U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE CÁLCULO AUTOMÁTICO NO ÂMBITO DO PROJETO DE ESTRUTURAS

TIAGO MIGUEL ANTUNES DE SOUSA TAVARES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Álvaro Ferreira Marques Azevedo

JULHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ 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 Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

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.

À minha família e amigos

O conhecimento não ocupa lugar

Ditado popular

AGRADECIMENTOS

É com grande estima e sinceridade que manifesto a minha gratidão a todos aqueles que me apoiaram e contribuíram, diretamente ou indiretamente, para a elaboração do presente trabalho. De um modo especial, agradeço:

- Ao Professor Doutor Álvaro Azevedo por todo o empenho demonstrado na orientação, disponibilidade, sugestões, incentivo, paciência e por todo o conhecimento transmitido o qual serviu de grande base para a sua elaboração;

- Aos colegas da empresa S.E. – Serviços de Engenharia, Lda, com especial agradecimento ao Engenheiro José Manuel Sousa, por ter encorajado e proporcionado efetuar este trabalho;

- À minha mulher e melhor amiga, Andrea Tavares, por todo amor e carinho com que me apoiou em todo o tempo, por todas as palavras de incentivo e encorajamento, claramente foi um grande suporte para este trabalho. Agradeço também ao meu filho Francisco Tavares que, apesar da sua juventude e inocência, compreendeu quando tive que estar ausente;

- Finalmente, à minha Família e amigos, e em particular aos meus Pais e Irmãos, por todo o apoio e afecto transmitidos em todas as ocasiões.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo principal a comparação de modelos de cálculo automático, no âmbito do projeto de estruturas.

Pretende-se ainda o conhecimento de modelos de análise estrutural de elementos laminares. Para tal é feita uma apresentação do método de analogia com elementos de grelha e compara-se com o método dos elementos finitos.

São efectuados e comparados modelos de cálculo automático de três casos reais de estruturas laminares, com geometrias e ações distintas.

O primeiro é referente a uma estrutura para túneis de compostagem de uma central de valorização de resíduos sólidos orgânicos, no qual se efetua três modelos de cálculo automático – dois modelos no programa Autodesk Robot Structural Analysis, com elementos de grelha e elementos finitos, e um no programa SAP2000, com elementos finitos.

O segundo é referente a uma estrutura para um tanque/reator de apoio à produção de biogás de uma central de valorização de resíduos orgânicos, no qual se efetua dois modelos de cálculo automático – um modelo de elementos finitos no programa Autodesk Robot Structural Analysis e outro modelo com elementos de grelha no programa Novo Metal 3D.

O terceiro é referente a uma estrutura para um tanque de tratamento biológico de uma central de tratamento de águas residuais, no qual se efetua dois modelos de cálculo automático – um modelo de elementos finitos no programa Autodesk Robot Structural Analysis e outro modelo com elementos finitos no programa CypeCad.

É feita uma abordagem do funcionamento e das condições operacionais que estão sujeitas as respectivas estruturas. São identificadas as ações e as características necessárias para a durabilidade.

Aproveita-se também para identificar algumas fragilidades na utilização de programas de cálculo automático, bem como algumas estratégias de resolução dos mesmos.

Por último é efectuado um dimensionamento estrutural de um dos casos apresentados, através do método preconizado no anexo F da norma europeia EN1992-1-1. Compara-se estes resultados com os do método tradicional.

PALAVRAS-CHAVE: Comparação de Programas de Cálculo Automático, Estruturas Laminares, Analogia de Grelha, Método dos Elementos Finitos, Análise Estrutural.

ABSTRACT

The main objective of the present work is the comparison of computer models in the context of the design of structures.

It is intended to further the knowledge of structural analysis models of laminar elements. For this purpose, the method of grillage analogy is described and compared with the finite element method.

Computer models of three real world cases of shell structures with different geometries and actions are described and compared.

The first concerns a structure for a composting tunnel system for the valuation of organic waste, for which three computer models were developed – two models in Autodesk Robot Structural Analysis software, with grid elements and finite elements, and the other in SAP2000 software, with finite elements.

The second case study refers to a structure of a tank / reactor for biogas production from organic waste, for which two computer models were prepared – a finite element model in Autodesk Robot Structural Analysis software, and the other based on grid elements using Metal 3D software.

The third studied example concerns a structure for a biological treatment tank of a wastewater treatment plant, for which two types of computer models were developed – a finite element model in Autodesk Robot Structural Analysis software, and the other using finite elements and the CypeCad software.

An explanation of the operational conditions to which the abovementioned structures are subjected is presented. Loads acting on the structure and the necessary characteristics for the durability of concrete are identified.

Some difficulties in the use of computer programs are identified as well as some strategies for overcoming them.

Finally, a structural design of one of the presented cases using the methodology recommended in Annex F of the European standard EN1992-1-1 is presented. The results are compared with those obtained with the traditional methodology for the design of structures.

KEYWORDS: Comparison of Structural Analysis Software, Shell Structures, Grillage Analogy, Finite Element Analysis, Structural Analysis.

