U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

FERRAMENTAS DE APOIO AO DIMENSIONAMENTO SÍSMICO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO DE ACORDO COM O EC8

TOMÁS NEGRÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM ENGENHARIA CIVIL

U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

FERRAMENTAS DE APOIO AO DIMENSIONAMENTO SÍSMICO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO DE ACORDO COM O EC8

TOMÁS PAIM SOTTO MAYOR NEGRÃO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Doutor José Filipe Miranda Melo

JULHO DE 2024

Mestrado em Engenharia Civil 2023/2024

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 - 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2024.

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.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é o encerrar de uma etapa muito importante na minha formação profissional, mas marca também uma grande superação pessoal. Por ter sabido insistir no trabalho e não ter a hipótese de desistência mesmo quando as coisas não corriam como era pretendido.

Antes de mais queria deixar um forte agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor José Melo, por todo apoio e disponibilidade prestada. É claro, um membro essencial na elaboração deste documento.

Ao Engenheiro José Lopes, por tão bem me ter recebido na família que faz a empresa A400. Não posso deixar de me mostrar profundamente agradecido pela ajuda que recebi, quer na aprendizagem da linguagem, quer no próprio desenvolvimento da aplicação, principalmente pelo Engenheiro Fernando Miranda.

Ao Engenheiro António Monteiro pela oportunidade de realizar este projeto em ambiente empresarial e por toda a experiência adquirida que daí derivou.

Por fim, queria agradecer a todos os meus amigos e família que tanto me apoiaram neste percurso.

RESUMO

A presente dissertação tem como principal objetivo complementar uma ferramenta prática para o programa *Revit*. Consiste numa compatibilização de modelos entre softwares, *Revit* e *Etabs*, dos quais são retirados esforços do *Etabs*, fruto da análise estrutural interna. Estes esforços são de seguida inseridos na parametrização do *Revit* correspondente ao elemento em análise.

Para a continuação do desenvolvimento deste programa foi utilizado o Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE), *Visual Studio*, na linguagem de programação C#. É integrada no *Revit* por meio do SDK, pacote de desenvolvimento de software, para retirar informação necessária às verificações que se pretendem efetuar.

São apresentados os princípios básicos de dimensionamento sísmico e as regras do eurocódigo 8 para os elementos em análise a serem verificados. As ações sísmicas associadas às características da estrutura foram modeladas numericamente através do programa de cálculo automático *Etabs.*

Este programa é de grande utilidade para a empresa (A400), resulta da constante intenção desta se manter a par das mais recentes tecnologias crescendo assim com o inovar e automatizar de alguns programas que possuem em biblioteca que podiam ter uma utilidade mais notável. Foi desenvolvido um algoritmo que torna possível a inserção de um *addin* no programa *Revit.*

O trabalho desenvolvido tornou possível a criação de uma ferramenta como era pretendido. Apresenta os resultados das verificações necessárias para vigas, pilares e respetivos nós a partir de um rácio e uma curta explicação da regra em vigor.

Com o panorama geral da análise estrutural é possível observar com facilidade qualquer incumprimento legislativo. Uma vez alterada a solução é, claro, possível repetir o processo e validar, ou não esta nova solução.

PALAVRAS-CHAVE: Engenharia Sísmica, *Revit, Etabs, C#,* Eurocódigo 8 Verificação de Segurança.

ABSTRACT

The main objective of this dissertation is to complement a practical tool for the Revit software. It consists on the compatibility of models between softwares, *Revit* and *Etabs*, from which forces are extracted from Etabs, resulting from internal structural analysis. These forces are then inserted into the parameterization of Revit corresponding to the element under analysis.

For the continuation of the development of this program, the *Integrated Development Environment (IDE), Visual Studio*, was used in the C# programming language. It is integrated into *Revit* through the SDK, software development kit, to extract necessary information for the verifications to be performed.

In this document is also present the basic principles of seismic design and the rules of Eurocode 8 for the elements under analysis to be verified. The seismic actions associated with the characteristics of the structure were numerically modeled using the automatic calculation program called *Etabs.*

This program is of great utility for the company (A400), stemming from their desire to continue innovating and automating some programs in their library that could have more notable utility. An algorithm was developed that makes it possible to insert an add-in into the *Revit* program.

The work developed made it possible to create a tool as intended. It presents the results of the necessary verifications for beams, columns, and respective nodes based on a ratio and a short explanation of the applicable rule.

With the overall view of structural analysis, it is easy to observe any legislative non-compliance. Once the solution is altered, it is, of course, possible to repeat the process and validate, or not, this new solution.

KEYWORDS: Seismic Engineering, *Revit*, *Etabs*, C#, Eurocode 8 Security Verification.

AGRADECIMENTOS ..... **VII**

RESUMO ..... **IX**

ABSTRACT ..... **XI**

ÍNDICE DE QUADROS ..... **XXII**

1 INTRODUÇÃO **1**

1.1 ENQUADRAMENTO **1**

1.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS **1**

1.3 MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS **2**

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO **3**

2 PRESSUPOSTOS DO EUROCÓDIGO 8 ..... **5**

2.1 INTRODUÇÃO **5**

2.2 AÇÃO SÍSMICA **5**

2.2.1 CONDIÇÕES DO TERRENO 6

2.2.2 ZONAS SÍSMICAS 6

2.2.3 CLASSES E COEFICIENTES DE IMPORTÂNCIA 7

2.2.4 REPRESENTAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DAS ACÇÕES SÍSMICAS 10

2.2.5 ESPECTRO DE RESPOSTA ELÁSTICA 10

2.2.6 COMBINAÇÃO DA AÇÃO SÍSMICA COM OUTRAS AÇÕES 13

2.2.7 COEFICIENTE A CONSIDERAR NO CÁLCULO DA MASSA 13

2.2.8 COEFICIENTES A CONSIDERAR NA COMBINAÇÃO SÍSMICA 14

2.2.9 COMBINAÇÃO DE DIREÇÕES 15

2.3 DESEMPENHO DA ESTRUTURA **15**

2.4 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO SISMORESISTENTES **16**

2.4.1 MODELAÇÃO EM 2D VS MODELAÇÃO EM 3D 17

2.4.2 MÉTODOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL 18

2.4.2.1 Análise Linear 18
2.4.2.2 Análise Não Linear 18
2.4.3 SISTEMAS ESTRUTURAIS REDUÇÃO DE RIGIDEZ 18
2.4.3.1 Redução de Rigidez 18
2.4.3.2 Condições de Ductilidade Global 19
2.4.3.3 Condições de Ductilidade Local 20
2.4.4 SISTEMAS ESTRUTURAIS 20
2.4.4.1 Rigidez à Torção 21
2.4.4.2 Momento Polar de Inércia de Massa 22
2.4.4.3 Coeficiente de Comportamento 22
2.4.4.4 Classes de Ductilidade 23
2.4.5 MATERIAIS 24
2.4.5.1 Betão 24
2.4.5.2 Aço 24
2.5 VIGAS 24
2.5.1 RESTRIÇÕES GEOMÉTRICAS 24
2.5.2 EXCENTRICIDADE VIGA-PILAR 25
2.5.3 LARGURA 25
2.5.4 ESFORÇOS DE CÁLCULO 25
2.5.5 RESISTÊNCIA À FLEXÃO E AO ESFORÇO TRANSVERSO 26
2.5.6 DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS PARA DUCTILIDADE LOCAL 28
2.5.7 ZONAS CRÍTICAS 28
2.5.8 ARMADURA DE COMPRESSÃO 28
2.5.9 TAXA DE ARMADURA NA ZONA TRACIONADA 28
2.5.10 ARMADURA DE CONFINAMENTO 29
2.6 PILARES 30
2.6.1 RESTRIÇÕES GEOMÉTRICAS 30
2.6.2 ESFORÇOS DE CÁLCULO 30

2.7.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO E ESFORÇO TRANSVERSO 31
2.6.3 RESISTÊNCIA DE CÁLCULO 32
2.6.4 ESFORÇO NORMAL REDUZIDO 32
2.6.5 DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS PARA A DUCTILIDADE LOCAL 33
2.6.6 TAXA DE ARMADURA LONGITUDINAL 33
2.6.7 ZONAS CRÍTICAS 33
2.6.8 REQUISITO DE DUCTILIDADE LOCAL 33
2.6.9 ESPAÇAMENTO DA ARMADURA TRANSVERSAL EM ZONAS CRÍTICAS 35
2.6.10 SÍNTESE DAS VERIFICAÇÕES 35
3 ELABORAÇÃO DO ALGORITMO 39
3.1 INTRODUÇÃO 39
3.2 FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA 39
3.2.1 PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS 39
3.2.2 RECOLHA DE INFORMAÇÃO 40
3.2.3 OBTENÇÃO DE DADOS DO REVIT E PRÉ-TRATAMENTO 40
3.2.4 OBTENÇÃO DE DADOS DO ETABS 43
3.3 TRATAMENTO DOS DADOS 43
3.3.1 APRESENTAÇÃO DOS DADOS 43
3.4 CASOS ESPECÍFICOS DE PROGRAMAÇÃO 46
3.4.1 ÁREA DE SECÇÃO TRANSVERSAL 46
3.5 CONCLUSÃO 49
4 CASO DE ESTUDO 51
4.1 INFORMAÇÃO ESTRUTURAL 51
4.1.1 GEOMETRIA 51
4.2 AÇÕES 54
4.3 CARGAS 54
4.3.1 AÇÃO SÍSMICA 54

4.4 MATERIAIS **55**

4.5 ANÁLISE ESTRUTURAL **55**

4.5.1 ANÁLISE MODAL 55

4.6 COMBINAÇÕES DA AÇÃO SÍSMICA **57**

4.6.1 COEFICIENTE DE COMBINAÇÃO $\psi_{E,I}$ 57

4.6.2 COMBINAÇÕES DAS RESTANTES AÇÕES COM A AÇÃO SÍSMICA 57

4.6.3 OUTRAS ANÁLISES 58

4.7 VERIFICAÇÃO DE UMA CORRETA FORMULAÇÃO DA ESTRUTURA **58**

ANÁLISE DO TIPO DE ESTRUTURA **60**

4.8 DIMENSIONAMENTO DE ARMADURAS **63**

4.8.1 ARMADURAS DE PILARES 63

4.8.2 ARMADURAS DE VIGAS 64

4.9 CONCLUSÃO **66**

5 APLICAÇÃO DO PROGRAMA **67**

5.1 INTRODUÇÃO **67**

5.2 INICIALIZAÇÃO **67**

5.3 PRÉ-SELEÇÕES **67**

5.3.1 SELEÇÃO DE BARRAS NO MODELO 68

5.4 RESULTADOS **69**

5.5 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS **69**

5.6 DETALHES À CERCA DAS VERIFICAÇÕES EFETUADAS **71**

5.7 VIGAS **72**

5.8 PILARES **75**

5.9 NÓS VIGA/PILAR **77**

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS **79**

6.1 INTRODUÇÃO **79**

6.2 CONCLUSÕES **79**

6.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 80

ANEXOS 82

A1 83

RESULTADOS DA ANÁLISE MODAL DA ESTRUTURA 83

A2 85

EXEMPLOS DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELO PROGRAMA FLEXDESV PARA VIGAS 85

A3 89

EXEMPLOS DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELO PROGRAMA FLEXDESV PARA PILARES 89

A4 97

RESULTADO DA APLICAÇÃO DO PROGRAMA PARA TODAS AS VIGAS DO CASO DE ESTUDO 97

A5 99

RESULTADO DA APLICAÇÃO DO PROGRAMA PARA TODOS OS PILARES DO CASO DE ESTUDO 99

A6 101

RESULTADO DA APLICAÇÃO DO PROGRAMA PARA TODOS OS NÓS VIGA/PILAR DO CASO DE ESTUDO 101

A7 103

DADOS GERAIS PARA A VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA 103

A8 105

DADOS GERAIS PARA A VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA PARA VIGAS 105

A9 107

DADOS GERAIS PARA A VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA PARA PILARES 107

A10 110

FUNÇÕES DA CLASSE *REVITFUNCS* DESENVOLVIDO EM LINGUAGEM C# 110

A11 114

FUNÇÕES DA CLASSE *BARDATA* DESENVOLVIDO EM LINGUAGEM C#..... 114

A12 116

FUNÇÕES DA CLASSE *BARRESULTS, BEAMRESULTS, COLUMNSRESULTS, E JOINTRESULTS,* DESENVOLVIDO EM LINGUAGEM C#..... 116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 -Divisão de Zonas Sísmicas em Portugal Continental. Tipo 1 do lado esquerdo e Tipo 2 do lado direito. (CNE, 2010)..... 6

Figura 2 - Divisão de Zonas Sísmicas nos Açores e na Madeira, Tipo 2 e Tipo 1 respetivamente CNE (2010)..... 7

Figura 3 - Forma do espetro de resposta elástica (EC8, 2010)..... 12

Figura 4 – Espetros de resposta elástica de Tipo 1 recomendados para terrenos dos tipos A a E, com 5% de amortecimento (EC8, 2010) 13

Figura 5 - Espetros de resposta elástica de Tipo 2 recomendados para terrenos dos tipos A a E, com 5% de amortecimento (EC8, 2010) 13

Figura 6 - Planta de um edifício regular em planta e em altura (Arêde, A., 2013) 17

Figura 7 - Corte de um edifício regular em planta e em altura (Arêde, A., 2013). 17

Figura 8 - Modelação 2D por junção de pórticos ligados por bielas axialmente rígidas (Arêde, A., 2013) 17

Figura 9 - Modelo 3D de uma estrutura (Varum, H.A.S., 2020). 17

Figura 10 – Métodos de análise com diferentes graus de precisão, generalidade e complexidade..... 18

Figura 11 – Análise dos momentos resistentes em torno do eixo x 19

Figura 12 Análise dos momentos resistentes em torno do eixo y. 19

Figura 13 Valores de cálculo pela capacidade real dos esforços transversos nas vigas (EC8, 2010) ... 26

Figura 15 Largura eficaz do banzo beff para vigas ligadas a pilares (EC8, 2010)..... 27

Figura 16 - Largura eficaz do banzo beff para vigas ligadas a pilares. 27

Figura 17 - Valores de cálculo pela capacidade real dos esforços transversos nas vigas (EC8, 2010). 31

Figura 18 - Valores de cálculo pela capacidade real dos esforços transversos nos pilares (CNE, 2010). 32

Figura 20 - Diagrama de Fluxo do tratamento de dados pelo programa(Carreira, P., 2021). 40

Figura 21 – Exemplo do código que efetua o preenchimento das propriedades na classe Bar Data (Carreira, P., 2021). 43

Figura 22 – Processamento e apresentação dos dados nas classes usadas..... 44

Figura 23 – Excerto do código referente à classe *Beam Results*.(Carreira, P., 2021)..... 45

Figura 24 – Processo de obtenção da área da secção transversal de um elemento..... 47

Figura 25 – Distinção entre os dois casos de armadura transversal..... 48

Figura.26 – Modelo 3D em REVIT da estrutura em estudo (Carreira, P., 2021)..... 51

Figura 27 – Plantas à cota das Fundações.(Carreira, P., 2021)..... 52

Figura 28 – Plantas à cota do Piso 1.(Carreira, P., 2021)..... 52

Figura 29 – Plantas à cota do Piso 2.(Carreira, P., 2021)..... 52

Figura 30 – Plantas à cota da Cobertura.(Carreira, P., 2021)..... 52

Figura 31 – Corte 1-1(Carreira, P., 2021)..... 53

Figura 32 – Corte 2-2. (Carreira, P., 2021)..... 53

Figura 33 – Espetros de resposta sísmica com representação do período *T*, do primeiro modo de vibração.(Carreira, P., 2021) 55

Figura 34 – Modelo 3D em SAP2000 da estrutura em estudo.(Carreira, P., 2021)..... 55

Figura 35 – Modelo 3D analítico em SAP2000 da estrutura em estudo.(Carreira, P., 2021). 55

Figura 36 – Representação do primeiro modo de vibração em xz..... 56

Figura 37 – Representação do primeiro modo de vibração em yz..... 56

Figura 38 – Representação do primeiro modo de vibração em 3d. 56

Figura 39 – Representação do segundo modo de vibração em xz..... 57

Figura.40 – Representação do segundo modo de vibração em yz..... 57

Figura.41 – Representação do segundo modo de vibração em 3d..... 57

Figura.42 – Representação do terceiro modo de vibração em *xz*. 57

Figura 43 – Representação do terceiro modo de vibração em yz. 57

Figura.44 – Representação do terceiro modo de vibração em 3d. 57

Figura 45 – Representação das armaduras colocadas no modelo REVIT. 65

Figura 46 – Janela inicial com as pré-seleções efetuadas. 68

Figura 47 – Modelo analítico da estrutura.(Carreira, P., 2021) 69

Figura 48 – Seleção de barras com o modelo analítico ativo.(Carreira, P., 2021) 69

Figura 49 – Resultados das verificações nas vigas selecionadas.(Carreira, P., 2021) 70

Figura 50 – Resultados das verificações nos pilares selecionados.(Carreira, P., 2021) 70

Figura 51 – Resultados das verificações nos nós viga-pilar selecionados.(Carreira, P., 2021) 71

Figura 52 – Informações respeitantes a cada uma das verificações realizadas. 72

Figura 53 -(Carreira, 2021 #9) 98

Figura 54 - (Carreira, 2021 #9) 100

Figura 55 -(Carreira, 2021 #9) 102

Figura 56 -(Carreira, 2021 #9) 104

Figura 57 - (Carreira, 2021 #9) 106

Figura 58 -(Carreira, 2021 #9) 109

Figura 59 - (Carreira, 2021 #9) 113

Figura 60 - (Carreira, 2021 #9) 115

Figura 61 -(Carreira, 2021 #9) 119

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de importância para os edifícios (EC8, 2010) 7

Quadro 2 - Coeficientes de importância γ_ I (NA-EC8, 2010) 8

Quadro 3 - Tipos de Terreno 8

Quadro 4 - Aceleração máxima de referência a_gR (m/s2) nas várias zonas sísmicas (EC8, 2010) 9

Quadro 5 - Valores dos parâmetros definidores do espetro de resposta elástico para ação sísmica Tipo 2 (NA-EC8, 2010) 10

Quadro 6 - Coeficiente de combinação das ações variáveis (EC8, 2010). 14

Quadro 7 – Valor básico do coeficiente de comportamento qo, para sistemas regulares em altura (EC8, 2010)..... 23

Quadro 8 – Valores para o fator de majoração αu/α1 (EC8, 2010). 23

Quadro 9 – Verificações relativas a materiais 35

Quadro 10 – Verificações relativas a opções de projeto..... 36

Quadro 11 - Verificações relativas a geometria para vigas e pilares. 36

Quadro 12– Verificações relativas a armaduras para vigas. 36

Quadro 13 – Verificações relativas a armaduras para pilares. (Carreira, 2021 #9) 37

Quadro 14 Dados obtidos direta e indiretamente a partir do REVIT. 41

Quadro 15 – Ações consideradas na estrutura.(Carreira, 2021 #9) 54

Quadro 16 Dados para a definição dos espetros. 54

Quadro.17 – Características dos modos de vibração. 56

Quadro 18 – Altura dos pisos 58

Quadro 19 – Cálculo das lajes. (Carreira, 2021 #9) 58

Quadro 20 – Cálculo dos pilares(Carreira, 2021 #9). 59

Quadro 21 - Cálculo das vigas(Carreira, 2021 #9) 59

Quadro 22 – Cálculo dos elementos associados ao peso próprio.(Carreira, 2021 #9) 59

Quadro 23 – Cálculos associados à Combinação Quase-Permanente.(Carreira, 2021 #9) 60

Quadro 24 Comparação dos resultados obtidos com o software SAP2000 para o peso próprio e CQP.(Carreira, 2021 #9) 60

Quadro 25 – Forças consideradas na análise do tipo de estrutura. 61

Quadro 26 Deslocamentos e rotações obtidos na análise do tipo de estrutura.(Carreira, 2021 #9) 61

Quadro 27 – Cálculo da rigidez nas direções requeridas.(Carreira, 2021 #9)..... 62

Quadro 28 - Resultados do fator r.(Carreira, 2021 #9) 62

Quadro 29 Cálculo do fator ls.(Carreira, 2021 #9)..... 62

Quadro 30 – Armadura dimensionada para os pilares. (Carreira, 2021 #9)..... 63

Quadro 31 – Armadura dimensionada para as vigas do piso 1.(Carreira, 2021 #9)..... 64

Quadro 32– Armadura dimensionada para as vigas do piso 2.(Carreira, 2021 #9)..... 64

Quadro 33 – Armadura dimensionada para as vigas da cobertura.(Carreira, 2021 #9) 65

Quadro 34 – Pré-seleções no programa..... 68

Quadro 35 Informações acerca da verificação da largura máxima para vigas. 73

Quadro 36 – Informações acerca da verificação do diâmetro máximo da armadura longitudinal para vigas. 73

Quadro 37 – Informações acerca da verificação da taxa mínima de armadura longitudinal de tração para vigas. 73

Quadro 38 – Informações acerca da verificação da taxa máxima de armadura longitudinal de tração para vigas. 73

Quadro 39 – Informações acerca da verificação da percentagem de armadura longitudinal de compressão para vigas. 74

Quadro 40 – Informações acerca da verificação do diâmetro mínimo da armadura transversal para vigas. 74

Quadro 41 – Informações acerca da verificação do espaçamento máximo da armadura transversal em zonas críticas para vigas. 74

Quadro 42 - – Informações acerca da verificação do espaçamento máximo da armadura transversal para vigas..... 74

Quadro 43 – Informações acerca da verificação primeira ocorrência da armadura transversal para vigas. 75

Quadro 44 – Informações acerca da verificação do VRD máximo para vigas. 75

Quadro 45 – Informações acerca da verificação do rácio mínimo de armadura longitudinal para pilares. 75

Quadro 46 – Informações acerca da verificação do rácio máximo de armadura longitudinal para pilares. 75

Quadro 47 – Informações acerca da verificação de armadura longitudinal em todas as faces para pilares. 76

Quadro 48 – Informações acerca da verificação de distância máxima entre a armadura longitudinal para pilares. 76

Quadro 49 – Informações acerca da verificação do diâmetro mínimo da armadura transversal para pilares. 76

Quadro 50 – Informações acerca da verificação do espaçamento máximo entre a armadura transversal para pilares..... 76

Quadro 51 – Informações acerca da verificação do esforço normal reduzido para pilares. 77

Quadro 52 – Informações acerca da verificação do fator de ductilidade para pilares. 77

Quadro 53 – Informações acerca da verificação da taxa mecânica volumétrica de cintas para pilares. 77

Quadro 54 – Informações acerca da verificação do VRD máximo para pilares..... 77

Quadro 55 – Informações acerca da verificação da condição de ductilidade global para nós viga-pilar. 78

Quadro 56 – Informações acerca da verificação da distância máxima entre eixos para nós viga-pilar. 78

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

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 Coeficiente 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 espetral constante

T_C Limite superior do período no ramo de aceleração espetral constante

T_D Valor que define no espetro 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 transverso

$V`_{Ed}$ Valor do esforço transverso 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_{0i} 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 Coeficiente 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 espetral de cálculo para análise elástica

γ_I Coeficiente de importância

ε_{cu2} Extensão última do betão não confinado

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

$\varepsilon_{sy,d}$ 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 Coeficiente de sensibilidade ao deslocamento relativo entre pisos

μ_ϕ Valor do fator de ductilidade em curvatura

ν Coeficiente de redução que tem em conta o mais baixo período de retorno da ação sísmica

ν_d Esforço normal reduzido

$v_{s,30}$ 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

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

ϕ_{cinta} Diâmetro da cinta

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A presente dissertação tem como principal objectivo complementar uma ferramenta prática para o programa Revit. Consiste numa compatibilização de modelos entre softwares, Revit e Etabs, dos quais são retirados esforços do Etabs, fruto da análise estrutural interna. Estes esforços são de seguida inseridos na parametrização do Revit correspondente ao elemento em análise. Uma vez actualizados os esforços podem então ser feitas as verificações convenientes ao dimensionamento em questão. Verificações estas desenvolvidas anteriormente em projecto de dissertação nesta mesma empresa. Este programa produzido anteriormente tem como base a verificação das regras de calculo pela capacidade real, neste caso para pilares e vigas. Verifica também detalhes exigidos no dimensionamento de estruturas de betão armado da Classe de Ductilidade Média (DCM) de acordo com a norma em vigor, EN 1998-1, Eurocódigo 8(CNE, 2010).

Para a continuação do desenvolvimento deste programa foi utilizado o Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE), Visual Studio, na linguagem de programação C#. É integrada no Revit por meio do SDK, pacote de desenvolvimento de software, para retirar informação necessária às verificações que se pretendem efectuar.

São apresentados os princípios básicos de dimensionamento sísmico e as regras do eurocódigo 8 para os elementos em análise a serem verificados. As acções sísmicas associadas às características da estrutura foram modeladas numericamente através do programa de cálculo automático Etabs.

Este programa é de grande utilidade para a empresa (A400), vem da vontade desta continuar a inovar e automatizar alguns programas que possuem em biblioteca que podiam ter uma utilidade mais notável. Foi desenvolvido um algoritmo que torna possível a inserção de um *addin* no programa Revit. Todo o desenvolvimento foi obtido pelo acompanhamento cuidado por parte da empresa e conhecimento adquirido ao longo desta jornada.

O resultado deste trabalho foi alcançado com sucesso, tonando possível a passagem de valores de cálculo entre o Etabs e o Revit fazendo posteriormente as verificações pretendidas com os valores agora actualizados. Uma vez corridas as verificações é possível, sem grande esforço, observar o incumprimento, ou não, de alguma destas normas de dimensionamento. É ainda possível repetir estas verificações alterando as características do solo ou os parâmetros sísmicos conseguindo assim perceber com mais clareza a influencia destes factores na resposta sísmica da estrutura.

1.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Engenharia Civil é um dos ramos mais tradicionais da engenharia. Sempre cresceu com o desenvolvimento humano. Temos vindo a assistir na comunidade científica uma onda de cooperação entre a programação e as mais diversas áreas. Com o desenvolvimento de ferramentas computacionais

com capacidades mais potentes começa a ser cada vez mais óbvia a necessidade de esta ser inserida na fase de conceção. No que toca ao dimensionamento facilita em muito pela diminuição do volume de trabalho para se obter uma avaliação do caso de estudo que antigamente teríamos de optar por soluções menos leves, ficando do lado da segurança, ou despender muito tempo. A construção nunca foi tão influenciada como é hoje pela programação e a automação.

Um dos maiores desafios que sempre existiram na construção são os sismos. Deixam uma onda de destruição por onde passam quando não existe construção adequada á capacidade resistente a sismos. Lamentavelmente com grandes perdas patrimoniais, privadas ou no pior caso perda de vidas.

Como dimensionar uma estrutura que seja resistente a acções do tipo sísmica quando estas ocorrem de forma tão imprevisível e tantas vezes violenta? O Comité Europeu de Normalização (CNE) desenvolveu um documento, apelidado de Eurocódigo 8, com um conjunto de preâmbulos e regras que procura idealizar uma estrutura, não só resistente às acções correntes, mas também com ductilidade suficiente para resistir a acções sísmicas evitando a ruina da estrutura, potencialmente salvando vidas.

No presente documento considera-se actual e inovador o conceito de *Building Information Modeling* ou BIM. Trata-se de uma metodologia que parte pela criação de um modelo virtual 3D com relação directa com o edifício real. Neste modelo são incorporadas todas as especialidades e é elaborado um trabalho conjunto de forma continua de partilha de informação de maneira a obter todas as nuances e pormenores relevantes para a realização da obra.

Uma vez que BIM é o processo de incorporação e não o software em questão é aqui que nos surge o programa Revit, ferramenta valiosa para a inserção e leitura de parâmetros e características do modelo a estudar. Ficando então em falta apenas o Etabs, software de cálculo, do qual é possível, através de um modelo equivalente, retirar os esforços reais na estrutura.

1.3 MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS

A motivação que levou à escolha deste tópico veio da falta de conhecimentos e programas em métodos de cálculo automático que permitam verificar a estrutura em questão quanto às normas relativas à resistência sísmica presentes no Eurocódigo8.

As ferramentas que actualmente existem à disposição permitem, sem grandes problemas, representar todos os parâmetros importantes na concepção bem como validar as normas exigidas no EC8 no que toca ao dimensionamento sísmico(Desenvolvidas na A400). Por conveniência este trabalho procura actualizar os valores de esforços com que todas estas verificações são efectuadas por meio de um segundo software chamado Etabs.

Antes de mais é necessário fazer uma compatibilização de modelos onde as coordenadas são transformadas, por rotações e translações nos três sentidos (Matriz de Transformação), de forma aos elementos serem compatíveis entre si. De seguida são escolhidas as combinações de acções. Uma vez calculado é possível então retirar toda a informação de esforços, reais e resistentes, necessários para as verificações anteriormente mencionadas.

Como dito anteriormente estas verificações são efectuadas por meio de um algoritmo escrito na linguagem C#, utilizada de forma corrente na concepção deste tipo de programas usados como addins para o Revit. O Revit possui uma ferramenta integradora chamada SDK (Software Development Kit) que torna possível, por interação facilitada, a criação do acrescento ao programa.

Em suma, o objectivo é o desenvolvimento de uma ferramenta que seja fácil, rápida e simples de consultar que confirme que as normas aplicadas a vigas e pilares e aos nós entre estes são verificadas num projecto de estrutura resistente a sismos no software de modelação em BIM.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é separada em seis capítulos, sendo que o primeiro trata de uma introdução ao trabalho a desenvolver e faz um enquadramento dos seus objectivos e organização da dissertação.

No capítulo seguinte são caracterizados os fundamentos das acções sísmicas segundo o Eurocódigo 8 bem como as especificações para o dimensionamento de elementos estruturais de ductilidade média.

No terceiro capítulo é exposta a construção do programa, onde é explicada a recolha (Etabs) e o tratamento de informação (Revit). Explica também a interface com o utilizador e expõem algumas partes do código mais fundamentais no desenvolvimento do algoritmo.

No quarto capítulo é apresentado o caso de estudo onde se faz uma descrição estrutural, da modelação e da análise estrutural realizada para o dimensionamento de armaduras. É também neste capítulo que é determinado e classificado o sistema estrutural com o fim de obter o coeficiente de comportamento a incorporar na análise.

No quinto capítulo é vista a aplicação do algoritmo ao caso de estudo falada no capítulo anterior. São apresentados os resultados obtidos bem como uma descrição curta de cada norma retirada do Eurocódigo 8. Os resultados vêm acompanhados de um factor de Segurança e erro percentual a cada verificação em questão.

Por fim no sexto capítulo são expostas as conclusões do trabalho realizado e possíveis propostas para que possam ser feitas, futuramente, melhorias no projeto.

2 PRESSUPOSTOS DO EUROCÓDIGO 8

2.1 INTRODUÇÃO

A conceção de edifícios deve ter em conta a atividade sísmica devido ao potencial de danos estruturais graves que podem ter repercussões sociais e económicas terríveis, desde a perda de vidas até à destruição de bens materiais.

Por conseguinte, é essencial que sejam implementadas directrizes de projeto específicas em locais propensos a sismos, a fim de reduzir os danos que estas catástrofes naturais podem causar. O Eurocódigo 8 - Parte 1 (CNE, 2010) de 2010 estabelece requisitos para medir, avaliar e ter em conta a ação sísmica na conceção de estruturas. Estas directrizes garantem que o projeto pode sobreviver suficientemente à atividade sísmica, tendo em conta uma série de variáveis internas e externas à estrutura.

As directrizes de dimensionamento sísmico que o algoritmo criado utiliza para verificação são abordadas em pormenor neste capítulo.

2.2 AÇÃO SÍSMICA

A quantificação da ação sísmica é a primeira fase do dimensionamento de uma estrutura capaz de resistir a sismos. Isto implica estimar o risco sísmico, que é estabelecido pela correlação entre a vulnerabilidade (resistência e capacidade estrutural), a perigosidade (recorrência e tipo de ação sísmica) e a exposição (uso e ocupação do edifício).

Perigosidade: É a probabilidade de ocorrência de um sismo, que é determinada pela análise das propriedades do solo e do historial sísmico do local. Isto ajuda a estimar a atividade sísmica prevista na região onde a estrutura será construída.

Vulnerabilidade: Refere-se à extensão das perdas ou danos esperados num elemento como resultado de um sismo de uma gravidade específica. Representa o desempenho do edifício aos efeitos de um sismo.

Exposição: Refere-se ao objetivo pretendido da estrutura e à importância dos produtos ou serviços que alberga.

É necessário encontrar um equilíbrio entre o risco sísmico do local e a suscetibilidade da estrutura ao projetar para a ação sísmica. Quanto maior for a ação sísmica, menor será a sensibilidade da estrutura ao perigo, e vice-versa IPMA (2021).

2.2.1 CONDIÇÕES DO TERRENO

A propagação de uma força sísmica varia muito com a composição do solo. O tipo de solo por onde as ondas sísmicas se propagam afeta a sua velocidade, o efeito da força sísmica muda dependendo do terreno em que ocorre. Com base no perfil estratigráfico e em resultados de ensaios realizados in situ, o Eurocódigo 8 (CNE, 2010) define vários tipos de terreno.

Com estes testes geotécnicos conseguimos classificar e prever com precisão como as condições do solo afetam a atividade sísmica. Testes geotécnicos como o Teste de Penetração Padrão (SPT) e o Teste de Penetração de Cone (CPT) precisam ser realizados no local. O tipo de terreno em questão pode ser identificado usando os parâmetros que surgem desses testes e as definições encontradas na Tabela 2.1.

