications*.

De modo que a leitura dos resultados seja de fácil interpretação e visualização, o valor em cada coluna de verificação aparecerá com um número a verde caso o pressuposto do Eurocódigo seja cumprido, caso contrário o painel exibirá um fundo e o respetivo valor a vermelho.

O programa fornece ainda a indicação da cláusula do Eurocódigo que serve de premissa para a verificação em análise, necessitando apenas o utilizador movimentar o cursor em cima do resultado, conforme exemplificado na Figura 5.4

ng. r Dist	Min Diam. Hoops	Mech. Vol. Ratio	Ductility Factor	Long. Rebar Min Ratio
09	1.33	2.62	3.05	7.0

EC2 9.5.3(1) - Minimum diameter of hoops

Figura 5.4 – Exibição da cláusula do Eurocódigo

5.3.2 ELEMENTOS DE EXTREMIDADE

Na figura 5.5 é apresentado para o caso dos elementos seleccionados (Figura 5.3) os resultados que se obtêm na análise dos elementos de extremidade. Acrescentar, é dado no Quadro 5.2 o fator de segurança empregue em cada regra (Equações 3.1 e 3.2, Capítulo 3), a respetiva secção no Eurocódigo e ainda o erro percentual do valor obtido pelo programa em comparação com o calculado de forma simplificada pelo Excel (Anexo A5 e A6), a fim de validar o sucesso da ferramenta criada.

The screenshot shows the 'Verification DCM - Walls' application window. It includes sections for 'Materials' (Concrete Grade: C 30/37, Steel Grade: A 400, Soil: B) and 'Seismic Properties' (Seismic Zone T1: 1.3, Seismic Zone T2: 2.3, Period [s]: 0.717, Behaviour factor [q]: 1.9, Strut Angle [22° to 45°]: 26.56). Below these is a table of verification results for 'Boundary Elements' and 'Web Elements'. The table for 'Boundary Elements' has the following data:

Wall Name	Critical Height	Failed Verifications	Min Length Confined	Extension Confined	Thickness Confined	Spacing Hoops	Long. Rebar Dist	Min Diam. Hoops	Mech. Vol. Ratio	Ductility Factor	Long. Rebar Min Ratio	Long. Rebar Max Ratio
Pa1	3.00	1	1.90	1.18	1.00	0.53	1.09	1.33	2.62	3.05	7.02	1.14

Figura 5.5 – Resultado das verificações para elementos de extremidade na parede Pa1

Quadro 5.2 – Informações da cláusula, do fator de segurança e do erro percentual do programa face a elementos de extremidade

Nome	Cláusula	Fator de Segurança [FS]	Erro [%]
<i>Min Length Confined</i>	EC8 5.4.3.4.2(6) - Minimum length of the confined boundary elements	$\frac{1}{\max(0,15l_w; 1,5b_w) / l_c}$	0,53
<i>Extension Confined</i>	EC8 5.4.3.4.2 (6) - Extension of the confined boundary elements	$\frac{1}{x_u \cdot \left(1 - \frac{\epsilon_{cu2}}{\epsilon_{cu2,c}}\right) / l_c}$	0,85
<i>Thickness Confined</i>	EC8 5.4.3.4.2(10) - Thickness of the confined parts of the wall section	$\frac{1}{0,2 / b_w}$	0,00
<i>Spacing Hoops</i>	EC8 5.4.3.2.2(11) a) - Spacing of the hoops (adopted for boundary elements)	$\frac{1}{\min\left(\frac{b_o}{2}; 0,175; 8d_{bL}\right) / s}$	0,00
<i>Long. Rebar Dist</i>	EC8 5.4.3.2.2(11) b) - Distance between consecutive longitudinal bars engaged by hoops or cross-ties	$\frac{1}{b_i / 0,2}$	0,00
<i>Min Diam. Hoops</i>	EC2 9.5.3(1) - Minimum diameter of hoops	$\frac{1}{\max\left(0,006; \frac{d_{bL}}{4}\right) / d_{bw}}$	0,00
<i>Mech. Vol. Ratio</i>	EC8 5.4.3.2.2(9) - Mechanical volumetric ratio (adopted for boundary elements)	$\frac{1}{0,08 / \omega_{wd}}$	0,76
<i>Ductility Factor</i>	EC8 5.4.3.4.2(4) – Ductility Factor	$\frac{1}{Eq. 2.34 / \alpha \cdot \omega_{wd}}$	1,31
<i>Long. Rebar Min Ratio</i>	EC8 5.4.3.4.2 - Longitudinal rebar minimum ratio	$\frac{1}{0,005 / p_{v,EE}}$	0,85
<i>Long. Rebar Max Ratio</i>	EC2 9.6.2(1) note2 - Longitudinal rebar maximum ratio	$\frac{1}{p_{v,EE} / 0,04}$	0,88

5.3.3 ELEMENTOS DA ALMA

No seguimento dos elementos de extremidade é exibido de forma igual os resultados atingidos para a parede Pa1 na zona da alma (Figura 5.6) e concomitantemente o Quadro 5.3 com as mesmas informações anunciadas anteriormente, agora para os elementos da alma.

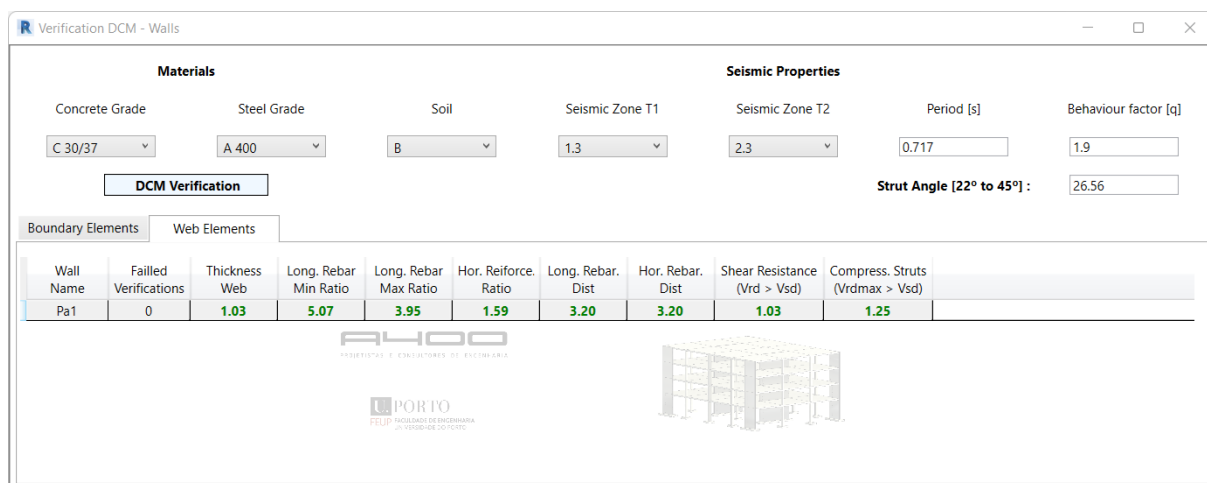


Figura 5.6 – Resultado das verificações para elementos da alma na parede Pa1

Quadro 5.3 – Informações da cláusula, do fator de segurança e do erro percentual do programa face a elementos da alma