.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 13
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO 13
1.2. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS 15

2. ANÁLISE DE ESTRUTURAS LAMINARES 17
2.1. INTRODUÇÃO 17
2.2. MÉTODOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL DE ELEMENTOS LAMINARES 19
2.2.1 ENQUADRAMENTO NA NORMA NP EN1992-1-1 20
2.2.2 MÉTODO DE ELEMENTOS DE GRELHA 21
2.2.4.1. Modelação de cascas ou membranas com elementos de grelha 22
2.2.4.2. Discretização a adoptar 24
2.2.4.3. Características geométricas dos elementos de grelha 28
2.2.4.4. Simulação das condições de apoio 31
2.2.4.5. Carregamento a considerar 33
2.2.4.6. Análise da solução 34
2.2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS – BREVE REFERÊNCIA 35
2.2.4 BREVE DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS DE CÁLCULO UTILIZADOS 38
2.2.4.1. Autodesk Robot Structural Analysis 38
2.2.4.2. SAP2000 41
2.2.4.3. CypeCad 44
2.2.4.4. Novo Metal 3D 45
2.3. MODELAÇÃO DAS FUNDAÇÕES DE ESTRUTURAS – MÉTODO DE WINKLER 46

3. CASO DE ESTUDO Nº1: TUNÉIS DE COMPOSTAGEM 51
3.1. INTRODUÇÃO 51
3.2. DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA CVO 52

3.3. TÚNEIS DE COMPOSTAGEM – CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL 57
3.3.1. GEOMETRIA 57
3.3.2. MATERIAIS E DURABILIDADE 58
3.3.3. AÇÕES E COMBINAÇÕES 61
3.3.4. AÇÃO TÉRMICA – JUSTIFICAÇÃO 63
3.4. MODELAÇÃO EM PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO 69
3.4.1. MODELO DE ELEMENTOS DE GRELHA 69
3.4.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS 71
3.4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS 74
3.4.3.1. Ação Permanente 75
3.4.3.2. Sobrecargas 79
3.4.3.3. Ação Térmica Operacional 80
3.4.3.4. Ação do Vento 85
3.4.3.5. Ação do Sismo 86
3.4.3.6. Combinação de Ações 88
3.4.3.7. Conclusão 91

4. CASO DE ESTUDO Nº2: TANQUE/REATOR 93
4.1. INTRODUÇÃO 93
4.2. TANQUE/REATOR DA CVO – CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL 93
4.2.1. BREVE EXPLICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO 93
4.2.2. GEOMETRIA 94
4.2.3. MATERIAIS E DURABILIDADE 94
4.2.4. AÇÕES 95
4.2.5. AÇÃO TÉRMICA – JUSTIFICAÇÃO 95
4.3. MODELAÇÃO EM PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO 96
4.3.1. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS 96
4.3.2. MODELO DE ELEMENTOS DE GRELHA 97
4.3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS 98
4.3.3.1. Impulso da Água 98
4.3.3.2. Temperatura 101
4.3.3.3. Conclusões 106

5. CASO DE ESTUDO Nº3: TANQUE DE ETAR 107

5.1. INTRODUÇÃO 107

5.2. TANQUE DO TRATAMENTO BIOLÓGICO (SBR) – CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL 108

5.2.1. BREVE EXPLICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO 108

5.2.2. GEOMETRIA 109

5.2.3. MATERIAIS E DURABILIDADE 110

5.2.4. AÇÕES 111

5.2.5. AÇÃO TÉRMICA – JUSTIFICAÇÃO 112

5.3. MODELAÇÃO EM PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO 112

5.3.1. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS – ROBOT 112

5.3.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS – CYPECAD 113

5.3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS 114

5.3.3.1. Impulso da Água 115

5.3.3.2. Impulso do Solo 120

5.3.3.3. Conclusões 121

6. DIMENSIONAMENTO 123

6.1. INTRODUÇÃO 123

6.2. METODOLOGIA DA NP EN 1992-1-1 124

6.3. DIMENSIONAMENTO DE UM CASO DE ESTUDO – TÚNEIS DE COMPOSTAGEM 128

6.3.1. ESFORÇOS DE DIMENSIONAMENTO 129

6.3.2. DIMENSIONAMENTO PELA METODOLOGIA DO ANEXO F 129

6.3.3. DIMENSIONAMENTO PELA METODOLOGIA CONVENCIONAL 132

6.3.4. DIMENSIONAMENTO SEGUNDO O ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO 133

6.3.5. SOLUÇÃO FINAL 136

7. CONCLUSÕES 139

7.1. CONCLUSÕES 139

7.2. SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de estruturas laminares: lajes e muros (arquivo pessoal) 17

Figura 2.2 – Exemplo de estruturas laminares: paredes e cascas (arquivo pessoal) 17

Figura 2.3 – Placa e laje: estruturas laminares planas (adaptado de Castro e Leitão [3]) 18

Figura 2.4 – Casca/membrana: estrutura laminar não plana (adaptado de Castro e Leitão [3]) 18

Figura 2.5 – Placa traccionada (adaptado de Castro e Leitão [3]) 19

Figura 2.6 – Exemplo da aplicação a uma laje do método de elementos de grelha (adaptado de [14] e [15]) 21

Figura 2.7 – Comparação de elementos (adaptado de Castro [9]) 22

Figura 2.8 – Nº de graus de liberdade no nó da grelha: 1 translação e 2 rotações 23

Figura 2.9 – Representação dos esforços (adaptado de Castro [9]) 23

Figura 2.10 – Divisão em faixas (adaptado de Castro [9]) 24

Figura 2.11 – Eixos dos elementos de grelha a considerar na modelação (adaptado de Castro [9]) .. 25

Figura 2.12 – Malha final: modelação com recurso a elementos de grelha (adaptado de Castro [3]) . 25

Figura 2.13 – Malha normalmente utilizada em elementos de grelha (adaptado de Castro [9]) 26

Figura 2.14 – Exemplos de modelação com elementos de grelha: bordo livre e encastrado (adaptado de Castro [9]) 26

Figura 2.15 – Exemplos de modelação com elementos de grelha: laje com pilares (adaptado de Castro [9]) 27

Figura 2.16 – a) Deformação por flexão das vigas com eixo paralelo ao eixo x; b) Deformação da secção transversal (adaptado de Castro e Leitão [3]) 28

Figura 2.17 - Deformada das secções transversais; momento a aplicar segundo a direção transversal (adaptado de castro e Leitão [3]) 29