2.2.2 ZONAS SÍSMICAS

As autoridades competentes realizam uma divisão territorial em distintas áreas sísmicas, levando em consideração o potencial de risco sísmico em cada localidade. No contexto do Eurocódigo 8 (CNE, 2010), o Anexo Nacional estipula dois esquemas de zonamento sísmico baseados na proximidade ao epicentro (Figura 2.1 a 2.3).

Uma ação sísmica é designada como Tipo 1 para epicentros localizados a uma distância considerável, na região do Oceano Atlântico, e como Tipo 2 para epicentros próximos, situados no território continental ou nos Açores. Essa subdivisão é refletida nos valores de referência para a aceleração máxima na base, representados por agR (CNE, 2010), conforme especificado no Quadro 2.2.

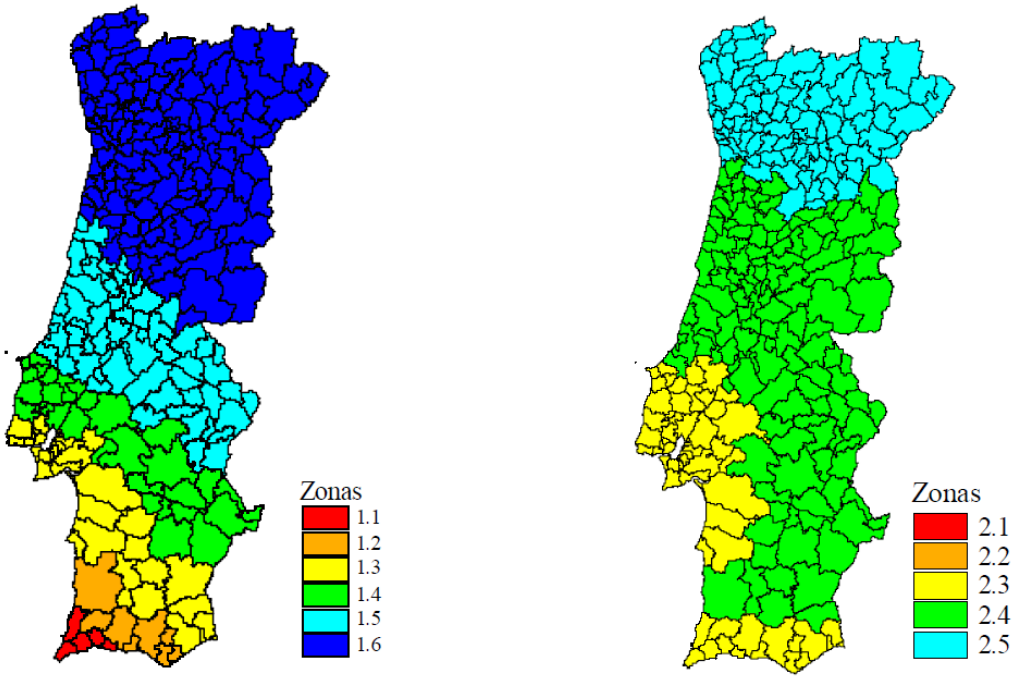


*Figura 1 -Divisão de Zonas Sísmicas em Portugal Continental. Tipo 1 do lado esquerdo e Tipo 2 do lado direito. (CNE, 2010)**Error! No text of specified style in document.**Error! No text of specified style in document.*

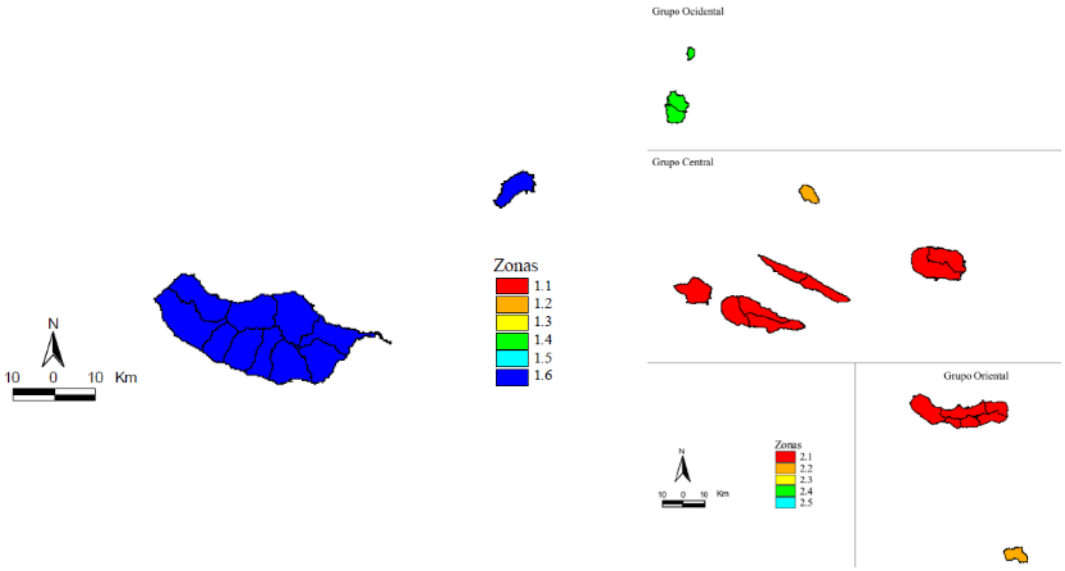


Figura 2 - Divisão de Zonas Sísmicas nos Açores e na Madeira, Tipo 2 e Tipo 1 respetivamente CNE (2010)

2.2.3 Classes e Coeficientes de Importância

O Eurocódigo 8 estabelece quatro classes de importância para avaliar a necessidade de um edifício manter sua operacionalidade em caso de um sismo (Quadro 2). No Anexo Nacional, são detalhados coeficientes de importância atribuídos a cada classe (Quadro 1). Esses coeficientes são aplicados multiplicando pelo valor de aceleração na base, agR, com o objetivo de ajustar (majorar ou minorar) o valor calculado da aceleração na superfície de um terreno tipo A, ag (CNE, 2010), conforme a Equação 2.3. Este valor é usado na determinação da ação sísmica, conforme especificado na seção 2.3.4 deste documento.

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$$

Quadro 1 - 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 - 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

Quadro 3 - 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 compacidade 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 4 - Aceleração máxima de referência a_{gR} (m/s^2) nas várias zonas sísmicas (EC8, 2010)

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

2.2.4 REPRESENTAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DAS ACÇÕES SÍSMICAS

Com o objetivo de descrever o movimento sísmico em um ponto específico da superfície do terreno para o dimensionamento e verificação de estruturas resistentes a terremotos, o Eurocódigo 8 (CNE, 2010) define um espectro de resposta em termos de deslocamentos, velocidades ou acelerações. Este espectro caracteriza graficamente as respostas máximas de conjuntos de sistemas de 1 grau de liberdade.

2.2.5 ESPECTRO DE RESPOSTA ELÁSTICA

O espectro de resposta é obtido por uma representação gráfica das respostas do conjunto de um grau de liberdade possíveis sendo este sujeito a uma solicitação que vibra num determinado período próprio (T), dependente do tipo de acção sísmica considerada como pode ser consultado no Quadro 4 e 5. Pode ser expressa em deslocamentos, velocidades, acelerações entre outras.
A abcissa do espectro é o período de vibração natural aos quais correspondem os valores de resposta máxima.

Quadro 4 - Aceleração máxima de referência agR (m/s2) nas várias zonas sísmicas (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 5 - Valores dos parâmetros definidores do espetro 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

Sendo que a estrutura tem comportamentos que permitem que seja representada por um comportamento dúctil pode ser feita uma análise elástica não linear, correspondendo nos cálculos com acções sísmicas inferiores às que se utilizariam numa resposta linear.

A acção sísmica é caracterizada a partir do espectro de resposta elástica que é reduzido pelo coeficiente de comportamento, de maneira a reduzir da mesma forma a acção sísmica. As expressões que se seguem tornam possível obter o espectro de calculo, Sd(t), para as componentes horizontais da acção sísmica.

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

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

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

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

em que as variáveis representam:

$S_e(T)$ valor do espetro 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 espetral constante;

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

T_D valor que define no espetro 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.

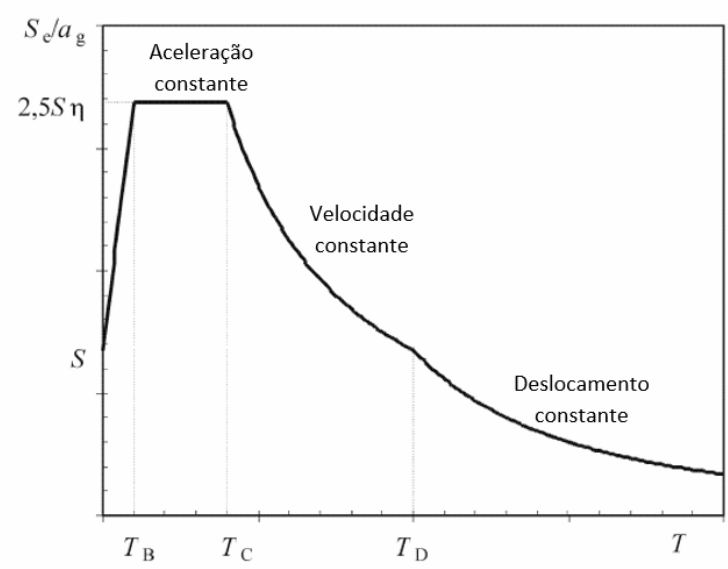


Figura 3 - Forma do espetro de resposta elástica (EC8, 2010)

Para a determinação do parâmetro S, que representa o coeficiente do solo, 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, deve ser corrigido através de:

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

onde:

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.

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 espetros 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).

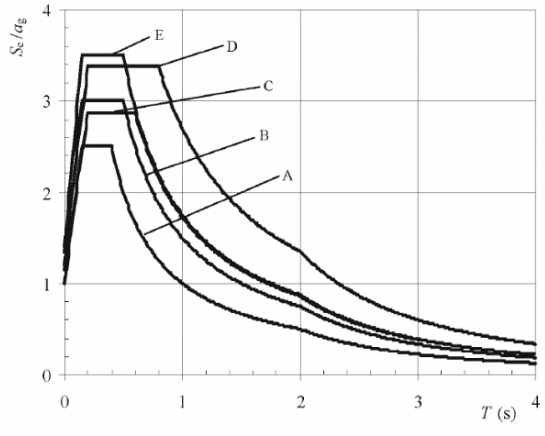


Figura 4 – Espetros de resposta elástica de Tipo 1 recomendados para terrenos dos tipos A a E, com 5% de amortecimento (EC8, 2010)

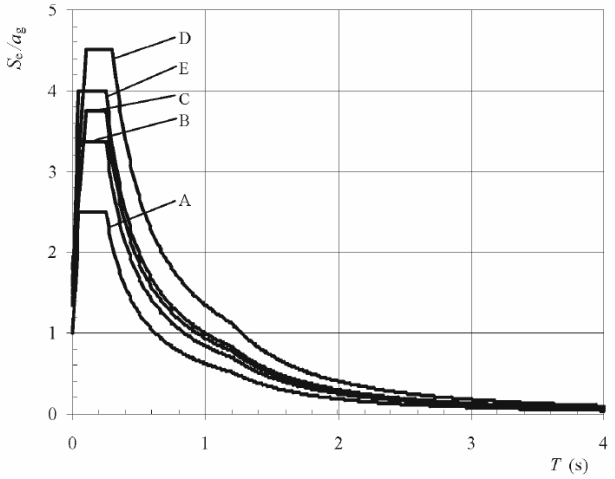


Figura 5 - Espetros de resposta elástica de Tipo 2 recomendados para terrenos dos tipos A a E, com 5% de amortecimento (EC8, 2010)

2.2.6 COMBINAÇÃO DA AÇÃO SÍSMICA COM OUTRAS AÇÕES

A resposta de uma estrutura sujeita a uma acção sísmica está interligada com as suas frequências naturais de vibração que variam muito com a massa e a rigidez do sistema em análise. Sendo que esta depende do tipo de estrutura e da utilização para o qual foi desenvolvido.

2.2.7 COEFICIENTE A CONSIDERAR NO CÁLCULO DA MASSA

Para calcular a massa da estrutura é usado um coeficiente φ, que vai variar consoante a utilização do edifício e das actividades para o qual foi dimensionado. Este será multiplicado pelo coeficiente ψ_{2i}, de maneira a conseguirmos estudar os efeitos da inércia na acção sísmica. Isto é, a inércia das massas associadas a todas as cargas gravíticas que verdadeiramente contribuem para a inércia global da estrutura aquando de um movimento sísmico.

O coeficiente de combinação de acções variáveis com a acção sísmica é nos dado pela Equação 2.4, sendo que φ vai depender do tipo de combinação da estrutura e das actividades para o qual foi desenhado, expostas no Quadro 2.6. Assim, resulta uma combinação associada a este efeito dada pela equação 2.5 que será usada para a fonte de massa da estrutura quando foi realizada a análise modal.

$$\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2i} \qquad \textit{Eq.1}$$

em que:

ψ_{2i} é o fator quase-permanente de cargas variáveis, toma o valor de 0,3 para cargas variáveis de ocupação de categoria B e de 0 para neve e vento.

Quadro 6 - Coeficiente de combinação das ações variáveis (EC8, 2010).

	Categorias	φ	
A	Atividades domésticas e residenciais	Coberturas	1
B	Escritórios	Pisos com ocupações correlacionadas	0,8
C	Locais de reunião	Pisos com ocupações independentes	0,5
D	Atividades comerciais		1

$$\sum G_{k,j} \text{ "+" } \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i} \qquad \textit{Eq.2}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

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

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

$\psi_{E,i}$ coeficiente de combinação para a ação variável i;

2.2.8 Coeficientes a considerar na Combinação Sísmica

Para que se possam determinar correctamente os esforços na estrutura é necessário calcular a combinação global que inclua todas as acções a que a estrutura está sujeita.

$$\sum G_{k,j} \text{ "+" } E_{E,\mathrm{d}} \text{ "+" } \sum \psi_{2i} \cdot Q_{k,i} \qquad \textit{Eq.3}$$

Onde as variáveis em questão representam:

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

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

$Q_{k,i}$ valor característico da ação variável *i*.

2.2.9 COMBINAÇÃO DE DIREÇÕES

Segundo a regulamentação as componentes da ação sísmica devem ser combinadas quando é feita uma análise tridimensional do sistema. São considerados os efeitos da ação sísmica em duas direções horizontais, uma na direção x ($E_{E,dx}$) e uma outra na direção y ($E_{E,dy}$), sendo que a combinação resulta da ação numa dada direção somada de trinta porcento na direção ortogonal correspondente.

Na direção x:

$$E_{E,dx} \text{ " + " } 0{,}30 \cdot E_{E,dy} \qquad \textit{Eq.4}$$

Na direção y:

$$0{,}30 \cdot E_{E,dx} \text{ " + " } E_{E,dy} \qquad \textit{Eq.5}$$

2.3 DESEMPENHO DA ESTRUTURA

Os dois principais critérios de desempenho para estruturas em zonas sísmicas são a não ocorrência de colapso e a limitação de danos, conforme descrito no Eurocódigo 8 (CNE, 2010).

1. O critério de não ocorrência de colapso garante que, em caso de sismo, a estrutura projectada e construída manterá a sua integridade estrutural não esgotando a sua capacidade resistente mesmo após o desenrolar de um sismo.

O EC8 define um estado limite último que tem em conta factores como a resistência, a ductilidade, o equilíbrio, a estabilidade das fundações e as juntas sísmicas, a fim de salvaguardar a segurança dos ocupantes.

Se o coeficiente de sensibilidade à deslocação entre pisos, θ, for inferior a 0,1 em todos os pisos, então os efeitos de segunda ordem não precisam de ser tidos em consideração. Os efeitos de segunda ordem podem ser simplificados se θ estiver entre 0,1 e 0,2, multiplicando as forças sísmicas por um factor 1/(1-θ). θ deve ser superior a 0,3.

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

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 distância entre pisos.

2. O requisito de limitação dos danos garante que a estrutura pode resistir a uma ação sísmica mais frequente do que a ação sísmica de cálculo, sem sofrer danos significativos ou perda de funcionalidade.

O estado de limitação de danos está associado a danos que comprometem as necessidades de utilização da estrutura, sendo que o EC8 impõe limites máximos para os deslocamentos relativos entre pisos, designados por *"drifts"*, de acordo com a equação:

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

em que:

d_r valor de cálculo do deslocamento relativo entre pisos;

h altura entre pisos;

ν 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.

2.4 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO SISMORESISTENTES

Neste subcapítulo são abordadas as noções básicas no que toca à concepção de uma estrutura sismo-resistente. Sendo que estes não são directamente relacionados com a acção sísmica, mas trata-se de um conjunto de conceitos que devem ser tidos em conta no dimensionamento de uma estrutura.

Segundo o Eurocódigo 8, para o dimensionamento de uma estrutura, na qual a acção horizontal desempenha um papel activo no comportamento da estrutura é possível obter um desempenho mais positivo adotando uma série de critérios propostos pelo EC8, entre eles:

- Simplicidade Estrutural;
- Uniformidade, redundância e simetria;
- Rigidez e Resistência nas duas direcções principais;
- Rigidez e Resistência à torção;
- Acção de diafragma ao nível dos pisos;
- Fundações apropriadas.

Sempre que possível a estrutura deve se apresentar de forma simples e regular, tanto em planta como altura. Quando não é possível dever-se-ia encontrar soluções onde sejam inseridas juntas de dilatação de maneira a se poderem estudar partes da estrutura em separado criando unidades dinamicamente independentes.

Deve ser ainda garantido um comportamento de dissipação dúctil, onde e se evitam roturas frágeis ou formações de mecanismos instáveis. Obtido pela hierarquia da resistência de vários componentes estruturais e dos correspondentes modos de colapso bem como pelo método de calculo pela capacidade real.

Uma forma de verificar as condições exigidas é, a partir das condições de equilíbrio, obter os esforços de calculo nas zonas consideradas, tendo em conta as áreas adjacentes e a formação de rotulas plásticas e as suas eventuais sobreresistencias.

2.4.1 MODELAÇÃO EM 2D VS MODELAÇÃO EM 3D

Na análise 2D a uma resposta modal é separada em cada uma das direcções sendo que a analise não linear é facilitada devido à simplicidade do modelo (Figura 2.4, 2.5 e 2.6). Este tipo de análise é a mais indicada para edifícios regulares em planta, na qual a resposta final tem que ser a combinação das respostas de cada direcção.

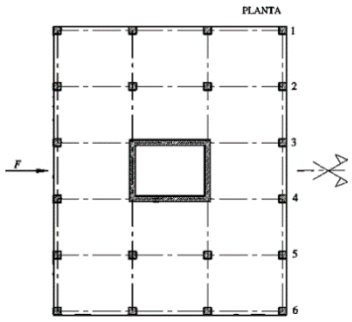


Figura 6 - Planta de um edifício regular em planta e em altura (Arêde, A., 2013)

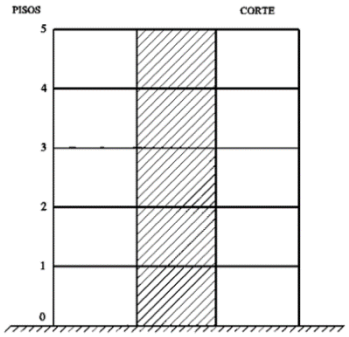


Figura 7 - Corte de um edifício regular em planta e em altura (Arêde, A., 2013).

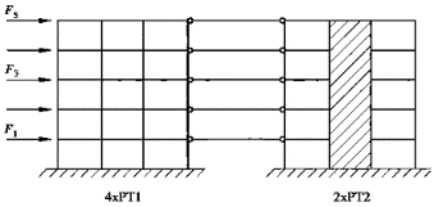


Figura 8 - Modelação 2D por junção de pórticos ligados por bielas axialmente rígidas (Arêde, A., 2013)

As análises retiradas da modelação 3D tornam possível a representação do comportamento da estrutura e a sua regularidade. O tratamento de resultados é mais simples e obvia, mesmo com a introdução de lajes em casca existe melhor visualização do caminho de carga gravítica. Este género de análise é válido para qualquer configuração geométrica.

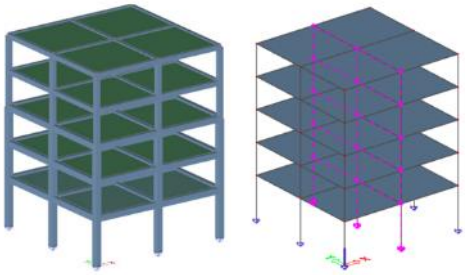


Figura 9 - Modelo 3D de uma estrutura (Varum, H.A.S., 2020).

.

2.4.2 MÉTODOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL

No modelo da estrutura deve ser adequadamente representada a distribuição de rigidez e massa de maneira a todos os modos de deformação relevantes e as forças de inercia sejam devidamente representados para a acção sísmica considerada.

2.4.2.1 ANÁLISE LINEAR

Tendo em conta que o comportamento estrutural de um edifício é não linear, no campo de analise estrutural tendemos a fazer uma análise linear. Este tipo de abordagem não é necessariamente inconveniente ou desligado da realidade. Na verdade, a linearização permite-nos resolver problemas mais complexos através de aproximações ao comportamento real das estruturas. Resumidamente trata-se de uma serie de relações (lineares) quer no que toca à teoria da elasticidade (corpos considerados contínuos e deformáveis) quer no que toca a peças lineares ou laminares (vigas, estruturas reticulas ou placas, lajes e cascas, respetivamente) (Corrêa, M.R., 2016)

No âmbito desta dissertação e tendo tido em conta as características estruturais do edifício, poder-se-á usar dois métodos de análise. O método de analise por forças laterais e o método de analise modal por espectro de resposta. Como método de referência para analise estrutural admite-se a analise modal por espectro de resposta, considerando uma análise linear e espectro exposto em 2.3.4.2.

Assim, para uma conveniente análise devem ser consideradas as respostas de todos os modos de vibração que possam contribuir significativamente para a resposta global da estrutura. Os modos que contribuem para esta resposta serão apenas os modos com massas modais efetivas superiores a cinco porcento da massa total e a soma das massas para os modos considerados superior a noventa porcento da massa total da estrutura.

2.4.2.2 ANÁLISE NÃO LINEAR

Como alternativa ao método linear anteriormente descrito poderão utilizar-se métodos não lineares, métodos estes que apesar de mais complexos preveem melhor o comportamento de uma estrutura face a um sismo. Esta complexidade em virtude de muitos aspetos que podem ou não ser contemplados e várias formas de modelar cada um desses aspetos recorrendo a mais ou menos simplificações (Corrêa, M.R., 2016). O Euro código 8 mostra uma análise estática não-linear e a análise temporal não-linear como métodos de análise, desde que estas sejam devidamente fundamentadas face á ação sísmica, ao método de interpretação dos resultados e ao modelo construtivo.

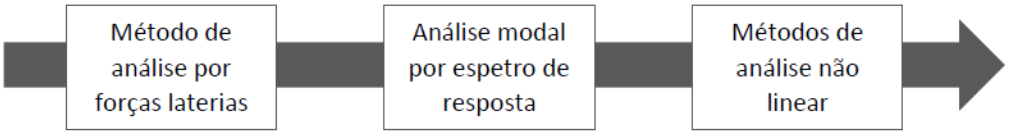


Figura 10 – Métodos de análise com diferentes graus de precisão, generalidade e complexidade

2.4.3 SISTEMAS ESTRUTURAIS REDUÇÃO DE RIGIDEZ

2.4.3.1 REDUÇÃO DE RIGIDEZ

Na análise da estrutura é considerada a rigidez dos elementos assumindo à partida que se encontram fendilhados, correspondendo a rigidez à observada no início da cedência da armadura.

No Eurocódigo 8 é definido que devem ser consideradas as propriedades de rigidez elástica e de esforço transverso como metade do valor do elemento não fendilhado. Assim, o modulo de elasticidade deve ser considerado como metade do modulo de elasticidade dos elementos não fendilhados (CNE, 2010).

2.4.3.2 CONDIÇÕES DE DUCTILIDADE GLOBAL

É importante garantir que os elementos estruturais possuam uma ductilidade adequada e compatível com o coeficiente de comportamento escolhido.

Deve ser garantida uma localização de rotulas plásticas de maneira a evitar roturas frágeis da estrutura. Para que tal se verifique é necessário que a seguinte condição seja verificada.

$$\sum M_{Rc} \geq 1{,}3 \cdot \sum M_{Rb} \qquad \textit{Eq.6}$$

Na qual as variáveis dispostas representam:

$\sum M_{Rc}$ somatório dos valores de cálculo dos momentos resistentes dos pilares ligados no nó considerado. O valor a considerar deverá ser o mínimo dos momentos resistentes do pilar obtidos para a secção sujeita aos vários esforços normais considerados na análise da situação sísmica;

$\sum M_{Rb}$ somatório dos valores de cálculo dos momentos resistentes das vigas ligadas ao nó considerado.

Esta equação 2.9 de ser aplicada de forma independente em dois planos verticais ortogonais de flexão. Neste caso, de estruturas porticadas definidas em duas direcçoes devem ser definidos por essas mesmas duas direcçoes. Deve ser igualmente considerado o sentido positivo e negativo de actuação da forca na envolvente do nó. Estas regras aplicam se para edifícios com dois ou mais pisos, exceptuando o nível superior dos pisos.

Para termos práticos, num nó onde convirjam dois pilares e quatro vigas (segundo x e y), na análise segundo x, entram os momentos resistentes em torno de x das vigas 1 e 2 e dos pilares 1 e 2. Na análise segundo y os momentos resistentes em torno de y das vigas 3 e 4 e dos pilares 1 e 2.

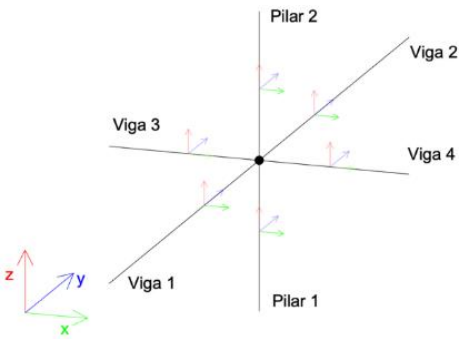


Figura 11 – Análise dos momentos resistentes em torno do eixo x

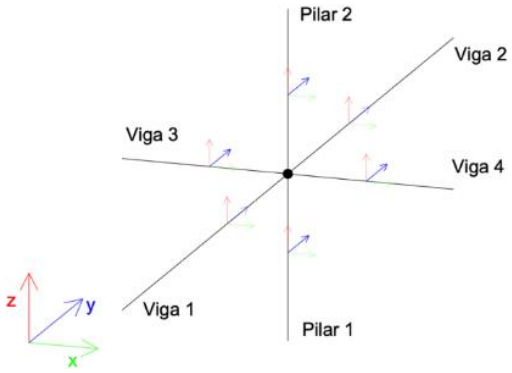


Figura 12 Análise dos momentos resistentes em torno do eixo y.

2.4.3.3 CONDIÇÕES DE DUCTILIDADE LOCAL

Uma vez que a estrutura é sujeita a um grande esforço de rotação é conveniente que esta seja acomodada sem que ocorra a rotura. Em todas as zonas críticas dos elementos sísmicos primários deve ser assegurada uma ductilidade suficiente para curvatura necessária para assegurar a formação de rotulas plásticas (EC8, 2010).

Em zonas de armaduras comprimidas deve ser impedida a curvatura local nas zonas de potencial formação de rotulas plásticas dos elementos sísmicos primários.

Quanto ao aço e ao betão, estes são também condicionados pela legislação (CNE, 2010):

- O aço deve pertencer à classe B ou C definidas no EC2 e possuir uma extenção plástica uniforme elevada;
- $\frac{R_m}{R_{eH}} \gg 1$, em que R_m é a tensão de rotura à tração do aço e R_{eH} é a tensão de cedência superior;
- Resistência à compressão adequada;
- Extensão de rotura deve exceder, numa margem adequada, a extensão correspondente à resistência à compressão máxima.

Para verificar se existe ductilidade suficiente é necessário calcular o fator de ductilidade em curvatura, μ_ϕ, para cada zona considerada critica (Eq.2.10). O coeficiente de ductilidade é definido como a relação entre a curvatura correspondente a oitenta e cinco porcento do momento resistente, na fase pós-ultima e a curvatura de cedência, sem que nunca seja excedida a extensão limite quer do aço quer do betão, $\varepsilon_{su,k}$ e $\varepsilon_{cu,}$ respetivamente. Para a eventualidade do aço de armadura longitudinal ser da classe B, o fator de ductilidade em curvatura deve ser, pelo menos, uma vez e meia superior ao obtido pelo sistema de Equações (Eq. 2.10).

$$\begin{cases} \mu_\phi = 2q_o - 1 \quad \text{se } T_1 \geq T_C \\ \mu_\phi = 1 + 2(q_o - 1)\, T_C/T_1 \quad \text{se } T_1 < T_C \end{cases} \qquad \textit{Eq.7}$$

Onde as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

q_o valor básico do coeficiente de comportamento;

T_1 período fundamental do edifício;

T_C limite superior do período no patamar de aceleração espetral constante.

2.4.4 SISTEMAS ESTRUTURAIS

Na conceção de projetos, o EC8 sugere uma separação entre tipos de sistemas estruturais, sendo que a cada um destes tipos estão alocados diferentes tipos de regras e valores máximos para o coeficiente de comportamento (CNE, 2010).

O Sistema Porticado é um sistema estrutural em que a resistência às ações verticais e horizontais são principalmente asseguradas por pórticos espaciais. Nestes sistemas, a resistência ao corte, na base do

edifício, é superior a sessenta e cinco por cento da resistência total á força de corte do sistema como um todo.

O Sistema de Paredes é um sistema estrutural no qual as resistências horizontais e verticais são principalmente asseguradas por paredes estruturais verticais, acopladas ou não. Nestes sistemas, a resistência ao corte, na base do edifício, é superior a sessenta e cinco por cento da resistência total á força de corte do sistema como um todo.

O Sistema Misto é um sistema estrutural no qual as resistências verticais são principalmente asseguradas por pórticos espaciais e a resistência às ações horizontais é assegurada, tanto pelo sistema porticado como pelas paredes estruturais, acopladas ou não. Este tipo de sistemas subdivide-se em dois tipos: o sistema misto equivalente a sistema porticado, no qual a resistência do sistema porticado ao corte na base do edifício é superior a cinquenta porcento da resistência sísmica do sistema como um todo. E no sistema misto equivalente a paredes onde a resistência das paredes a forca de corte na base do edifício é superior a cinquenta porcento da resistência sísmica do sistema estrutural como um todo.

O Sistema de Pendulo Invertido é um sistema estrutural no qual pelo menos cinquenta por cento da massa total da estrutura se encontra no terço superior da altura ou os mecanismos de dissipação de energia se encontrem concentrados num único elemento na base.

O Sistema Torsionalmente Flexível é um sistema misto ou sistema de paredes que não apresenta rigidez à torção mínima.

2.4.4.1 RIGIDEZ À TORÇÃO

Para a que a estrutura seja torsionalmente resistente tem que cumprir os seguintes requisitos:

$$r_X \geq l_S \qquad \textit{Eq.8}$$

$$r_X = \sqrt{\frac{K_{Torção}}{K_y}} \qquad \textit{Eq.9}$$

$$l_S = \sqrt{\frac{J_{x_G}}{M}} \qquad \textit{Eq.10}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

$K_{Torção}$ rigidez de torção;

K_y rigidez lateral na direção y;

l_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;

M massa do piso.

2.4.4.2 MOMENTO POLAR DE INÉRCIA DE MASSA

O Momento Polar de Inércia de Massa é definido como a resistência à deformação torsional, a capacidade de um objeto resistir à aceleração angular, quando sujeito a ações exteriores. Ou seja, a resistência à mudança de direção de rotação. Esta resistência depende da distribuição de massa no objeto e da sua forma. No caso de um edifício deve ser calculada piso a piso tendo em consideração a massa e o centro de gravidade respetivos.

Sendo o momento polar de inercia de área, I_P, definido relativamente ao centro de gravidade x_G, calculado por:

$$I_{P_{x_G}} = \frac{(h^2 + b^2)}{12} \cdot A \qquad \textit{Eq.11}$$

Já o momento de inercia de massa, J_P, é obtido por:

$$J_{P_{x_G}} = \frac{I_{P_{x_G}}}{A} \cdot M \qquad \textit{Eq.12}$$

$$J_{P_{x_G}} = \frac{M}{12} \cdot (h^2 + b^2) \qquad \textit{Eq.13}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

h, b dimensões do piso;

A área do piso.

2.4.4.3 COEFICIENTE DE COMPORTAMENTO

Quando se dimensiona um edifício que tem possibilidades de enfrentar ações sísmicas ao longo da sua vida útil não é prudente considerar uma análise linear para o cálculo dos esforços.

Aquando de uma ação sísmica intensa a estrutura pode apresentar deslocamentos significativos o que resultam num comportamento não linear do edifício.

Para que se possa ter em conta este comportamento não linear os esforços são divididos pelo coeficiente de comportamento. Assim é possível dimensionar a estrutura para esforços bastante inferiores aos resultantes de analise elásticas lineares.

Com este coeficiente é possível explorar a capacidade dúctil dos materiais em regime não linear, reduzindo a ação a que a estrutura está sujeita ao mesmo tempo que é exigida uma maior capacidade de deformação, usando analises lineares elásticas. É uma aproximação que permite ter em conta a capacidade de dissipação de energia da estrutura caso a resposta seja apenas no domínio elástico com cinco porcento de amortecimento viscoso.