Nome	Cláusula	Fator de Segurança [FS]	Erro [%]
<i>Thickness Web</i>	EC8 5.4.1.2.3(1) - Thickness of the web	$\frac{1}{\max\left(0,15; \frac{h_s}{20}\right) b_{wo}}$	0,00
<i>Long. Rebar Min Ratio</i>	EC2 9.6.2(1) note1 - Longitudinal rebar minimum ratio	$\frac{1}{0,002 p_{v,alma}}$	0,00
<i>Long. Rebar Max Ratio</i>	EC2 9.6.2(1) note2 - Longitudinal rebar maximum ratio	$\frac{1}{\frac{p_{v,alma}}{0,04}}$	0,00
<i>Hor. Rebar Ratio</i>	EC2 9.6.3(1) - Horizontal reinforcement ratio	$\frac{1}{\max\left(25\% \cdot p_{v,alma}; 0,1\%\right) p_h \times 100}$	0,00
<i>Long. Rebar Dist</i>	EC2 9.6.2(3) - Distance between two adjacents longitudinal bars	$\frac{1}{\frac{s}{\min(3b_w; 0,4)}}$	0,00
<i>Hor. Rebar Dist</i>	EC2 9.6.3(2) - Distance between two adjacents horizontal bars	$\frac{1}{\frac{s}{0,4}}$	0,00
<i>Shear Resistance</i> ($V_{Rd} > V_{Sd}$)	EC8 5.4.3.4.1(1) - Shear resistance	$\frac{1}{\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}}$	0,00
<i>Compress. Struts</i> ($V_{Rd,max} > V_{Sd}$)	EC8 5.4.3.4.1(1) - Compression struts (maximum shear force)	$\frac{1}{\frac{V_{Sd}}{V_{Rd,max}}}$	0,76

6

CONCLUSÃO

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

A realização da presente dissertação teve como objetivo a criação de uma ferramenta de verificação, integrado na metodologia BIM, face às normas preconizadas no Eurocódigo 8 para o dimensionamento sísmico de paredes resistentes de betão armado, para a classe de ductilidade média.

Aos dias de hoje, a produtividade e a qualidade de um projeto de estruturas são fatores relevantes num gabinete de engenharia. Assim e para o trabalho realizado, a criação de um programa que de forma automática verifique o cumprimento das normas para paredes estruturais, visa otimizar processos no dimensionamento, minorando repetições desnecessárias e de forma perspicaz identificar eventuais incumprimentos.

Para este propósito, foi abordado inicialmente pressupostos do Eurocódigo 8, no qual para paredes estruturais da classe *DCM*, constatou-se os vários requisitos, desde a classificação da ação sísmica às disposições construtivas da armadura, para se alcançar e classificar uma estrutura de sismo-resistente.

A ferramenta computacional foi elaborada no software *Microsoft Visual Studio*, em linguagem de programação *C#*, tendo-se inserido no software *Revit* por meio de um *plug-in* a ferramenta gerada. A construção do programa teve como base um caso de estudo que foi modelado em *Revit* e no programa de cálculo *ETABS*, proporcionando o contacto e aprendizagem com dois softwares muito utilizados em engenharia civil.

Dos mais diversos capítulos deduziram-se conclusões interessantes, sendo um desses casos localizado no quarto capítulo. Para a caracterização do valor do coeficiente de comportamento, constata-se de como o sistema estrutural influencia significativamente a adoção de um maior ou menor valor a aplicar no espetro de cálculo. Dado que o sistema foi classificado como torsionalmente flexível e excluindo os parâmetros adicionais para a obtenção do valor q , este mesmo valor ficou imediatamente limitando a um valor inferior comparativamente se o sistema estrutural tivesse sido classificado de paredes não acopladas. Como referido no capítulo, o facto de existirem duas paredes estruturais de comprimento considerável numa das direções ortogonais e próximas do centro de rigidez, favoreceu a uma menor rigidez de torção nessa direção, levando o sistema a ser considerado torsionalmente flexível. Se na situação de projeto a classificação do sistema não fosse aprovado, uma das possíveis soluções seria distanciar as duas paredes do centro de rigidez (deslocando-as na direção perpendicular à referida direção ortogonal), proporcionando rigidez à torção mínima em toda a estrutura e conseqüentemente modificação do sistema estrutural.

Em todo o desenvolvimento do algoritmo surgiram dificuldades (devido à falta de conhecimentos na área de programação) que foram ultrapassadas com êxito, no entanto, não foi possível associar

automaticamente os esforços provenientes do modelo de cálculo automático (ajustados também segundo o Eurocódigo 8) e o Revit, tendo estes sido inseridos manualmente no código e devidamente identificados pela parede estrutural a que se refere.

Analisando os resultados das verificações para elementos de extremidade e de alma para as seis paredes estruturais do caso de estudo (Anexo A7), é possível assumir que na sua generalidade a estrutura foi bem dimensionada ao dimensionamento sísmico, revelando-se apenas o incumprimento da norma para o espaçamento máximo dos estribos nos elementos de extremidade em cerca de 40/50% do valor pretendido, sendo necessário o aumentando da quantidade de estribos nesse elemento diminuindo dessa maneira o referido espaçamento.

Por fim e como explicado no quinto capítulo, comprava-se o sucesso da ferramenta originada pela aproximação dos resultados atingidos pelo programa para todas as paredes estruturais (Anexo A7) e os obtidos pelo Excel de forma simplificada e metódica (Anexo A5 e A6).

6.2 PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Concluída a dissertação e tendo sido cumprido o objetivo principal, o da criação de uma ferramenta integrada no software Revit para verificação das normas do Eurocódigo 8, sugere-se de seguida, alguns possíveis desenvolvimentos futuros:

- Permitir a interação de forma direta entre o programa ETABS e o Revit para obtenção da informação relativa a esforços provenientes da análise e a sua correta envolvente de cálculo, segundo o EC8;
- Junção do programa criado na empresa A400 – Projetistas e Consultores de Engenharia, Lda., com outros anteriormente desenvolvidos, concretamente o elaborado pela Patrícia Carreira (também realizado na mesma empresa), com regras de verificação para pilares, vigas e nós viga-pilar;
- Desenvolver uma ferramenta que complemente não só estruturas projetadas de betão mas também para outros materiais, estabelecidos no EC8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARÊDE, António (2013). *Dinâmica de Estruturas e Engenharia Sísmica*. FEUP. ISBN: ISBN.
- CEN, Comité Europeu de Normalização (2009). Norma Europeia EN 1990: Eurocódigo 0 – Bases para o projeto de estruturas. Caparica: IPQ.
- CEN, Comité Europeu de Normalização (2009). Norma Europeia EN 1991-1-1: Eurocódigo 1 – Ações em estruturas. Caparica: IPQ.
- CEN, Comité Europeu de Normalização (2004). Norma Europeia EN 1992-1-1: Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Caparica: IPQ.
- CEN, Comité Europeu de Normalização (2010). Norma Europeia EN 1998-1: Eurocódigo 8 - Disposições para projecto de estruturas sismo-resistentes: Parte 1 - Regras gerais-acções sísmicas e requisitos gerais para as estruturas. Caparica: IPQ.
- CSI, Portugal (2020). Eurocódigo 8 - Edifícios de Betão Armado Sessão 1. CSi Portugal (Webminar).
- CORRÊA, Manuel Ritto (2016). Introdução ao comportamento não linear de estruturas. Instituto Superior Técnico.
- GRAHAM, Jeremy (2018). Pushing Revit to the Next Level: An Intro to Revit Plugins with C#. Autodesk University.
- VARUM, Humberto Amorim Salazar (2021). Design of RC buildings with EN 1992 (Eurocode 2) and EN 1998 (Eurocode 8): Worked examples.
- POUCA, Nelson Vila. Análise Sísmica de Estruturas de Edifícios de Betão Armado segundo o Eurocódigo 8. FEUP.
- VARUM, Humberto Amorim Salazar (2020). Design of RC building frame structures according to Eurocode 8 (2004): Worked example. CONSTRUCT.
- COSTA, António (2011). *Seminário – Aplicação do Eurocódigo 8 ao Projecto de Edifícios*. [Consult. 24-03-2022] Disponível em WWW <URL:https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/20111118_acosta_exemplo1_1163118754eca750661304.pdf>
- CAMARA, José Noronha (2014). Estruturas de Betão: Folhas de apoio às aulas. Instituto Superior Técnico.
- CARDOSO, André Filipe Couseiro (2011). *Desenvolvimento de um programa de cálculo de sapatas de betão armado*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.
- TEIXEIRA, José Paulo Martins Campos (2017). *Desenvolvimento de uma aplicação web de gestão do património histórico recorrendo à tecnologia BIM*. Universidade de Aveiro.
- BIDARRA, L., VELHO, J., CLEMENTE, A., COSTA, A. Desenvolvimento de ferramentas de suporte ao processo BIM.
- CARREIRA, Patrícia (2021). *Ferramentas BIM de apoio ao dimensionamento sísmico de estruturas porticadas de edifícios de BA de acordo com o EC8*. Dissertação de Mestrado. FEUP.
- VARUM, H., RODRIGUES, H., FURTADO, A., ARÊDE, A. (2019). *Desempenho sísmico de edifícios: lições de sismos recentes*.