Figura 2.18 – Exemplo: bordo encastrado (adaptado de Castro [9]) 31

Figura 2.19 – Exemplo: bordo simplesmente apoiado (adaptado de Castro [9]) 31

Figura 2.20 – Exemplo: pilares (adaptado de Castro [9]) 32

Figura 2.21 – Exemplo: Bordo de Continuidade (adaptado de Castro [9]) 32

Figura 2.22 – Simulação de grelha em laje de fundação com apoios elásticos 32

Figura 2.23 – Áreas de influência a considerar na determinação das cargas nodais concentradas ou cargas distribuídas nas barras (adaptado de Castro [9] e Hennrichs [15]) 33

Figura 2.24 – Exemplo de uma malha de elementos finitos 35

Figura 2.25 – Refinamento de uma malha de elementos finitos 36

Figura 2.26 – Exemplo: elemento finito de 4 e 8 nós 36

Figura 2.27 – Graus de liberdade num nó de um elemento finito 37

Figura 2.28 – Tipos de cálculos ROBOT 38

Figura 2.29 – Exemplo: malhas automáticas do ROBOT; a) Método de Coons ; b) Método Delaunay39

Figura 2.30 – Convenção de sinais do programa ROBOT: a) Em painéis; b) Em barras 40

Figura 2.31 – Template SAP2000 41

Figura 2.32 – Exemplo de malhas geradas pelo SAP2000: elemento quadrangular de 4 nós 42

Figura 2.33 – Tipo de elementos finitos SAP2000 42

Figura 2.34 – Convenção de sinais de um elemento finito no programa SAP2000 43

Figura 2.35 – Tipo de apoios numa fundação (adaptado de [23]) 46

Figura 2.36 – Exemplo de Interação do solo com o modelo estrutural com recuso a elementos finitos volumétricos (adaptado de Monteiro [27]) 47

Figura 2.37 – Rotações de uma sapata assente num meio elástico sob ação de momentos (adaptado de Fernandes [28]) 48

Figura 2.38 – Distribuição de apoios elásticos ao longo de uma fundação 50

Figura 3.1 – Fotografia aérea: localização GPS: N 39° 05´22,14"; W 07° 43´28,67" 51

Figura 3.2 – Esquema da CVO 52

Figura 3.3 – Grua em ponte rolante; tratamento mecânico (arquivo pessoal) 52

Figura 3.4 – Túneis de compostagem via aeróbia (arquivo pessoal) 53

Figura 3.5 – Esq.) Túneis de compostagem (via anaeróbia); Dir.) Depósito/reator de percolato/lixiviados 53

Figura 3.6 – Esquemas do sistema de adição de ar, do sistema de recolha de água e do sistema de rega 54

Figura 3.7 – Esquema de funcionamento da compostagem anaeróbia 55

Figura 3.8 – Motogerador e queimador de gás (arquivo pessoal) 55

Figura 3.9 – Biofiltro (arquivo pessoal) 56

Figura 3.10 – Compostagem/maturação em pilhas (arquivo pessoal) 56

Figura 3.11 – Túneis de compostagem: planta (s/ escala) 57

Figura 3.12 – Túneis de compostagem: corte 1-1 (s/ escala) 58

Figura 3.13 – Túneis de compostagem: corte 2-2 (s/ escala) 58

Figura 3.14 – Diagrama das componentes de um perfil de temperatura 63

Figura 3.15 – Principais componentes da temperatura para condutas, silos, reservatórios e torres de arrefecimento 64

Figura 3.16 – Mapa de Portugal com zonamento térmico para as condições de Inverno (T_{min}) e verão (T_{max}) por concelhos 65

Figura 3.17 – Perfil térmico de elemento de duas camadas; esquema da variação de temperatura .. 67

Figura 3.18 – Esquema 3D dos túneis com elementos de barra 70

Figura 3.19 – Esquema 3D dos túneis com a discretização dos elementos finitos (ROBOT) 71

Figura 3.20 – Esquema 3D dos túneis com a discretização dos elementos finitos (SAP2000) 72

Figura 3.21 – Discretização da parede do fundo no túnel (ROBOT): negativos para ventilação 72

Figura 3.22– Discretização da parede do fundo no túnel (SAP2000): negativos para ventilação 73

Figura 3.23 – Menu do espectro sísmico, ROBOT 73

Figura 3.24 – Menu do espectro sísmico, SAP2000 74

Figura 3.25 – Sistema de eixos dos túneis 74

Figura 3.26 – Deformada para a ação PP_REV (SAP2000) 75

Figura 3.27 – Momentos flectores em x e y da ação PP_REV (ROBOT, modelo de elementos finitos) 76

Figura 3.28 – Esforço de corte em x e y da ação PP_REV (ROBOT, modelo de elementos finitos)... 77

Figura 3.29 – Esforço axial da ação PP_REV (ROBOT, modelo de elementos finitos e SAP2000).... 78

Figura 3.30 – Deformada da ação SOBRE_PISO e SOBRE_PISO_1 (ROBOT, modelo de elementos de grelha) 79

Figura 3.31 – Deformada da ação TEMP e TEMP_1 (SAP2000)..... 80

Figura 3.32 – Momentos flectores em x da ação TEMP e TEMP_1 (ROBOT, modelo de elementos finitos) 82

Figura 3.33 – Momentos flectores em x eixo y-10 da ação TEMP e TEMP_1 (ROBOT, modelo de elementos grelha)..... 82

Figura 3.34 – Momentos flectores em y da ação TEMP e TEMP_1 (ROBOT, modelo de elementos finitos) 83

Figura 3.35 – Momentos flectores em x eixo x-2.5 da ação TEMP (ROBOT, modelo de elementos grelha)..... 84