Para uma correta avaliação dos mecanismos dissipativos de energia, aquando da formação de rotulas plásticas na ocorrência de um evento sísmico o Euro código oito define limites máximos para o coeficiente de comportamento, q, a utilizar, tendo em conta a respetiva capacidade de dissipar energia que é analisada pelo fator de majoração (para a Classe DCM no Quadro 2.7) Quando este fator de majoração não for quantificado poderão ser utilizados valores aproximados tabelados no Quadro 2.8.

Quadro 7 – Valor básico do coeficiente de comportamento qo, para sistemas regulares em altura (EC8, 2010)

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

Quadro 8 – Valores para o fator de majoração αu/α1 (EC8, 2010).

Tipo estrutural		α_u/α_1
Sistema porticado ou sistemas mistos equivalentes a pórticos	Edifícios de 1 só piso	1,1
	Edifícios de vários pisos, pórticos com 1 só tramo	1,2
	Edifícios de vários pisos, pórticos ou sistemas mistos equivalentes a pórticos com vários tramos	1,3
Sistema 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

em que:

α_1 é o 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_u é o 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.

2.4.4.4 Classes de Ductilidade

A ductilidade que um edifício apresenta quando sujeito a uma ação sísmica é dividida, pelo EC8, em três classes de ductilidade: baixa, DCL (*Ductility Class: Low*); média, DCM (*Ductility Class: Medium*); alta, DCH (*Ductility Class: High*), com grau de crescente flexibilidade e decrescente rigidez. Assim, a energia oriunda do sismo é dissipada através das capacidades plásticas dos materiais.

A DCL é usada em casos onde se observe baixa sismicidade, sendo que é requerida baixa ductilidade do edifício aplica-se um coeficiente de comportamento não superior a 1,5 e todas as regras de dimensionamento de edifícios de betão armado são aplicadas segundo o EC2.

A DCM e a DCH são descritas no Eurocódigo 8 e estabelecem parâmetros de dimensionamento mais eficientes no que toca aos sismos. Nomeadamente para os elementos que resistem diretamente às ações sísmicas. Tornando possível a troca entre deformabilidade e capacidade de dissipação por esforços, isto é, um coeficiente de comportamento maior do que 1,5.

A maior diferença entre as várias classes de ductilidade vem do espectro de resposta a utilizar.

Para estruturas DCL a ação sísmica é avaliada através de um espectro elástico. Em DCM's é considerada a formação de rotulas plásticas nos elementos resistentes, usando um espectro de dimensionamento que incorpora o coeficiente de comportamento, q, conduzindo a uma redução da ação sísmica tão grande quanto a capacidade de dissipar energia da estrutura. Em suma, para um maior coeficiente de comportamento teremos uma maior ductilidade da estrutura, menor a ação sísmica de calculo considerada e mais flexível é à mesma.

A classe DCM é a mais usada quando é necessário dimensionar um edifício com características de resistência sísmica. A DCH já exige normas mais restritas e um maior coeficiente de comportamento. São pouco empregues primeiro pela eficácia desnecessária à ocorrência sísmica, mas também pela obvia despesa adicional do reforço estrutural. É normalmente encontrada em edifícios de teor educacional.

2.4.5 MATERIAIS

A seleção de materiais a empregar num projeto resistente a ações sísmicas devem ter em conta não só as características resistentes destes, mas também os requerimentos de ductilidade impostos.

2.4.5.1 BETÃO

A classe de Betão deve ter uma resistência de compressão adequada e uma extensão de rotura elevada. Não é aconselhado utilizar betão estrutural com classe inferior a C16/20 na realização de estruturas sismos-resistentes (CNE, 2010)

2.4.5.2 AÇO

O aço deve ter uma extensão plástica uniforme elevada. Todas as armaduras sismo-resistentes empregadas em zonas críticas devem ser da classe B ou C, excluindo estribos fechados em que se devem usar varões nervurados (CNE, 2010).

2.5 VIGAS

As vigas são elementos indispensáveis no que toca à resistência a sismos uma vez que transportam as cargas das lajes para os pilares. Por regulamentação, foi definido que estes seriam os elementos a serem mais carregados. As estruturas são desenhadas de forma a estas vigas falhem antes do surgimento de rotulas plásticas nos pilares de maneira a garantir o mínimo de estabilidade evitando a cedência da mesma.

2.5.1 RESTRIÇÕES GEOMÉTRICAS

Os desvios geométricos podem resultar em incertezas significativas no que toca a resistência da do elemento em estudo. As regras expostas seguidamente devem ser cumpridas de forma a garantir a segurança da estrutura.

2.5.2 EXCENTRICIDADE VIGA-PILAR

De maneira a termos uma transferência de momentos, resultantes de ações sísmicas, eficaz é imposta uma excentricidade limite entre os eixos da viga e do pilar:

$$e_{b,c} \leq \frac{b_c}{4} \qquad \textit{Eq.14}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

$e_{b,c}$ excentricidade do eixo da viga em relação ao pilar;

b_c maior dimensão da secção transversal do pilar perpendicular ao eixo longitudinal da viga.

2.5.3 LARGURA

Existe também regulamentação no que toca ao limite de largura das vigas. Visa aproveitar o efeito favorável da compressão do pilar na aderência dos varões horizontais. Esta largura depende da geometria do pilar e da própria altura da viga (CNE, 2010).

$$b_w \leq min\{b_c + h_w; 2b_c\} \qquad \textit{Eq.15}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

b_w largura de uma viga sísmica primária;

h_w altura da viga.

2.5.4 ESFORÇOS DE CÁLCULO

Os esforços atuantes na viga resultantes de ações sísmicas são obtidos a partir da capacidade real com base no equilíbrio da viga sob a ação de (CNE, 2010):

- Carga transversal atuante na situação de projeto sísmico
- Momentos de extremidades associados a formação de rotulas plásticas.

Considera-se que são formadas rotulas plásticas nas extremidades da viga ou nos elementos verticais para ambos os sentidos da ação sísmica, positivo e negativo. Para que os esforços de calculo verifiquem a resistência a ação sísmica consideradas em cada extremidade devem ser considerados dois valores do esforço transverso atuante(CNE, 2010)

- $V_{Ed,max,i}$ correspondente ao momento positivo máximo;
- $V_{Ed,min,i}$ correspondente ao momento negativo máximo.

Estes momentos nas extremidades da viga, $M_{i,d}$, representada na Figura 2.10 são possíveis de determinar pelo EC8 pela Eq.2.19.

$$M_{i,d} = \gamma_{Rd} \cdot M_{Rb,i} \cdot min\left(1, \frac{\sum M_{Rc}}{\sum M_{Rb}}\right) \qquad \text{Eq.16}$$

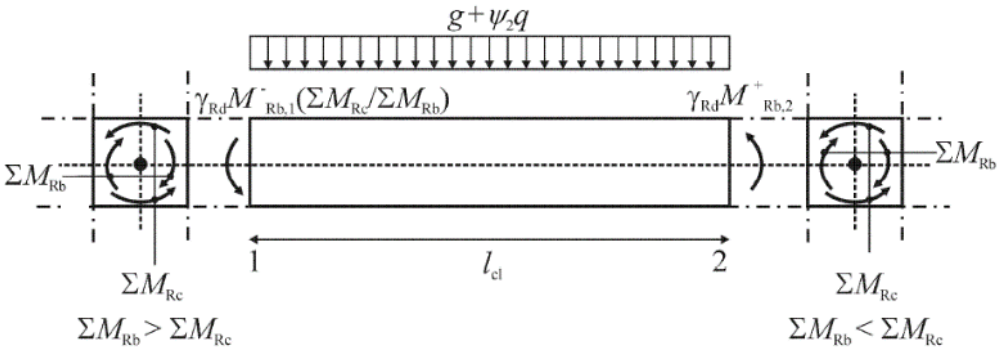


Figura 13 Valores de cálculo pela capacidade real dos esforços transversos nas vigas (EC8, 2010)

Onde as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

γ_{Rd} coeficiente que tem em conta a possível sobrerresistência do aço, para vigas pertencentes a estruturas DCM considera-se igual a 1,0;

$M_{Rb,i}$ valor de cálculo do momento resistente da viga na extremidade i no sentido do momento fletor sísmico para o sentido considerado da ação sísmica;

$\sum M_{Rc}$ soma dos valores de cálculo dos momentos resistentes dos pilares que concorrem no nó. Deve corresponder aos esforços normais do pilar, na situação de projeto sísmico;

$\sum M_{Rb}$ soma dos valores de cálculo dos momentos resistentes das vigas que concorrem no nó;

2.5.5 Resistência à Flexão e ao Esforço Transverso

De maneira a termos melhorias na resistência a flexão e ao esforço transverso em vigas sísmicas primárias com secção transversal em L ou em T, a armadura superior deverá ser inserida no interior da largura da alma, mas tem que ser contida dentro da largura efetiva do banzo, b_{eff}. Para vigas sísmicas primarias ligadas a pilares exteriores, pode ser calculada tendo em conta a geometria na envolvente. (Eq. 2.20 e Eq 2.23 e Figura 2.11).

- Sem viga transversal

$$b_{eff} = b_c$$

*Eq**Error! No text of specified style in document.**.17*

- Com uma viga transversal de altura semelhante

$$b_{eff} = b_c + 2h_f \qquad \textit{Eq.18}$$

A largura efetiva do banzo, b_{eff}, para vigas sísmicas primárias ligadas a pilares interiores, pode ser calculada:

- Sem viga transversal

$$b_{eff} = b_c + 2h_f \qquad \textit{Eq.19}$$

- Com uma viga transversal de altura semelhante

$$b_{eff} = b_c + 4h_f \qquad \textit{Eq.20}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

b_c largura do pilar;

h_f altura do banzo da viga.

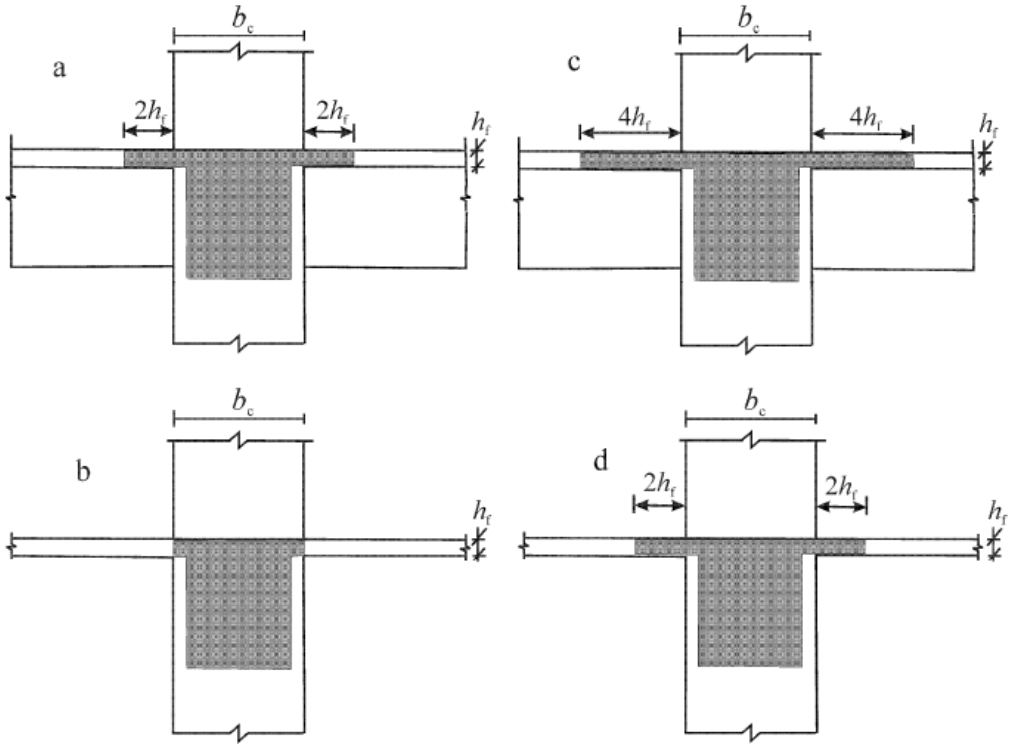


Figura 14 Largura eficaz do banzo beff para vigas ligadas a pilares (EC8, 2010).

Figura 15 - Largura eficaz do banzo beff para vigas ligadas a pilares.

2.5.6 Disposições Construtivas para Ductilidade Local

No Eurocódigo 8 são descritas regras construtivas que limitam o espaçamento da armadura transversal das vigas. Asseguram a existência de armadura longitudinal suficiente para que possa ser considerado que existe ductilidade local.

2.5.7 Zonas Críticas

São chamadas de zonas criticas, , as zonas em que será necessário um cuidado especial onde será detalhado mais pormenorizadamente a armadura a reforçar. É necessário também satisfazer o requisito de ductilidade local nas zonas criticas da viga sísmica primaria. É possível garantir o requisito de ductilidade local caso sejam verificadas algumas condições em ambos os banzos(CNE, 2010).

Nas vigas a zona critica é contabilizada a partir da ligação viga-pilar e tem a extensão de:

$$l_{cr} = h_w \qquad \textit{Eq.21}$$

em que:

h_w é a altura da viga.

2.5.8 Armadura de Compressão

Nas zonas comprimidas deve ser colocada, pelo menos, metade da armadura da zona tracionada (Eq.2.25), para além da armadura de compressão necessária para que seja verificado o estado limite último na situação de projeto sísmico.

$$A_{s,c} \geq 0{,}5 \cdot A_{s,t} \qquad \textit{Eq.22}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

$A_{s,c}$ secção de armadura para a zona comprimida;

$A_{s,t}$ secção de armadura para a zona tracionada.

2.5.9 Taxa de Armadura na zona Tracionada

A taxa de armadura da zona tracionada, ρ, não deve ser excedido pelo valor máximo, ρ_{max} (Eq.2.26 e Eq. 2.27). As taxas de armaduras, ρ e ρ', devem ser normalizadas por bd, em que b é a largura do banzo comprimido da viga e d é a altura útil da secção transversal. em todo o seu comprimento, a taxa de armadura tracionada deve ser superior à taxa de armadura mínima, ρ_{min} (Eq. 2.28). No caso da zona tracionada esteja a conter uma laje, a armadura desta que se encontre orientada paralelamente à viga deverá ser contabilizada na taxa de armadura tracionada.

$$\rho \leq \rho_{max}$$ Eq.23

$$\rho_{max} = \rho' + \frac{0{,}0018}{\mu_\phi \cdot \varepsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$$ Eq.24

$$\rho_{min} = 0{,}5 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}\right)$$ Eq.25

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

ρ' taxa de armadura na zona comprimida;

$\varepsilon_{sy,d}$ valor de cálculo da extensão do aço;

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

f_{yd} valor de cálculo da tensão de cedência do aço;

f_{ctm} valor médio da tensão de cedência do aço.

2.5.10 Armadura de Confinamento

É necessário especial cuidado na armadura de confinamento das zonas críticas de vigas sísmicas primarias de tal forma que sejam verificadas as Eq.2.26 e Eq.2.27. A primeira armadura de confinamento deve ser colocada a uma distância nunca maior do que cinquenta milímetros da secção transversal que introduz o nó viga-pilar.

$$d_{bw} \geq 6\ mm$$ Eq. 26

$$s \leq min\left\{\frac{h_w}{4}\ ;\ 24 \cdot d_{dw}\ ;\ 225\ ;\ 8 \cdot d_{bL}\right\}\ mm$$ Eq.27

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

d_{bw} diâmetro da armadura de confinamento;

s espaçamento da armadura de confinamento;

h_w altura da viga;

d_{bL} diâmetro mínimo dos varões da armadura longitudinal.

2.6 PILARES

Os pilares são elementos fundamentais no panorama de estruturas. São particularmente sensíveis a ações semelhantes às sísmicas. Ações axiais em combinação com flexão biaxial cíclica (Rodrigues, H. [et al.], 2016) São definidas normas pelo EC8 que permitem limitar os danos provocados por ações sísmicas.

2.6.1 RESTRIÇÕES GEOMÉTRICAS

No que toca aos pilares a curvatura é importante porque irá propagar para os efeitos de segunda ordem. Assim, é necessário fazer o controle de deslocamentos relativos entre pisos de maneira a ser verificada e garantida a resistência da estrutura.

Se a condição $\theta \leq 0,1$ (Eq.28) for verificada, não será necessário considerar os efeitos de segunda ordem. No caso de $0,1 < \theta \leq 0,2$ pode ser considerada uma análise simplificada dos efeitos de segunda ordem, multiplicando os esforços sísmicos por um fator $1/(1-\theta)$. O coeficiente de sensibilidade ao deslocamento relativo entre pisos não deve exceder o valor de zero virgula três.

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,1 \qquad \text{Eq.28}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

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 ao deslocamento relativo entre pisos;

V_{tot} força de corte sísmica total, no piso considerado;

h altura entre pisos.

2.6.2 ESFORÇOS DE CÁLCULO

Os esforços atuantes na viga resultantes de ações sísmicas são obtidos a partir da capacidade real com base no equilíbrio da viga sob a ação de (CNE, 2010):

- Carga transversal atuante na situação de projeto sísmico

- Momentos de extremidades associados a formação de rotulas plásticas.

Considera-se que são formadas rotulas plásticas nas extremidades da viga ou nos elementos verticais para ambos os sentidos da ação sísmica, positivo e negativo. Para que os esforços de calculo verifiquem a resistência à ação sísmica consideradas em cada extremidade devem ser considerados dois valores do esforço transverso atuante (CNE, 2010).

- $V_{Ed,max,i}$ correspondente ao momento positivo máximo;
- $V_{Ed,min,i}$ correspondente ao momento negativo máximo.

Estes momentos nas extremidades da viga, $M_{i,d}$, representada na Figura 16 são possíveis de determinar pelo EC8 pela Eq.29.

$$M_{i,d} = \gamma_{Rd} \cdot M_{Rb,i} \cdot min\left(1, \frac{\sum M_{Rc}}{\sum M_{Rb}}\right) \qquad \text{Eq.29}$$

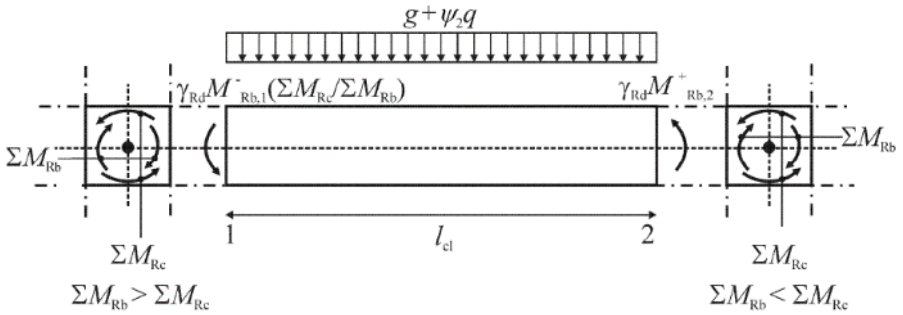


Figura 16 - Valores de cálculo pela capacidade real dos esforços transversos nas vigas (EC8, 2010).

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

γ_{Rd} coeficiente que tem em conta a possível sobrerresistência do aço, para vigas pertencentes a estruturas DCM considera-se igual a 1,0;

$M_{Rb,i}$ valor de cálculo do momento resistente da viga na extremidade i no sentido do momento fletor sísmico para o sentido considerado da ação sísmica;

$\sum M_{Rc}$ soma dos valores de cálculo dos momentos resistentes dos pilares que concorrem no nó. Deve corresponder aos esforços normais do pilar, na situação de projeto sísmico;

$\sum M_{Rb}$ soma dos valores de cálculo dos momentos resistentes das vigas que concorrem no nó;

2.7.2. Resistência à Flexão e Esforço Transverso

Tanto a resistência à flexão como ao esforço transverso devem ser determinados de acordo com as correspondentes capacidades reais. Considerando o equilíbrio do pilar sobre a ação dos momentos fletores nas extremidades associadas às formações de rotulas plásticas.

As rótulas plásticas são formadas nas extremidades das vigas ligadas aos nós, nas quais as extremidades dos pilares concorrem ou nas extremidades dos pilares.

Os momentos de extremidade da viga, $M_{i,d}$, representados seguidamente na Figura 2.12 são possíveis de determinar pelo Eurocodigo 8 pela Eq. 2.32

$$M_{i,d} = \gamma_{Rd} \cdot M_{Rc,i} \cdot min\left(1, \frac{\sum M_{Rb}}{\sum M_{Rc}}\right) \qquad \text{Eq.30}$$

Em que:

γ_{Rd} é o coeficiente que tem em conta a possível sobrerresistência do aço e o confinamento do betão, na zona de compressão da secção, considera-se igual a 1,1;

$M_{Rc,i}$ é o valor de cálculo do momento resistente do pilar na extremidade i, no sentido do momento fletor sísmico para o sentido considerado da ação sísmica;

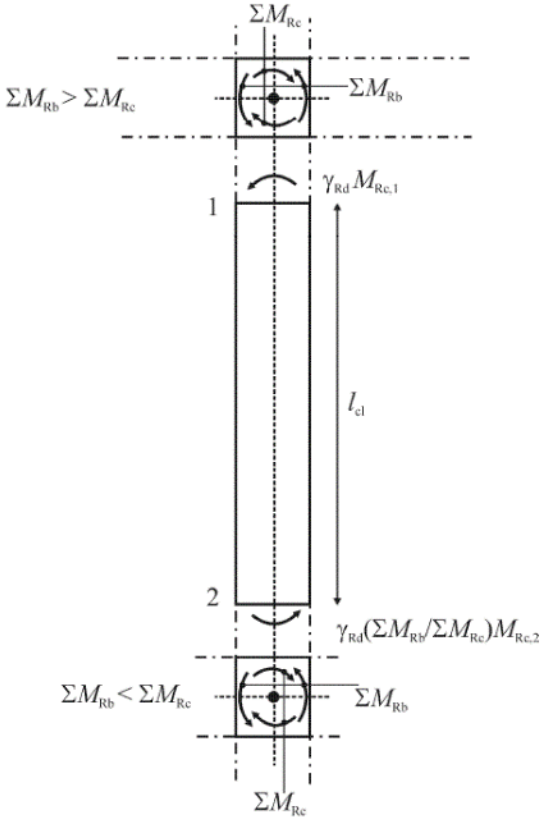


Figura 17 - Valores de cálculo pela capacidade real dos esforços transversos nos pilares (CNE, 2010).

2.6.3 Resistência de Cálculo

A resistência a flexão e ao esforço transverso são calculadas segundo o Eurocódigo 2, inicialmente utilizando o valor do esforço normal para a situação de projeto sísmico nos dois sentidos (positivo e negativo) segundo cada eixo ortogonal.

É ainda preciso verificar a flexão desviada, simplificadamente, em cada direção com uma redução de 30 % relativamente à resistência de flexão.

2.6.4 Esforço Normal Reduzido

O esforço normal reduzido, υ , não deve ter um valor superior a 0,65:

$$\upsilon = \frac{N_{Ed}}{h \cdot b \cdot f_{cd}} \leq 0{,}65 \qquad \textit{Eq.31}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

N_{Ed} esforço axial de cálculo;

b, h dimensões da peça;

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

2.6.5 Disposições Construtivas para a Ductilidade Local

A ductilidade local à flexão é fundamentalmente garantida pela cintagem e pela intensidade do esforço axial. São enunciados valores máximos e mínimos de esforço axial e cintagem, respetivamente, nas zonas críticas (zonas onde potencialmente se irão formar rotulas plásticas, nós de ligação) de vigas e pilares. Sendo que os nós e as zonas limítrofes tomam um papel especialmente importante nesta análise. (Gomes, A. and de Brito, J., 1996)

2.6.6 Taxa de Armadura Longitudinal

A taxa de armadura deve ser intervalada por o,01 e 0,04, (Eq. 2.34). No caso da seção transversal ser simétrica deve-se utilizar soluções com armaduras simétricas também, (Eq.2.35). Deve ser ainda ter tido em conta o especial cuidado de ser colocado, ao longo de cada face do pilar, no mínimo, um varão intermédio entre os varões de canto, assim assegurando a integridade dos nós viga-pilar.

$$0{,}01 \leq \rho \leq 0{,}04 \qquad \textit{Eq.32}$$

$$\rho = \rho' \qquad \textit{Eq.33}$$

2.6.7 Zonas Críticas

As zonas numa extensão l_{cr}, definida pela Eq. 2.36, a partir de cada uma das extremidades de um pilar sísmico primário, deve ser considerada como zona critica. Caso seja verificada a condição $l_{cl}/h_c < 3$, toda a altura do pilar sísmico primário deverá ser considerada como zona critica.

$$l_{cr} = max\{\, h_c \,;\, l_{cl}/6 \,;\, 0{,}45 \,\}\, m \qquad \textit{Eq.34}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

h_c maior dimensão da secção transversal;

l_{cl} comprimento livre do pilar.

2.6.8 Requisito de Ductilidade Local

De forma a ser assegurada a integridade da viga, é preciso ser satisfeito o requisito de ductilidade local nas zonas críticas. Se, para o valor de μ_ϕ, for atingida, em qualquer ponto da secção transversal, uma extensão do betão superior a $\varepsilon_{cu2}=0{,}0035$, deve ser compensado com um confinamento adequado do núcleo de betão a perda de resistência derivado do destacamento desse betão. Para a zona critica na base dos pilares sísmicos primários deve ser ainda verificado que $\omega_{wd} \geq 0{,}08$.

Este requisito é satisfeito se:

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_{\phi} \cdot v_d \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_o} - 0{,}035 \qquad \textit{Eq.35}$$

$$\omega_{wd} = \frac{volume\ de\ cintas}{volume\ do\ núcleo\ de\ betão} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \qquad \textit{Eq.36}$$

$$v_d = \frac{N_{ed}}{A_c \cdot f_{cd}} \qquad \textit{Eq.37}$$

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s \qquad \textit{Eq.38}$$

Para secções transversais retangulares:

$$\alpha_n = 1 - \sum_n {b_i}^2/(6 \cdot b_o \cdot h_o) \qquad \textit{Eq. 39}$$

$$\alpha_s = (1 - s/2 \cdot b_o)(1 - s/2 \cdot h_o) \qquad \textit{Eq.40}$$

Para secções transversais circulares com cintas circulares:

$$\alpha_n = 1 \qquad \textit{Eq.41}$$

$$\alpha_s = (1 - s/2 \cdot D_o)^2 \qquad \textit{Eq.42}$$

Para secções transversais circulares com cintas helicoidais:

$$\alpha_n = 1 \qquad \textit{Eq.43}$$

$$\alpha_s = (1 - s/2 \cdot D_o) \qquad \textit{Eq.44}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

ω_{wd} taxa mecânica volumétrica de cintas na zona crítica;

v_d esforço normal reduzido de cálculo;

$\varepsilon_{sy,d}$ valor de cálculo da extensão de cedência à tração do aço;

h_c, b_c altura e largura bruta da seção transversal;

h_o, b_o altura e largura do núcleo confinado, medido ao eixo das cintas;

α coeficiente de eficácia do confinamento;

n número total de varões longitudinais abraçados lateralmente por cintas ou por ganchos;

s espaçamento entre armaduras transversais;

b_i distância entre varões consecutivos abraçados;

D_o diâmetro do núcleo de confinado, medido ao eixo das cintas.

2.6.9 Espaçamento da Armadura Transversal em Zonas Críticas

Em todas as zonas críticas dos pilares sísmicos primários devem ser adotadas cintas e ganchos de diâmetro nunca inferior a seis milímetros. As cintas devem ter um espaçamento que garanta um mínimo de ductilidade e impeça a encurvadura local dos varões longitudinais. A sua forma deve ser tal que a secção transversal fique sujeita a condições de tensão triaxial poe elas produzida.

Caso $q \leq 2{,}0$ e $v \leq 0{,}2$, a zona critica na base do pilar sísmico primário pode ser dimensionada pelo descrito EC2, ou seja, para DCL.

$$d_{cw} \geq 6\,mm \qquad \textit{Eq.45}$$

$$s \leq min\left\{\frac{b_o}{2}\ ;\ 175\ ;\ 8 \cdot d_{bL}\right\}\ mm \qquad \textit{Eq.46}$$

$$b_i \leq 200\ mm \qquad \textit{Eq}\textbf{Error! No text of specified style in document.}\textit{.47}$$

em que as variáveis envolvidas têm os seguintes significados:

d_{bL} diâmetro mínimo dos varões da armadura longitudinal [mm];

b_i distância entre varões longitudinais consecutivos [mm].

2.6.10 Síntese das Verificações

Nos quadros 2.9 e 2.11 são apresentados os resumos de verificações a fazer em vigas e pilares segundo o EC8 para DCM. Estas verificações são utilizadas para a construção do programa descrito no capítulo que se segue, a aplicar na estrutura detalhada no capítulo 4.

Quadro 9 – Verificações relativas a materiais

Materiais	Betão	Classe do betão	Não inferior a C16/20
	Aço	Varões nervurados	Nas zonas críticas (exceto em estribos fechados)
		Classe da armadura	Classe B ou C nas zonas críticas

Quadro 10 – Verificações relativas a opções de projeto.

Opções de projeto	Coeficiente de comportamento	Ductilidade Local	se $T_1 \geq T_C$	$\mu_\phi = 2q_o - 1$
			se $T_1 < T_C$	$\mu_\phi = 1 + 2(q_o - 1)\, T_C/T_1$

Quadro 11 - Verificações relativas a geometria para vigas e pilares.

Geometria	VIGAS		
	Excentricidade	Excentricidade do eixo da viga em relação ao eixo do pilar	$e_{b,c} \leq \frac{b_c}{4}$
	Largura	b_w	$\leq min\{b_c + h_w; 2b_c\}$
	Zonas críticas	$l_{cr} = h_w\ m$	
	PILARES		
	Zonas críticas	$l_{cr} = max\{\ h_c\ ;\ l_{cl}/6\ ;\ 0{,}45\ \}\ m$ Se $l_{cl}/h_c < 3$ toda a altura do pilar é zona critica.	

Quadro 12– Verificações relativas a armaduras para vigas.

Armaduras	Disposição da armadura	Ligação a pilar exterior	Sem viga transversal	$b_{eff} = b_c$
			Com viga transversal	$b_{eff} = b_c + 2h_f$
		Ligação a pilar interior	Sem viga transversal	$b_{eff} = b_c + 2h_f$
			Com viga transversal	$b_{eff} = b_c + 4h_f$
	Armadura Longitudinal	Percentagem de armadura de tração, ρ		$\rho_{min} = 0{,}5 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}\right)$ $\rho_{max} = \rho' + \frac{0{,}0018}{\mu_\phi \cdot \varepsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$
		Armadura de compressão		$A_{s,c} \geq 0{,}5 \cdot A_{s,t}$
		Armadura máxima		$A_s \leq 0{,}04 \cdot A_c$
	Armadura Transversal	Diâmetro		$d_{bw} \geq 6\ mm$
		Espaçamento (zona crítica)		$s \leq min\left\{\frac{h_w}{4}\ ;\ 24 \cdot d_{dw}\ ;\ 225\ ;\ 8 \cdot d_{bL}\right\}\ mm$
		Colocação da primeira armadura de confinamento		a menos de 50 mm
	Amarração	Limitação do diâmetro dos varões longitudinais		Em nós viga-pilar interiores $\frac{d_{bL}}{h_c} \leq \frac{7{,}5 \cdot f_{ctm}}{\gamma_{Rd} \cdot f_{yd}} \cdot \frac{1 + 0{,}8 \cdot v_d}{1 + 0{,}75 k_D \cdot \rho'/\rho_{máx}}$ Em nós viga-pilar exteriores $\frac{d_{bL}}{h_c} \leq \frac{7{,}5 \cdot f_{ctm}}{\gamma_{Rd} \cdot f_{yd}} \cdot (1 + 0{,}8 \cdot v_d)$

Quadro 13 – Verificações relativas a armaduras para pilares. (Carreira, P., 2021)

Armaduras	Disposição da armadura	Ao longo de cada face do pilar	Pelo menos um varão intermédio entre os varões de canto
	Armadura Longitudinal	Percentagem de armadura de tração, ρ	$0{,}01 \leq \rho_l \leq 0{,}04$
		Distância entre varões	$b_i \leq 200\ mm$
	Armadura Transversal	Taxa mecânica volumétrica de cintas nas zonas críticas	$\omega_{wd} = \frac{volume\ de\ cintas}{volume\ do\ núcleo\ de\ betão} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$ $\omega_{wd} \geq 0{,}08$
		Verificação do fator de ductilidade	$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \cdot \mu_\phi \cdot v_d \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_o} - 0{,}035$
		Diâmetro	$d_{bw} \geq 6\ mm$
		Espaçamento	$s \leq min\left\{\frac{b_o}{2}\ ;\ 175\ ;\ 8 \cdot d_{bL}\right\}\ mm$
	Amarração	Relação entre a armadura requerida e a armadura usada	$A_{s,req} / A_{s,prov} = 1$

3

3 ELABORAÇÃO DO ALGORITMO

3.1 INTRODUÇÃO

Utilizando a linguagem de programação *C#*, pelo meio do compilador *Visual Studios*, foi desenvolvido um programa bastante complexo que visa verificar o cumprimento ou não das regras estabelecidas no Eurocodigo8 para que seja feito um correto dimensionamento sismo- resistente classificada como DCM – Classe de Ductilidade Média – em vigas e em pilares estruturais. O programa desenvolvido no âmbito desta dissertação procura continuar este trabalho agora com valores atualizados diretamente do software *Etabs*.