- LOPES, Mário (2008). *Sismos e Edifícios*. Editora ORION. ISBN: 9789728620110.
- RAMÔA, Luís Manuel da Silva (2012). *Aplicação do EC8 ao dimensionamento sísmico de edifícios de betão armado: Comparação com a aplicação do RSA/REBAP*. Dissertação de Mestrado. FEUP.
- GONÇALVES, António Pedro Bártolo Brás (2017). *Análise de edifícios altos de betão armado envolvendo a ação sísmica segundo o Eurocódigo 8*. Dissertação de Mestrado. FEUP.
- FRAGOSO, M., BARROS, M. (2005). *Espetros de Resposta de Movimentos Sísmicos Consistentes com Histórias de Deslocamentos Velocidades e Acelerações*. Universidade do Açores, Dep. De Ciências Tecnológicas e Desenvolvimento Ponta Delgada, São Miguel – Açores, Portugal.
- GUERREIRO, Luís (2016). *Ação sísmica: Engenharia Sísmica de Pontes*. Instituto Superior Técnico.
- GOMES, José Mário Moreira Andrade (2009). *Dimensionamento Sísmico de Edifícios Hospitalares Segundo o Eurocódigo 8*. Dissertação de Mestrado. FEUP.
- GAMA, Catarina (2014). *Dimensionamento Sísmico de Edifícios de Betão Armado*. Dissertação de Mestrado. FEUP.

ANEXOS

A1

MÉTODOS DA CLASSE *REVITFUNCS*

```

1  using Autodesk.Revit.ApplicationServices;
2  using Autodesk.Revit.DB;
3  using Autodesk.Revit.DB.Architecture;
4  using Autodesk.Revit.DB.Events;
5  using Autodesk.Revit.DB.ExtensibleStorage;
6  using Autodesk.Revit.DB.Structure;
7  using Autodesk.Revit.UI;
8  using System;
9  using System.Collections.Generic;
10 using System.Linq;
11 using System.Windows;
12 using RevitCommon;
13 using RevitWalls.R2022.RevitCommands;
14
15
16
17 namespace RevitWalls.Addin
18 {
19     1 referência
20     public class RevitFuncs
21     {
22         1 referência
23         internal static List<WallData> GetElementsWallData(UIDocument uiDoc)
24         {
25             var doc = uiDoc.Document;
26             var kLen = RevitUnits.ConvertToDisplayUnitsLength(doc);
27             var wlst = new List<WallData>();
28
29             using (var t = new Transaction(doc, "getSelectedWalls"))
30             {
31                 t.Start();
32
33                 foreach(var id in uiDoc.Selection.GetElementIds())
34                 {
35                     var el = doc.GetElement(id);
36                     var w = new WallData();
37
38                     if (el.Category == null) continue;
39                     if (el.Category.Name == "Walls")
40                     {
41                         w.h = GetWallHeight(el, doc);
42                         if (w.h > 0)
43                         {
44                             w.RevitId = el.UniqueId;
45                             w.RevitCategory = el.Category.Name;
46                             w.WallName = GetWallName(el, doc);
47                             w.WallElevation = GetWallElevation(el, doc);
48                             w.Orientation = GetWallOrientation(el, doc);
49                             w.rebars_hor.AddRange(GetRebarsHor(el, doc));
50                             w.rebars_ver.AddRange(GetRebarsVer(el, doc));
51                             w.bw = GetWallWidth(el, doc);
52                             w.lw = GetWallLength(el, doc);
53                             w.scArea = GetSectionArea(el, doc);
54                             w.hcr = GetWallCriticalHeight(el, doc);
55                             w.hs = GetClearStoryHeight(el, doc);
56                             w.cover = GetConcCover(el, doc);
57                             w.bo = GetConfinedWidth(el, doc);
58                             w.ho = GetConfinedLength(el, doc);
59                             w.lc = w.ho;
60                             w.pv_web = GetRatioVerticalReinforcementWeb(el, doc);
61                             w.pv_BE = GetRatioVerticalReinforcementBE(el, doc);
62                             w.ph = GetRatioHorizontalReinforcement(el, doc);
63                             w.vConcreteCore = GetVolumeConcreteCore(el, doc);
64                             w.vHoops = GetVolumeOfCofiningHoops(el, doc);
65                             w.alpha = GetConfinementEffectivenessFactor(el, doc);
66                             w.bi = GetDistanceBetweenBarsVer(el, doc);
67                             w.Msd = GetBendingMomentsSd(el, doc);
68                             w.Mrd = GetBendingMomentsRd(el, doc);
69                             w.Vsd = GetShearForcesSd(el, doc);
70                             w.Vrd = GetShearForcesRd(el, doc);
71                             w.Nsd = GetAxialForces(el, doc);
72
73                             wlst.Add(w);
74                         }
75                     }
76                 }
77                 t.Commit();
78             }
79             return wlst;
80         }
81
82         1 referência
83         public static double GetWallCriticalHeight (Element el, Document doc)[...]
84
85         2 referências
86         public static double GetClearStoryHeight (Element el, Document doc)[...]
87
88         1 referência
89         public static string GetWallElevation (Element el, Document doc)[...]
90
91         6 referências
92         public static string GetWallName (Element el, Document doc)[...]
93
94         8 referências
95         public static RebarProps [] GetRebarsHor (Element el, Document doc)[...]
96
97         2 referências
98         public static RebarProps[] GetRebarsVer(Element el, Document doc)[...]
99
100        3 referências
101        public static double GetRebarDiameter (Element el)[...]
102
103        1 referência
104        public static double GetRebarLength (Element el)[...]
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203