Figura 3.36 – Deformada da ação VENTO 85

Figura 3.37 – Deformada da ação SISMO X e Y TIPO 1 86

Figura 3.38 – Momentos flectores e esforço transverso em x da ação SISMO X TIPO1 (ROBOT, modelo de elementos finitos) 87

Figura 3.39 – Momentos flectores em x e y da combinação de ação COMB 1 (ROBOT, modelo de elementos finitos) 88

Figura 3.40 – Esforço transverso em x e y da combinação de ação COMB 1 (ROBOT, modelo de elementos finitos) 89

Figura 3.41 – Esforço axial vertical da combinação de ação COMB 1 (SAP2000, modelo de elementos finitos) 90

Figura 4.1 – Tanque/reator de produção de biogás (arquivo pessoal)..... 93

Figura 4.2 – Corte do tanque reator (s/ escala) 94
Figura 4.3 – Esquema 3D e malha de elementos finitos (ROBOT) 96
Figura 4.4 – Esquema 3D e malha de elementos de grelha (Novo Metal 3D) 97
Figura 4.5 – Deformada devido à ação IMP_AG (Novo Metal 3D) 98
Figura 4.6 – Momento flector vertical devido à ação IMP_AG (ROBOT) 99
Figura 4.7 – Esforço transverso vertical devido à ação IMP_AG (ROBOT) 99
Figura 4.8 – Esforço axial horizontal devido à ação IMP_AG (ROBOT) 100
Figura 4.9 – Deformada devido à ação TEMP_UNIF (Novo Metal 3D) 101
Figura 4.10 – Momento flector vertical devido à ação TEMP (ROBOT) 103
Figura 4.11 – Esforço transverso vertical devido à ação TEMP (ROBOT) 103
Figura 4.12 – Esforço axial horizontal devido à ação TEMP (ROBOT) 105

Figura 5.1 – Vista área da atual ETAR: localização GPS: N 41º 09´51,25”; W 08º 33´46,81” 107
Figura 5.2 – Planta com a proposta para ampliação da ETAR 108
Figura 5.3 – a) Exemplo tanque SBR; b) Exemplo de difusores de fundo 109
Figura 5.4 – Planta do fundo do tanque SBR (s/ escala) 109
Figura 5.5 – Corte 1-1 do tanque SBR (s/escala) 110
Figura 5.6 – Esquema 3D e malha de elementos finitos (ROBOT) 112
Figura 5.7– Esquema 3D e malha de elementos finitos (CypeCad) 113
Figura 5.8 – Deformada devido à ação IMP_AG e IMP_AG_1 (CypeCad) 115
Figura 5.9 – Eixo A: momentos flectores verticais da ação IMP_AG (ROBOT) 116
Figura 5.10 – Eixo A: momentos flectores horizontais da ação IMP_AG (ROBOT) 116
Figura 5.11 – Eixo A: esforço transverso vertical da ação IMP_AG (ROBOT) 116
Figura 5.12 – Eixo A: esforço transverso horizontal da ação IMP_AG (ROBOT) 116
Figura 5.13 – Eixo 1: momentos flectores verticais da ação IMP_AG (ROBOT) 117
Figura 5.14 – Eixo 1: momentos flectores horizontais da ação IMP_AG (ROBOT) 117
Figura 5.15 – Eixo 1: momentos flectores verticais da ação IMP_AG_1 (ROBOT) 118
Figura 5.16 – Eixo 1: momentos flectores horizontais da ação IMP_AG_1 (ROBOT) 118
Figura 5.17 – Eixo 1: esforço transverso vertical da ação IMP_AG_1 (ROBOT) 119
Figura 5.18 – Eixo 1: esforço transverso horizontal da ação IMP_AG_1 (ROBOT) 119
Figura 5.19 – Deformada para a ação IMP_SOLO (CypeCad) 120
Figura 5.20 – Eixo A: momentos flectores em y da ação IMP_SOLO (ROBOT) 120
Figura 5.21 – Eixo A: esforço transverso em y da ação IMP_AG (ROBOT) 121

Figura 6.1 – Elemento laminar a) Tensões resultantes; b) Modelo das três camadas..... 123
Figura 6.2 – Esforços normais e momentos flectores nas camadas exteriores 125
Figura 6.3 – Esforços de corte e momentos de torção nas camadas exteriores..... 125
Figura 6.4 – Aspecto gráfico da folha de cálculo 136
Figura 6.5 – Localização dos nós..... 137

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Classes de exposição (adaptado de [30]) 59
Quadro 3.2 – Valores de $c_{min,dur}$ em mm (adaptado de [30]) 60
Quadro 3.3 – Ações consideradas 61
Quadro 3.4 – T_{min} e $T_{máx}$ em Portugal 65
Quadro 3.5 – Denominação das ações consideradas nos modelos cálculo 69
Quadro 3.6 – Valor das constantes elásticas dos apoios de fundação 70
Quadro 3.7 – Comparação do U_z entre modelos (PP_REV) 75
Quadro 3.8 – Comparação do M_x e do M_y entre modelos (PP_REV) 76
Quadro 3.9 – Comparação do V_x e do V_y entre modelos (PP_REV) 77
Quadro 3.10 – Comparação do N_y entre modelos (PP_REV) 78
Quadro 3.11 – Comparação do U_z entre modelos (SOBRE_PISO e SOBRE_PISO_1) 79
Quadro 3.12 – Comparação do U_x, U_y e U_z entre modelos (TEMP) 80
Quadro 3.13 – Comparação do U_x, U_y e U_z entre modelos (TEMP) 81
Quadro 3.14 – Comparação do M_x entre modelos (TEMP) 82
Quadro 3.15 – Comparação do M_x entre modelos (TEMP_1) 83
Quadro 3.16 – Comparação do M_y entre modelos (TEMP e TEMP_1) 84
Quadro 3.17 – Comparação do U_x entre modelos (VENTO) 85
Quadro 3.18 – Comparação do U_x e do U_y entre modelos (SISMO X e Y TIPO 1) 86
Quadro 3.19 – Comparação do M_x e do V_x entre modelos (SISMO X TIPO 1) 87
Quadro 3.20 – Comparação do M_x e do M_y entre modelos (COMB 1) 88
Quadro 3.21 – Comparação do V_x e do V_y entre modelos (COMB 1) 89
Quadro 3.22 – Comparação do N_x entre modelos (COMB 1) 90