O programa é inserido dentro do software *Revit* como um *addin* e é compatível com outros projetos, sendo lhe aplicada as variantes entre eles. Tipos de solo, materiais, tipo de carga entre outros. Para o seu desenvolvimento foi utilizado o SDK (*Software Development Kit*), que fornece ferramentas para fazer a ligação com o *Revit* e o *Etabs* através de *C#*.

No presente capítulo é explicado o desenvolvimento do algoritmo com o detalhar da sequência de calculo das verificações. São ainda vistos em concreto alguns casos de programação para os quais foram necessárias soluções mais complexas. Nos anexos A10 e A12 são apresentadas as principais funções utilizadas no programa.

3.2 FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA

3.2.1 PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS

Com o desenhar de um programa é necessário fazer uma série de escolhas no que toca aos vários estilos de programação. A programação orientada a objetos (POO) surge como uma abordagem que se foca em objetos, classes e métodos que se destaca da programação tradicional.

A POO tem três grandes fatores fundamentais:

- Encapsulamento: Não é preciso conhecer a implantação interna de um objeto para o poder usar

- Herança: Forma como as diferentes classes se relacionam entre si. Classe que herda variáveis e métodos de outra classe. Existe reutilização de código sem que este tenha de ser reescrito.

- Polimorfismo: O mesmo método pode ser aplicado em diferentes objetos de diferentes classes.

Por fim, retira-se que a POO é um método eficaz e eficiente para elaboração de um programa onde é simplificada a ordenação de ideias e a deteção de erros com maior facilidade resultando numa melhor utilização do tempo despendido.

O processo de verificação inicia-se com o reconhecimento de elementos estruturais presentes no na modelação a estudar. É então preenchida a classe com os dados de cada elemento chamada, Bar Data. Juntamente com esses dados encontram-se as informações fundamentais para a analise, neste caso, de pilares, vigas e as suas interceções (nós viga-pilar). Os dados correspondentes ao elemento em questão são guardados numa outra classe chamada de Bar Results, esta é que vai tratar e correr as verificações, independentemente entre os três, para que depois possa apresentar os resultados convenientemente.

3.2.2 Recolha de Informação

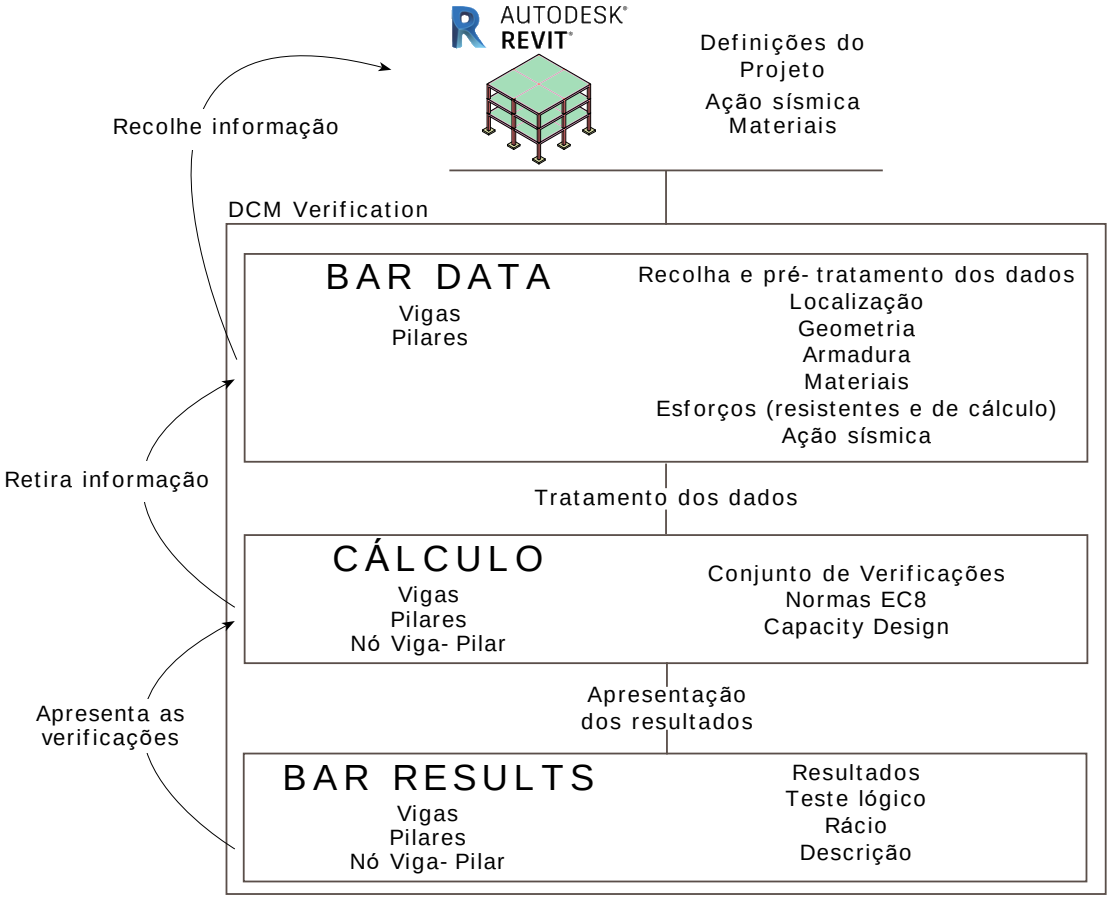


Figura 18 - Diagrama de Fluxo do tratamento de dados pelo programa(Carreira, P., 2021).

3.2.3 Obtenção de Dados do Revit e Pré-Tratamento

Um grande fator de erro neste tipo de programas é a obtenção de dados. Se os dados recolhidos forem incorretos os resultados serão, obviamente, diretamente influenciados por esses erros.

Uma vez que é tão importante a correta leitura das características da estrutura esta é tratada numa fase inicial da formulação. Com verificação continua da qualidade dos resultados produzidos. A recolha de dados é muito delicada visto que implica contacto direto com os dados do *Revit* para cada elemento selecionado.

Nesta fase de obtenção de dados do *Revit*, há informações essenciais que migram diretamente de características de modelo para parâmetros do elemento estrutural uma vez que existem armazenadas no conjunto de características que definem o elemento. São estas mesmas características que é procurado serem atualizadas a partir dos resultados de calculo oriundos do *Etabs*. Existem ainda outras informações que são resultado do tratamento de dados obtidos anteriormente, é feita então uma separação entre dados obtidos diretamente e indiretamente. Esta separação é detalhada no quadro 3.1 e no código correspondente na figura 3.2.

É também crucial que seja claro o tipo de elemento que estamos a estudar (viga ou pilar) uma vez que dependendo do tipo de elemento as verificações irão variar também. Não esquecendo ainda a ligação entre elementos (ligações viga-pilar).

Quadro 14 Dados obtidos direta e indiretamente a partir do REVIT.

DADOS OBTIDOS DIRETAMENTE		DADOS COM O PRÉ TRATAMENTO
Comprimento Eixo Faces Comprimento livre Altura entre pisos	GEOMETRIA	Área da secção transversal Distância entre os eixos viga-pilar Dimensão da secção transversal Dimensões confinadas Volume do núcleo de betão
Transversal Diâmetro Espaçamento **Longitudinal** Diâmetro Número de varões Posição	ARMADURA	**Transversal** Volume de cintas Espaçamento **Longitudinal** Área de armadura Distância entre varões Armadura de compressão/tração Percentagem de armadura
Betão Classe **Aço** Classe	MATERIAIS	**Betão** f_{cd} f_{ctm} **Aço** f_{yd} f_{yk} $E_{y,d}$
Período natural da estrutura Características da ação sísmica Coeficiente de comportamento, q	OPÇÕES DE PROJETO	Ductilidade Local Parâmetros definidores do espetro de resposta
Momento Resistente Esforço Transverso Resistente	ESFORÇOS	

```
1  using Autodesk.Revit.DB;
2  using Autodesk.Revit.DB.Structure;
3  using Autodesk.Revit.UI;
4  using Dcm.Common;
5  using RevitApi;
6  using System;
7  using System.Collections.Generic;
8  using System.Linq;
9
10 namespace Dcm.Addin
11 {
12     public class RevitFuncs
13     {
14
15         internal static List<BarData> GetSelectedRevitBarsData(UIDocument uiDoc)
16         {
17             var doc = uiDoc.Document;
18             var lst = new List<BarData>();
19             var label = LabelElements(uiDoc);
20
21             using (var tr = new Transaction(doc, "getSelectedBars"))
22             {
23                 tr.Start();
24                 new SetForcesColumns(doc);
25                 new SetForcesBeams(doc);
26
27                 foreach (var id in uiDoc.Selection.GetElementIds())
28                 {
29                     var el = doc.GetElement(id);
30                     if (el.Category == null) continue;
31                     var b = new BarData();
32                     b.rebar = new RebarProps();
33                     b.forces = new ForcesData();
34
35                     if (el.Category.Name == "Structural Columns" || el.Category.Name == "Structural Framing")
36                     {
37                         b.doc = doc;
38                         b.pData = GetPData(label, el);
39                         b.barName = b.pData.barName;
40                         b.RevitCategory = el.Category.Name;
41                         b.ID = el.UniqueId;
42                         b.shape = SectionData.GetElementShape(el, uiDoc);
43                         b.Axis = GetElementAxis(el, uiDoc);
44                         b.csArea = SectionData.GetArea(el, uiDoc);
45                         b.lc = GetCutLenght(el, uiDoc);
46                         b.relPosition = el.GetParameter2("Relative Position").AsString();
47                         b.rebar.dbw = GetRebarDiameterTransv(el, doc);
48                         b.rebar.bi = GetDistanceBetweenBars(el, doc);

49                         b.rebar.dbl = GetRebarDiameterLongi(el, doc);
50                         b.rebar.nbl = GetRebarLongiNumber(el, doc);
51                         b.rebar.As = GetRebarAreaLongi2(el, doc);
52                         b.rebar.sMax = GetRebarMaxSpacing(el, uiDoc);
53                         b.rebar.sMin = GetRebarMinSpacing(el, uiDoc);
54                         b.rebar.longi = GetRebarAsRebarLongi(el, doc);
55                         b.rebar.transv = GetRebarAsRebarTransv(el, doc);
56                         b.rebar.transvVolume = GetRebarTransvVolume(el, doc);
57                         b.rebar.spacingTransv = GetRebarSpacingTransv(el, uiDoc);
58                         b.rebar.rebarTopPts = GetRebarTopPoints(el, doc);
59                         b.rebar.cover = GetConcCover(el, doc);
60                         b.forces.axialF = Extensions.ConvertToDisplayUnitsForce(doc, el.GetParameter2("Nsd").AsDouble());
61                         b.forces.VRd = Extensions.ConvertToDisplayUnitsForce(doc, el.GetParameter2("VRd").AsDouble());
62                         GetTopAndBotRebar(el, uiDoc, out b.rebar.rebarTop, out b.rebar.rebarBottom, out b.rebar.rebarPts);

64                         if (b.RevitCategory == "Structural Framing")
65                         {
66                             b.bw = SectionData.MinEdgeDim(el, uiDoc);
67                             b.hw = SectionData.MaxEdgeDim(el, uiDoc);
68                             b.lcr = b.hw;
69                             b.zBase = GetZBeam(el, uiDoc);
70                             b.forces.beamMRdxx2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("Mrdxx+").AsDouble());
71                             b.forces.beamMRdxx1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("Mrdxx-").AsDouble());
72                             b.forces.beamMRdyy2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("Mrdxx+").AsDouble());
73                             b.forces.beamMRdyy1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("Mrdxx-").AsDouble());
74                             b.forces.beamVDist = Extensions.ConvertToDisplayUnitsForceDist(doc, el.GetParameter2("VDist").AsDouble());
75                         }
76                         else if (b.RevitCategory == "Structural Columns")
77                         {
78                             b.bc = SectionData.MaxEdgeDim(el, uiDoc);
79                             b.hc = SectionData.MaxEdgeDim(el, uiDoc);
80                             b.hf = SectionData.MaxEdgeDim(el, uiDoc);
81                             b.bo = GetConfinedWidth(el, uiDoc);
82                             b.ho = GetConfinedHeight(el, uiDoc);
83                             b.vo = GetConfinedVolume(el, uiDoc);
84                             b.lcr = GetColumnLcr(b);
85                             b.levelH = GetLevelHeightColumn(el, uiDoc);
86                             b.zBase = GetZBaseColumn(el, uiDoc);
87                             b.forces.columnMRdxxTop2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdxxTop+").AsDouble());
88                             b.forces.columnMRdyyTop2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdyyTop+").AsDouble());
89                             b.forces.columnMRdxxBottom2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdxxBottom+").AsDouble());
90                             b.forces.columnMRdyyBottom2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdyyBottom+").AsDouble());
91                             b.forces.columnMRdxxTop1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdxxTop-").AsDouble());
92                             b.forces.columnMRdyyTop1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdyyTop-").AsDouble());
93                             b.forces.columnMRdxxBottom1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdxxBottom-").AsDouble());
94                             b.forces.columnMRdyyBottom1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdyyBottom-").AsDouble());
95                         }
96                         lst.Add(b);
```

```
                }
            }
            tr.Commit();
        }
        return lst;
    }
```

Figura 19 – Exemplo do código que efetua o preenchimento das propriedades na classe Bar Data (Carreira, P., 2021).

3.2.4 Obtenção de Dados do Etabs

Como explicado anteriormente, a validade das verificações a serem feitas é maior quanto melhor for a veracidade dos valores iniciais a serem introduzidos nessas mesmas verificações. Com este programa é pretendido fazer uma ponte de informação entre o *Etabs* (Modelo de calculo) e o *Revit* (Modelação apenas) de forma a termos uma maior confiança no sistema de controlo de dimensionamentos sismoresistentes.

Para que essa ligação entre programa seja possível é necessário que seja feita uma compatibilização entre os diferentes modelos. As coordenadas devem ser transformadas de forma a serem equivalentes. Na janela inicial do programa são dispostas três opções de interação. A primeira que importa as combinações de ações inseridas no *Etabs* para que o estudo da estrutura possa ser feito para diferentes combinações sem grandes trabalhos.

De seguida são dispostos parâmetros de translação nas três direções bem como possíveis rotações. Estes parâmetros representam uma matriz de transformação de uma forma simplificada. Estes indicadores devem ser inseridos manualmente pelo utilizador que deve ter previamente os valores que tornem possível esta compatibilização. Finalmente, o terceiro campo, uma vez selecionado insere automaticamente os valores de calculo obtidos para a combinação de ações escolhidas nos parâmetros de cada elemento no *Revit*. Podendo agora realizar todas as verificações pretendidas com os valores atualizados.

3.3 Tratamento dos Dados

Uma vez recolhidos os dados do *Etabs* e migrados para o *Revit* deixa de existir contacto com qualquer um destes softwares. Todos os resultados obtidos são armazenados na classe Bar Data que será o input para todas as analises realizadas na obtenção de resultados. Os objetos armazenados nesta classe são guardados de maneira a ser possível correr o restante programa.

3.3.1 Apresentação dos Dados

Uma vez feitos os cálculos intermédios, dentro do programa realizado a partir dos valores migrados do *Etabs*, são feitas finalmente as verificações separadamente por tipo de elemento, vigas, pilares e ligações viga-pilar.

Cada verificação apresenta três propriedades: um teste logico, um rácio que cumpre ou não a verificação e uma breve descrição (Figura 3.3). O teste logico define a verificação como verdadeira, caso seja

cumprida e falso no caso contrário. O rácio é calculado de forma diferente para cada verificação, tendo em conta o teor desta. Caso seja verificada em relação a um valor mínimo, o rácio será dado pela razão entre a opção de projeto e a exigência (Eq 3.1); no caso de o limite ser um máximo, o rácio será dado pelo inverso, isto é, a razão entre a exigência e a opção de projeto (Eq.3.2).

Assim, o rácio representa para um resultado positivo, um valor positivo superior a 1, sendo tanto maior quanto a veracidade da verificação. Contrariamente, para um resultado negativo, o rácio toma valores compreendidos entre zero e um, sendo mais próximo de um quanto mais próximo estiver de verificar a condição em causa. A descrição de cada verificação mostra uma definição da clausula do EC8 de onde esta verificação origina.

$$rácio_{limite\ mínimo} = \frac{opção\ de\ projeto}{exigência_{mínima}} \qquad Eq.48$$

$$rácio_{limite\ máximo} = \frac{opção\ de\ projeto}{exigência_{máxima}} \qquad Eq.49$$

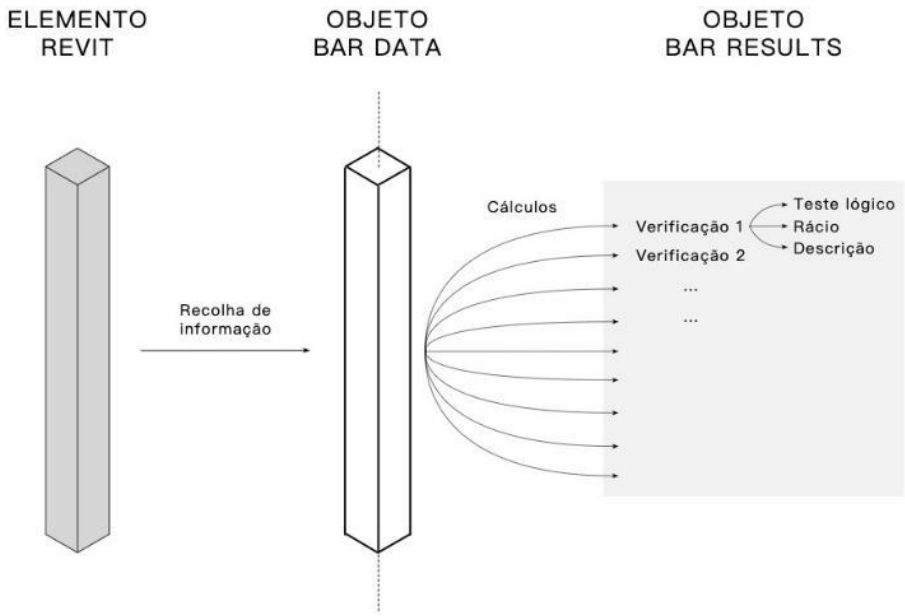


Figura 20 – Processamento e apresentação dos dados nas classes usadas.

```
 1  using System.Collections.Generic;
 2  using System.Linq;
 3  using System;
 4  using Dcm.Common;
 5
 6  namespace Dcm.Common
 7  {
 8      public class BeamResults : BarResults
 9      {
10          public Verification verBExteriorInteriorRebarMaxDiam;
11          public Verification verBRebarTransvSpacingLcr;
12          public Verification verBFirstRebarTransv;
13          public Verification verBRebarTransvSpacing;
14          public Verification verBWidth;
15          public Verification verBRebarRatioTracMin;
16          public Verification verBRebarRatioTracMax;
17          public Verification verBRebarComp;
18          public Verification verMaxVrd;
19          public override void Calculate()

20          {
21              base.Calculate();
22
23              verBExteriorInteriorRebarMaxDiam = VerifyBeamExteriorInteriorRebarMaxDiam();
24              verBRebarTransvSpacingLcr = VerifyBeamRebarTransvSpacingLcr();
25              verBFirstRebarTransv = VerifyBeamFirstRebarTransv();
26              verBRebarTransvSpacing = VerifyBeamRebarTransvSpacing();
27              verBWidth = VerifyBeamWidth();
28              verBRebarRatioTracMin = VerifyBeamRebarRatioTracMin();
29              verBRebarRatioTracMax = VerifyBeamRebarRatioTracMax();
30              verBRebarComp = VerifyBeamRebarComp();
31              verMaxVrd = VerifyMaxVrd();
32          }
33          public BeamResults(BarData bar, MaterialData.Concrete concrete, MaterialData.Steel steel, SeismicProps seismicProps) : base(bar, concrete, steel, ↲
              seismicProps)
34          {
35             // Calculate();
36          }

37          // VERIFICATIONS
38          public Verification VerifyBeamExteriorInteriorRebarMaxDiam()
39          {
40              bool ver;
41              double ratio;
42              var txt = "Longitudinal Rebar Maximum Diameter - EC8 5.6.2.2(2)P";
43
44              ratio =  MaxLongiRebarDiamInterior(Bar, Concrete, Steel, SeismicProp) / Bar.rebar.dbl;
45
46              if (Bar.relPosition=="interior" & Bar.rebar.dbl > MaxLongiRebarDiamInterior(Bar, Concrete, Steel, SeismicProp))
47              {

48                  ver = false;
49                  FailedVerification++;
50              }
51              else if (Bar.relPosition == "exterior" & Bar.rebar.dbl > MaxLongiRebarDiamExterior(Bar, Concrete, Steel))
52              {
53                  ver = false;
54                  FailedVerification++;
55              }
56              else
57              {
58                  ver = true;
59              }
60              return new Verification(ver, ratio, txt);
61          }


62          public Verification VerifyBeamRebarComp()


85          public Verification VerifyBeamRebarRatioTracMax()


105         public Verification VerifyBeamRebarRatioTracMin()


126         public Verification VerifyBeamWidth()


153         public Verification VerifyBeamRebarTransvSpacing()


177         public Verification VerifyBeamFirstRebarTransv()


203         public Verification VerifyBeamRebarTransvSpacingLcr()


240         public Verification VerifyMaxVrd()
```

Figura 21 – Excerto do código referente à classe *Beam Results*.(Carreira, P., 2021)

3.4 CASOS ESPECÍFICOS DE PROGRAMAÇÃO

Com o escrever do programa foram surgindo problemas lógicos para os quais foi necessário procurar soluções mais desenvolvidas no que toca a programação. Estes casos correspondem a situações em que os dados são diretamente ligados aos elementos, sendo preciso tratar a informação de maneira a obter todas as características necessárias para a analise posterior do elemento.

Muitos destes problemas vêm da necessidade de criar um algoritmo sólido que seja capaz de realizar as analises ou verificações para qualquer tipo de situação.

3.4.1 ÁREA DE SECÇÃO TRANSVERSAL

Um dos processos que envolveu um maior grau de complexidade, não só apenas ao nível da programação, mas também ao nível da interação com o *Revit*, foi a obtenção da área transversal dos elementos a analisar. (Figura 23). Uma vez que o não é um dado fornecido pelo *Etabs* é necessário obtê-lo de forma secundária.

A face que representa a secção transversal obtém-se pela comparação das direções de dois vetores, um que é coincidente com o eixo da barraque é normal a cada uma das faces, pelo que se estes dois vetores forem paralelos, o que é verificável com o produto externo de dois vetores, a face considerada será normal ao eixo do elemento e consequentemente, representa a secção transversal do mesmo.

O eixo da barra faz parte das propriedades predefinidas do elemento (*Revit*), criando-se um vetor que é colinear com este. Após a obtenção de todas as faces que compõem o elemento, define-se uma coleção de vetores que são normais a cada uma dessas faces. Pela comparação entre cada um destes vetores é possível obter o vetor normal paralelo ao eixo da barra, logo a secção transversal do elemento.

Uma vez obtida a face da secção transversal, fica apenas a faltar calcular a sua área. Este cálculo é feito à base de triângulos, elementos mais simples que são a base de todas as formas. É necessário decompor a secção nos seus triângulos constituintes, processo chamado de triangulação. Cada triangulo é composto por três pontos tridimensionais, a partir dos quais é possível calcular a sua área, somando todas as parcelas obtemos a área a determinar para o respetivo elemento

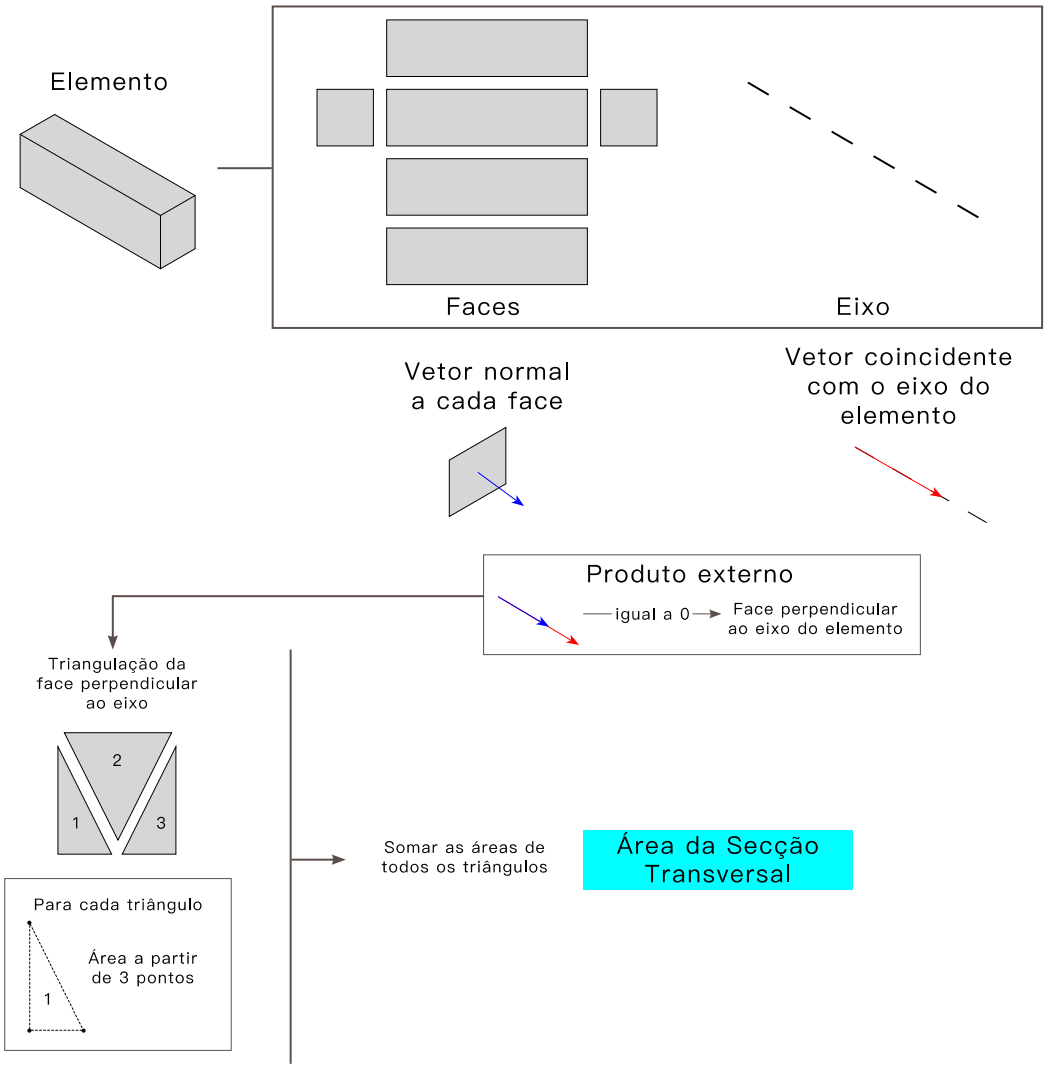


Figura 22 – Processo de obtenção da área da secção transversal de um elemento.

Para estas duas possibilidades existem diferentes formas para avaliar o espaçamento entre a armadura transversal, uma vez que ao obter a armadura inserida no elemento, apenas é obtido o espaçamento da armadura independente.

Assim, no primeiro caso exposto, é claro que os espaçamentos máximos e mínimos correspondem aos valores retirados diretamente, uma vez que as armaduras são independentes. Sendo o valor mínimo o espaçamento da armadura nos extremos e o máximo espaçamento da armadura central.

Para o segundo caso é já preciso um cuidado acrescido. Uma vez que os espaçamentos de cada elemento não levam em conta a sua sobreposição. O espaçamento máximo é o valor do espaçamento da armadura central, sendo este valor retirado diretamente. O espaçamento mínimo é dado por:

$$e_{min} = (e_1 - e_2) + min\{\, e_1 \,;\, e_2 \,\}/2 \qquad \text{Eq.50}$$

Devido a estas duas formas de cumprir os regulamentos é necessário que exista uma divisão dos elementos quando é feito o preenchimento das suas propriedades.

Outra propriedade do elemento que temos disponível é a quantidade de armadura transversal associada a cada um dos diferentes espaçamentos (Figura 3.7). Com estes dados é possível obter o comprimento em que determinado espaçamento é aplicado. Multiplicando esse espaçamento pelo número de varões. Se a soma dos comprimentos de todas as ocorrências de armadura for aproximadamente o comprimento da barra, conclui-se que estamos perante o primeiro caso, onde os espaçamentos são independentes. Caso contrário, se a soma for superior ao comprimento da barra, dando alguma tolerância para a distinção dos casos, há sobreposição da armadura transversal, sendo assim inserida no segundo caso.

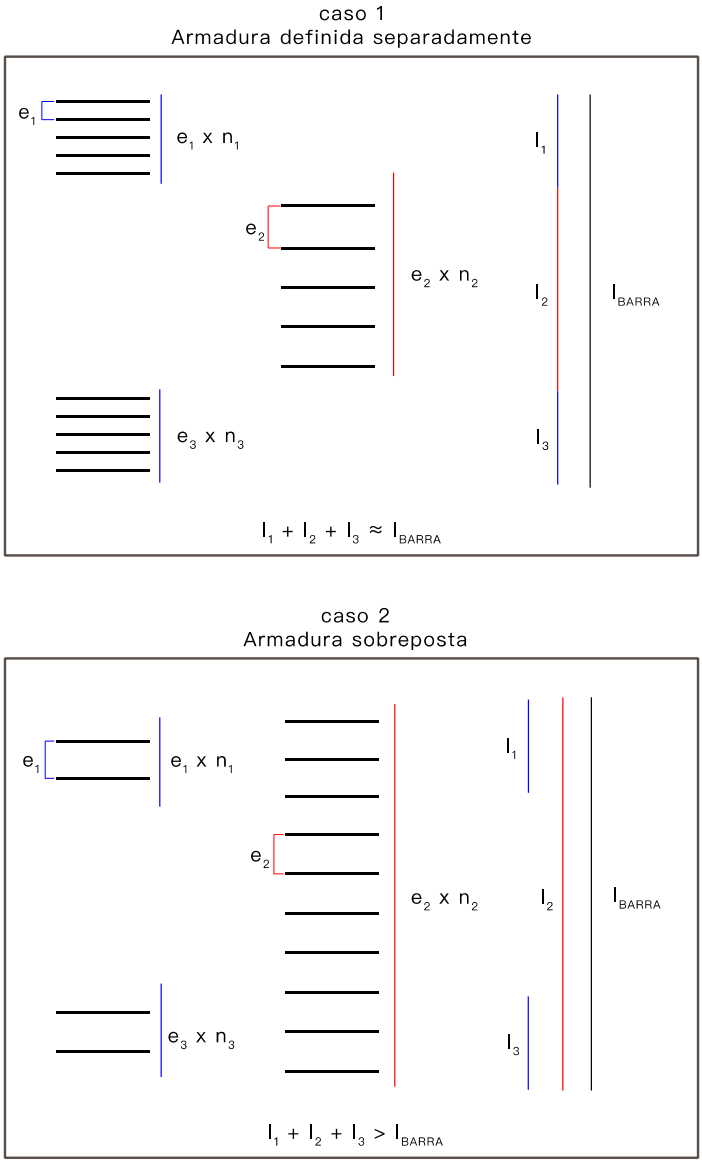


Figura 23 – Distinção entre os dois casos de armadura transversal.

3.5 CONCLUSÃO

Para se alcançar o objetivo esperado foram necessárias várias sessões de aprendizagem, melhoramento e otimização, muito pela falta de conhecimentos na área. Assim como foi exposto no subcapítulo anterior, existiram outras dificuldades para as quais foi necessário elaborar funções que tornassem possíveis as capacidades de verificar a estrutura. A parte mais complexa foi a interação com o *Revit* e o *Etabs* para a obtenção de informações necessárias. As verificações em si não têm grande complexidade sendo mais dependentes da veracidade dos valores assumidos.

No capítulo que se segue é descrito pormenorizadamente o caso de estudo escolhido, no qual foram feitas todas as verificações descritas no capítulo 2.

4

4 CASO DE ESTUDO

4.1 INFORMAÇÃO ESTRUTURAL

4.1.1 GEOMETRIA

Trata-se de um edifício, regular em planta e altura, de dois pisos mais cobertura. Os pés-direitos são de três metros em todos os pisos. É totalmente simétrico em relação aos seus eixos ortogonais. Está representado em modelo 3D (Figura 4.), nas plantas (Figura 4.2 a Figura 4.5) e nos cortes (Figura 4.6 e 4.7) modelado em *Revit.*

Neste modelo existem três tipos de pilares, um pilar central com dimensões de 50cm vs 50cm, pilares de bordo com 40cm vs 50cm e por fim os pilares de canto com 40cm vs 40cm.

As vigas são todas do tipo 30cm vs 40cm. As lajes são do tipo maciça e tem espessura de 20cm. Para todos os elementos, simplificadamente, foi considerado um recobrimento de 35 milímetros.