```

```
207 1 referência
211 public static double GetRebarSpacing (Element el)...
212
212 2 referências
public static bool IsHor(Rebar el, out int numsegs, out Segment2D segment, Document doc, out double length_b, out double length_h)...
262 1 referência
public static bool IsVer(Rebar el, out Segment2D segment)...
296 2 referências
public static string GetWallOrientation (Element el, Document doc)...
305 1 referência
public static bool IsDirectionX (Element el, Document doc)...
320 6 referências
329 public static double GetWallWidth (Element el, Document doc)...
330 8 referências
336 public static double GetWallLength (Element el, Document doc)...
337 3 referências
348 public static double GetWallHeight (Element el, Document doc)...
349 2 referências
358 public static double GetConcCover (Element el, Document doc)...
359 1 referência
366 public static double GetSectionArea (Element el, Document doc)...
367 5 referências
public static double GetConfinedWidth (Element el, Document doc)...
384 7 referências
402 public static double GetConfinedLength (Element el, Document doc)...
403 3 referências
453 public static double GetRatioVerticalReinforcement (Element el, Document doc)...
454 1 referência
public static double GetRatioVerticalReinforcementWeb (Element el, Document doc)...
463 1 referência
public static double GetRatioVerticalReinforcementBE (Element el, Document doc)...
473 1 referência
492 public static double GetRatioHorizontalReinforcement (Element el, Document doc)...
493 1 referência
500 public static double GetVolumeConcreteCore (Element el, Document doc)...
501 1 referência
529 public static double GetVolumeOfCofiningHoops (Element el, Document doc)...
530 1 referência
public static double GetConfinementEffectivenessFactor (Element el, Document doc)...
537 1 referência
public static double GetAlphaS (Element el, Document doc)...
555 1 referência
public static double GetAlphaN (Element el, Document doc)...
564 1 referência
public static double GetDistanceBetweenBarsVer (Element el, Document doc)...
576 2 referências
public static List<double> GetDistanceBetweenBars (Element el, Document doc)...
652 1 referência
public static double GetBendingMomentsSd (Element el, Document doc)...
674 1 referência
public static double GetBendingMomentsRd(Element el, Document doc)...
696 1 referência
public static double GetShearForcesSd(Element el, Document doc)...
718 1 referência
public static double GetShearForcesRd(Element el, Document doc)...
740 1 referência
762 public static double GetAxialForces(Element el, Document doc)...
763
764 }
765
```


A2

MÉTODOS DA CLASSE *MATERIAL* E *SEISMICPROP*

```

1 using System;
2 using System.Linq;
3
4 namespace RevitCommon
5 {
6     32 referências
7     public class MatConcrete
8     {
9         public string grade;
10        public double fck;
11        public double fcd;
12        public double fctm;
13
14        14 referências
15        public MatConcrete(string grade)
16        {
17            this.grade = grade;
18            fck = PropertiesConcreteGrade.fck(grade);
19            fcd = PropertiesConcreteGrade.fcd(grade);
20        }
21
22        0 referências
23        public override string ToString()
24        {
25            return grade;
26        }
27    }
28
29    19 referências
30    public class MatSteel
31    {
32        public string grade;
33        public double fyk;
34        public double fyd;
35        public double Es = 200e6;
36        public double Esysd;
37
38        3 referências
39        public MatSteel(string grade)
40        {
41            this.grade = grade;
42            fyk = PropertiesSteelGrade.fyk(grade);
43            fyd = PropertiesSteelGrade.fyd(grade);
44            Esysd = PropertiesSteelGrade.Esysd(grade);
45        }
46
47        0 referências
48        public override string ToString()
49        {
50            return grade;
51        }
52    }
53
54    //Funcoes
55
56    2 referências
57    public static class PropertiesConcreteGrade{...}
58
59    3 referências
60    public static class PropertiesSteelGrade{...}
61
62 }
63
64 }
65
66 }
67

```

```

1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5 using System.Threading.Tasks;
6 using RevitCommon;
7
8 namespace RevitCommon
9 {
10    12 referências
11    public class SeismicProp
12    {
13        public SeismicZone1 sZ1;
14        public SeismicZone2 sZ2;
15        public Soil soil;
16        public List<SeismicZone1> choiceSeismicZone1;
17        public List<SeismicZone2> choiceSeismicZone2;
18        public List<Soil> choiceSoil;
19        public double T;
20        public double q;
21        public double localDuc;
22
23        1 referências
24        public SeismicProp(SeismicZone1 sZ1, SeismicZone2 sZ2, Soil soil, double t, double q){...}
25
26        1 referências
27        public static double LocalDuctility(Soil soil, double T, double q){...}
28
29        0 referências
30        public static double GetCofes1(SeismicProp SeismicP){...}
31
32        0 referências
33        public static double GetCofes2(SeismicProp SeismicP){...}
34
35    }
36
37 }
38
39 }
40
41 }
42
43 }
44
45 }
46
47 }
48
49 }
50
51 }
52
53 }
54
55 }
56
57 }
58
59 }
60
61 }
62
63 }
64
65 }
66
67 }
68
69 }
70
71 }
72
73 }
74
75 }
76
77 }
78
79 }
80
81 }
82
83 }
84
85 }
86
87 }
88
89 }
90
91 }
92
93 }
94
95 }
96
97 }
98
99 }
100