Quadro 4.1 – Ações consideradas 95
Quadro 4.2 – Denominação das ações consideradas nos modelos cálculo 98
Quadro 4.3 – Comparação do U_x entre modelos (IMP_AG) 99
Quadro 4.4 – Comparação do $M_{vertical}$ e do $V_{vertical}$ entre modelos (IMP_AG) 100
Quadro 4.5 – Comparação do $N_{horizontal}$ entre modelos (IMP_AG) 101
Quadro 4.6 – Comparação do U_x, U_y e U_z entre modelos (TEMP_UNIF e TEMP_UNIF_1) 102
Quadro 4.7 – Comparação do $M_{vertical}$ e do $V_{vertical}$ entre modelos (TEMP_UNIF e TEMP_UNIF_1) 104
Quadro 4.8 – Comparação do $N_{horizontal}$ entre modelos (TEMP_UNIF e TEMP_UNIF_1) 105

Quadro 5.1 – Ações consideradas 111
Quadro 5.2 – Valor das constantes elásticas dos apoios de fundação 113
Quadro 5.3 – Denominação das ações consideradas nos modelos de cálculo 114
Quadro 5.4 – Comparação do U_x e U_y entre modelos (IMP_AG) 115
Quadro 5.5 – Eixo A e 1: comparação do M e do V entre modelos (IMP_AG) 117
Quadro 5.6 – Eixo 1: comparação do M e do V entre modelos (IMP_AG) 118
Quadro 5.7 – Eixo 1: comparação do M e do V entre modelos (IMP_AG_1) 119
Quadro 5.8 – Comparação do U_x e U_y entre modelos (IMP_SOLO) 120
Quadro 5.9 – Eixo 1: comparação do M e do V entre modelos (IMP_SOLO) 121

Quadro 6.1 – Combinação de ações consideradas no dimensionamento (ULS) 128
Quadro 6.2 – Quadro resumo de armaduras 137

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

CVO – Central de valorização de resíduos sólidos urbanos

MEF – Método dos elementos finitos

ULS – Estados limites últimos

SBR – Reatores Biológicos Sequenciais

SLS - Estados limites de utilização

A_c – Área da secção transversal de betão

A_s – Área da secção de uma armadura para betão armado

$A_{s,min}$ – Área da secção mínima de armaduras

b – Largura de um elemento de betão armado

d – Altura útil de uma secção transversal

E - Módulo de elasticidade

EI – Rigidez à flexão

G – Módulo de distorção

G_k – Valor característico de uma ação permanente

h – Altura ou espessura de um elemento de betão armado

I – Momento de inércia da secção de betão

I_{eq} – Inércia equivalente

J_{eq} – Rigidez de torção equivalente

l_b – Corresponde à largura da faixa de laje modelado pelo elemento de grelha

Q_k – Valor característico de uma ação variável

V_{Ed} – Valor de cálculo do esforço transverso atuante

N_x ou n_x – Esforço axial na direção x

N_y ou n_y – Esforço axial na direção y

M_x ou m_x – Momento flector na direção x

M_y ou m_y – Momento flector na direção y

M_{xy} ou m_{xy} – Momento torsor

V_x ou v_x – Esforço transverso na direção x

V_y ou v_y – Esforço transverso na direção y

R_x ou θ_x – Rotação na direção x

R_y ou θ_y – Rotação na direção y

R_z ou θ_z – Rotação na direção z

U_x ou w_x – Deslocamento na direção x

U_y ou w_y – Deslocamento na direção y

U_z ou w_z – Deslocamento na direção z

$\varepsilon^l{}_s$ – Extensão axial das fibras longitudinais na face superior da viga

$\varepsilon^l{}_i$ – Extensão axial das fibras longitudinais na face inferior da viga

ν – Coeficiente de Poisson

f_{ck} – Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias

f_{cd}– Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão

f_{yk} – Valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado

f_{yd} – Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado

γ_G – Coeficiente parcial relativo às ações permanentes, G

γ_Q– Coeficiente parcial relativo às ações variáveis, Q

ρ_l – Taxa de armaduras longitudinais

σ_c– Tensão de compressão no betão

σ_{cp} – Tensão de compressão no betão devida a um esforço normal ou ao pré-esforço

τ – Tensão tangencial de torção

Ø – Diâmetro de um varão

ψ_0 – Coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável

ψ_1 – Coeficiente para a determinação do valor frequente de uma ação variável

ψ_2 – Coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

É evidente o paralelismo entre a evolução dos programas de cálculo automático de estruturas e a evolução tecnológica dos computadores. Este foi potenciado, sobretudo na década de 90, com a exponencial evolução das ferramentas de processamento e armazenamento de dados, as quais permitiram a evolução, quer em dimensão quer em velocidade, do cálculo de grande escala. O desenvolvimento de ferramentas de processamento de imagens gráficas tridimensionais e de interação virtual é também condição fundamental para o desenvolvimento dos referidos programas. De facto é impensável o cálculo de grande escala sem haver uma imagem tridimensional do que se pretende calcular.