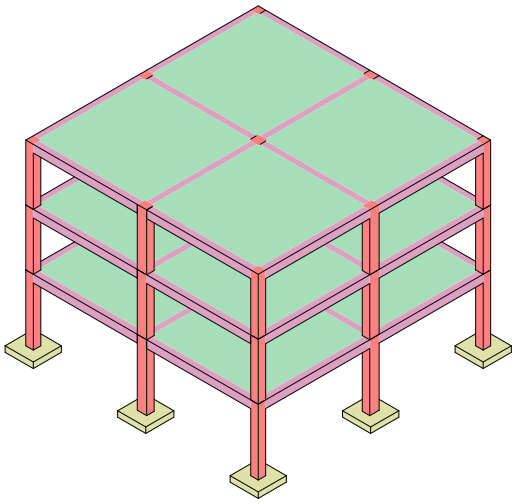


Figura.24 – Modelo 3D em REVIT da estrutura em estudo (Carreira, P., 2021)

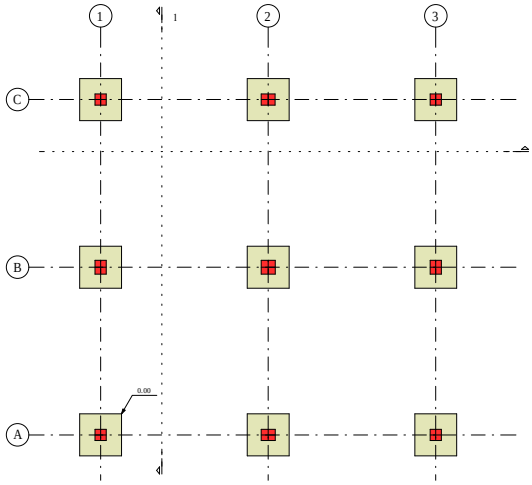


Figura 25 – Plantas à cota das Fundações.(Carreira, P., 2021)

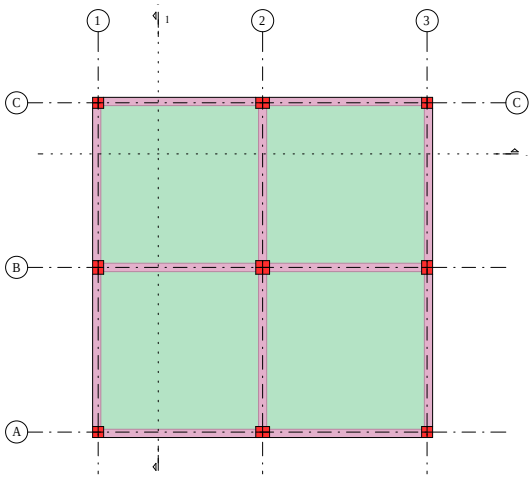


Figura 26 – Plantas à cota do Piso 1.(Carreira, P., 2021)

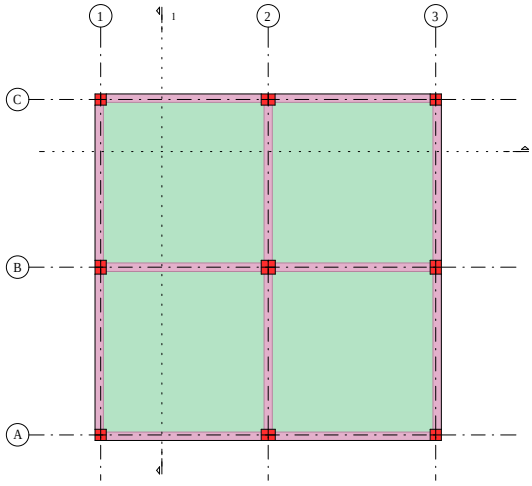


Figura 27 – Plantas à cota do Piso 2.(Carreira, P., 2021)

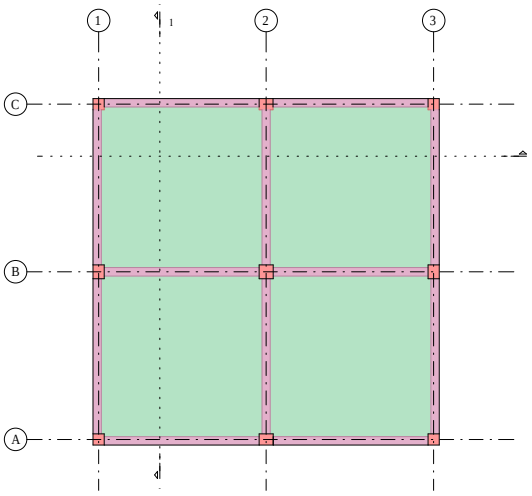


Figura 28 – Plantas à cota da Cobertura.(Carreira, P., 2021)

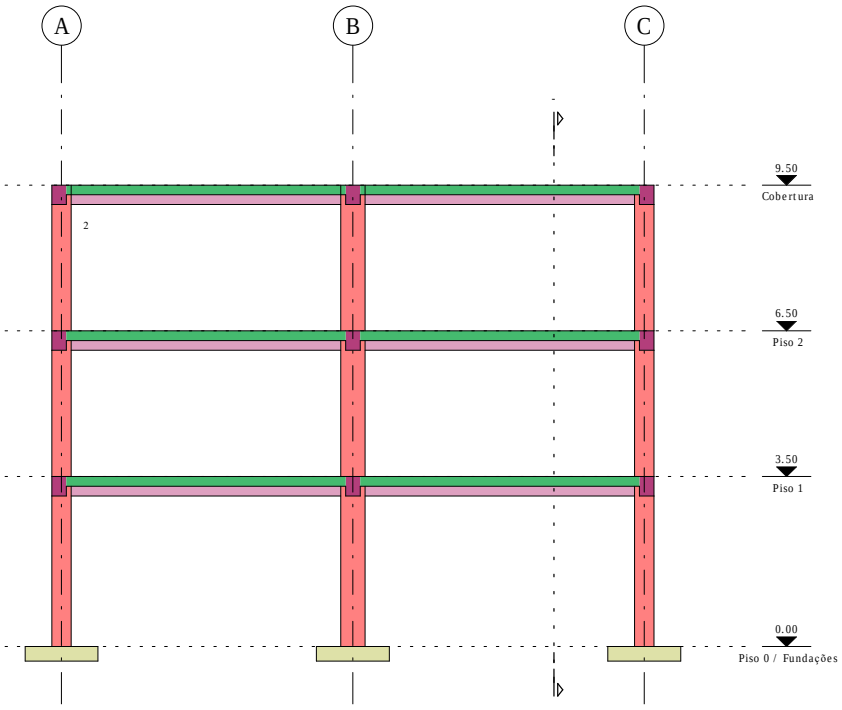


Figura 29 – Corte 1-1(Carreira, P., 2021).

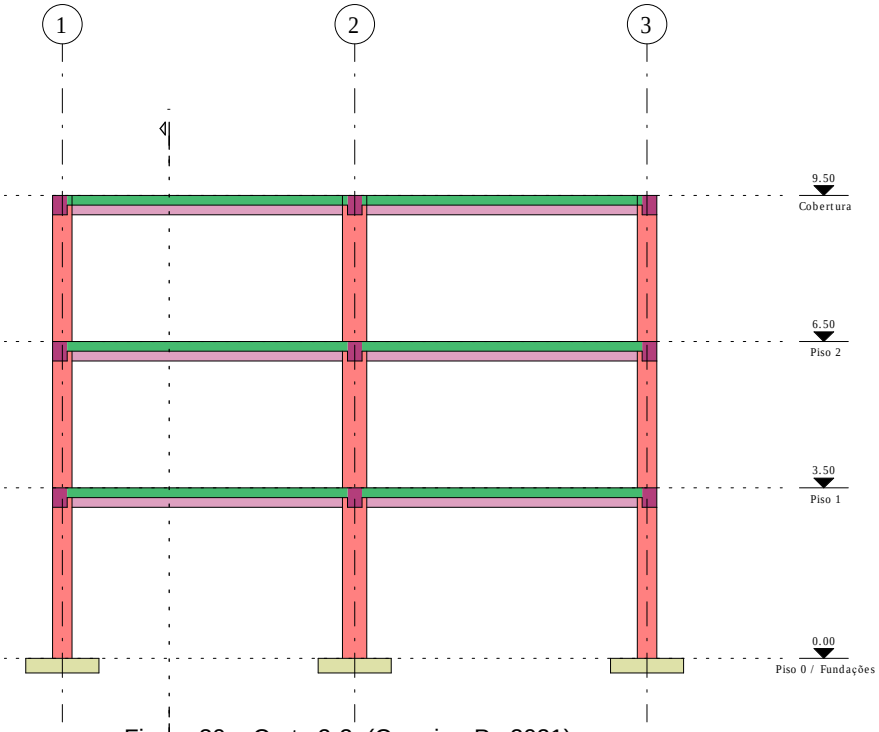


Figura 30 – Corte 2-2. (Carreira, P., 2021)

4.2 AÇÕES

As ações atuantes na estrutura foram tidas em conta segundo o Euro código 0, Eurocódigo 2 e o Eurocódigo 8.

4.3 CARGAS

Para a modelação do caso de estudo foi considerado que existem duas mais ações para alem do peso próprio da estrutura, as restantes cargas permanentes (RCP) e a sobrecarga (Qk) apresentadas no Quadro 15.

Quadro 15 – Ações consideradas na estrutura.(Carreira, P., 2021)

	Piso 1 e Piso 2	Cobertura
RCP [kN/m^2]	2,00	2,00
Q_k [kN/m^2]	2,00	1,00
φ_0	0,70	0,00
φ_1	0,50	0,00
φ_2	0,30	0,00

4.3.1 AÇÃO SÍSMICA

Considerou-se que a estrutura em causa se encontra edificada em Lisboa, num terreno do tipo B e que o coeficiente de comportamento escolhido foi de 3,0. Foram obtidos dois espectros de resposta (Figura 4.8) para a ação sísmica correspondente, como pode ser observado no quadro que se segue.

Quadro 16 Dados para a definição dos espetros.

	Tipo 1	Tipo 2
$S_{MÁX}$	1,35	
a_{gr} [m/s^2]	1,50	1,70
S	1,29	1,27
T_B [s]	0,10	0,10
T_C [s]	0,60	0,25
T_D [s]	2,00	2,00

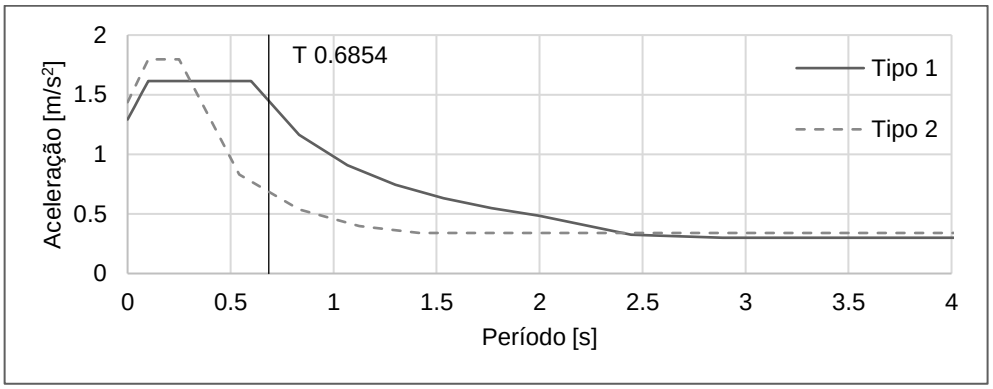


Figura 31 – Espetros de resposta sísmica com representação do período *T*, do primeiro modo de vibração.(Carreira, P., 2021)

4.4 MATERIAIS

O betão utilizado foi da classe c30/37 e o aço da classe A400.

4.5 ANÁLISE ESTRUTURAL

Foi feita uma análise modal para a simulação de efeitos sísmicos e assim convenientemente dimensionar as armaduras. A ação sísmica foi modelada no software SAP2000 para obtenção dos esforços internos na estrutura.

4.5.1 ANÁLISE MODAL

Para se poder prever convenientemente o comportamento dinâmico da estrutura foram realizadas análises modal e sísmica. Estas análises foram validadas pela mesma repetição da mesma agora no software Robot.

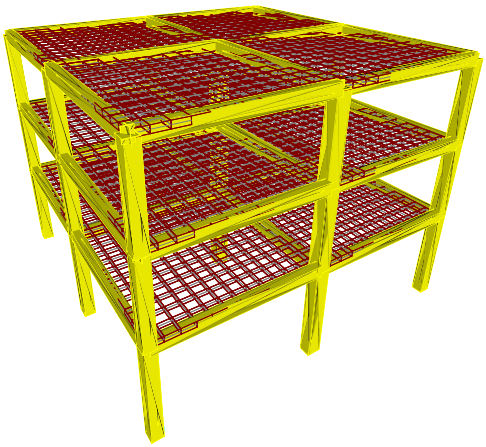


Figura 32 – Modelo 3D em SAP2000 da estrutura em estudo.(Carreira, P., 2021)

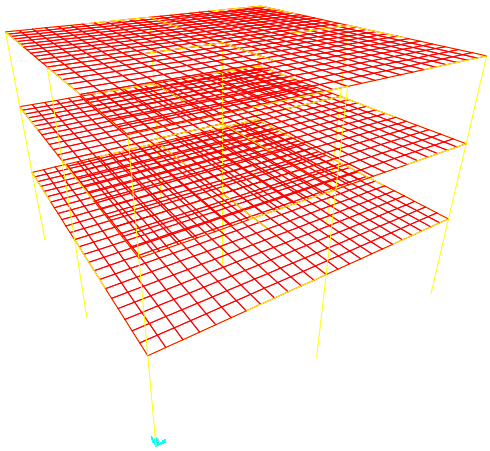


Figura 33 – Modelo 3D analítico em SAP2000 da estrutura em estudo.(Carreira, P., 2021)

Quadro.17 – Características dos modos de vibração.

Modo	Período [s]	UX	UY	RZ
1	0,6854	0,6825	0,2038	0,0000
2	0,6854	0,2038	0,6825	0,0000
3	0,5366	0,0000	0,0000	0,8855
4	0,2066	0,0701	0,0256	0,0000
5	0,2066	0,0256	0,0701	0,0000
6	0,1627	0,0000	0,0000	0,0961

No anexo A1, é exposta uma tabela onde se verifica a veracidade dos resultados da utilização de uma análise modal por espectro de resposta. Uma vez que todos os modos com massas superiores a cinco porcento e a soma das massas modais efectivas dos modos utilizados superam noventa por cento da massa total.

É verificado que os dois primeiros modos de vibração são apenas e só translacionais e simétricos. O terceiro modo é um modo de torção, uma vez que só existe componente de rotação. Os três primeiros modos de vibração encontram-se representados nas figuras 35 e 43.

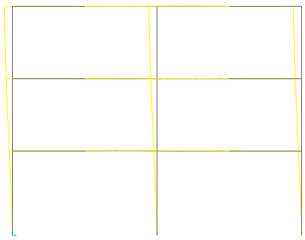


Figura 34 – Representação do primeiro modo de vibração em xz.

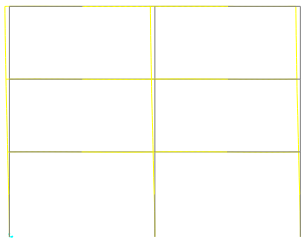


Figura 35 – Representação do primeiro modo de vibração em yz.

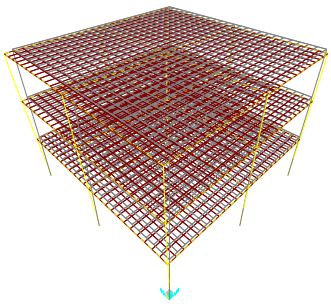


Figura 36 – Representação do primeiro modo de vibração em 3d.

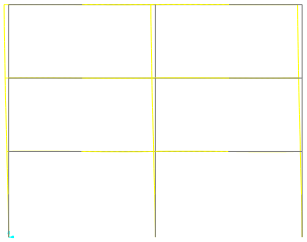


Figura 37 – Representação do segundo modo de vibração em xz.

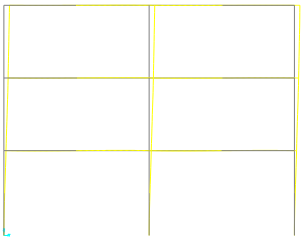


Figura.38 – Representação do segundo modo de vibração em yz.

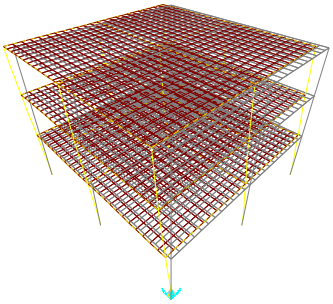


Figura.39 – Representação do segundo modo de vibração em 3d.

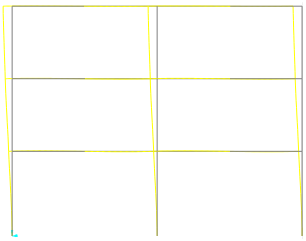


Figura.40 – Representação do terceiro modo de vibração em *xz*.

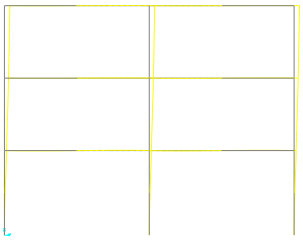


Figura 41 – Representação do terceiro modo de vibração em yz.

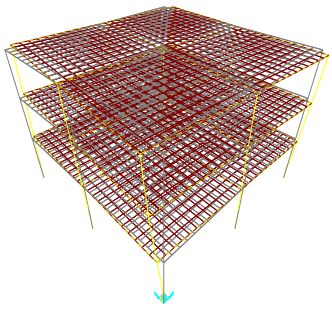


Figura.42 – Representação do terceiro modo de vibração em 3d.

4.6 COMBINAÇÕES DA AÇÃO SÍSMICA

Como foi já explicado no capítulo dois, para uma verdadeira análise de resposta de uma estrutura aquando de um sismo é muito importante que as combinações sejam correspondentes com as ações atuantes na estrutura. Neste caso, peso próprio, cargas permanentes e de sobrecarga.

4.6.1 COEFICIENTE DE COMBINAÇÃO $\psi_{E,I}$

Para o calculo da massa, que contribui verdadeiramente para a inercia da estrutura, normalmente chamada de fonte de massa, é necessário considerar o coeficiente de combinação $\psi_{E,i}$, Pela equação 2.4 este toma o valor de 0,24 para os pisos um e dois (sendo que o valor de φ é correspondente ao de pisos com ocupações correlacionadas ou seja 0,8)

Então, a fonte de massa considera-se o resultado da atuação do peso próprio, restantes cargas permanentes e sobrecargas multiplicadas pelo fator de 0,24.

4.6.2 COMBINAÇÕES DAS RESTANTES AÇÕES COM A AÇÃO SÍSMICA

Segundo o Eurocódigo 8 é proposto que a estrutura seja analisada tendo em conta a possibilidade de ocorrência de um sismo segundo as duas direções horizontais ortogonais, X e Y. Os dois casos são combinados de acordo com as equações 2.7 e 2.8. Esta análise é feita com a combinação de ações quase-permanentes.

Assim, porque temos duas direções obtemos as seguintes quatro expressões para as combinações:

- CQP + Sismo X (tipo 1) + 30% Sismo Y (tipo 1);
- CQP + Sismo Y (tipo 1) + 30% Sismo X (tipo 1);
- CQP + Sismo X (tipo 2) + 30% Sismo Y (tipo 2);
- CQP + Sismo Y (tipo 2) + 30% Sismo X (tipo 2).

4.6.3 OUTRAS ANÁLISES

Uma vez terminada a modelação da estrutura em Sap foram feitas outras análises para verificar os critérios necessários para o cumprimento das verificações para dimensionamentos sismo-resistentes.

4.7 VERIFICAÇÃO DE UMA CORRETA FORMULAÇÃO DA ESTRUTURA

De maneira a termos segurança na formulação da modelação da estrutura são realizadas verificações das ações na base da estrutura. Tendo em consideração que a geometria será a anteriormente referida e que o peso volúmico do betão é de 25 kN/m^3 resultam então os quadros 4.5 a 4.11 com os respetivos resultados.

Quadro 18 – Altura dos pisos

	h [m]
Piso 1	3,5
Piso 2	3
Cobertura	3

Quadro 19 – Cálculo das lajes. (Carreira, P., 2021)

Laje	
Quantidade	4
b [m]	6
l [m]	6
e [m]	0,2
A_{LAJE} [m^2]	36
A_{TOTAL} [m^2]	144
V [m^3]	28,8

Quadro 20 – Cálculo dos pilares(Carreira, P., 2021).

Pilares		P1	P2	P3
Quant./piso		4	4	1
b [m]		0,40	0,40	0,50
h [m]		0,40	0,50	0,50
A [m^2]		0,16	0,20	0,25
I_X [m^4]		0,002133	0,004167	0,005208
I_Y [m^4]		0,002133	0,002667	0,005208
	Piso 1	2,24	2,80	0,88
V [m^3]	Piso 2	1,92	2,40	0,75
	Cobert.	1,92	2,40	0,75

Quadro 21 - Cálculo das vigas(Carreira, P., 2021)

Vigas	Piso 1	Piso 2	Cobertura
Quant.	12	12	12
b [m]		0,30	
h [m]		0,40	
A [m^2]		0,12	
l [m]		6	
V_{TOTAL} [m^3]	8,64	8,64	8,64

Quadro 22 – Cálculo dos elementos associados ao peso próprio.(Carreira, P., 2021)

Peso Próprio [kN]	Laje	P1	P2	P3	Vigas	Total/piso
Piso 1	720	70	56	22	216	1084
Piso 2	720	60	48	19	216	1063
Cobertura	720	60	48	19	216	1063
Total/elemento	2160	190	152	59	648	3209

Quadro 23 – Cálculos associados à Combinação Quase-Permanente.(Carreira, P., 2021)

	Piso 1	Piso 2	Cobertura	Total
RCP [kN/m^2]	2,0	2,0	2,0	
RCP [kN]	288,0	288,0	288,0	864,0
Q_k [kN/m^2]	2,0	2,0	1,0	
$\boldsymbol{\varphi}_2$	0,3	0,3	0,0	
Q_k [kN]	86,4	86,4	0,0	172,8
			CQP	4246,2

Quadro 24 Comparação dos resultados obtidos com o software SAP2000 para o peso próprio e CQP.(Carreira, P., 2021)

Caso de Carga	$F_{Z\ GLOBAL}$ Modelo [kN]	$F_{Z\ GLOBAL}$ Cálculos [kN]	Erro
Peso Próprio	3208,4	3209,4	0,03%
CQP	4245,2	4246,2	0,02%

ANÁLISE DO TIPO DE ESTRUTURA

Tendo em conta apenas a geometria estamos perante uma estrutura porticada, ou seja, composta por pórticos. Apesar disso e devido à componente torsional presente no terceiro modo de vibração é necessário fazer uma análise para verificar que não estamos perante uma estrutura torsionalmente flexível. Para que se possa manter a suposição inicial, se essa verificação não for cumprida teríamos de aplicar regras respetivas a esse tipo de estrutura. Por exemplo, alterando o coeficiente de comportamento, que é considerado para uma estrutura regular em planta e altura, isto é, vãos iguais em ambas as direções. Dimensões de pilares e vigas distribuídos de forma que seja obtida simetria nas direções ortogonais. Devido a esta simetria não é necessário considerar excentricidades na análise da estrutura.

No entanto para a analise foi necessário obter dados mais específicos da estrutura de maneira a ficar satisfeita a condição imposta pela Eq. 2.11.

Por simplificação, foi aplicada, no centro de rigidez da cobertura, duas forças e um momento com intensidades elevadas em casos de carga separados (Quadro 4.11). Assim são obtidos os respetivos deslocamentos e valores significativos. Uma vez que os efeitos destas forças são propagados pela estrutura é possível fazer-se uma análise piso a piso com este método.

Quadro 25 – Forças consideradas na análise do tipo de estrutura.

Designação		Intensidade
Força na direção x	F_X	10^6 kN
Força na direção y	F_Y	10^6 kN
Momento em torno de z	M_Z	10^6 kN.m

A partir dos deslocamentos relativos entre pisos é possível concluir a rigidez nessa mesma direção, sendo que os deslocamentos em x, no caso da força Fx, representam a rigidez na direção Kx. De igual forma na direção y. E por fim, as rotações segundo z, no caso do momento Mz, representam a rigidez à torção, $K_{Torção}$.

Considerando tudo isto, foram obtidos os resultados apresentados no Quadro 4.12. Para a obtenção da rigidez em cada caso foi utilizada uma normalização (Eq. 4.1 a 4.3), para ter em conta a dimensão das forças empregues no início da análise. Foi calculado um fator r, em cada uma das direções, x e y (Quadro 4.14), como ilustrado na Equação 2.12.

$$K_X = \frac{10^6}{(d_{x_i} - d_{x_{i-1}})} \qquad \text{Eq.51}$$

$$K_Y = \frac{10^6}{\left(d_{y_i} - d_{y_{i-1}}\right)} \qquad \text{Eq.52}$$

$$K_{Torção} = \frac{10^6}{(r_{z_i} - r_{z_{i-1}})} \qquad \text{Eq. 53}$$

Em que:

d_{x_i} é o deslocamento na direção x no piso i;
r_{z_i} é a rotação em torno de z no piso i.

Quadro 26 Deslocamentos e rotações obtidos na análise do tipo de estrutura.(Carreira, P., 2021)

		UX [cm]	UY [cm]	RZ [Rad]
F_X	Cobertura	5757,60	0,00	0,00
	Piso 2	3852,20	0,00	0,00
	Piso 1	1723,20	0,00	0,00
F_Y	Cobertura	0,00	5757,60	0,00
	Piso 2	0,00	3852,20	0,00
	Piso 1	0,00	1723,20	0,00
M_Z	Cobertura	0,00	0,00	1,26
	Piso 2	0,00	0,00	0,85
	Piso 1	0,00	0,00	0,38

Quadro 27 – Cálculo da rigidez nas direções requeridas.(Carreira, P., 2021)

	K_X [kN/m]	K_Y [kN/m]	$K_{Torção}$ [kN.m/m]
Cobertura	52482,42	52482,42	2415458,94
Piso 2	46970,41	46970,41	2141327,62
Piso 1	58031,57	58031,57	2638522,43

Quadro 28 - Resultados do fator r.(Carreira, P., 2021)

r_X	r_Y
6,78	6,78
6,75	6,75
6,74	6,74

O cálculo do momento polar de inercia de massa foi feito como explicado no ponto 2.4.8 utilizando os dados apresentados no Quadro 4.15. Verifica-se também que o centro de rigidez, , é coincidente com o centro de massa da estrutura, o que apoia a suposição inicial de que a estrutura é regular e simétrica em planta e altura.

Uma vez que em todos os casos é verificada a regra imposta pela Eq. 2.11, pode ser concluído que a estrutura não é definitivamente do tipo torsionalmente flexível, sendo verificada a suposição inicial de que estamos perante uma estrutura do tipo porticada.

Cumprindo o Quadro 2.8 é adotado um valor para o factor, estabelecendo um máximo de 3,9 para o coeficiente de comportamento. Com esta análise foi possível validar o valor de três virgula zero, escolhido para o coeficiente de comportamento. Confirmada mais ainda por se tratar duma estrutura porticada e o terceiro modo de vibração é de torção pura.

Quadro 29 Cálculo do fator I_s.(Carreira, P., 2021)

	Piso 1	Piso 2	Cobertura
b [m]	12,0	12,0	12,0
h [m]	12,0	12,0	12,0
A [m^2]	144,0	144,0	144,0
x_G (x,y,z) [m]	(6,00; 6,00; 3,26)	(6,00; 6,00; 6,32)	(6,00; 6,00; 9,32)
x_{CR} (x,y,z) [m]	(6,00; 6,00; 3,26)	(6,00; 6,00; 6,32)	(6,00; 6,00; 9,32)
I_P Área [m^4]	3456,0	3456,0	3456,0
Massa [kg]	253309,4	249082,1	242033,8
$I_{P\ Massa}$ [kg.m^2]	6079424,9	5977969,4	5808810,7
I_S	4,90	4,90	4,90

4.8 DIMENSIONAMENTO DE ARMADURAS

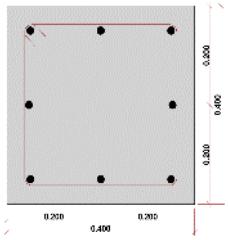
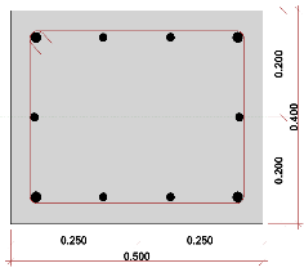
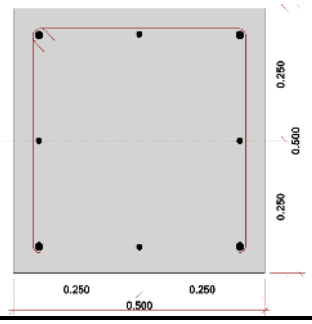
Na empresa A400 foi desenvolvido um programa pelo departamento de investigação e desenvolvimento, chamado Flexdesv, que permite o cálculo da resistência de elementos à flexão desviada cumprindo as regras do Eurocodigo 2 e 8. Este programa é usado para o dimensionamento de armaduras, sejam longitudinais ou transversais, a partir de várias iterações de diferentes soluções até que seja obtida a que seja mais adequada para as ações modeladas em SAP.

A partir desse programa FlexDesv, e a partir dos esforços obtidos previamente é possível calcular então as armaduras para vigas e pilares da estrutura. Nos anexos A3 e A4 seguem alguns exemplos de resultados obtidos. De seguida, as armaduras calculadas foram implementadas no modelo de Revit.

4.8.1 ARMADURAS DE PILARES

Para os pilares a armadura foi dimensionada de forma idêntica para todos os pisos, variando ligeiramente tendo em conta a respetiva secção. Apresentado no Quadro 30.

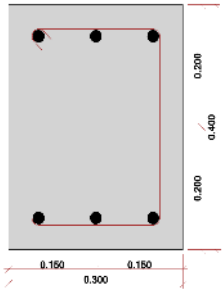
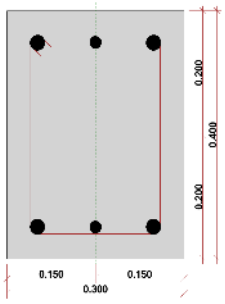
Quadro 30 – Armadura dimensionada para os pilares. (Carreira, P., 2021)

		Armadura Longitudinal (A_s [cm^2])	Estribos Transversais (A_{sw}/s [cm^2/m])
Pilar de canto (0,40 x 0,40 m^2)		8 ø16 (16,08)	ø8 // 0,20 (5,03)
Pilar de fachada (0,40 x 0,50 m^2)		4 ø20 + 6 ø16 (24,63)	ø 8 // 0.20 (5,03)
Pilar central (0,50 x 0,50 m^2)		4 ø16 + 4 ø12 (12,57)	ø 8 // 0.20 (5,03)

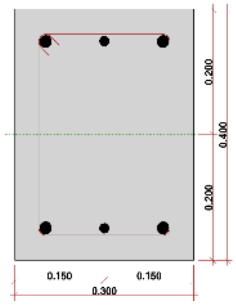
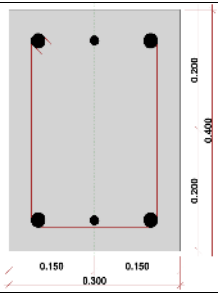
4.8.2 ARMADURAS DE VIGAS

As Vigas, apesar de terem todas a mesma secção, terão variações de esforços uma vez que a estas se encontram mais ou menos carregadas dependendo do piso e da sua localização, interior ou de fachada. Foi assim necessário agrupá-las assim mesmo, por pisos e por localização.

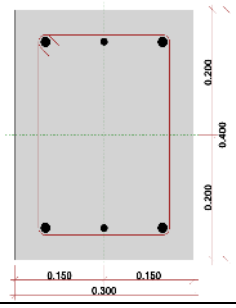
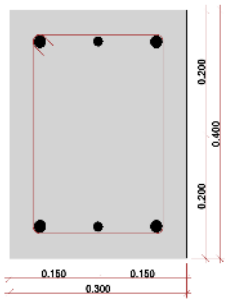
Quadro 31 – Armadura dimensionada para as vigas do piso 1.(Carreira, P., 2021)

		Armadura Longitudinal (A_s [cm^2])	Estribos Transversais (A_{sw}/s [cm^2/m])
Viga de fachada (0,30 x 0,40 m^2)		6 ø20 (18,85)	ø8 // 0,20 (5,03)
Viga interior (0,30 x 0,40 m^2)		4 ø25 + 2 ø20 (25,92)	ø 8 // 0.20 (5,03)

Quadro 32– Armadura dimensionada para as vigas do piso 2.(Carreira, P., 2021)

		Armadura Longitudinal (A_s [cm^2])	Estribos Transversais (A_{sw}/s [cm^2/m])
Viga de fachada (0,30 x 0,40 m^2)		4 ø20 + 2 ø16 (16,59)	ø8 // 0,20 (5,03)
Viga interior (0,30 x 0,40 m^2)		4 ø25 + 2 ø16 (23,66)	ø 8 // 0.20 (5,03)

Quadro 33 – Armadura dimensionada para as vigas da cobertura.(Carreira, P., 2021)

		Armadura Longitudinal (A_s [cm^2])	Estribos Transversais (A_{sw}/s [cm^2/m])
Viga de fachada (0,30 x 0,40 m^2)		4 ø16 + 2 ø12 (10,30)	ø8 // 0,20 (5,03)
Viga interior (0,30 x 0,40 m^2)		4 ø20 + 2 ø16 (16,59)	ø 8 // 0.20 (5,03)

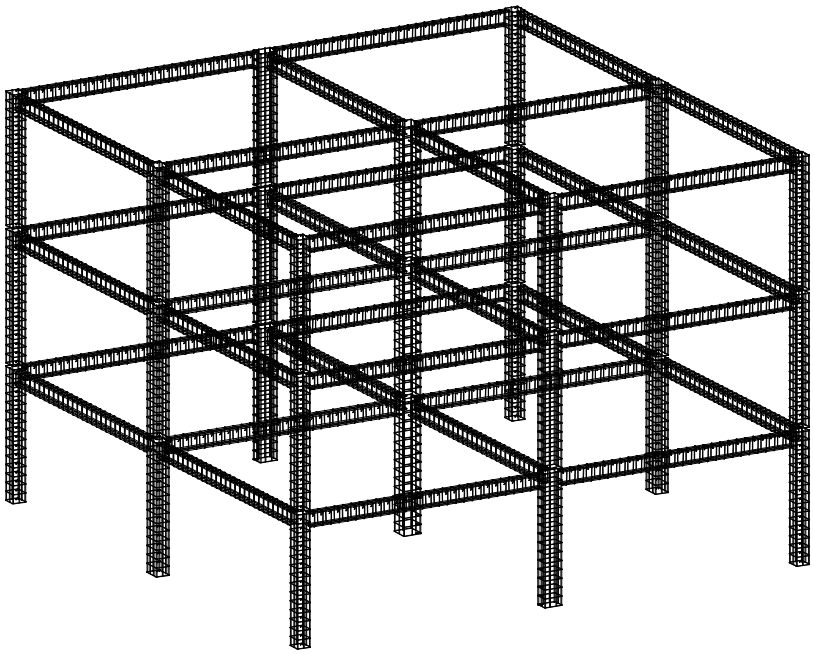


Figura 43 – Representação das armaduras colocadas no modelo REVIT.