```

A3

MÉTODOS DA CLASSE WALLDATA, WALLRESULTS, BOUNDARYELEMENTSRESULTS E WEBRESULTS

```
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5 using System.Threading.Tasks;
6
7 namespace RevitCommon
8 {
9     29 referências
10     public class WallData
11     {
12         public string Orientation;
13         public string RevitId;
14         public string RevitCategory;
15         public string WallName;
16         public string WallElevation;
17         public Segment2D Segment;
18         public List<RebarProps> rebars_hor = new List<RebarProps>();
19         public List<RebarProps> rebars_ver = new List<RebarProps>();
20         public double bw; //Espessura parede
21         public double lw; //Comprimento parede
22         public double h; //Altura parede
23         public double hcr; //Altura critica
24         public double hs; //Altura do piso
25         public double cover; //Recobrimento
26         public double ho; //Comprimento nucleo confinado
27         public double lc; //Comprimento elemento extremidade
28         public double bo; //Largura nucleo confinado
29         public double pv_web; //Taxa armadura vertical na alma (web)
30         public double pv_BE; //Taxa armadura vertical nos elementos de extremidade (Boundary elements)
31         public double ph; //Taxa armadura horizontal
32         public double scArea; //Area da secção
33         public double vConcreteCore; //Volume nucleo de betão
34         public double vHoops; //Volume cintas
35         public double alpha; //Fator de eficacia do confinamento
36         public double bi; //Distancia entre barras verticais consecutivas envolvido por cintas
37         public double Mrd; //Momento atuante;
38         public double Vsd; //Esforço transverso atuante;
39         public double Vrd; //Esforço transverso resistente;
40         public double Nsd; //Esforço axial;
41     }
42
43     11 referências
44     public class RebarProps
45     {
46         public double diameter;
47         public double quantity;
48         public double spacing;
49         public double length;
50         public bool isStirrup;
51         public double lenghtStirrupSeg_MinorSide;
52         public double lengthStirrupSeg_LargarSide;
53         public Segment2D segment;
54     }
55     8 referências
56     public class Point2D...
57     7 referências
58     public class Segment2D...
59 }
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
```



```
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5 using System.Threading.Tasks;
6
7 namespace RevitCommon.RevitCommon
8 {
9     public class WallResults
10    {
11        public WallData Wall { get; private set; }
12        public MatConcrete Concrete { get; private set; }
13        public MatSteel Steel { get; private set; }
14        public SeismicProp SeismicProp { get; private set; }
15        public int FailedVerificaton { get; set; } = 0;
16
17        public Verification Verification { get; set; }
18        public WallResults (WallData wall, MatConcrete concrete, MatSteel steel, SeismicProp seismicProp)
19        {
20            Wall = wall;
21            Concrete = concrete;
22            Steel = steel;
23            SeismicProp = seismicProp;
24
25            Calculate();
26        }
27        public virtual void Calculate() { }
28
29        //-----
30        public double GetNormalizedAxialForce(WallData wall, MatConcrete concrete)
31        {
32            return wall.Nsd / (wall.scArea * concrete.fcd);
33        }
34    }
35 }
36
```

```

1  using System;
2  using System.Collections.Generic;
3  using System.Linq;
4  using System.Text;
5  using System.Threading.Tasks;
6
7  namespace RevitCommon.RevitCommon
8  {
9      7 referências
10     public class BoundaryElementsResults : WallResults
11     {
12         4 referências
13         public Verification VerMinimumLengthConfinedBoundaryElements { get; private set; }
14         4 referências
15         public Verification VerExtensionConfinedBoundaryElements { get; private set; }
16         4 referências
17         public Verification VerThicknessConfinedBoundaryElements { get; private set; }
18         4 referências
19         public Verification VerSpacingHoops { get; private set; }
20         4 referências
21         public Verification VerDistanceBetweenConsecutiveLongitudinalBars { get; private set; }
22         4 referências
23         public Verification VerMinimumDiameterHoops { get; private set; }
24         4 referências
25         public Verification VerMechanicalVolumetricRatio { get; private set; }
26         4 referências
27         public Verification VerDuctilityFactor { get; private set; }
28         4 referências
29         public Verification VerLongitudinalRebarMinimumRatioBE { get; private set; }
30         4 referências
31         public Verification VerLongitudinalRebarMaximumRatioBE { get; private set; }
32
33         4 referências
34         public override void Calculate()
35         {
36             base.Calculate();
37
38             VerMinimumLengthConfinedBoundaryElements = VerifyMinimumLengthConfinedBoundaryElements();
39             VerExtensionConfinedBoundaryElements = VerifyExtensionConfinedBoundaryElements();
40             VerThicknessConfinedBoundaryElements = VerifyThicknessConfinedBoundaryElements();
41             VerSpacingHoops = VerifySpacingHoops();
42             VerDistanceBetweenConsecutiveLongitudinalBars = VerifyDistanceBetweenConsecutiveLongitudinalBars();
43             VerMinimumDiameterHoops = VerifyMinimumDiameterHoops();
44             VerMechanicalVolumetricRatio = VerifyMechanicalVolumetricRatio();
45             VerDuctilityFactor = VerifyDuctilityFactor();
46             VerLongitudinalRebarMinimumRatioBE = VerifyLongitudinalRebarMinimumRatioBE();
47             VerLongitudinalRebarMaximumRatioBE = VerifyLongitudinalRebarMaximumRatioBE();
48         }
49
50         1 referência
51         public BoundaryElementsResults(WallData wall, MatConcrete concrete, MatSteel steel, SeismicProp seismicProp) : base(wall, concrete, steel, seismicProp)
52         {
53         }
54
55         //-----VERIFICATIONS-----
56         1 referência
57         public Verification VerifyMinimumLengthConfinedBoundaryElements()...
58         1 referência
59         public Verification VerifyExtensionConfinedBoundaryElements()...
60         1 referência
61         public Verification VerifyThicknessConfinedBoundaryElements()...
62         1 referência
63         public Verification VerifySpacingHoops()...
64         1 referência
65         public Verification VerifyDistanceBetweenConsecutiveLongitudinalBars()...
66         1 referência
67         public Verification VerifyMinimumDiameterHoops()...
68         1 referência
69         public Verification VerifyMechanicalVolumetricRatio()...
70         1 referência
71         public Verification VerifyDuctilityFactor()...
72         1 referência
73         public Verification VerifyLongitudinalRebarMinimumRatioBE()...
74         1 referência
75         public Verification VerifyLongitudinalRebarMaximumRatioBE()...
76
77         //-----FUNCTIONS-----
78         3 referências
79         public double MechanicalVolumetricRatio (WallData wall, MatConcrete concrete, MatSteel steel)...
80         1 referência
81         public double UltimateExtensionConfinedConcrete (WallData wall, MatConcrete concrete, MatSteel steel)...
82         2 referências
83         public double MechanicalVerticalReinforcementRatioWeb (WallData wall, MatConcrete concrete, MatSteel steel)...
84         1 referência
85         public double NeutralAxisDepth (WallData wall, MatConcrete concrete, MatSteel steel)...
86         1 referência
87         public double LocalDuctility (WallData wall, SeismicProp seismicProp)...
88     }
89 }

```

```
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5 using System.Threading.Tasks;
6
7 namespace RevitCommon.RevitCommon
8 {
9     7 referências
10     public class WebResults : WallResults
11     {
12         public Verification verThicknessWeb;
13         public Verification verLongitudinalRebarMinimumRatioWeb;
14         public Verification verLongitudinalRebarMaximumRatioWeb;
15         public Verification verHorizontalReinforcementRatio;
16         public Verification verDistanceBetweenTwoAdjacentLongitudinalBars;
17         public Verification verDistanceBetweenTwoAdjacentHorizontalBars;
18         public Verification verShearResistance;
19         public Verification verCompressionStruts;
20
21     4 referências
22     public override void Calculate()
23     {
24         base.Calculate();
25
26         verThicknessWeb = VerifyThicknessWeb();
27         verLongitudinalRebarMinimumRatioWeb = VerifyLongitudinalRebarMinimumRatioWeb();
28         verLongitudinalRebarMaximumRatioWeb = VerifyLongitudinalRebarMaximumRatioWeb();
29         verHorizontalReinforcementRatio = VerifyHorizontalReinforcementRatio();
30         verDistanceBetweenTwoAdjacentLongitudinalBars = VerifyDistanceBetweenTwoAdjacentLongitudinalBars();
31         verDistanceBetweenTwoAdjacentHorizontalBars = VerifyDistanceBetweenTwoAdjacentHorizontalBars();
32         verShearResistance = VerifyShearResistance();
33         verCompressionStruts = VerifyCompressionStruts();
34     }
35
36     1 referência
37     public WebResults(WallData wall, MatConcrete concrete, MatSteel steel, SeismicProp seismicProp) : base(wall, concrete, steel, seismicProp)
38     {
39     }
40
41     //-----VERIFICATIONS-----
42
43     1 referência
44     public Verification VerifyThicknessWeb()...
45
46     1 referência
47     public Verification VerifyLongitudinalRebarMinimumRatioWeb()...
48
49     1 referência
50     public Verification VerifyLongitudinalRebarMaximumRatioWeb()...
51
52     1 referência
53     public Verification VerifyHorizontalReinforcementRatio()...
54
55     1 referência
56     public Verification VerifyDistanceBetweenTwoAdjacentLongitudinalBars()...
57
58     1 referência
59     public Verification VerifyDistanceBetweenTwoAdjacentHorizontalBars()...
60
61     1 referência
62     public Verification VerifyShearResistance()...
63
64     1 referência
65     public Verification VerifyCompressionStruts()...
66
67     //-----FUNCTIONS-----
68
69     1 referência
70     public double RequiredShearReinforcement (WallData wall, MatConcrete concrete, SeismicProp seismicProp)...
```