Outro paralelismo ocorrido nos últimos anos é o da evolução tecnológica com a da economia de escala, sobretudo nos novos mercados emergentes. Vivemos cada vez mais num mercado global, em que o conceito de fronteira "deixou" de ser uma barreira para as empresas, sendo a qualidade, a capacidade de resposta e a rapidez factores determinantes na competitividade entre empresas.

É com naturalidade que, hoje em dia, seja impensável efetuar projetos de estabilidade sem o auxílio destas ferramentas de cálculo automático. A utilização de programas adequados é uma condição necessária para um bom projeto não sendo, porém, condição suficiente.

Pode-se definir que num bom projeto de estabilidade são seguidas normalmente as seguintes etapas:

- Definição – Análise e formulação do problema;
- Concepção – Proposta de uma solução para o problema, é a parte mais nobre do processo onde normalmente está o engenho do engenheiro;
- Análise estrutural e dimensionamento – Etapa mais sensível de um projeto de estabilidade.
- Materialização gráfica – Etapa mais importante, a estrutura é concebida fisicamente, em grande parte, por estes elementos;
- Descrição, justificação – Parte escrita do projeto, onde é descrita e justificada a concepção da estrutura.
- Especificação – Onde são definidas as especificações relativas à execução e aos materiais.

Obviamente que iterações são possíveis e, muitas vezes, as diferentes fases do projeto decorrem em simultâneo.

Todas estas etapas levam o seu devido tempo a concretizar-se, contudo, com a evolução tecnológica, associada à utilização de programas de cálculo automático permitiu que tempo "gasto" no cálculo

estrutural fosse substancialmente reduzido. Poderia pensar-se que deste modo se passaria a ter mais tempo para análise de resultados e optimização estrutural. Porém, com a exigência atual do mercado, no qual a rapidez da resposta é muitas vezes factor condicionante, esta poupança de tempo parece apenas permitir que os engenheiros produzam maior volume de trabalho com menor pensamento criativo. Uma análise estrutural muito rápida, sem o devido amadurecimento, aliada ao mau conhecimento do funcionamento do programa de cálculo automático leva muitas vezes ao erro. Este pode implicar um mau desempenho estrutural, que no limite pode levar ao colapso, mas também pode implicar um sobredimensionamento estrutural, obviamente com implicações económicas.

É assim importante, para um engenheiro projetista, que se conheça bem o funcionamento dos programas de cálculo. Para tal e de modo a "ganhar-se confiança" no programa de cálculo automático, torna-se necessário que se teste o mesmo. Estes testes podem ser feitos através da comparação de modelos simples os quais são de fácil resolução analítica. Outro modo de testar os programas é através da comparação de um mesmo modelo em vários programas de cálculo automático, sobretudo em estruturas laminares com inúmeras variáveis, no qual a resolução analítica é demorosa e complicada. É neste sentido que surge o presente estudo, objecto da dissertação.

Assim sendo os objetivos propostos para a presente dissertação são:

- Análise comparativa de modelos estruturais com recurso a programas de cálculo automático, através de elementos de grelha e de elementos finitos;
- Comparar resultados de programas comerciais em termos de deslocamentos, esforços e identificar diferenças;
- Identificar fragilidades dos programas de cálculo automático;
- Efetuar o dimensionamento de uma estrutura laminar, através da metodologia preconizada na norma europeia NP EN1992-1-1 [1].

Para tal foram escolhidos três estruturas de projetos reais, e foram modeladas com o recurso aos seguintes programas comerciais:

- Autodesk Robot Structural Analysis (ROBOT), versão 2013;
- SAP2000, versão 15;
- CypeCad, versão 2013, licença "after hours";
- Novo Metal 3D, versão 2013, licença "after hours".

1.2. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS

Os objetivos propostos na presente dissertação estão desenvolvidos em sete capítulos, descritos nos pontos seguintes:

- Capítulo 1 – É feito o enquadramento do tema do trabalho, ao nível do âmbito em que este se insere, e são descritos, de uma forma geral, os objetivos e o conteúdo dos capítulos que constituem a dissertação;

- Capítulo 2 – É abordada a análise estrutural de estruturas laminares de betão armado, mencionando-se os aspectos mais importantes para a modelação estrutural deste tipo de estruturas, e estão descritas algumas recomendações fundamentadas por outros autores. Faz-se ainda uma breve descrição dos programas de cálculo automático utilizados neste trabalho;

- Capítulo 3 – É apresentado o primeiro caso prático, túneis de compostagem de uma central de valorização de resíduos orgânicos, explicando em traços gerais o funcionamento da central e é descrito mais pormenorizadamente o funcionamento dos túneis. Os modelos efectuados nos programas de cálculo automático são explicados, compara-se os resultados obtidos e apresenta-se as respectivas conclusões;

- Capítulo 4 – Descreve-se o segundo caso prático, depósito reator de apoio à produção de biogás da central de valorização de resíduos orgânicos, descrevendo-se o funcionamento. É explicada também as modelações efectuadas nos programas de cálculo automático, apresenta-se os resultados obtidos e as respectivas conclusões;

- Capítulo 5 – É exposto o terceiro caso prático, tanque de decantação de uma estação de tratamento de águas residuais, descrevendo-se o funcionamento. Explica-se as modelações efectuadas nos programas de cálculo automático, são apresentados os resultados obtidos e as respectivas conclusões;

- Capitulo 6 – É efectuado o dimensionamento de um caso prático através da metodologia preconizada na norma europeia EN1992-1-1 [1], anexo F. Comparação dos resultados obtidos com a metodologia tradicional;

- Capítulo 7 – Apresentação das conclusões finais e alguns aspectos que poderão ter interesse em estudar no futuro, encerrando-se assim a presente dissertação.

.