4.9 CONCLUSÃO

A estrutura sujeita ao caso de estudo fica comprovada como regular em planta e em altura. Isto facilita bastante a analise sísmica. Pode ser também concluído com segurança que estamos perante uma estrutura porticada uma vez que foi demonstrado não ser torsionalmente flexível. Apesar de não ser muito complexa, esta estrutura é valida para validar verificações descritas no algoritmo no capítulo antecessor. No capítulo que se segue a análise é apresentada com mais detalhe.

5

5 APLICAÇÃO DO PROGRAMA

5.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do programa, exposto no capítulo número três, procurou sempre aplicar as regras referidas no capítulo número dois (resumido nos Quadros 22 a 31). Neste capítulo é referida a aplicação dessas regras no caso de estudo apresentado.

A estrutura foi modelada em Revit, modelo este onde foram inseridas as armaduras calculadas tendo conta os dados apresentados no capítulo anterior.

A estrutura foi modelada em Revit, modelo este onde foram inseridas as armaduras calculadas tendo conta os dados apresentados no capítulo anterior.

5.2 INICIALIZAÇÃO

O programa resume-se a um *addin* inserido no *Revit*, surge na barra superior uma aba chamada "A400 – Apps" e tem o nome, "*DCM Verification*". Como exposto anteriormente, existem duas fases que devem executadas na ordem correcta. Primeiramente a actualização de parâmetros provenientes do *Etabs* e seguidamente a verificação ou não da legislação em vigor no que toca ao dimensionamento sísmico.

5.3 PRÉ-SELEÇÕES

Antes de mais é necessário compatibilizar os modelos entre softwares, por transformação de coordenadas, translações e rotações, inseridas manualmente na primeira janela de opções do programa. De seguida é necessário importar as possíveis combinações de ações, são migradas todas as que entraram nos cálculos do *Etabs*. Uma vez seleccionada a combinação pretendida e preenchidos os campos de compatibilização de modelos podemos prosseguir com a importação dos esforços calculados no *Etabs* para parâmetros específicos ao elemento correspondente no *Revit*. Terminando assim o trabalho desenvolvido nesta dissertação. No entanto este programa não teria valor se não fosse capaz de verificar as conformidades no que toca ao dimensionamento da estrutura. De seguida é exposto o funcionamento do restante programa.

Antes de se iniciar o processo de contacto entre o programa e o *Revit* é necessário inserir manualmente dados relativos à estrutura, informações que não são dados inseríveis no modelo.

Para a estrutura em causa, localizada em Lisboa e com um solo de fundação do tipo B, e tendo em conta as analises realizadas no capítulo anterior, foram escolhidas as alternativas do Quadro 5.1 em correspondência com os dados fornecidos como detalhado na figura 45.

No que toca à compatibilização de modelos, os softwares foram calibrados e os projectos desenvolvidos de maneira aos elementos terem exactamente a mesmas coordenadas. Assim os valores da matriz de transformação seriam nulos.

Quadro 34 – Pré-seleções no programa.

Dados do projeto			Seleção no programa
Classe do Betão	C30/37	C30/37	*Concrete*
Classe do Aço	A400	A400	*Steel*
Solo	Tipo B	B	*Soil*
Localização	Lisboa	1.3	*Zone Type 1*
		2.3	*Zone Type 2*
Período natural da estrutura	0,6854	0.6854	*Period*
Coeficiente de comportamento	3,0	3.0	*Behaviour factor (q)*

Figura 44 – Janela inicial com as pré-seleções efetuadas.

5.3.1 Seleção de Barras no Modelo

A grande vantagem deste programa está na facilidade em avaliar elementos isoladamente que estão inseridos em estruturas mais ou menos complexas. Foi desenhado para ser necessário apenas seleccionar os elementos pretendidos e correr as verificações para esses elementos apenas.

Antes de mais é necessário confirmar que na vista 3D a opção de modelo analítico está activa. Sem este primeiro passo o programa não irá funcionar visto que emprega informações oriundas do modelo

analítico que é gerado no *Revit*. O modelo analítico, exposto na Figura 46, é uma simplificação da estrutura 3D no seu esqueleto, isto é, linhas médias que definem a geometria do elemento respectivo estando esta geometria associada às características do modelo como um todo.

De seguida são selecionados os elementos a verificar. Carregando no botão "*Get loads from Etabs*" as Combinações de acções são todas importadas para a janela. Uma vez selecionada a combinação pretendida pode-se prosseguir primindo o botão "*Update Loads/Combin to Revit*" os valores dos esforços para cada elemento selecionado são actualizados directamente na parametrização do *Revit*. Por fim, pressionando o botão "*DCM Verification*" são corridas as verificações pretendidas e expostos os resultados numa tabela seguidamente descrita.

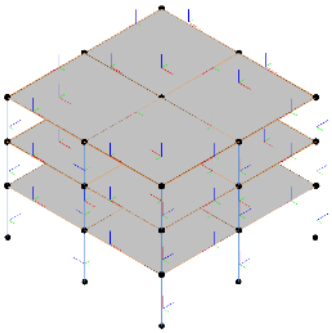


Figura 45 – Modelo analítico da estrutura.(Carreira, P., 2021)

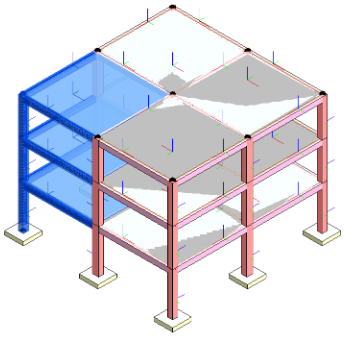


Figura 46 – Seleção de barras com o modelo analítico ativo.(Carreira, P., 2021)

5.4 RESULTADOS

Os resultados são organizados em quatro separadores onde três deles apresentam os resultados por tipo de elemento:

Beams, resultados das verificações para as vigas selecionadas (Figura 48)

Columns, resultados das verificações para os pilares selecionados (Figura 49)

Joints, resultados das verificações para os nós Viga-Pilar selecionados (Figura 50)

Na quarta e ultima aba são expostas todas as informações acerca do programa e especificações acerca das verificações realizadas.

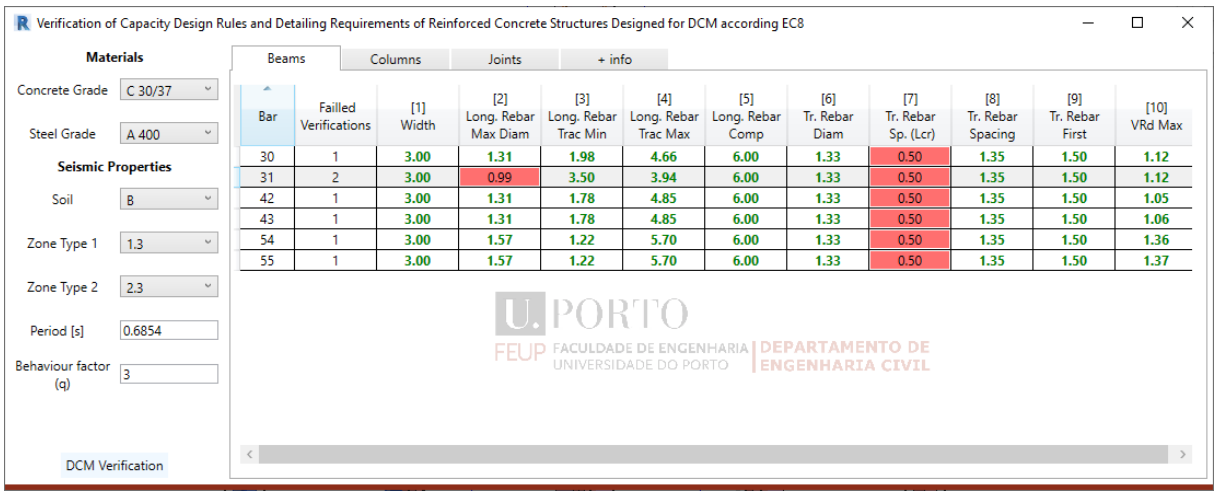
Tanto no separador das vigas como no dos pilares as primeiras duas colunas representam a identificação do elemento selecionado e o numero de verificações que não foram cumpridas. As restantes colunas dizem respeito as verificações associadas a secção correspondente.

5.5 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

A apresentação de resultados foi pensada para tornar fácil a avaliação dos elementos a estudar. Assim, quando as verificações são cumpridas o valor é apresentado a verde e no caso da verificação não ser cumprida é exposto com um fundo vermelho. Assim é facilitada a avaliação mais geral da estrutura.

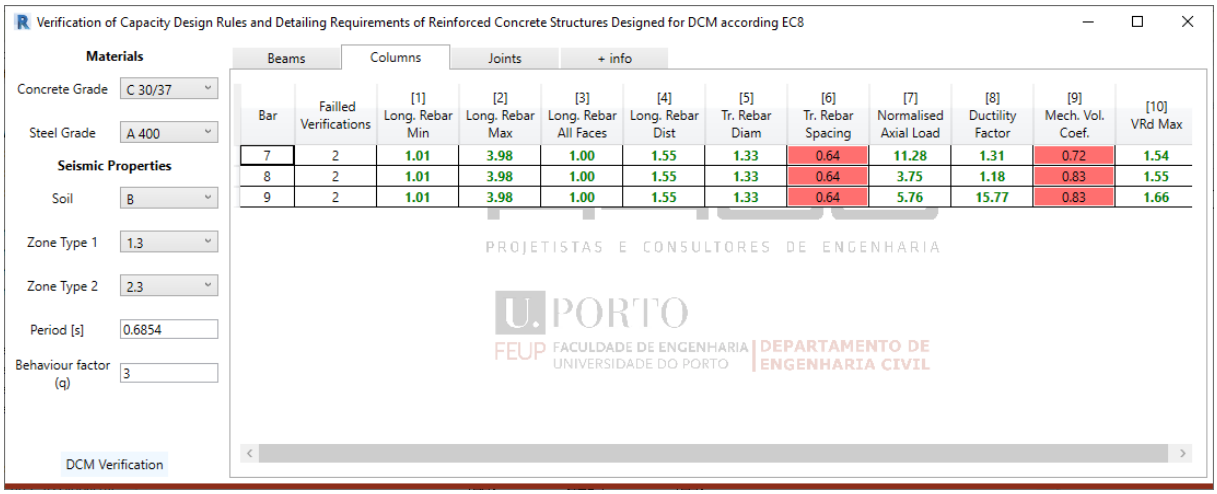
Cada coluna de resultados tem um titulo com uma indicação simplificada da verificação em causa e ao passar o cursor por cima de cada valor de resultado é apresentada uma descrição mais detalhada com a indicação da secção ou equação do eurocodigo 8 segundo qual é efectuada a verificação.

Não pode ficar por ver o caso de não ser selecionado nenhum elemento. Neste caso a lista de resultados apresentar-se-à em branco. O separador das ligações Viga-Pilar surgirão a branco também no caso de serem selecionado pilares e vigas que não se intersectem.



Bar	Failed Verifications	[1] Width	[2] Long. Rebar Max Diam	[3] Long. Rebar Trac Min	[4] Long. Rebar Trac Max	[5] Long. Rebar Comp	[6] Tr. Rebar Diam	[7] Tr. Rebar Sp. (Lcr)	[8] Tr. Rebar Spacing	[9] Tr. Rebar First	[10] VRd Max
30	1	3.00	1.31	1.98	4.66	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.12
31	2	3.00	0.99	3.50	3.94	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.12
42	1	3.00	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.05
43	1	3.00	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.06
54	1	3.00	1.57	1.22	5.70	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.36
55	1	3.00	1.57	1.22	5.70	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.37

Figura 47 – Resultados das verificações nas vigas selecionadas.(Carreira, P., 2021)



Bar	Failed Verifications	[1] Long. Rebar Min	[2] Long. Rebar Max	[3] Long. Rebar All Faces	[4] Long. Rebar Dist	[5] Tr. Rebar Diam	[6] Tr. Rebar Spacing	[7] Normalised Axial Load	[8] Ductility Factor	[9] Mech. Vol. Coef.	[10] VRd Max
7	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	11.28	1.31	0.72	1.54
8	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	3.75	1.18	0.83	1.55
9	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	5.76	15.77	0.83	1.66

Figura 48 – Resultados das verificações nos pilares selecionados.(Carreira, P., 2021)

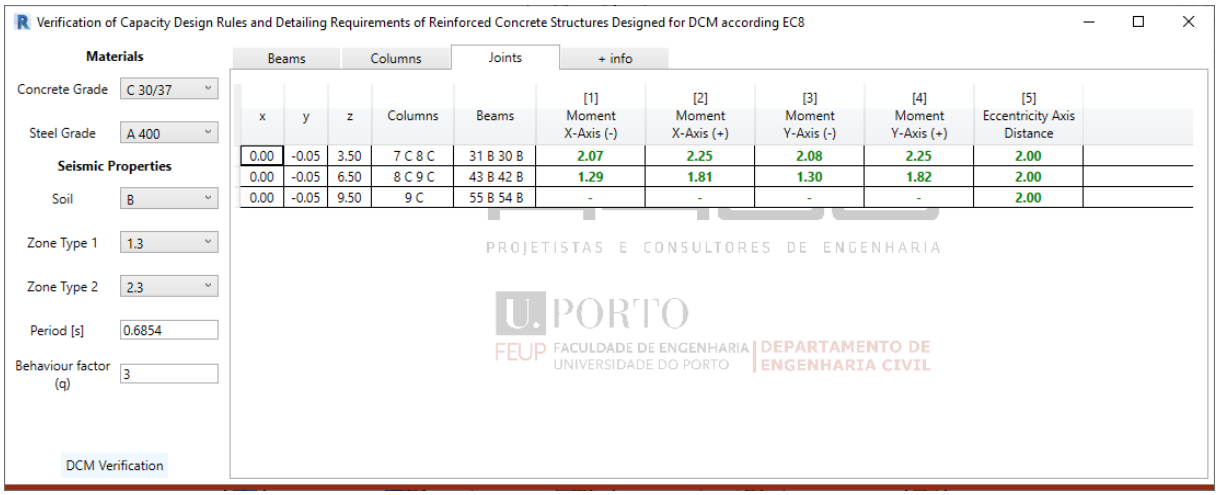


Figura 49 – Resultados das verificações nos nós viga-pilar selecionados.(Carreira, P., 2021)

5.6 DETALHES À CERCA DAS VERIFICAÇÕES EFETUADAS

Como visto anteriormente, na última aba são expostas as características de cada uma das verificações realizadas. Temos um separador com o nome *"+ info"*. Aqui são expostas pormenorizadamente cada verificação, a norma do Eurocodigo 8 e a sua equação em causa. Nos quadros 5.2 e 5.23 é exposta essa mesma informação bem como o método a utilizar no cálculo do factor de segurança associado.

```
using A400.GEO.D2D;
using A400.GEO.D3D;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using static EtabsLib;

namespace DcmVerify.UI
{
    3 references
    public static class EtabsHlp
    {
        1 reference
        public static List<LoadCase> GetCases()
        {
            var list = new List<LoadCase>();

            EtabsLib.Connect();

            var loads = EtabsLib.GetAllCasesIsLoad();

            foreach (var pair in loads)
            {

                list.Add(new LoadCase() { Name = pair.Key, IsLoad = pair.Value });

            }
            return list;
        }


        1 reference
        internal static Dictionary <string,InternalResultsBars> GetBarsForces(string[] bars, string caseName, bool isLoad)
        {
            var barsRes = new Dictionary <string,InternalResultsBars>();
```

```
        var ret = EtabsLib.ApiModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput();
        if (ret != 0)
            throw new Exception("error ");

        if (isLoad)
        {
            ret = EtabsLib.ApiModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput(caseName);
            if (ret != 0)
                throw new Exception("error ");
        }
        else
        {
            ret = EtabsLib.ApiModel.Results.Setup.SetComboSelectedForOutput(caseName);
            if (ret != 0)
                throw new Exception("error ");
        }

        foreach (var bar in bars)
        {
            var r = new InternalResultsBars();

            ret = EtabsLib.ApiModel.Results.FrameForce(bar, CSiAPIv1.eItemTypeElm.ObjectElm, ref r.numberResults,
                ref r.obj, ref r.objSta, ref r.elm, ref r.elmSta,
                ref r.loadCase, ref r.stepType, ref r.stepNum,
                ref r.p, ref r.v2, ref r.v3, ref r.t, ref r.m2, ref r.m3);


            if (ret != 0)
                throw new Exception("error ");

            barsRes.Add(bar,r);
        }

        return barsRes;

    }

    1 reference
    internal static Dictionary <string,Segment3D> GetBarsAxis(string[] bars)
    {
        var dic = new Dictionary <string,Segment3D>();
        foreach (var bar in bars)
        {
            dic.Add(bar,EtabsLib.Bars.GetBarSegment(bar));

        }
        return dic;
    }
}


7 references
public class LoadCase
{
    2 references
    public string Name { get; set; }
    2 references
    public bool IsLoad { get; set; } //load=0 ; comb=1
}

}
```

Figura 50 – Informações respeitantes a cada uma das verificações realizadas.

5.7 VIGAS

São realizadas 10 verificações relacionadas com as vigas. Uma ligada à geometria (Quadro 5.2), quatro com a armadura longitudinal (Quadros 5.3 a 5.6), quatro com a armadura transversal (Quadros 5.7 a 5.10) e uma final ligada ao *Capacity Design* (Quadro 5.11).

Quadro 35 Informações acerca da verificação da largura máxima para vigas.

Verificação	[1] *Width*
Descrição	De forma a tirar partido do efeito favorável da compressão na armadura do pilar é necessário limitar a largura das vigas.
Norma	EC8 5.4.1.2.1(3)P
Rácio	$\frac{d_{bL_{max}}}{d_{bL}}$

Quadro 36 – Informações acerca da verificação do diâmetro máximo da armadura longitudinal para vigas.

Verificação	[2] *Longitudinal Rebar Maximum Diameter*
Descrição	Verificação do diâmetro máximo dos varões longitudinais. Para impedir uma rotura de aderência, o diâmetro dos varões longitudinais das vigas que atravessam os nós viga-pilar, d_{bL}, deve ser limitado. O valor máximo depende da posição relativa da viga em relação à estrutura, isto é, se se trata de uma viga exterior ou interior.
Norma	EC8 5.6.2.2(2)P
Rácio	$\frac{d_{bL_{max}}}{d_{bL}}$

Quadro 37 – Informações acerca da verificação da taxa mínima de armadura longitudinal de tração para vigas.

Verificação	[3] *Longitudinal Traction Rebar Minimum*
Descrição	Verificação do valor mínimo da percentagem de armadura de tração. Para as vigas, dado que se considera armadura simétrica, trabalhará à tração a armadura mais próxima da face. Ao longo de todo o comprimento de uma viga sísmica primária, a taxa de armadura da zona tracionada, ρ, não deve ser inferior ao seguinte valor mínimo ρ_{min}.
Norma	EC8 5.4.3.1.2(5)P Eq. 5.12
Rácio	$\frac{\rho}{\rho_{min}}$

Quadro 38 – Informações acerca da verificação da taxa máxima de armadura longitudinal de tração para vigas.

Verificação	[4] *Longitudinal Traction Rebar Maximum*
Descrição	Verificação do valor mínimo da percentagem de armadura de tração. Para as vigas, dado que se considera armadura simétrica, trabalhará à tração a armadura mais próxima da face. A taxa de armadura na zona tracionada ρ não excede um valor ρ_{max}.
Norma	EC8 5.4.3.1.2(5)P Eq. 5.11
Rácio	$\frac{\rho_{max}}{\rho}$

Quadro 39 – Informações acerca da verificação da percentagem de armadura longitudinal de compressão para vigas.

Verificação	[5] *Longitudinal Compression Rebar*
Descrição	Esta verificação é feita em relação à taxa de armadura de tração. Na zona comprimida é colocada uma armadura de secção não inferior a metade da secção da armadura da zona tracionada, adicional a qualquer armadura de compressão necessária à verificação da viga em relação ao estado limite último na situação de projeto sísmica.
Norma	EC8 5.4.3.1.2(4) a)
Rácio	$\frac{\rho'}{0{,}5\cdot\rho}$

Quadro 40 – Informações acerca da verificação do diâmetro mínimo da armadura transversal para vigas.

Verificação	[6] *Transversal Rebar Minimum Diameter*
Descrição	O diâmetro d_{bw} das armaduras de confinamento (em milímetros) não deve ser inferior a 6 mm.
Norma	EC8 5.4.3.1.2(6)P a)
Rácio	$\frac{d_{bw}}{0{,}006}$

Quadro 41 – Informações acerca da verificação do espaçamento máximo da armadura transversal em zonas críticas para vigas.

Verificação	[7] *Transversal Rebar Spacing in Critical Zones*
Descrição	Nas zonas críticas é definido um espaçamento máximo específico compatível com as dimensões da viga.
Norma	EC8 5.4.3.1.2(6)P b)
Rácio	$\frac{s_{max_{lcr}}}{s_{lcr}}$

Quadro 42 - – Informações acerca da verificação do espaçamento máximo da armadura transversal para vigas.

Verificação	[8] *Transversal Rebar Spacing*
Descrição	Verificação das condições de espaçamento definidas pelo EC2.
Norma	EC2
Rácio	$\frac{s_{max}}{s}$

Quadro 43 – Informações acerca da verificação primeira ocorrência da armadura transversal para vigas.

Verificação	[9] *First Occurrence of Transversal Rebar*
Descrição	A primeira armadura de confinamento deve-se encontrar, no máximo, a 50mm da extremidade do comprimento livre da viga.
Norma	EC8 5.4.3.1.2(6)P c)
Rácio	$\frac{distância\ a\ que\ se\ encontra\ o\ primeiro\ estribo}{0{,}05}$

Quadro 44 – Informações acerca da verificação do VRD máximo para vigas.

Verificação	[10] *Maximum V_{RD}*
Descrição	Nas vigas sísmicas primárias, os valores de cálculo dos esforços transversos devem ser determinados de acordo com a regra de cálculo pela capacidade real, com base no equilíbrio da viga.
Norma	EC8 5.4.2.2(2)
Rácio	$\frac{V_{Rd}}{V_{Rd\ capacidade\ real}}$

5.8 PILARES

São também realizadas 10 verificações relacionadas com os pilares. Quatro relacionadas com a armadura longitudinal, quatro mais com a armadura transversal, uma com os esforços aplicados na estrutura e por fim uma relacionada com o *capacity design*. (Quadros 5.12 a 5.21).

Quadro 45 – Informações acerca da verificação do rácio mínimo de armadura longitudinal para pilares.

Verificação	[1] *Longitudinal Rebar Minimum Ratio*
Descrição	A taxa de armadura longitudinal, ρ_l, não deve ser inferior a 0,01.
Norma	EC8 5.4.3.2.2(1)P
Rácio	$\frac{\rho_l}{0{,}01}$

Quadro 46 – Informações acerca da verificação do rácio máximo de armadura longitudinal para pilares.

Verificação	[2] *Longitudinal Rebar Maximum Ratio*
Descrição	A taxa de armadura longitudinal, ρ_l, não deve ser superior a 0,04.
Norma	EC8 5.4.3.2.2(1)P
Rácio	$\frac{0{,}04}{\rho_l}$

Quadro 47 – Informações acerca da verificação de armadura longitudinal em todas as faces para pilares.

Verificação	[3] *Longitudinal Rebar in All Faces*
Descrição	Deve ser colocado ao longo de cada face do pilar pelo menos um varão intermédio entre os varões de canto, de forma a assegurar a integridade dos nós viga-pilar.
Norma	EC8 5.4.3.2.2(2)P
Rácio	$\frac{n\ varões\ intermédias}{n\ varões\ de\ canto}$

Quadro 48 – Informações acerca da verificação de distância máxima entre a armadura longitudinal para pilares.

Verificação	[4] *Maximum Distance Between Longitudinal Rebar*
Descrição	A distância entre varões longitudinais consecutivos abraçados por cintas ou por ganchos não é superior a 200 mm. Esta verificação é realizada para cada varão em relação aos outros existentes no pilar.
Norma	EC8 5.4.3.2.2(11) b)
Rácio	$\frac{0,2}{b_i}$

Quadro 49 – Informações acerca da verificação do diâmetro mínimo da armadura transversal para pilares.

Verificação	[5] *Transversal Rebar Minimum Diameter*
Descrição	O diâmetro d_{bw} das armaduras de confinamento (em milímetros) não deve ser inferior a 6 mm.
Norma	EC8 5.4.3.1.2(6)P a)
Rácio	$\frac{d_{bw}}{0,006}$

Quadro 50 – Informações acerca da verificação do espaçamento máximo entre a armadura transversal para pilares.

Verificação	[6] *Transversal Rebar Spacing*
Descrição	Nas zonas críticas de pilares, o espaçamento entre armadura transversal deve ser tal que confira o mínimo de ductilidade e impeça a encurvadura local dos varões longitudinais.
Norma	EC8 5.4.3.2.2(11) a)
Rácio	$\frac{s}{s_{max}}$

Quadro 51 – Informações acerca da verificação do esforço normal reduzido para pilares.

Verificação	[7] *Normalised Axial Load*
Descrição	Em pilares sísmicos primários, o valor do esforço normal reduzido v_d não deve ser superior a 0,65.
Norma	EC8 5.4.3.2.1(3)P
Rácio	$\frac{0,65}{v_d}$

Quadro 52 – Informações acerca da verificação do fator de ductilidade para pilares.

Verificação	[8] *Ductility Factor*
Descrição	De forma a cumprir as condições de ductilidade local, o valor do fator de ductilidade em curvatura deve cumprir o valor estabelecido em EC8 5.2.3.4(3).
Norma	EC8 5.4.3.2.2(8)
Rácio	$\frac{\alpha \cdot \omega_{wd}}{30 \cdot \mu_\phi \cdot v_d \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_o} - 0,035}$

Quadro 53 – Informações acerca da verificação da taxa mecânica volumétrica de cintas para pilares.

Verificação	[9] *Mechanical Volumetric Ratio*
Descrição	A taxa mecânica volumétrica de cintas nas zonas críticas não deverá ser inferior a 0,08.
Norma	EC8 5.4.3.2.2(9)
Rácio	$\frac{\omega_{wd}}{0,08}$

Quadro 54 – Informações acerca da verificação do VRD máximo para pilares.

Verificação	[10] *Maximum V_{RD}*
Descrição	Nos pilares sísmicos primários, os valores de cálculo dos esforços transversos devem ser determinados de acordo com a regra de cálculo pela capacidade real, considerando o equilíbrio do pilar sob ação dos momentos nas extremidades.
Norma	EC8 5.4.2.3(2)
Rácio	$\frac{V_{Rd}}{V_{Rd\ capacidade\ real}}$

5.9 NÓS VIGA/PILAR

Serão apenas apresentados resultados nesta parte do programa se forem selecionados elementos que se intersectem. São feitas 5 verificações relacionadas com os nós viga-pilar. Quatro verificações relacionadas com a verificação da equação 2.9, na direção x e y em nos dois sentidos, positivo e negativo. Finalmente temos uma verificação relacionada com o espaçamento máximo aos eixos da viga e do pilar conectados (Quadros 5.22 e 5.23).

Quadro 55 – Informações acerca da verificação da condição de ductilidade global para nós viga-pilar.

Verificação	[1] *Beam-Column Resistance Interaction X-Axis Negative Direction* [2] *Beam-Column Resistance Interaction X-Axis Positive Direction* [3] *Beam-Column Resistance Interaction Y-Axis Negative Direction* [4] *Beam-Column Resistance Interaction Y-Axis Positive Direction*
Descrição	Nos edifícios com vários pisos, deve evitar-se a formação de um mecanismo plástico de piso flexível, uma vez que tal mecanismo pode induzir, nos pilares do piso flexível, exigências de ductilidade local excessivas, tal é conseguido pela condição da Equação 2.9.
Norma	EC8 4.4.2.3 (4) Eq. 4.29
Rácio	$\frac{\sum M_{Rc} / \sum M_{Rb}}{1,3}$

Quadro 56 – Informações acerca da verificação da distância máxima entre eixos para nós viga-pilar.

Verificação	[5] *Beam-Column Axis Eccentricity*
Descrição	A excentricidade do eixo da viga em relação ao eixo do pilar com o qual forma um nó deve ser limitada a fim de permitir uma transmissão eficaz dos momentos cíclicos de uma viga sísmica primária para o pilar. Deverá limitar-se a distância entre os eixos dos centros de gravidade dos dois elementos a menos de $b_c/4$, em que b_c é a maior dimensão da secção transversal do pilar perpendicular ao eixo longitudinal da viga.
Norma	EC8 5.4.1.2.1(2)
Rácio	$\frac{b_c/4}{e_{bc}}$

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feito um resumo alargado do trabalho realizado, reforçando as maiores dificuldades e os objectivos cumpridos. Inicialmente são apresentadas conclusões mais gerais do desenvolvimento alcançado, terminando com possíveis desenvolvimentos futuros.

6.2 CONCLUSÕES

O principal objectivo desta dissertação foi complementar a ferramenta já existente de verificações de normas de dimensionamento de estruturas sismoresistentes. O programa vai ao detalhe no que toca às normas exigidas em vigas e pilares de estruturas de betão armado, dimensionadas para a classe DCM, de acordo com o Eurocodigo 8.

Na prática de projecto, é recorrente serem feitas alterações menores que podem ter consequências negativas no dimensionamento sísmico efetuado previamente, podendo levar até ao incumprimento de alguma norma exigida. Assim, é de grande valor esta ferramenta, de fácil consulta, para que sejam verificadas a qualquer momento as verificações estipuladas.

A automatização da verificação destas normas é mais uma etapa na modernização da construção, neste caso de projecto, que tanto invade a construção civil actualmente. Torna muito rápida, eficaz e simples a consulta e verificação de conformidade dos elementos a dimensionar. O facto de o processo ser repetido sempre com as mesmas etapas e fluxo, aumenta o rigor dos resultados e consequentemente a sua qualidade.

É de realçar que o trabalho desenvolvido simplesmente aliou ferramentas que já exitem. A linguagem de programação avançada C# no compilador Visual Basic e os softwares de Bim, Revit e Etabs. Com esta mistura gerando uma ferramenta nova e de grande utilidade para a engenharia sísmica e claro para a empresa A400.

O processo de desenvolvimento do programa foi muito complexo e iterativo. Com alguns passos para trás para se poderem dar outros para a frente. Eventualmente, e fruto de muita insistência e apoio, surgiu algum á vontade com a linguagem o que permitiu nas fases mais de conclusão do projecto alguma autonomia tão procurada ao longo destes meses. De salientar não só o tempo despendido, mas também a paciência de todos os que se mostraram disponíveis para tornar este projeto executável.

Uma vez com o trabalho mais autónomo foi possível melhorar o programa, através da pesquisa do erro ou com o simples seguimento do fluxo do programa com as funcionalidades de *debugging*. Sempre em vista a melhoria continua do resultado final.

O resultado da evolução e aprendizagem foi esta ferramenta de análise que preenche os critérios pretendidos, apesar de, inicialmente ser sugerida a analise não só de vigas, pilares e os seus respectivos nós (Carreira, P.), mas também uma análise detalhada de paredes (Pedro Bernardes). Esta última acabou por cair da lista de prioridades, não só por aumentar significativamente o volume de trabalho, mas também por não ser fácil fazer a incorporação dos dois programas num só. Assim, resulta um programa

útil e capaz de auxiliar, de forma rápida e eficaz, o dimensionamento de estruturas de betão armado resistentes a sismos, verificando todas as normas necessárias em vigor.

Como os resultados apresentam um panorama geral das verificações é possível tirar conclusões quanto às principais diferenças entre o dimensionamento inicial, pela comparação de valores de calculo com o valor resistente, e um dimensionamento pela capacidade real, como proposto pelo eurocodigo 8.