A4

EXEMPLO DOS RESULTADOS OBTIDOS DO PROGRAMA *FLEXDESV* PARA PAREDES ESTRUTURAIS

Num	Combin	SecShape	Station	Bar.L (m)
1	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(>)Myy(>)	Rectangular	0,000	4
2	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(>)Myy(>)	Rectangular	4,000	4
3	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(>)Myy(>)	Rectangular	buckling	4
4	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(>)Myy(<)	Rectangular	0,000	4
5	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(>)Myy(<)	Rectangular	4,000	4
6	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(>)Myy(<)	Rectangular	buckling	4
7	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(<)Myy(>)	Rectangular	0,000	4
8	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(<)Myy(>)	Rectangular	4,000	4
9	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(<)Myy(>)	Rectangular	buckling	4
10	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(<)Myy(<)	Rectangular	0,000	4
11	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(<)Myy(<)	Rectangular	4,000	4
12	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(<)Mxx(<)Myy(<)	Rectangular	buckling	4
13	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(>)Myy(>)	Rectangular	0,000	4
14	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(>)Myy(>)	Rectangular	4,000	4
15	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(>)Myy(>)	Rectangular	buckling	4
16	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(>)Myy(<)	Rectangular	0,000	4
17	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(>)Myy(<)	Rectangular	4,000	4
18	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(>)Myy(<)	Rectangular	buckling	4
19	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(<)Myy(>)	Rectangular	0,000	4
20	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(<)Myy(>)	Rectangular	4,000	4
21	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(<)Myy(>)	Rectangular	buckling	4
22	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(<)Myy(<)	Rectangular	0,000	4
23	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(<)Myy(<)	Rectangular	4,000	4
24	CQP+Sismo Tipo 1 X_N(>)Mxx(<)Myy(<)	Rectangular	buckling	4

Asw/s [x] (cm ² /m)	Asw/s [y] (cm ² /m)	R.gir.[xx] Rebar (m)	R.gir.[yy] Rebar (m)	Mxx.QP (kN.m)	Myy.QP (kN.m)	Mxx.FLU (kN.m)	Myy.FLU (kN.m)	N.ULS (kN)
56,30	8,04	1,02	0,05	-6,13	0,00	-9,78	0,00	1010,12
56,30	8,04	1,02	0,05	48,79	37,34	77,88	59,66	950,14
56,30	8,04	1,02	0,05	26,82	22,41	42,81	35,80	1010,12
56,30	8,04	1,02	0,05	-6,13	0,00	-9,78	0,00	1010,12
56,30	8,04	1,02	0,05	48,79	37,34	77,88	59,66	950,14
56,30	8,04	1,02	0,05	26,82	22,41	42,81	35,80	1010,12
56,30	8,04	1,02	0,05	-6,13	0,00	-9,78	0,00	1010,12
56,30	8,04	1,02	0,05	48,79	37,34	77,88	59,66	950,14
56,30	8,04	1,02	0,05	26,82	22,41	42,81	35,80	1010,12
56,30	8,04	1,02	0,05	-6,13	0,00	-9,78	0,00	1010,12
56,30	8,04	1,02	0,05	48,79	37,34	77,88	59,66	950,14
56,30	8,04	1,02	0,05	26,82	22,41	42,81	35,80	1010,12
56,30	8,04	1,02	0,05	-6,13	0,00	-9,78	0,00	551,27
56,30	8,04	1,02	0,05	48,79	37,34	77,88	59,66	491,29
56,30	8,04	1,02	0,05	26,82	22,41	42,81	35,80	551,27
56,30	8,04	1,02	0,05	-6,13	0,00	-9,78	0,00	551,27
56,30	8,04	1,02	0,05	48,79	37,34	77,88	59,66	491,29
56,30	8,04	1,02	0,05	26,82	22,41	42,81	35,80	551,27
56,30	8,04	1,02	0,05	-6,13	0,00	-9,78	0,00	551,27
56,30	8,04	1,02	0,05	48,79	37,34	77,88	59,66	491,29
56,30	8,04	1,02	0,05	26,82	22,41	42,81	35,80	551,27
56,30	8,04	1,02	0,05	-6,13	0,00	-9,78	0,00	551,27
56,30	8,04	1,02	0,05	48,79	37,34	77,88	59,66	491,29
56,30	8,04	1,02	0,05	26,82	22,41	42,81	35,80	551,27
56,30	8,04	1,02	0,05	-6,13	0,00	-9,78	0,00	551,27
56,30	8,04	1,02	0,05	48,79	37,34	77,88	59,66	491,29
56,30	8,04	1,02	0,05	26,82	22,41	42,81	35,80	551,27

Mxx.ULS (kN.m)	Myy.ULS (kN.m)	Vx.ULS (kN)	Vy.ULS (kN)	Exclmpe rf [y] (m)	Mimperf [xx] (kN.m)	Exclmpe rf [x] (m)	Mimperf [yy] (kN.m)	Coef _n
6676,14	0,00	-7,78	1442	0,02	101,01	0,1	20,20	0,08
5779,03	40,41	-7,30	1440	0,02	95,01	0,1	19,00	0,08
6317,30	24,24	-7,78	1442	0,02	101,01	0,1	20,20	0,08
6676,14	0,00	-10,89	1442	0,02	101,01	0,1	20,20	0,08
5779,03	34,28	-11,37	1440	0,02	95,01	0,1	19,00	0,08
6317,30	20,57	-10,89	1442	0,02	101,01	0,1	20,20	0,08
6676,14	0,00	-7,78	1442	0,02	101,01	0,1	20,20	0,08
5779,03	40,41	-7,30	1440	0,02	95,01	0,1	19,00	0,08
6317,30	24,24	-7,78	1442	0,02	101,01	0,1	20,20	0,08
6676,14	0,00	-10,89	1442	0,02	101,01	0,1	20,20	0,08
5779,03	34,28	-11,37	1440	0,02	95,01	0,1	19,00	0,08
6317,30	20,57	-10,89	1442	0,02	101,01	0,1	20,20	0,08
6676,14	0,00	-7,78	1442	0,02	55,13	0,1	11,03	0,05
5779,03	40,41	-7,30	1440	0,02	49,13	0,1	9,83	0,04
6317,30	24,24	-7,78	1442	0,02	55,13	0,1	11,03	0,04
6676,14	0,00	-10,89	1442	0,02	55,13	0,1	11,03	0,05
5779,03	34,28	-11,37	1440	0,02	49,13	0,1	9,83	0,04
6317,30	20,57	-10,89	1442	0,02	55,13	0,1	11,03	0,04
6676,14	0,00	-7,78	1442	0,02	55,13	0,1	11,03	0,05
5779,03	40,41	-7,30	1440	0,02	49,13	0,1	9,83	0,04
6317,30	24,24	-7,78	1442	0,02	55,13	0,1	11,03	0,04
6676,14	0,00	-10,89	1442	0,02	55,13	0,1	11,03	0,05
5779,03	34,28	-11,37	1440	0,02	49,13	0,1	9,83	0,04
6317,30	20,57	-10,89	1442	0,02	55,13	0,1	11,03	0,04