2

ANÁLISE DE ESTRUTURAS LAMINARES

2.1. INTRODUÇÃO

O livro Vocabulário da Teoria das Estruturas [2] define uma peça laminar como sendo um corpo em que uma das dimensões é muito menor que as outras duas. São exemplo as lajes, os muros, as paredes e as cascas.

Figura 2.1 – Exemplo de estruturas laminares: lajes e muros (arquivo pessoal)

Figura 2.2 – Exemplo de estruturas laminares: paredes e cascas (arquivo pessoal)

No mesmo livro [2] encontram-se ainda as seguintes definições para as estruturas laminares de betão armado:

- Folheto médio - Superfície média de uma peça laminar;
- Plano médio - Folheto médio de uma peça laminar plana;
- Placa - Peça laminar plana sujeita a esforços existentes apenas no seu plano médio;
- Laje - Peça laminar plana sujeita principalmente a esforços não existentes no seu plano médio;
- Membrana - Peça laminar não plana sujeita a esforços existentes apenas nos planos tangentes ao seu folheto médio;
- Casca - Peça laminar não plana sujeita a esforços não existentes apenas nos planos tangentes ao seu folheto médio;

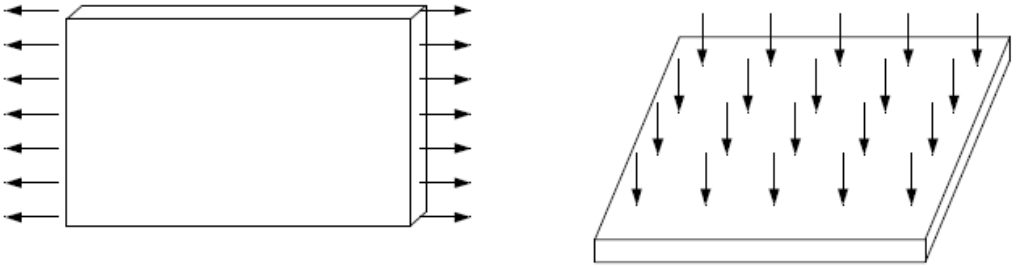

Figura 2.3 – Placa e laje: estruturas laminares planas (adaptado de Castro e Leitão [3])

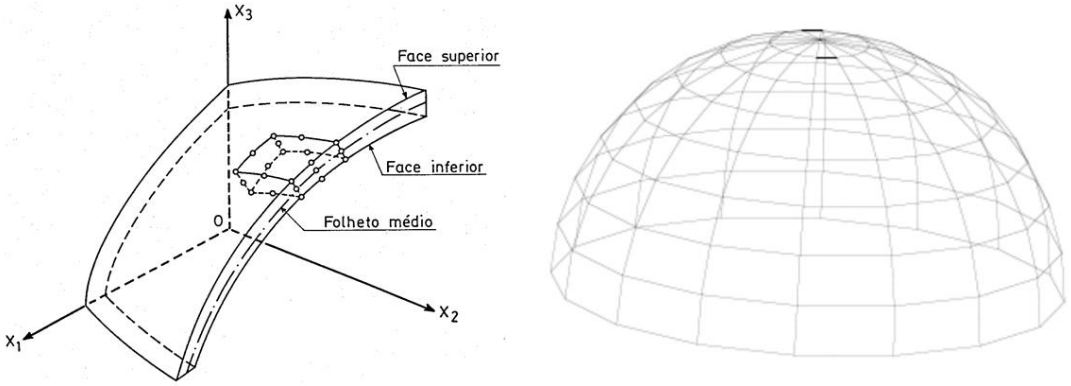

Figura 2.4 – Casca/membrana: estrutura laminar não plana (adaptado de Castro e Leitão [3])

Segundo Castro e Leitão [3], a maior dificuldade na análise deste tipo de estruturas face às estruturas formadas por elementos unidimensionais (treliças, pórticos, grelhas) resulta precisamente do carácter bidimensional que o seu comportamento estrutural exibe.

De uma forma muito simplista pode-se dizer que ao traccionar uma placa ela irá ”crescer” ou ”esticar” na direção das trações e que, por força do coeficiente de Poisson, irá ”encolher” na direção transversal. No entanto, o comportamento das placas nem sempre é assim tão evidente, como no caso de tração pura numa direção, no qual bastam pequenas variações no tipo de cargas aplicadas, na geometria ou no tipo de apoios para que esta intuição se afaste um pouco da realidade (Figura 2.5).

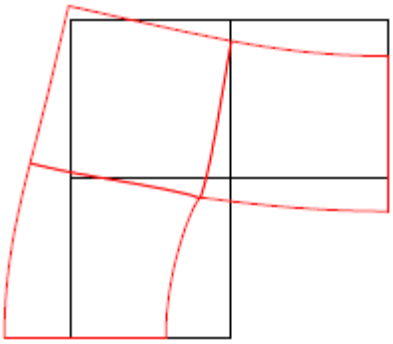

Figura 2.5 – Placa traccionada (adaptado de Castro e Leitão [3])

Nas lajes algo de semelhante vai ocorrer: flexão numa direção leva, normalmente, a que se desenvolva flexão também na outra direção. Esta análise ”intuitiva” do comportamento estrutural de lajes é, no entanto, mais difícil de fazer do que no caso das placas. Nas lajes há diversos factores que influenciam o comportamento estrutural espectável.

2.2. MÉTODOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL DE ELEMENTOS LAMINARES

Os mesmos autores [3] referem que na análise estrutural de elementos laminares é possível encontrar soluções analíticas normalmente sob a forma de séries infinitas, sobretudo quando a geometria e as condições de fronteira do elemento laminar são simples. Muitas dessas soluções estão tabeladas, em particular para os casos correntes de lajes, [4].