Para os pilares, há alguns critérios que se salientam pelo seu incumprimento, o espaçamento da armadura transversal e a taxa mecânica volumétrica de cintas na zona critica. Sendo necessário reforço de armadura transversal uma vez que estas falhas são relacionadas. Nos pilares centrais é verificado que a taxa de armadura é inferior ao necessário. Já nas vigas verifica-se que não são cumpridos os critérios de espaçamento máximo da armadura transversal nas zonas criticas. As restantes verificações têm parecer positivo, com um rácio elevado, isto é, longe do incumprimento.

A presente dissertação tornou possível o contacto com ferramentas de uso comum em projecto de estruturas em engenharia civil, um software de calculo automático, *Sap2000*, dois softwares de modelação BIM, o *Revit* e o *Etabs*. Houve ainda uma enorme evolução nos conhecimentos na área da programação que serão, certamente, muito uteis para o desenvolvimento e manutenção de ferramentas semelhantes no futuro profissional. O desenvolvimento deste projecto em ambiente empresarial foi extremamente enriquecedor a nível profissional e pessoal e não só promoveu a aplicação de competências adquiridas ao longo da formação académica como tornou clara a importância de certos temas até agora, normalmente, abordados de um ponto de vista mais teóricos.

É de salientar que ao longo do desenvolvimento deste projecto foi necessário ir fazendo ajustes devido à dificuldade em programar numa linguagem nova o que resultou na alteração do tema. Inicialmente fazia parte do desafio incorporar também a análise detalhada de paredes. Não foi possível desenvolver este projecto para além das vigas, pilares e respectivos nós. Uma forte sugestão futura poderia ser tratar este género de projectos como um trabalho conjunto com outros estudantes mais capazes na área da programação tornando possível o desenvolvimento de um programa mais completo sem tantos contratempos e aprendizagem de raiz.

6.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Uma vez que o resultado deste projecto visa a criação de uma ferramenta de fácil utilização, que torne as verificações, que são morosas de fazer manualmente, rápidas e de simples avaliação será difícil de acreditar que não existam acrescentos possíveis no programa em questão. Assim, enumero algumas opções de possível desenvolvimento futuro:

- Confirmação de que o programa é transversal a qualquer estrutura modelada em Revit, podendo ser corrido independentemente da sua formulação e características mais especificas.

- Como dito anteriormente, a incorporação de mais elementos estruturais, nomeadamente paredes, alvo de regulamentação, também segundo o Eurocodigo 8. Poderia ser interessante também alargar o programa a diferentes materiais para alem do betão armado, por exemplo, estruturas de madeira e/ou metálicas.

- Uma maneira mais formal de apresentar os resultados. Um relatório mais específico que pudesse ser incluído nos projectos de estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carreira, Patricia - Ferramentas Bim de apoio ao Dimensionamento Sísmico de Estruturas de BA segundo o EC8. 2021. ISBN/ISSN:

CNE - Eurocódigo 8 - Projecto de Estruturas para Resistência aos Sismos, parte 1: Regras Gerais, Acções Sísmicas e Regras para Edifícios. 2010. ISBN/ISSN:

Corrêa, Manuel Ritto - Introdução ao comportamento não linear de estruturas. Instituto Superior Técnico, 2016. ISBN/ISSN:

Gomes, Augusto; de Brito, Jorge - Influência da cintagem dos pilares na ductilidade e aplicação das regras de pormenorização do Eurocódigo 8. *Betão Estrutural*. Vol. 96. (1996). ISSN:

IPMA - Porque é que se monitorizam os sismos? IPMA, 2021. Disponível em WWW: <https://www.ipma.pt/pt/educativa/faq/geofisica/sismologia/faqdetail.html?f=/pt/educativa/faq/geofisica/sismologia/faq_sis_0004.html&print=true>. ISBN/ISSN:

Portugal, Governo De - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP). Diário da República: 1983. ISBN/ISSN:

Rodrigues, Hugo; Furtado, André; Arêde, António; Varum, Humberto - Estudo experimental do comportamento sísmico de pilares de betão armado sujeitos à flexão biaxial. (2016). ISSN:

Verderame, Gerardo M; De Carlo, Giovanni; Ricci, Paolo; Fabbrocino, Giovanni - Cyclic bond behaviour of plain bars. Part II: Analytical investigation. *Construction and building Materials*. Vol. 23. n.º 12 (2009). p. 3512-3522. ISSN: 0950-0618

ANEXOS

A1

RESULTADOS DA ANÁLISE MODAL DA ESTRUTURA

Modo	T [s]	UX	UY	UZ	ΣUX	ΣUY	ΣUZ	RX	RY	RZ	ΣRX	ΣRY	ΣRZ
1	0.685	0.677	0.209	0.000	0.677	0.209	0.000	0.010	0.031	0.000	0.010	0.031	0.000
2	0.685	0.209	0.677	0.000	0.886	0.886	0.000	0.031	0.010	0.000	0.041	0.041	0.000
3	0.537	0.000	0.000	0.000	0.886	0.886	0.000	0.000	0.000	0.886	0.041	0.041	0.886
4	0.207	0.070	0.026	0.000	0.956	0.912	0.000	0.063	0.172	0.000	0.104	0.213	0.886
5	0.207	0.026	0.070	0.000	0.982	0.982	0.000	0.172	0.063	0.000	0.276	0.276	0.886
6	0.163	0.000	0.000	0.000	0.982	0.982	0.000	0.000	0.000	0.096	0.276	0.276	0.982
7	0.128	0.000	0.000	0.000	0.982	0.982	0.000	0.088	0.002	0.000	0.364	0.278	0.982
8	0.128	0.000	0.000	0.000	0.982	0.982	0.000	0.002	0.088	0.000	0.365	0.365	0.982
9	0.124	0.000	0.000	0.695	0.982	0.982	0.695	0.000	0.000	0.000	0.365	0.365	0.982
10	0.120	0.000	0.000	0.000	0.982	0.982	0.695	0.079	0.000	0.000	0.445	0.365	0.982
11	0.120	0.000	0.000	0.000	0.982	0.982	0.695	0.000	0.079	0.000	0.445	0.445	0.982
12	0.118	0.000	0.000	0.000	0.982	0.982	0.695	0.181	0.058	0.000	0.626	0.502	0.982

A2

EXEMPLOS DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELO PROGRAMA FLEXDESV PARA VIGAS

	Load/Comb	Bar	Station	Nsd (kN)	Msd.xx (kN.m)	Msd.yy (kN.m)	Sec. Area (m^2)	Sec.B[x] (m)
1	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(<)Mxx(>)Myy(>)	25	0	-12.13	34.04	-0.08	0.12	0.30
2	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(<)Mxx(>)Myy(<)]	25	0	-12.13	34.04	-0.43	0.12	0.30
3	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(<)Mxx(<)Myy(>)	25	0	-12.13	-92.45	-0.08	0.12	0.30
4	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(<)Mxx(<)Myy(<)]	25	0	-12.13	-92.45	-0.43	0.12	0.30
5	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(>)Mxx(>)Myy(>)	25	0	1.60	34.04	-0.08	0.12	0.30
6	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(>)Mxx(>)Myy(<)]	25	0	1.60	34.04	-0.43	0.12	0.30
7	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(>)Mxx(<)Myy(>)	25	0	1.60	-92.45	-0.08	0.12	0.30
8	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(>)Mxx(<)Myy(<)]	25	0	1.60	-92.45	-0.43	0.12	0.30
9	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(<)Mxx(>)Myy(>)	25	6	-9.74	26.84	-0.26	0.12	0.30
10	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(<)Mxx(>)Myy(<)]	25	6	-9.74	26.84	-0.71	0.12	0.30
11	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(<)Mxx(<)Myy(>)	25	6	-9.74	-102.20	-0.26	0.12	0.30
12	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(<)Mxx(<)Myy(<)]	25	6	-9.74	-102.20	-0.71	0.12	0.30
13	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(>)Mxx(>)Myy(>)	25	6	3.03	26.84	-0.26	0.12	0.30
14	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(>)Mxx(>)Myy(<)]	25	6	3.03	26.84	-0.71	0.12	0.30
15	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(>)Mxx(<)Myy(>)	25	6	3.03	-102.20	-0.26	0.12	0.30
16	CQP + Ek_X_Tipo1 [N(>)Mxx(<)Myy(<)]	25	6	3.03	-102.20	-0.71	0.12	0.30

	Sec.H[y] (m)	Sec.d[x] (m)	Sec.d[y] (m)	Sec.Ixx (cm^4)	Sec.Iyy (cm^4)	As.Long (cm^2)	Asw/s (cm^2/m)	v	u.xx	u.yy
1	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	-0.0040	0.05	-0.0002
2	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	-0.0040	0.05	-0.0009
3	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	-0.0040	-0.13	-0.0002
4	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	-0.0040	-0.13	-0.0009
5	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	0.0005	0.05	-0.0002
6	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	0.0005	0.05	-0.0009
7	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	0.0005	-0.13	-0.0002
8	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	0.0005	-0.13	-0.0009
9	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	-0.0032	0.04	-0.0005
10	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	-0.0032	0.04	-0.0014
11	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	-0.0032	-0.14	-0.0005
12	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	-0.0032	-0.14	-0.0014
13	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	0.0010	0.04	-0.0005
14	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	0.0010	0.04	-0.0014
15	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	0.0010	-0.14	-0.0005
16	0.40	0.25	0.35	0.00232	0.00111	18.85	5.03	0.0010	-0.14	-0.0014

	Mrd.xx (kN.m)	Mrd.yy (kN.m)	Msd (kN.m)	Mrd (kN.m)	CSeg.M	Vrd.x (kN)	Vrd.y (kN)	CSeg.V	Nrd (kN)	CSeg.N
1	102.64	-0.25	34.04	102.64	3.02	78.36	109.83	8.53	-442.85	36.51
2	102.61	-1.29	34.04	102.62	3.01	78.36	109.83	2.24	-442.81	36.50
3	-102.64	-0.09	92.45	102.64	1.11	78.36	109.83	7.95	-76.23	6.28
4	-102.63	-0.48	92.45	102.63	1.11	78.36	109.83	2.20	-76.17	6.28
5	104.75	-0.26	34.04	104.75	3.08	78.36	109.83	8.53	2782.31	1733.72
6	104.71	-1.32	34.04	104.72	3.08	78.36	109.83	2.24	2782.18	1733.64
7	-104.75	-0.10	92.45	104.75	1.13	78.36	109.83	7.95	2377.91	1481.73
8	-104.74	-0.49	92.45	104.74	1.13	78.36	109.83	2.20	2377.34	1481.37
9	102.98	-1.00	26.84	102.99	3.84	78.36	109.83	1.95	-487.86	50.09
10	102.93	-2.71	26.85	102.97	3.84	78.36	109.83	3.96	-487.81	50.08
11	-103.00	-0.26	102.20	103.00	1.01	78.36	109.83	2.00	-14.80	1.52
12	-102.99	-0.71	102.20	102.99	1.01	78.36	109.83	4.16	-14.72	1.51
13	104.94	-1.02	26.84	104.95	3.91	78.36	109.83	1.95	2831.91	933.44
14	104.89	-2.77	26.85	104.92	3.91	78.36	109.83	3.96	2831.73	933.39
15	-104.96	-0.27	102.20	104.96	1.03	78.36	109.83	2.00	2302.06	758.80
16	-104.95	-0.73	102.20	104.95	1.03	78.36	109.83	4.16	2301.24	758.53

A3

EXEMPLOS DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELO PROGRAMA FLEXDESV PARA PILARES

	Combin	Bar	Rott (º)	Sec. Shape	Station	Bar.L (m)
1	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(>)Myy(>)	1	0	Rect.	0.000	3.50
2	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(>)Myy(>)	1	0	Rect.	3.500	3.50
3	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(>)Myy(>)	1	0	Rect.	buckling	3.50
4	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(>)Myy(<)	1	0	Rect.	0.000	3.50
5	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(>)Myy(<)	1	0	Rect.	3.500	3.50
6	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(>)Myy(<)	1	0	Rect.	buckling	3.50
7	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(<)Myy(>)	1	0	Rect.	0.000	3.50
8	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(<)Myy(>)	1	0	Rect.	3.500	3.50
9	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(<)Myy(>)	1	0	Rect.	buckling	3.50
10	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(<)Myy(<)	1	0	Rect.	0.000	3.50
11	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(<)Myy(<)	1	0	Rect.	3.500	3.50
12	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(<)Mxx(<)Myy(<)	1	0	Rect.	buckling	3.50
13	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(>)Myy(>)	1	0	Rect.	0.000	3.50
14	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(>)Myy(>)	1	0	Rect.	3.500	3.50
15	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(>)Myy(>)	1	0	Rect.	buckling	3.50
16	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(>)Myy(<)	1	0	Rect.	0.000	3.50
17	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(>)Myy(<)	1	0	Rect.	3.500	3.50
18	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(>)Myy(<)	1	0	Rect.	buckling	3.50
19	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(<)Myy(>)	1	0	Rect.	0.000	3.50
20	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(<)Myy(>)	1	0	Rect.	3.500	3.50
21	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(<)Myy(>)	1	0	Rect.	buckling	3.50
22	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(<)Myy(<)	1	0	Rect.	0.000	3.50
23	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(<)Myy(<)	1	0	Rect.	3.500	3.50
24	CQP+CQP + Ek_X_Tipo1_N(>)Mxx(<)Myy(<)	1	0	Rect.	buckling	3.50

	Sec.Area (m^2)	Sec.B[x] (m)	Sec.H[y] (m)	Sec.Ixx (cm^4)	Sec.Iyy (cm^4)	As.Long (cm^2)	Asw/s (cm^2/m)	R.gir [xx] (m)	R.gir [yy] (m)	Mxx.QP (kN.m)	Myy.QP (kN.m)
1	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	-8.84	-8.84
2	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	18.08	18.08
3	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	7.31	7.31
4	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	-8.84	-8.84
5	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	18.08	18.08
6	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	7.31	7.31
7	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	-8.84	-8.84
8	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	18.08	18.08
9	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	7.31	7.31
10	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	-8.84	-8.84
11	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	18.08	18.08
12	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	7.31	7.31
13	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	-8.84	-8.84
14	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	18.08	18.08
15	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	7.31	7.31
16	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	-8.84	-8.84
17	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	18.08	18.08
18	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	7.31	7.31
19	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	-8.84	-8.84
20	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	18.08	18.08
21	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	7.31	7.31
22	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	-8.84	-8.84
23	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	18.08	18.08

24	0.16	0.40	0.40	260161	260829	16.08	5.03	0.13	0.13	7.31	7.31

	Mxx.FLU (kN.m)	Myy.FLU (kN.m)	N.ULS (kN)	Mxx.ULS (kN.m)	Myy.ULS (kN.m)	Vx.ULS (kN)	Vy.ULS (kN)	Exc Imperf [y] (m)	M imperf [xx] (kN.m)	Exc Imperf [x] (m)	M imperf [yy] (kN.m)
1	-8.84	-8.84	172.13	87.52	20.73	5.54	34.56	0.02	3.44	0.02	3.44
2	18.08	18.08	158.13	69.66	34.84	5.54	34.56	0.02	3.16	0.02	3.16
3	7.31	7.31	172.13	80.37	29.20	5.54	34.56	0.02	3.44	0.02	3.44
4	-8.84	-8.84	172.13	87.52	-38.41	-20.93	34.56	0.02	3.44	0.02	3.44
5	18.08	18.08	158.13	69.66	1.32	-20.93	34.56	0.02	3.16	0.02	3.16
6	7.31	7.31	172.13	80.37	-22.52	-20.93	34.56	0.02	3.44	0.02	3.44
7	-8.84	-8.84	172.13	-105.20	20.73	5.54	-49.94	0.02	3.44	0.02	3.44
8	18.08	18.08	158.13	-33.49	34.84	5.54	-49.94	0.02	3.16	0.02	3.16
9	7.31	7.31	172.13	-76.52	29.20	5.54	-49.94	0.02	3.44	0.02	3.44
10	-8.84	-8.84	172.13	-105.20	-38.41	-20.93	-49.94	0.02	3.44	0.02	3.44
11	18.08	18.08	158.13	-33.49	1.32	-20.93	-49.94	0.02	3.16	0.02	3.16
12	7.31	7.31	172.13	-76.52	-22.52	-20.93	-49.94	0.02	3.44	0.02	3.44
13	-8.84	-8.84	341.01	87.52	20.73	5.54	34.56	0.02	6.82	0.02	6.82
14	18.08	18.08	327.02	69.66	34.84	5.54	34.56	0.02	6.54	0.02	6.54
15	7.31	7.31	341.01	80.37	29.20	5.54	34.56	0.02	6.82	0.02	6.82
16	-8.84	-8.84	341.01	87.52	-38.41	-20.93	34.56	0.02	6.82	0.02	6.82
17	18.08	18.08	327.02	69.66	1.32	-20.93	34.56	0.02	6.54	0.02	6.54
18	7.31	7.31	341.01	80.37	-22.52	-20.93	34.56	0.02	6.82	0.02	6.82
19	-8.84	-8.84	341.01	-105.20	20.73	5.54	-49.94	0.02	6.82	0.02	6.82
20	18.08	18.08	327.02	-33.49	34.84	5.54	-49.94	0.02	6.54	0.02	6.54
21	7.31	7.31	341.01	-76.52	29.20	5.54	-49.94	0.02	6.82	0.02	6.82
22	-8.84	-8.84	341.01	-105.20	-38.41	-20.93	-49.94	0.02	6.82	0.02	6.82

23	18.08	18.08	327.02	-33.49	1.32	-20.93	-49.94	0.02	6.54	0.02	6.54
24	7.31	7.31	341.01	-76.52	-22.52	-20.93	-49.94	0.02	6.82	0.02	6.82

	Coef_n	Coef_w	Lambda [xx]	Lambda [yy]	Nsd (kN)	Msd.xx (kN.m)	Msd.yy (kN.m)	Vsd.x (kN)	Vsd.y (kN)	Mrd.xx (kN.m)	Mrd.yy (kN.m)
1	0.05	0.17	29.74	29.70	172.13	90.96	20.73	5.54	34.56	136.70	31.15
2	0.05	0.17	29.74	29.70	158.13	72.82	34.84	5.54	34.56	123.49	59.09
3	0.05	0.17	29.74	29.70	172.13	83.82	29.20	5.54	34.56	131.15	45.69
4	0.05	0.17	29.74	29.70	172.13	90.96	-38.41	-20.93	34.56	127.59	-53.88
5	0.05	0.17	29.74	29.70	158.13	72.82	1.32	-20.93	34.56	137.35	2.49
6	0.05	0.17	29.74	29.70	172.13	83.82	-22.52	-20.93	34.56	134.77	-36.21
7	0.05	0.17	29.74	29.70	172.13	-108.64	20.73	5.54	-49.94	-137.49	26.23
8	0.05	0.17	29.74	29.70	158.13	-33.49	38.01	5.54	-49.94	-92.18	104.61
9	0.05	0.17	29.74	29.70	172.13	-79.96	29.20	5.54	-49.94	-130.38	47.61
10	0.05	0.17	29.74	29.70	172.13	-108.64	-38.41	-20.93	-49.94	-130.92	-46.29
11	0.05	0.17	29.74	29.70	158.13	-36.66	1.32	-20.93	-49.94	-137.27	4.95
12	0.05	0.17	29.74	29.70	172.13	-79.96	-22.52	-20.93	-49.94	-134.16	-37.79
13	0.11	0.17	29.74	29.70	341.01	94.34	20.73	5.54	34.56	155.92	34.26
14	0.10	0.17	29.74	29.70	327.02	76.20	34.84	5.54	34.56	141.66	64.78
15	0.10	0.17	29.74	29.70	341.01	87.19	29.20	5.54	34.56	149.77	50.15
16	0.11	0.17	29.74	29.70	341.01	94.34	-38.41	-20.93	34.56	145.70	-59.33
17	0.10	0.17	29.74	29.70	327.02	76.20	1.32	-20.93	34.56	160.80	2.79
18	0.10	0.17	29.74	29.70	341.01	87.19	-22.52	-20.93	34.56	153.81	-39.73
19	0.11	0.17	29.74	29.70	341.01	-112.02	20.73	5.54	-49.94	-157.54	29.15
20	0.10	0.17	29.74	29.70	327.02	-33.49	41.38	5.54	-49.94	-97.20	120.11
21	0.10	0.17	29.74	29.70	341.01	-83.34	29.20	5.54	-49.94	-148.88	52.16
22	0.11	0.17	29.74	29.70	341.01	-112.02	-38.41	-20.93	-49.94	-149.30	-51.20
23	0.10	0.17	29.74	29.70	327.02	-40.03	1.32	-20.93	-49.94	-160.60	5.30
24	0.10	0.17	29.74	29.70	341.01	-83.34	-22.52	-20.93	-49.94	-153.17	-41.39

	Msd (kN.m)	Mrd (kN.m)	CSeg.M	Vrd.x (kN)	Vrd.y (kN)	CSeg.V	Nrd (kN)	CSeg.N
1	93.29	140.20	1.50	110.46	110.46	2.75	3173.50	18.44
2	80.73	136.90	1.70	110.46	110.46	2.75	3280.78	20.75
3	88.76	138.88	1.56	110.46	110.46	2.75	3211.29	18.66
4	98.74	138.50	1.40	110.46	110.46	1.99	3139.25	18.24
5	72.83	137.37	1.89	110.46	110.46	1.99	3332.97	21.08
6	86.79	139.55	1.61	110.46	110.46	1.99	3224.46	18.73
7	110.60	139.97	1.27	110.46	110.46	1.99	3040.72	17.67
8	50.66	139.43	2.75	110.46	110.46	1.99	3498.20	22.12
9	85.12	138.80	1.63	110.46	110.46	1.99	3240.74	18.83
10	115.23	138.86	1.21	110.46	110.46	1.56	3001.06	17.44
11	36.68	137.36	3.74	110.46	110.46	1.56	3573.61	22.60
12	83.07	139.38	1.68	110.46	110.46	1.56	3253.93	18.90
13	96.59	159.64	1.65	110.46	110.46	2.75	3162.47	9.27
14	83.79	155.77	1.86	110.46	110.46	2.75	3255.37	9.95
15	91.95	157.94	1.72	110.46	110.46	2.75	3205.54	9.40
16	101.86	157.32	1.54	110.46	110.46	1.99	3108.56	9.12
17	76.21	160.83	2.11	110.46	110.46	1.99	3308.51	10.12
18	90.05	158.86	1.76	110.46	110.46	1.99	3198.77	9.38
19	113.92	160.22	1.41	110.46	110.46	1.99	3015.45	8.84
20	53.24	154.51	2.90	110.46	110.46	1.99	3489.07	10.67
21	88.30	157.75	1.79	110.46	110.46	1.99	3214.93	9.43
22	118.42	157.84	1.33	110.46	110.46	1.56	2971.48	8.71
23	40.06	160.69	4.01	110.46	110.46	1.56	3551.83	10.86
24	86.33	158.66	1.84	110.46	110.46	1.56	3228.11	9.47

A4

RESULTADO DA APLICAÇÃO DO PROGRAMA PARA TODAS AS VIGAS DO CASO DE ESTUDO

Verification of Capacity Design Rules and Detailing Requirements of Reinforced Concrete Structures Designed for DCM according EC8

Materials

Concrete Grade: C 30/37

Steel Grade: A 400

Seismic Properties

Soil: B

Zone Type 1: 1.3

Zone Type 2: 2.3

Period [s]: 0.6854

Behaviour factor (q): 3

DCM Verification

Beams | Columns | Joints | + info

Bar	Failled Verifications	[1] Width	[2] Long. Rebar Max Diam	[3] Long. Rebar Trac Min	[4] Long. Rebar Trac Max	[5] Long. Rebar Comp	[6] Tr. Rebar Diam	[7] Tr. Rebar Sp. (Lcr)	[8] Tr. Rebar Spacing	[9] Tr. Rebar First	[10] VRd Max
25	1	3.00	1.31	1.98	4.66	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.12
26	1	3.00	1.31	1.98	4.66	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.12
27	1	3.00	1.31	1.98	4.66	6.00	1.33	0.50	1.35	1.49	1.12
28	1	3.00	1.31	1.98	4.66	6.00	1.33	0.50	1.35	1.51	1.12
29	1	3.00	1.31	1.98	4.66	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.12
30	1	3.00	1.31	1.98	4.66	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.12
31	2	3.00	0.99	3.50	3.94	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.12
32	1	3.00	1.31	1.98	4.66	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.12
33	3	3.00	0.99	2.99	4.10	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	0.77
34	3	3.00	0.98	2.99	4.10	6.00	1.33	0.50	1.35	3.50	0.77
35	3	3.00	0.99	2.99	4.10	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	0.77
36	3	3.00	0.98	2.99	4.10	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	0.77
37	1	3.00	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.05
38	1	3.00	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.05
39	1	3.00	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.49	1.06
40	1	3.00	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.51	1.06
41	1	3.00	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.05
42	1	3.00	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.05
43	1	3.00	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.06
44	1	3.01	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.06
45	3	3.00	0.99	2.79	4.18	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	0.81
46	3	3.00	0.99	2.79	4.18	6.00	1.33	0.50	1.35	3.50	0.81
47	3	3.00	0.98	2.79	4.18	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	0.81
48	3	3.00	0.98	2.79	4.18	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	0.81
49	1	3.00	1.57	1.22	5.70	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.36
50	1	3.00	1.57	1.22	5.70	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.36
51	1	3.00	1.57	1.22	5.70	6.00	1.33	0.50	1.35	1.49	1.37
52	1	3.00	1.57	1.22	5.70	6.00	1.33	0.50	1.35	1.51	1.37
53	1	3.00	1.57	1.22	5.70	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.36
54	1	3.00	1.57	1.22	5.70	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.36
55	1	3.00	1.57	1.22	5.70	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.37
56	1	3.00	1.57	1.22	5.70	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	1.37
57	2	3.00	1.32	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	0.94
58	2	3.00	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	3.50	0.94
59	2	3.00	1.32	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	0.95
60	2	3.00	1.31	1.78	4.85	6.00	1.33	0.50	1.35	1.50	0.95

Figura 51 -(Carreira, 2021 #9)

A5

RESULTADO DA APLICAÇÃO DO PROGRAMA PARA TODOS OS PILARES DO CASO DE ESTUDO

Verification of Capacity Design Rules and Detailing Requirements of Reinforced Concrete Structures Designed for DCM according EC8

Materials

Concrete Grade: C 30/37

Steel Grade: A 400

Seismic Properties

Soil: B

Zone Type 1: 1.3

Zone Type 2: 2.3

Period [s]: 0.6854

Behaviour factor (q): 3

DCM Verification

Beams | Columns | Joints | + info

Bar	Failled Verifications	[1] Long. Rebar Min	[2] Long. Rebar Max	[3] Long. Rebar All Faces	[4] Long. Rebar Dist	[5] Tr. Rebar Diam	[6] Tr. Rebar Spacing	[7] Normalised Axial Load	[8] Ductility Factor	[9] Mech. Vol. Coef.	[10] VRd Max
1	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	6.10	45.95	0.72	1.20
2	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	6.10	45.95	0.72	1.20
3	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	9.71	1.88	0.83	1.15
4	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	21.93	1.02	0.83	1.29
5	3	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	3.35	0.90	0.83	1.64
6	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	5.24	4.80	0.83	1.66
7	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	11.28	1.31	0.72	1.54
8	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	3.75	1.18	0.83	1.55
9	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	5.76	15.77	0.83	1.66
10	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	12.07	1.22	0.72	1.54
11	3	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	3.35	0.90	0.83	1.64
12	2	1.01	3.98	1.00	1.55	1.33	0.64	6.10	53.61	0.83	1.29
13	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	6.03	2.64	0.62	0.78
14	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	6.55	5.14	0.72	0.83
15	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	2.33	0.34	0.72	1.78
16	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	3.56	0.59	0.62	1.36
17	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	7.13	13.86	0.72	0.96
18	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	12.14	2.01	0.72	0.96
19	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	6.03	2.63	0.62	0.61
20	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	12.14	2.01	0.72	0.86
21	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	8.83	5.16	0.72	0.64
22	5	0.52	7.69	1.00	1.10	1.33	0.64	2.92	0.55	0.53	0.83
23	4	0.52	7.69	1.00	1.10	1.33	0.64	4.45	2.13	0.62	0.83
24	3	0.52	7.69	1.00	1.10	1.33	0.64	8.91	1.74	0.62	1.10
61	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	5.23	1.49	0.62	0.78
62	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	7.87	17.15	0.72	0.74
63	3	1.17	3.42	1.20	2.01	1.33	0.76	16.05	1.44	0.72	0.96

Figura 52 - (Carreira, 2021 #9)

A6

RESULTADO DA APLICAÇÃO DO PROGRAMA PARA TODOS OS NÓS VIGA/PILAR DO CASO DE ESTUDO

Verification of Capacity Design Rules and Detailing Requirements of Reinforced Concrete Structures Designed for DCM according EC8

Materials

Concrete Grade: C 30/37

Steel Grade: A 400

Seismic Properties

Soil: B

Zone Type 1: 1.3

Zone Type 2: 2.3

Period [s]: 0.6854

Behaviour factor (q): 3

DCM Verify

Beams | Columns | Joints | + info

x	y	z	Columns	Beams	[1] Moment X-Axis (-)	[2] Moment X-Axis (+)	[3] Moment Y-Axis (-)	[4] Moment Y-Axis (+)	[5] Eccentricity Axis Distance
0.00	6.00	3.50	16 C 17 C	36 B 29 B 30	1.69	1.73	3.01	3.15	2.50
6.00	6.00	3.50	22 C 23 C	36 B 35 B 34	1.55	1.55	1.56	1.56	Zero Eccentricity
0.00	-0.05	3.50	7 C 8 C	31 B 30 B	2.07	2.25	2.08	2.25	2.00
6.00	-0.05	3.50	13 C 14 C	31 B 32 B 33	3.00	3.13	1.69	1.73	2.50
12.00	-0.05	3.50	1 C 5 C	32 B 25 B	2.07	2.25	2.08	2.25	2.00
12.00	6.00	3.50	61 C 62 C	35 B 26 B 25	1.69	1.73	3.01	3.15	2.50
6.00	12.05	3.50	19 C 21 C	27 B 28 B 34	3.00	3.13	1.69	1.73	2.50
12.00	12.05	3.50	2 C 3 C	27 B 26 B	2.07	2.25	2.08	2.25	2.00
0.00	12.05	3.50	10 C 11 C	28 B 29 B	2.07	2.25	2.08	2.25	2.00
0.00	6.00	6.50	17 C 18 C	48 B 41 B 42	1.38	1.31	2.66	2.67	2.50
6.00	6.00	6.50	23 C 24 C	48 B 47 B 46	1.32	1.32	1.33	1.33	Zero Eccentricity
0.00	-0.05	6.50	8 C 9 C	43 B 42 B	1.29	1.81	1.30	1.82	2.00
6.00	-0.05	6.50	14 C 15 C	43 B 44 B 45	2.64	2.64	1.39	1.32	2.50
12.00	-0.05	6.50	5 C 6 C	44 B 37 B	1.29	1.81	1.30	1.82	1.97
12.00	6.00	6.50	62 C 63 C	47 B 38 B 37	1.38	1.31	2.66	2.67	2.50
6.00	12.05	6.50	21 C 20 C	39 B 40 B 46	2.64	2.64	1.39	1.32	2.50
12.00	12.05	6.50	3 C 4 C	39 B 38 B	1.29	1.81	1.30	1.82	2.00
0.00	12.05	6.50	11 C 12 C	40 B 41 B	1.29	1.81	1.30	1.82	2.00
0.00	6.00	9.50	18 C	60 B 53 B 54	-	-	-	-	2.50
6.00	6.00	9.50	24 C	60 B 59 B 58	-	-	-	-	Zero Eccentricity
0.00	-0.05	9.50	9 C	55 B 54 B	-	-	-	-	2.00
6.00	-0.05	9.50	15 C	55 B 57 B 56	-	-	-	-	2.50
12.00	6.00	9.50	63 C	59 B 50 B 49	-	-	-	-	2.50
6.00	12.05	9.50	20 C	51 B 52 B 58	-	-	-	-	2.50
12.00	12.05	9.50	4 C	51 B 50 B	-	-	-	-	2.00
0.00	12.05	9.50	12 C	52 B 53 B	-	-	-	-	2.00
12.05	0.00	9.50	6 C	49 B 56 B	-	-	-	-	2.00

Figura 53 -(Carreira, 2021 #9)

A7

DADOS GERAIS PARA A VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA

Secções	P 40 40	0.16
	P 40 50	0.2
	P 50 50	0.25
	V 30 40	0.12

Material	Betão	C30/37 E/2
	E	16500000
	fck	30000
		30
	fcd	20000
	fctm	2.896468

Aço	A400
fyk	400000
fyd	347826.1
E	2.00E+08
esyk	0.0017
Recbobrim	0.035

T [s]	0,6854	
	Tipo 1	Tipo 2
SMÁX	1,35	
agr [m/s2]	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	3	
μ_ϕ	5	

rebar trac	0.003621

Figura 54 -(Carreira, 2021 #9)

A8

DADOS GERAIS PARA A VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA PARA VIGAS