Coef_w	Nsd (kN)	Msd.xx (kN.m)	Msd.yy (kN.m)	Vsd.x (kN)	Vsd.y (kN)	Mrd.xx (kN.m)	Mrd.yy (kN.m)	Msd (kN.m)
0,44	1010,12	6777,15	0,00	-7,78	1442,72	7165,72	0,00	6777,15
0,44	950,14	5874,05	40,41	-7,30	1440,15	7000,28	48,16	5874,19
0,44	1010,12	6418,31	24,24	-7,78	1442,72	7115,42	26,88	6418,35
0,44	1010,12	6777,15	0,00	-10,89	1442,72	7165,72	0,00	6777,15
0,44	950,14	5874,05	34,28	-11,37	1440,15	7026,54	41,01	5874,15
0,44	1010,12	6418,31	20,57	-10,89	1442,72	7125,34	22,83	6418,34
0,44	1010,12	6777,15	0,00	-7,78	1442,72	7165,72	0,00	6777,15
0,44	950,14	5874,05	40,41	-7,30	1440,15	7000,28	48,16	5874,19
0,44	1010,12	6418,31	24,24	-7,78	1442,72	7115,42	26,88	6418,35
0,44	1010,12	6777,15	0,00	-10,89	1442,72	7165,72	0,00	6777,15
0,44	950,14	5874,05	34,28	-11,37	1440,15	7026,54	41,01	5874,15
0,44	1010,12	6418,31	20,57	-10,89	1442,72	7125,34	22,83	6418,34
0,44	551,27	6731,27	0,00	-7,78	1442,72	6779,40	0,00	6731,27
0,44	491,29	5828,16	40,41	-7,30	1440,15	6634,96	46,00	5828,30
0,44	551,27	6372,42	24,24	-7,78	1442,72	6745,25	25,66	6372,47
0,44	551,27	6731,27	0,00	-10,89	1442,72	6779,40	0,00	6731,27
0,44	491,29	5828,16	34,28	-11,37	1440,15	6657,72	39,16	5828,26
0,44	551,27	6372,42	20,57	-10,89	1442,72	6753,94	21,80	6372,46
0,44	551,27	6731,27	0,00	-7,78	1442,72	6779,40	0,00	6731,27
0,44	491,29	5828,16	40,41	-7,30	1440,15	6634,96	46,00	5828,30
0,44	551,27	6372,42	24,24	-7,78	1442,72	6745,25	25,66	6372,47
0,44	551,27	6731,27	0,00	-10,89	1442,72	6779,40	0,00	6731,27
0,44	491,29	5828,16	34,28	-11,37	1440,15	6657,72	39,16	5828,26
0,44	551,27	6372,42	20,57	-10,89	1442,72	6753,94	21,80	6372,46

Mrd (kN.m)	CSeg.M	Vrd.x (kN)	Vrd.y (kN)	CSeg.V	Nrd (kN)	CSeg.N
7165,72	1,06	535,75	1486,42	1,02	9920,89	9,82
7000,44	1,19	535,75	1486,42	1,02	10985,88	11,56
7115,47	1,11	535,75	1486,42	1,02	10308,59	10,21
7165,72	1,06	535,75	1486,42	1,01	9653,84	9,56
7026,66	1,20	535,75	1486,42	1,01	11031,30	11,61
7125,38	1,11	535,75	1486,42	1,01	10331,46	10,23
7165,72	1,06	535,75	1486,42	1,02	9638,55	9,54
7000,44	1,19	535,75	1486,42	1,02	10985,88	11,56
7115,47	1,11	535,75	1486,42	1,02	10308,59	10,21
7165,72	1,06	535,75	1486,42	1,01	9653,84	9,56
7026,66	1,20	535,75	1486,42	1,01	11031,30	11,61
7125,38	1,11	535,75	1486,42	1,01	10331,46	10,23
6779,40	1,01	535,75	1486,42	1,02	598,08	0,92
6635,11	1,14	535,75	1486,42	1,02	11039,10	22,47
6745,30	1,06	535,75	1486,42	1,02	10376,24	18,82
6779,40	1,01	535,75	1486,42	1,01	573,35	0,96
6657,83	1,14	535,75	1486,42	1,01	11095,79	22,59
6753,97	1,06	535,75	1486,42	1,01	10398,99	18,86
6779,40	1,01	535,75	1486,42	1,02	559,16	0,99
6635,11	1,14	535,75	1486,42	1,02	11039,10	22,47
6745,30	1,06	535,75	1486,42	1,02	10376,24	18,82
6779,40	1,01	535,75	1486,42	1,01	573,35	0,96
6657,83	1,14	535,75	1486,42	1,01	11095,79	22,59
6753,97	1,06	535,75	1486,42	1,01	10398,99	18,86

A5

DADOS PARA REALIZAÇÃO DAS VERIFICAÇÕES PELO EXCEL

Material			
Betão	C30/37 E/2	Aço	A400
E	16500000	fyk (kPa)	400000
fck (kPa)	30000	fyd	347826
	30	E	2,00E+08
fcd	20000	esyk	0,0017
fctm	2,896	Recobrimento	0,03
Ecu2	0,0035		

T [s]	0,717	
	Tipo 1	Tipo 2
SMÁX	1,35	1,35
agr [m/s ²]	1,50	1,70
S	1,29	1,27
TB [s]	0,10	0,10
TC [s]	0,60	0,25
TD [s]	2,00	2,00
q	1,9	1,9

	u	u_ajust	q_ajust
Parede1	2,334	2,594	1,797
Parede2	2,334	2,594	1,797
Parede3	2,334	2,594	1,797
Parede4	2,334	2,594	1,797
Parede5	0,997	0,997	0,998
Parede6	0,997	0,997	0,998

Zona Crítica			
	Altura Crítica	Condicionante	Altura Crítica Real
Parede 1	3	3,875	3
Parede 2	3	3,875	3
Parede 3	3	3,875	3
Parede 4	3	3,875	3
Parede 5	7	3,875	3,875
Parede 6	7	3,875	3,875

id	Altura P1 [m]	Altura (hw) [m]	Secção [cm]	lw [m]	bw [m]	bwo [m]	A [m ²]	ho=lc [m]	bo [m]	hs [m]	Vnucleo [m ³]
Parede1_P1	4,00	13,00	Pa 300 20	3,00	0,20	0,20	0,60	0,85	0,13	3,88	0,11
Parede2_P1	4,00	13,00	Pa 300 20	3,00	0,20	0,20	0,60	0,85	0,13	3,88	0,11
Parede3_P1	4,00	13,00	Pa 300 20	3,00	0,20	0,20	0,60	0,85	0,13	3,88	0,11
Parede4_P1	4,00	13,00	Pa 300 20	3,00	0,20	0,20	0,60	0,85	0,13	3,88	0,11
Parede5_P1	4,00	13,00	Pa 700 20	7,00	0,20	0,20	1,40	2,00	0,13	3,88	0,26
Parede6_P1	4,00	13,00	Pa 700 20	7,00	0,20	0,20	1,40	2,00	0,13	3,88	0,26

Vnucleo [m ³]	Xu	Ecu2,c	lc (formula)	Nsd [kN]	Msd [kN.m]	Mrd [kN.m]	Vsd [kN]	Vrd,s [kN]	Vrd [kN]	Vrd,max [kN]
0,11	1,18	0,01	0,73	1010	6777	7165	1442	1202	1486	1816
0,11	1,18	0,01	0,73	1010	6777	7165	1442	1202	1486	1816
0,11	1,18	0,01	0,73	1010	6777	7165	1442	1202	1486	1816
0,11	1,18	0,01	0,73	1010	6777	7165	1442	1202	1486	1816
0,26	2,57	0,01	1,81	4494	20918	39813	3462	3496	4375	4224
0,26	2,57	0,01	1,81	4494	20918	39813	3462	3496	4375	4224

vd	pv, alma	Wv	φ 10	φ 12	φ 16	φ 20	Asw [cm ² /m]	φ estribo dbw	bi Horiz (EE)[m]	bi Vert (EE)[m]
0,08	0,010	0,176		18		42	8,042	8	0,091	0,104
0,08	0,010	0,176		18		42	8,042	8	0,091	0,104
0,08	0,010	0,176		18		42	8,042	8	0,091	0,104
0,08	0,010	0,176		18		42	8,042	8	0,091	0,104
0,16	0,004	0,082	40			90	10,05	8	0,094	0,104
0,16	0,004	0,082	40			90	10,053	8	0,094	0,104

Número espaços entre varões long (horizontal)	n	Transv [cm ² /m]	Spacing Estribos [m]	Spacing máx [m]	Spacing Arm Long Alma [m]	Vcintas [m ³]
9	60	56,297	0,125	0,066	0,125	0,0013
9	60	56,297	0,125	0,066	0,125	0,0013
9	60	56,297	0,125	0,066	0,125	0,0013
9	60	56,297	0,125	0,066	0,125	0,0013
21	90	90,477	0,100	0,066	0,150	0,0038
21	90	90,477	0,100	0,066	0,150	0,0038

Wwd	alpha n	alpha s	alpha pv, EE	ph	a*Wwd	Eq. 5.20	
0,21	0,55	0,49	0,27	0,035	0,004	0,06	0,0184
0,21	0,55	0,49	0,27	0,035	0,004	0,06	0,0184
0,21	0,55	0,49	0,27	0,035	0,004	0,06	0,0184
0,21	0,55	0,49	0,27	0,035	0,004	0,06	0,0184
0,26	0,53	0,61	0,32	0,032	0,005	0,08	-0,0159
0,26	0,53	0,61	0,32	0,032	0,005	0,08	-0,0159

A6

RESULTADOS DAS VERIFICAÇÕES REALIZADAS PELO EXCEL PARA ELEMENTOS DE EXTREMIDADE E ALMA DA PAREDE

Verificações (EE)										
id	Comprimento min de lc	$l_c > x_u * (1 - E_{cu2} / E_{cu2,c})$	Espessura min bw	Taxa Arm. Long min	Taxa Arm. Long max	Esp. Máx estribos	Distancia máx entre 2 V.long	Diâmetro min estribos	Taxa mecanica volumetrica	Fator de ductilidade
Parede1_P1	1,89	1,17	1,00	7,08	1,13	0,53	1,09	1,33	2,60	3,01
Parede2_P1	1,89	1,17	1,00	7,08	1,13	0,53	1,09	1,33	2,60	3,01
Parede3_P1	1,89	1,17	1,00	7,08	1,13	0,53	1,09	1,33	2,60	3,01
Parede4_P1	1,89	1,17	1,00	7,08	1,13	0,53	1,09	1,33	2,60	3,01
Parede5_P1	1,90	1,11	1,00	6,45	1,24	0,66	1,06	1,33	3,20	5,18
Parede6_P1	1,90	1,11	1,00	6,45	1,24	0,66	1,06	1,33	3,20	5,18

Verificações (Alma)								
id	Espessura min bwo	Taxa Arm. Long min	Taxa Arm. Long max	Taxa min Arm. Horizontal	Distância máx entre 2	Distância máx entre 2 varoes	Verificação Esmagamento	Verificação Esforço
Parede1_P1	1,03	5,07	3,95	1,59	3,20	3,20	1,26	1,03
Parede2_P1	1,03	5,07	3,95	1,59	3,20	3,20	1,26	1,03
Parede3_P1	1,03	5,07	3,95	1,59	3,20	3,20	1,26	1,03
Parede4_P1	1,03	5,07	3,95	1,59	3,20	3,20	1,26	1,03
Parede5_P1	1,03	2,36	8,46	4,25	2,67	4,00	1,22	1,26
Parede6_P1	1,03	2,36	8,46	4,25	2,67	4,00	1,22	1,26

A7

**RESULTADOS DAS VERIFICAÇÕES REALIZADAS PELO
PROGRAMA A TODAS AS PAREDES DO CASO DE ESTUDO
PARA ELEMENTOS DE EXTREMIDADE E DE ALMA**

Verification DCM - Walls

Materials **Seismic Properties**

Concrete Grade: C 30/37 Steel Grade: A 400 Soil: B Seismic Zone T1: 1.3 Seismic Zone T2: 2.3 Period [s]: 0.717 Behaviour factor [q]: 1.9

DCM Verification **Strut Angle [22° to 45°]:** 26.56

Boundary Elements Web Elements

Wall Name	Critical Height	Failed Verifications	Min Length Confined	Extension Confined	Thickness Confined	Spacing Hoops	Long. Rebar Dist	Min Diam. Hoops	Mech. Vol. Ratio	Ductility Factor	Long. Rebar Min Ratio	Long. Rebar Max Ratio
Pa1	3.00	1	1.90	1.18	1.00	0.53	1.09	1.33	2.62	3.05	7.02	1.14
Pa2	3.00	1	1.90	1.18	1.00	0.53	1.09	1.33	2.62	3.05	7.02	1.14
Pa3	3.00	1	1.90	1.18	1.00	0.53	1.09	1.33	2.62	3.05	7.02	1.14
Pa4	3.00	1	1.90	1.18	1.00	0.53	1.09	1.33	2.62	3.05	7.02	1.14
Pa5	3.88	1	1.91	1.11	1.00	0.66	1.06	1.33	3.24	5.23	6.42	1.25
Pa6	3.88	1	1.91	1.11	1.00	0.66	1.06	1.33	3.24	5.24	6.42	1.25

Verification DCM - Walls

Materials **Seismic Properties**

Concrete Grade: C 30/37 Steel Grade: A 400 Soil: B Seismic Zone T1: 1.3 Seismic Zone T2: 2.3 Period [s]: 0.717 Behaviour factor [q]: 1.9

DCM Verification **Strut Angle [22° to 45°]:** 26.56

Boundary Elements Web Elements

Wall Name	Failed Verifications	Thickness Web	Long. Rebar Min Ratio	Long. Rebar Max Ratio	Hor. Reiforce. Ratio	Long. Rebar. Dist	Hor. Rebar. Dist	Shear Resistance (Vrd > Vsd)	Compress. Struts (Vrdmax > Vsd)
Pa1	0	1.03	5.07	3.95	1.59	3.20	3.20	1.03	1.25
Pa2	0	1.03	5.07	3.95	1.59	3.20	3.20	1.03	1.25
Pa3	0	1.03	5.07	3.95	1.59	3.20	3.20	1.03	1.25
Pa4	0	1.03	5.07	3.95	1.59	3.20	3.20	1.03	1.25
Pa5	0	1.03	2.36	8.46	4.25	2.67	4.00	1.26	1.22
Pa6	0	1.03	2.36	8.46	4.25	2.67	4.00	1.26	1.22