Beams																			
id	l [m]	Secção	Posição	piso	b [m]	h [m]	A [m2]	ϕ 12	ϕ 16	ϕ 20	ϕ 25	As [cm2]	ratio [%]	Transv [mm]	Asw/s [cm2/m]	s [m]	Smax lcr [m]	Smax [m]	Max bw [m]	rebar trac max
25	6.00	V 30 40	BORDO	1	0.30	0.40	0.12			6		0.00188	0.0157	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0198
26	6.00	V 30 40	BORDO	1	0.30	0.40	0.12			6		0.00188	0.0157	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0198
27	6.00	V 30 40	BORDO	1	0.30	0.40	0.12			6		0.00188	0.0157	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0198
28	6.00	V 30 40	BORDO	1	0.30	0.40	0.12			6		0.00188	0.0157	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0198
29	6.00	V 30 40	BORDO	1	0.30	0.40	0.12			6		0.00188	0.0157	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0198
30	6.00	V 30 40	BORDO	1	0.30	0.40	0.12			6		0.00188	0.0157	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0198
31	6.00	V 30 40	BORDO	1	0.30	0.40	0.12			6		0.00188	0.0157	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0198
32	6.00	V 30 40	BORDO	1	0.30	0.40	0.12			6		0.00188	0.0157	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0198
33	6.00	V 30 40	BORDO	2	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188
34	6.00	V 30 40	BORDO	2	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188
35	6.00	V 30 40	BORDO	2	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188
36	6.00	V 30 40	BORDO	2	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188
37	6.00	V 30 40	BORDO	2	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188
38	6.00	V 30 40	BORDO	2	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188
39	6.00	V 30 40	BORDO	2	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188
40	6.00	V 30 40	BORDO	2	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188
41	6.00	V 30 40	BORDO	3	0.30	0.40	0.12	2	4			0.00105	0.0087	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0163
42	6.00	V 30 40	BORDO	3	0.30	0.40	0.12	2	4			0.00105	0.0087	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0163
43	6.00	V 30 40	BORDO	3	0.30	0.40	0.12	2	4			0.00105	0.0087	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0163
44	6.00	V 30 40	BORDO	3	0.30	0.40	0.12	2	4			0.00105	0.0087	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0163
45	6.00	V 30 40	BORDO	3	0.30	0.40	0.12	2	4			0.00105	0.0087	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0163
46	6.00	V 30 40	BORDO	3	0.30	0.40	0.12	2	4			0.00105	0.0087	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0163
47	6.00	V 30 40	BORDO	3	0.30	0.40	0.12	2	4			0.00105	0.0087	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0163
48	6.00	V 30 40	BORDO	3	0.30	0.40	0.12	2	4			0.00105	0.0087	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0163
49	6.00	V 30 40	CENTRAL	1	0.30	0.40	0.12			2	4	0.00266	0.0221	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0230
50	6.00	V 30 40	CENTRAL	1	0.30	0.40	0.12			2	4	0.00266	0.0221	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0230
51	6.00	V 30 40	CENTRAL	1	0.30	0.40	0.12			2	4	0.00266	0.0221	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0230
52	6.00	V 30 40	CENTRAL	1	0.30	0.40	0.12			2	4	0.00266	0.0221	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0230
53	6.00	V 30 40	CENTRAL	2	0.30	0.40	0.12		2		4	0.00242	0.0202	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0220
54	6.00	V 30 40	CENTRAL	2	0.30	0.40	0.12		2		4	0.00242	0.0202	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0220
55	6.00	V 30 40	CENTRAL	2	0.30	0.40	0.12		2		4	0.00242	0.0202	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0220
56	6.00	V 30 40	CENTRAL	2	0.30	0.40	0.12		2		4	0.00242	0.0202	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0220
57	6.00	V 30 40	CENTRAL	3	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188
58	6.00	V 30 40	CENTRAL	3	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188
59	6.00	V 30 40	CENTRAL	3	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188
60	6.00	V 30 40	CENTRAL	3	0.30	0.40	0.12		2	4		0.00165	0.0138	8	5.027	0.200	0.100	0.270	0.90	0.0188

Beams	Verifications				
id	Width	Verify Beam Rebar Transv Spacing Lcr	Verify Beam Rebar Transversal Spacing	Verify Beam Rebar Ratio Trac Max	Verify Beam Rebar Ratio Trac Min
25	3.00	0.50	1.35	2.52	2.17
26	3.00	0.50	1.35	2.52	2.17
27	3.00	0.50	1.35	2.52	2.17
28	3.00	0.50	1.35	2.52	2.17
29	3.00	0.50	1.35	2.52	2.17
30	3.00	0.50	1.35	2.52	2.17
31	3.00	0.50	1.35	2.52	2.17
32	3.00	0.50	1.35	2.52	2.17
33	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90
34	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90
35	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90
36	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90
37	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90
38	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90
39	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90
40	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90
41	3.00	0.50	1.35	3.73	1.21
42	3.00	0.50	1.35	3.73	1.21
43	3.00	0.50	1.35	3.73	1.21
44	3.00	0.50	1.35	3.73	1.21
45	3.00	0.50	1.35	3.73	1.21
46	3.00	0.50	1.35	3.73	1.21
47	3.00	0.50	1.35	3.73	1.21
48	3.00	0.50	1.35	3.73	1.21
49	3.00	0.50	1.35	2.08	3.06
50	3.00	0.50	1.35	2.08	3.06
51	3.00	0.50	1.35	2.08	3.06
52	3.00	0.50	1.35	2.08	3.06
53	3.00	0.50	1.35	2.18	2.79
54	3.00	0.50	1.35	2.18	2.79
55	3.00	0.50	1.35	2.18	2.79
56	3.00	0.50	1.35	2.18	2.79
57	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90
58	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90
59	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90
60	3.00	0.50	1.35	2.73	1.90

Figura 55 - (Carreira, 2021 #9)

A9

DADOS GERAIS PARA A VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA PARA PILARES

Columns										
id	l [m]	Secção	h [m]	b [m]	A [m2]	ho [m]	bo [m]	Vnucleo [m3]	Nsd [kN]	ν_d
1	3.50	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.36	341.01	0.107
2	3.50	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.36	341.01	0.107
3	3.00	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.31	214.11	0.067
4	3.00	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.31	94.86	0.030
5	3.00	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.31	620.88	0.194
6	3.00	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.31	396.99	0.124
7	3.50	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.36	184.39	0.058
8	3.00	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.31	554.92	0.173
9	3.00	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.31	361.26	0.113
10	3.50	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.36	172.32	0.054
11	3.00	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.31	620.88	0.194
12	3.00	P 40 40	0.40	0.40	0.16	0.32	0.32	0.31	341.01	0.107
13	3.50	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.48	431.40	0.108
14	3.00	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.41	396.99	0.099
15	3.00	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.41	1114.40	0.279
16	3.50	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.48	730.87	0.183
17	3.00	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.41	364.66	0.091
18	3.00	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.41	214.11	0.054
19	3.50	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.48	431.40	0.108
20	3.00	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.41	214.11	0.054
21	3.00	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.41	294.50	0.074
22	3.50	P 50 50	0.50	0.50	0.25	0.42	0.42	0.62	1114.40	0.223
23	3.00	P 50 50	0.50	0.50	0.25	0.42	0.42	0.53	730.87	0.146
24	3.00	P 50 50	0.50	0.50	0.25	0.42	0.42	0.53	364.66	0.073
61	3.50	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.48	497.35	0.124
62	3.00	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.41	330.22	0.083
63	3.00	P 40 50	0.50	0.40	0.20	0.42	0.32	0.41	161.97	0.040

Columns																
id	ϕ 12	ϕ 16	ϕ 20	Longi [m2]	ratio [%]	ϕ [mm]	bi Distancia entre varões longi [m]	n	Transv [cm2/m]	Spacing [m]	Vcintas [cm3]	wwd	alpha n	alpha s	aplha	smax [m]	Eq. 5.15
1		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.057	0.787	0.475	0.374	0.128	-0.0005
2		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.057	0.787	0.475	0.374	0.128	-0.0005
3		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.067	0.787	0.475	0.374	0.128	-0.0133
4		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.067	0.787	0.475	0.374	0.128	-0.0248
5		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.067	0.787	0.475	0.374	0.128	0.0279
6		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.067	0.787	0.475	0.374	0.128	0.0052
7		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.057	0.787	0.475	0.374	0.128	-0.0163
8		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.067	0.787	0.475	0.374	0.128	0.0212
9		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.067	0.787	0.475	0.374	0.128	0.0016
10		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.057	0.787	0.475	0.374	0.128	-0.0175
11		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.067	0.787	0.475	0.374	0.128	0.0279
12		8		0.00161	0.0101	8	0.130	8	5.027	0.200	0.0012	0.067	0.787	0.475	0.374	0.128	-0.0005
13		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.050	0.879	0.526	0.462	0.153	0.0087
14		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.058	0.879	0.526	0.462	0.153	0.0052
15		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.058	0.879	0.526	0.462	0.153	0.0778
16		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.050	0.879	0.526	0.462	0.153	0.0390
17		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.058	0.879	0.526	0.462	0.153	0.0019
18		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.058	0.879	0.526	0.462	0.153	-0.0133
19		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.049	0.879	0.526	0.462	0.153	0.0087
20		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.058	0.879	0.526	0.462	0.153	-0.0132
21		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.058	0.879	0.526	0.462	0.153	-0.0052
22	4	4		0.00131	0.0052	8	0.181	8	5.027	0.200	0.0015	0.042	0.754	0.582	0.439	0.128	0.0339
23	4	4		0.00131	0.0052	8	0.181	8	5.027	0.200	0.0015	0.049	0.754	0.582	0.439	0.128	0.0102
24	4	4		0.00131	0.0052	8	0.181	8	5.027	0.200	0.0015	0.049	0.754	0.582	0.439	0.128	-0.0125
61		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.050	0.879	0.526	0.462	0.153	0.0154
62		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.058	0.879	0.526	0.462	0.153	-0.0016
63		6	4	0.00235	0.0118	8	0.103	10	5.027	0.200	0.0014	0.058	0.879	0.526	0.462	0.153	-0.0186

Columns	Verificações							
id	Verify Column Rebar Ratio	Verify Column Rebar Ratio	Verify Column Rebar All Faces	Verify Column Rebar Longi Dist	Verify Column Rebar Transv Spacing	Verify Column Normalized Axial Force	wwd*alpha	Verify Column Mechanical Vol Ratio Conf Reinf
1	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	6.10	45.94	0.72
2	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	6.10	45.94	0.72
3	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	9.71	1.88	0.83
4	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	21.93	1.01	0.83
5	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	3.35	0.90	0.83
6	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	5.24	4.80	0.83
7	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	11.28	1.31	0.72
8	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	3.75	1.18	0.83
9	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	5.76	15.76	0.83
10	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	12.07	1.22	0.72
11	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	3.35	0.90	0.83
12	1.01	3.98	1.00	1.54	0.64	6.10	53.59	0.83
13	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	6.03	2.64	0.62
14	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	6.55	5.14	0.72
15	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	2.33	0.34	0.72
16	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	3.56	0.59	0.62
17	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	7.13	13.85	0.72
18	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	12.14	2.01	0.72
19	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	6.03	2.63	0.62
20	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	12.14	2.03	0.72
21	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	8.83	5.16	0.72
22	0.52	7.63	1.00	1.10	0.64	2.92	0.55	0.53
23	0.52	7.63	1.00	1.10	0.64	4.45	2.13	0.62
24	0.52	7.63	1.00	1.10	0.64	8.91	1.74	0.62
61	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	5.23	1.49	0.62
62	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	7.87	17.15	0.72
63	1.18	3.40	1.25	1.94	0.76	16.05	1.44	0.72

Figura 56 -(Carreira, 2021 #9)

A10

FUNÇÕES DA CLASSE *REVITFUNCS* DESENVOLVIDO EM LINGUAGEM C#

```
10  namespace Dcm.Addin
11  {
        4 references
12      public class RevitFuncs
13      {
14
            1 reference
15          internal static List<BarData> GetSelectedRevitBarsData(UIDocument uiDoc)
16          {
17              var doc = uiDoc.Document;
18              var lst = new List<BarData>();
19              var label = LabelElements(uiDoc);
20
21              using (var tr = new Transaction(doc, "getSelectedBars"))
22              {
23                  tr.Start();
24                  new SetForcesColumns(doc);
25                  new SetForcesBeams(doc);
26
27                  foreach (var id in uiDoc.Selection.GetElementIds())
28                  {
29                      var el = doc.GetElement(id);
30                      if (el.Category == null) continue;
31                      var b = new BarData();
32                      b.rebar = new RebarProps();
33                      b.forces = new ForcesData();
34
35                      if (el.Category.Name == "Structural Columns" || el.Category.Name == "Structural Framing")
36                      {
37                          b.doc = doc;
38                          b.pData = GetPData(label, el);
39                          b.barName = b.pData.barName;
40                          b.RevitCategory = el.Category.Name;
41                          b.ID = el.UniqueId;
42                          b.shape = SectionData.GetElementShape(el, uiDoc);
43                          b.Axis = GetElementAxis(el, uiDoc);
44                          b.csArea = SectionData.GetArea(el, uiDoc);
45                          b.lc = GetCutLenght(el, uiDoc);
46                          b.relPosition = el.GetParameter2("Relative Position").AsString();
47                          b.rebar.dbw = GetRebarDiameterTransv(el, doc);
48                          b.rebar.bi = GetDistanceBetweenBars(el, doc);
49                          b.rebar.dbl = GetRebarDiameterLongi(el, doc);
50                          b.rebar.nbl = GetRebarLongiNumber(el, doc);
51                          b.rebar.As = GetRebarAreaLongi2(el, doc);
52                          b.rebar.sMax = GetRebarMaxSpacing(el, uiDoc);
53                          b.rebar.sMin = GetRebarMinSpacing(el, uiDoc);
54                          b.rebar.longi = GetRebarAsRebarLongi(el, doc);
55                          b.rebar.transv = GetRebarAsRebarTransv(el, doc);
56                          b.rebar.transvVolume = GetRebarTransvVolume(el, doc);
57                          b.rebar.spacingTransv = GetRebarSpacingTransv(el, uiDoc);
58                          b.rebar.rebarTopPts = GetRebarTopPoints(el, doc);
59                          b.rebar.cover = GetConcCover(el, doc);
```

```
60                          b.forces.axialF = Extensions.ConvertToDisplayUnitsForce(doc, el.GetParameter2("Nsd").AsDouble());
61                          b.forces.VRd = Extensions.ConvertToDisplayUnitsForce(doc, el.GetParameter2("VRd").AsDouble());
62                          GetTopAndBotRebar(el, uiDoc, out b.rebar.rebarTop, out b.rebar.rebarBottom, out b.rebar.rebarPts);
63
64                          if (b.RevitCategory == "Structural Framing")
65                          {
66                              b.bw = SectionData.MinEdgeDim(el, uiDoc);
67                              b.hw = SectionData.MaxEdgeDim(el, uiDoc);
68                              b.lcr = b.hw;
69                              b.zBase = GetZBeam(el, uiDoc);
70                              b.forces.beamMRdxx2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("Mrdxx+").AsDouble());
71                              b.forces.beamMRdxx1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("Mrdxx-").AsDouble());
72                              b.forces.beamMRdyy2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("Mrdxx+").AsDouble());
73                              b.forces.beamMRdyy1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("Mrdxx-").AsDouble());
74                              b.forces.beamVDist = Extensions.ConvertToDisplayUnitsForceDist(doc, el.GetParameter2("VDist").AsDouble());
75                          }
76                          else if (b.RevitCategory == "Structural Columns")
77                          {
78                              b.bc = SectionData.MaxEdgeDim(el, uiDoc);
79                              b.hc = SectionData.MaxEdgeDim(el, uiDoc);
80                              b.hf = SectionData.MaxEdgeDim(el, uiDoc);
81                              b.bo = GetConfinedWidth(el, uiDoc);
82                              b.ho = GetConfinedHeight(el, uiDoc);
83                              b.vo = GetConfinedVolume(el, uiDoc);
84                              b.lcr = GetColumnLcr(b);
85                              b.levelH = GetLevelHeightColumn(el, uiDoc);
86                              b.zBase = GetZBaseColumn(el, uiDoc);
87                              b.forces.columnMRdxxTop2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdxxTop+").AsDouble());
88                              b.forces.columnMRdyyTop2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdyyTop+").AsDouble());
89                              b.forces.columnMRdxxBottom2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdxxBottom+").AsDouble());
90                              b.forces.columnMRdyyBottom2 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdyyBottom+").AsDouble());
91                              b.forces.columnMRdxxTop1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdxxTop-").AsDouble());
92                              b.forces.columnMRdyyTop1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdyyTop-").AsDouble());
93                              b.forces.columnMRdxxBottom1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdxxBottom-").AsDouble());
94                              b.forces.columnMRdyyBottom1 = Extensions.ConvertToDisplayUnitsMoment(doc, el.GetParameter2("MrdyyBottom-").AsDouble());
95                          }
96                          lst.Add(b);
97                      }
98                  }
99                  tr.Commit();
100             }
101             return lst;
102         }
```

```
105     1 reference
        public static PositionData GetPOata(List<PositionData> lst, Element elem)...
114     1 reference
        public static List<PositionData> LabelElements(UIDocument uiDoc)...
149     1 reference
        public static int GetRebarLongiNumber(Element elem, Document doc)...
161     1 reference
        public static double GetRebarTransvVolume(Element elem, Document doc)...
173     5 references
        public static double GetConcCover(Element elem, Document doc)...
181     2 references
        public static double GetConfinedWidth(Element elem, UIDocument uiDoc)...
190     2 references
        public static double GetConfinedHeight(Element elem, UIDocument uiDoc)...
199     1 reference
        public static double GetConfinedVolume(Element elem, UIDocument uiDoc)...
207     1 reference
        public static double GetZBaseColumn(Element elem, UIDocument uiDoc)...
216     1 reference
        public static double GetZBeam(Element elem, UIDocument uiDoc)...
222     1 reference
        public static double GetLevelHeightColumn(Element elem, UIDocument uiDoc)...
228     1 reference
        public static double GetColumnLcr(BarData bar)...
243     1 reference
        public static double GetRebarMaxSpacing(Element elem, UIDocument uiDoc)...
255     1 reference
        public static double GetRebarMinSpacing(Element elem, UIDocument uiDoc)...
280     5 references
        public static List<List<double>> GetRebarSpacingTransv(Element elem, UIDocument uiDoc)...
320     2 references
        public static List<List<double>> GetRebarSpacingTransvIndp(Element elem, UIDocument uiDoc)...
347     2 references
        public static bool IsRebarDistOverlap(Element elem, UIDocument uiDoc)...
363     1 reference
        public static double GetDistanceBetweenBars(Element elem, Document doc)...
369     1 reference
        public static List<double> GetNearestRebarDistLongi(Element elem, Document doc)...
388     1 reference
        public static void GetTopAndBotRebar(Element elem, UIDocument uiDoc, out List<Point3D> lstTop, out List<Point3D> lstBot, out Dictionary<Point3D, double> points)...
408     2 references
        public static Dictionary<Point3D, double> GetRebarPointsDiam(List<Rebar> rebars, Document doc)...
426     1 reference
        public static List<Point3D> GetRebarTopPoints(Element elem, Document doc)...
444     1 reference
        public static Dictionary<Point3D, double> GetNearestPointsDiam(Dictionary<Point3D, double> points)...
476     1 reference
        public static List<Point3D> GetTopPoints(List<Segment3D> seg)...
487     1 reference
        public static List<Point3D> GetTopPoints2(List<Segment3D> seg)...
497     1 reference
        public static List<Rebar> GetRebarLongiR(List<Rebar> rebars)...
514     2 references
        public static List<Rebar> GetRebarTransvR(List<Rebar> rebars)...
531     2 references
        public static List<Segment3D> GetRebarSegLongi(Rebar rebar, Document doc)...
559     3 references
        public static double GetRebarDiameterTransv(Element el, Document doc)...
```

```
573     1 reference
        public static double GetRebarDiameterLongi(Element el, Document doc)...
587     1 reference
        public static double GetRebarAreaLongi2(Element el, Document doc)...
600     3 references
        public static double GetRebarDiameter(Element el, Document doc)...
604     2 references
        public static bool IsLongi(Element el)...
610     1 reference
        public static List<Element> GetRebarTransv(Element elem, Document doc)...
622     1 reference
        public static List<Element> GetRebarLongi(Element elem, Document doc)...
634     1 reference
        public static double GetRebarLength(Element elem, Document doc)...
638     2 references
        public static Dictionary<Element, double> GetRebarWithLength(Element el, Document doc)...
657     1 reference
        public static List<Rebar> GetRebarAsRebar(Element el, Document doc)...
670     2 references
        public static List<Rebar> GetRebarAsRebarTransv(Element el, Document doc)...

686     public static List<Rebar> GetRebarAsRebarLongi(Element el, Document doc)...

702     private static double GetCutLenght(Element el, UIDocument uiDoc)...
        11 references
712     public static Segment3D GetElementAxis(Element el, UIDocument uiDoc)...
721     1 reference
        private static Segment3D GetColumnAxisInterUnits(FamilyInstance instance, UIDocument uiDoc)...
738     1 reference
        internal static IEnumerable<PlanarFace> GetFamilyInstancePlanarFaces(FamilyInstance elem, bool verifyRefs)...
744 }
```

```
13 references
public class SectionData
{
    1 reference
    public static string GetElementShape(Element elem, UIDocument uiDoc)...
    2 references
    public static double GetArea(Element elem, UIDocument uiDoc)...
    1 reference
    public static List<Segment3D> VerifyEdges(List<Segment3D> lst)...
    1 reference
    public static bool AreInSameDirection(Segment3D s1, Segment3D s2)...
    1 reference
    public static Segment3D UniteSeg(Segment3D s1, Segment3D s2)...
    2 references
    public static List<Segment3D> GetEdgesTriSeg2(Element elem, UIDocument uiDoc)...
    1 reference
    internal static List<Point3D> GetFacePoints(Document doc, Face face, bool removeDuplicates = true)...
    2 references
    internal static string PointHash(Point3D point)...
    1 reference
    public static bool HasEqualPoint(Segment3D s1, Segment3D s2)...
    4 references
    public static bool ArePointEquals(Point3D p1, Point3D p2, double tol = 1e-4)...
    7 references
    public static double MaxEdgeDim(Element elem, UIDocument uiDoc)...
    3 references
    public static double MinEdgeDim(Element elem, UIDocument uiDoc)...
    1 reference
    internal static IEnumerable<Face> GetElementFaces(Element elem, bool verifyRefs)...
    1 reference
    internal static IEnumerable<Face> GetSolidsFaces(IEnumerable<Solid> solids, bool verifyRefs)...
    1 reference
    internal static IEnumerable<Face> GetSolidFaces(Solid solid, bool verifyRefs)...
    1 reference
    internal static IEnumerable<Solid> GetElementSolids(Element elem)...
    1 reference
    internal static IEnumerable<Solid> GetElementSolids(Options options, Element elem)...
    1 reference
    internal static IEnumerable<Solid> GetGeometryElementSolids(GeometryElement geomElement)...
}
}
```

Figura 57 - (Carreira, 2021 #9)

A11

FUNÇÕES DA CLASSE *BARDATA* DESENVOLVIDO EM LINGUAGEM C#

```
5   namespace Dcm.Common
6   {
        54 references
7       public class BarData
8       {
9           public PositionData pData;
10          public Document doc;
11          public string barName;
12          public string ID;
13          public string RevitCategory;
14          public string shape;
15          public double csArea;
16          public double lc;
17          public double bc;
18          public double hw;
19          public double bw;
20          public double hf;
21          public double bo;
22          public double ho;
23          public double vo;
24          public double lcr;
25          public double hc;
26          public string level;
27          public double levelH;
28          public double zBase;
29          public double eccentricity;
30          public string relPosition;
31          public List<Segment3D> edges;
32          public List<Triangle2D> triangles;
33          public Segment3D Axis;
34          public Tripod3D Tripod;
35          public RebarProps rebar;
36          public ForcesData forces;
37      }
```

```
        2 references
38      public class RebarProps
39      {
40          public double dbw;                          //diameter of boop
41          public double dbl;                          //longitudinal rebar diameter
42          public double nbl;                         // number of longitudinal rebar
43          public double bi;                           //distance between consecutive rebar engaged by a corner of a tie or by a cross-tie in a column
44          public double As;                           //longitudinal rebar area
45          public double Asc;                          //compression longitudinal rebar area
46          public double Ast;                          //tensile longitudinal rebar area
47          public double sMax;                         //Max spacing of transversal reinforcement
48          public double sMin;                         //Min spacing of transversal reinforcement
49          public List<Rebar> transv;                  //transversal rebar
50          public List<Rebar> longi;                  //longitudinal rebar
51          public double transvVolume;                 //transversal rebar volume
52          public List<List<double>> spacingTransv;    //transversal rebar spacing
53          public double cover;                        //rebar cover
54          public List<Point3D> rebarTop;
55          public List<Point3D> rebarTopPts;
56          public List<Point3D> rebarBottom;
57          public Dictionary<Point3D, double> rebarPts;
58      }
        2 references
59      public class ForcesData
60      {
61          public double axialF;
62          public double VRd;
63          public double beamNRd;
64          public double beamMRdxx1;
65          public double beamMRdxx2;
66          public double beamMRdyy1;
67          public double beamMRdyy2;
68          public double beamVDist;
69          public double columnNRd;
70          public double columnMRdxxTop1;
71          public double columnMRdxxTop2;
72          public double columnMRdyyTop1;
73          public double columnMRdyyTop2;
74          public double columnMRdxxBottom1;
75          public double columnMRdxxBottom2;
76          public double columnMRdyyBottom1;
77          public double columnMRdyyBottom2;
78      }
79  }
80
```

Figura 58 - (Carreira, 2021 #9)

A12

FUNÇÕES DA CLASSE *BARRESULTS*, *BEAMRESULTS*, *COLUMNSRESULTS*, E *JOINTRESULTS*, DESENVOLVIDO EM LINGUAGEM C#

```
6   public class BarResults
7   {
8       public BarData Bar { get; private set; }
9       public MaterialData.Concrete Concrete { get; private set; }
10      public MaterialData.Steel Steel { get; private set; }
11      public SeismicProps SeismicProp { get; private set; }
12      public int FailedVerification { get; set; } = 0;
13      public Verification verRebarTransvDiameter;
14      public BarResults(BarData bar, MaterialData.Concrete concrete, MaterialData.Steel steel, SeismicProps seismicProps)
15      {
16          Bar = bar;
17          Concrete = concrete;
18          Steel = steel;
19          SeismicProp = seismicProps;
20
21          Calculate();
22      }
23      public virtual void Calculate()...
27      public override string ToString()...
31      public class Verification
32      {
33          public bool Ver;
34          public double Ratio;
35          public string Txt;
36          public Verification(bool ver, double ratio, string txt)
37          {
38              this.Ver = ver;
39              this.Ratio = ratio;
40              this.Txt = txt;
41          }
42      }
43      // VERIFICATIONS
44      private Verification VerifyRebarTransvDiam()...
62      // FUNCTIONS
63      public double RebarArea(BarData bar, List<Point3D> ptsLst)...
78      public double GetNormalizedAxialForce(BarData bar, MaterialData.Concrete concrete)...
82      public static double GetMinValue(List<double> lst)...
93      public static double GetRebarArea(double diam)...
97  }
```

```
7   public class BeamResults : BarResults
8   {
9       public Verification verBExteriorInteriorRebarMaxDiam;
10      public Verification verBRebarTransvSpacingLcr;
11      public Verification verBFirstRebarTransv;
12      public Verification verBRebarTransvSpacing;
13      public Verification verBWidth;
14      public Verification verBRebarRatioTracMin;
15      public Verification verBRebarRatioTracMax;
16      public Verification verBRebarComp;
17      public Verification verMaxVrd;
18      public override void Calculate()
19      {
20          base.Calculate();
21
22          verBExteriorInteriorRebarMaxDiam = VerifyBeamExteriorInteriorRebarMaxDiam();
23          verBRebarTransvSpacingLcr = VerifyBeamRebarTransvSpacingLcr();
24          verBFirstRebarTransv = VerifyBeamFirstRebarTransv();
25          verBRebarTransvSpacing = VerifyBeamRebarTransvSpacing();
26          verBWidth = VerifyBeamWidth();
27          verBRebarRatioTracMin = VerifyBeamRebarRatioTracMin();
28          verBRebarRatioTracMax = VerifyBeamRebarRatioTracMax();
29          verBRebarComp = VerifyBeamRebarComp();
30          verMaxVrd = VerifyMaxVrd();
31      }
32      public BeamResults(BarData bar, MaterialData.Concrete concrete, MaterialData.Steel steel, SeismicProps seismicProps) : base(bar, concrete, steel, seismicProps)
33      {
34          // Calculate();
35      }
36      // VERIFICATIONS
37      public Verification VerifyBeamExteriorInteriorRebarMaxDiam()...
61      public Verification VerifyBeamRebarComp()...
84      public Verification VerifyBeamRebarRatioTracMax()...
104     public Verification VerifyBeamRebarRatioTracMin()...
125     public Verification VerifyBeamWidth()...
147     public Verification VerifyBeamRebarTransvSpacing()...
171     public Verification VerifyBeamFirstRebarTransv()...
197     public Verification VerifyBeamRebarTransvSpacingLcr()...
234     public Verification VerifyMaxVrd()...
```

```
258         // FUNCTIONS
259
            1 reference
260         public static double SpacingConditionsBeamLcr(BarData bar)...
            1 reference
270         public static double SpacingConditionsBeam(BarData bar)...
            2 references
274         public static double GetRebarRatioTrac(BarData bar)...
            2 references
290         public static double GetRebarRatioCompr(BarData bar)...
            2 references
306         public double MaxLongiRebarDiamInterior(BarData bar, MaterialData.Concrete concrete, MaterialData.Steel steel, SeismicProps seismicProps)...
            2 references
313         public double GetBeamRebarRatioTracMax(BarData bar, MaterialData.Concrete concrete, MaterialData.Steel steel, SeismicProps seismicProps)...
            1 reference
320         public double MaxLongiRebarDiamExterior(BarData bar, MaterialData.Concrete concrete, MaterialData.Steel steel)...
327     }
328 }
329
```

```
 4  namespace Dcm.Common
 5  {
        7 references
 6      public class ColumnResults : BarResults
 7      {
 8
 9          public Verification verCNormalizedAxialForce;
10          public Verification verCRebarMax;
11          public Verification verCRebarMin;
12          public Verification verCRebarAllFaces;
13          public Verification verCDuctilityFactor;
14          public Verification verCMechanicalVolRationConfReinf;
15          public Verification verCRebarTransvSpacing;
16          public Verification verCRebarLongiDist;
17          public Verification verMaxVrd;
18
19          public override void Calculate()
20          {
21              base.Calculate();
22
23              verCNormalizedAxialForce = VerifyColumnNormalizedAxialForce();
24              verCRebarMax = VerifyColumnRebarRatioMax();
25              verCRebarMin = VerifyColumnRebarRatioMin();
26              verCRebarAllFaces = VerifyColumnRebarAllFaces();
27              verCDuctilityFactor = VerifyColumnDuctilityFactor();
28              verCMechanicalVolRationConfReinf = VerifyColumnMechanicalVolRatioConfReinf();
29              verCRebarTransvSpacing = VerifyColumnRebarTransvSpacing();
30              verCRebarLongiDist = VerifyColumnRebarLongiDist();
31              verMaxVrd = VerifyMaxVrd();
32          }
33
```

```
            1 reference
34          public ColumnResults(BarData bar, MaterialData.Concrete concrete, MaterialData.Steel steel, SeismicProps seismicProps) : base(bar, concrete, steel, seismicProps)
35          {
36              //Calculate();
37          }
38
39          // VERIFICATIONS
            1 reference
40          public Verification VerifyMaxVrd()...
            1 reference
63          public Verification VerifyColumnNormalizedAxialForce()...
            1 reference
82          public Verification VerifyColumnRebarRatioMin()...
            1 reference
102         public Verification VerifyColumnRebarRatioMax()...
            1 reference
122         public Verification VerifyColumnRebarAllFaces()...
            1 reference
182         public Verification VerifyColumnDuctilityFactor()...
            1 reference
208         public Verification VerifyColumnMechanicalVolRatioConfReinf()...
            1 reference
226         public Verification VerifyColumnRebarTransvSpacing()...
            1 reference
244         public Verification VerifyColumnRebarLongiDist()...
261
262         // FUNCTIONS
263
            1 reference
264         public double GetAlpha(BarData bar)...
            1 reference
271         public double GetAlphaN(BarData bar)...
            1 reference
287         public double GetAlphaS(BarData bar)...
            2 references
306         public double GetMechanicalVolRationConfReinf(BarData bar, MaterialData.Concrete concrete, MaterialData.Steel steel)...
            1 reference
313         public static double SpacingConditionsColumn(BarData bar)...

323         internal static bool IsZero(double value, double tolerance = 1e-2)...
327
328     }
329 }
330
```

```
6   namespace Dcm.Common
7   {
8       public class JointResults
9       {
10          public Verification verEccentAxis;
11          public Verification verMomentRdXXNeg;
12          public Verification verMomentRdYYNeg;
13          public Verification verMomentRdXXPos;
14          public Verification verMomentRdYYPos;
15          public Point3D pSimp;

16          public Point3D Joint { get; private set; }

17          public List<BarData> Beams { get; private set; }

18          public List<BarData> Columns { get; private set; }

19          public JointResults(Point3D joint, List<BarData> beams, List<BarData> columns)...
31
32          // VERIFICATIONS

33          public Verification VerifyEccentAxis()...

89          public Verification VerifyMomentRdXXNeg()...

124         public Verification VerifyMomentRdYYNeg()...
            1 reference
160         public Verification VerifyMomentRdXXPos()...
            1 reference
194         public Verification VerifyMomentRdYYPos()...
229         //FUNCTIONS
            0 references
230         public static string PointHash(Point3D point)...
            2 references
234         internal static bool IsZeroDistPoints(Point3D p0, Point3D p1, double tolerance = .3)...
238     }
239 }
240
```

Figura 59 -(Carreira, 2021 #9)