Este método é, sem dúvida, o processo mais utilizado pelos projetistas no dimensionamento de painéis de laje que não apresentem dificuldades de maior. Nos casos mais gerais (nos quais se incluem quase todos os casos em que se pretende analisar dois ou mais painéis de laje simultaneamente) não é possível encontrar soluções analíticas (nem mesmo na forma de série) e tem que se recorrer a técnicas numéricas. As técnicas numéricas mais utilizadas para a análise de elementos laminares baseiam-se nos seguintes métodos:

- Método dos elementos finitos, [5], [6] e [7];
- Método dos elementos de fronteira (pouco usado), [3];
- Método das diferenças finitas, [8].

A modelação de elementos laminares através de elementos de grelha [9] é outra técnica correntemente utilizada para a análise de elementos laminares com geometria e/ou condições de fronteira mais complexas, quando não se dispõe de um programa de elementos finitos de laje ou não se justifica a sua utilização. A modelação através de elementos de grelha corresponde, na realidade, à definição do caminho ou trajetória que as cargas tomam até descarregarem nos apoios.

Castro e Leitão [3] afirmam ainda que se pode provar, com recurso à análise plástica limite, nomeadamente ao teorema estático, que as distribuições de esforços assim determinadas estão sempre do lado da segurança o que é muito importante em termos de dimensionamento de lajes. É usual referir-se este método como sendo o método das faixas ou das bandas.

Por último deve referir-se ainda um outro método baseado no teorema cinemático da análise plástica limite, o método das linhas de rotura. Este método é talvez o menos utilizado por fornecer uma solução que sobrestima a capacidade resistente da laje, não estando assim do lado da segurança.

2.2.1 ENQUADRAMENTO NA NORMA NP EN1992-1-1

Na norma europeia NP EN1992-1-1 [1], a análise e dimensionamento de elementos laminares de betão armado pode ser efectuada recorrendo à **análise elástica linear**, à **análise plástica** e à **análise não linear**.

Na **análise elástica linear**, o cálculo de elementos, quer nos estados limites de utilização (SLS), quer nos estados limites últimos (ULS), é baseada na teoria da elasticidade.

Nesta teoria admite-se as seguintes hipóteses:

- Secções não fendilhadas;
- Relações tensões-extensões lineares;
- Valores médios do módulo de elasticidade.

Relativamente aos efeitos das deformações de origem térmica, dos assentamentos e da retração no estado limite último, pode-se admitir-se uma rigidez reduzida correspondente às secções fendilhadas, desprezando para tal a contribuição do betão traccionado mas incluindo os efeitos da fluência. Para o estado limite de utilização, deverá considerar-se uma evolução gradual da fendilhação.

Conforme referido anteriormente, a obtenção de esforços e deslocamentos pode ser efectuada recorrendo a tabelas de esforços elásticos ou a métodos numéricos, nomeadamente:

- **Método de elementos de grelha**;
- **Método dos elementos finitos**;
- **Método das diferenças finitas**.

A mesma norma admite ainda a possibilidade de se efetuar uma redistribuição dos esforços elásticos, não devendo, no entanto, esta ultrapassar cerca de 25% do valor dos momentos elásticos nos apoios.

A análise linear com redistribuição limitada poderá ser aplicada na verificação dos elementos estruturais em relação aos estados limites últimos (ULS).

A **análise plástica** pode ser aplicada quando a ductilidade do comportamento à flexão é garantida, ou seja, quando o dimensionamento das armaduras de flexão é efectuado por forma a que a posição da linha neutra correspondente a este estado limite último seja tal que: $x/d \leq 0.25$.

A determinação dos esforços e deslocamentos, recorrendo à Teoria da Plasticidade, pode ser efectuado por dois métodos distintos:

- Método estático: o valor da carga que satisfaz as equações de equilíbrio, de forma a que em nenhum ponto seja excedida a capacidade resistente, é um valor igual ou inferior à carga última (método conservativo) – exemplo: método das bandas.

- Método cinemático: o valor da carga associado a um mecanismo cinematicamente admissível é um valor igual ou superior da carga última – exemplo: método das linhas de rotura.

Os métodos de **análise não linear** poderão ser utilizados, quer para os estados limites de utilização quer para os estados limites últimos, desde que satisfaçam as condições de equilíbrio e de compatibilidade e que seja admitido um comportamento não linear adequado para os materiais. A análise poderá ser de primeira ou de segunda ordem.

Relativamente ao estado limite último, deverá verificar-se a capacidade de resistência das secções críticas locais a quaisquer deformações não elásticas resultantes da análise, tendo em devida conta as incertezas.

Para estruturas sujeitas predominantemente a ações estáticas, os efeitos de carregamentos anteriores poderão, em geral, ser desprezados, e poderá admitir-se um aumento monotónico da intensidade das ações.

Na análise não linear, devem utilizar-se características dos materiais que representam a rigidez de uma forma realista mas que tenham em conta as incertezas da rotura. Devem utilizar-se apenas os modelos de cálculo que sejam válidos nos domínios de aplicação considerados.

Na presente dissertação as modelações estruturais estão efectuadas tendo em conta uma análise elástica linear. A análise estrutural foi efectuada pelos métodos de elementos de grelha e de elementos finitos, os quais estão abordados nas secções seguintes. Os restantes métodos não são objecto de estudo da presente dissertação, porém, é possível encontrar informação na bibliografia [10], [11], [12] e [13].

2.2.2 Método de Elementos de Grelha

Uma das técnicas numéricas que possibilita uma obtenção aproximada de deslocamentos e esforços, de um elemento laminar, consiste na divisão do elemento estrutural num conjunto de elementos de barra, distribuídos nas duas direções, formando-se desta forma uma grelha (figura 2.6).

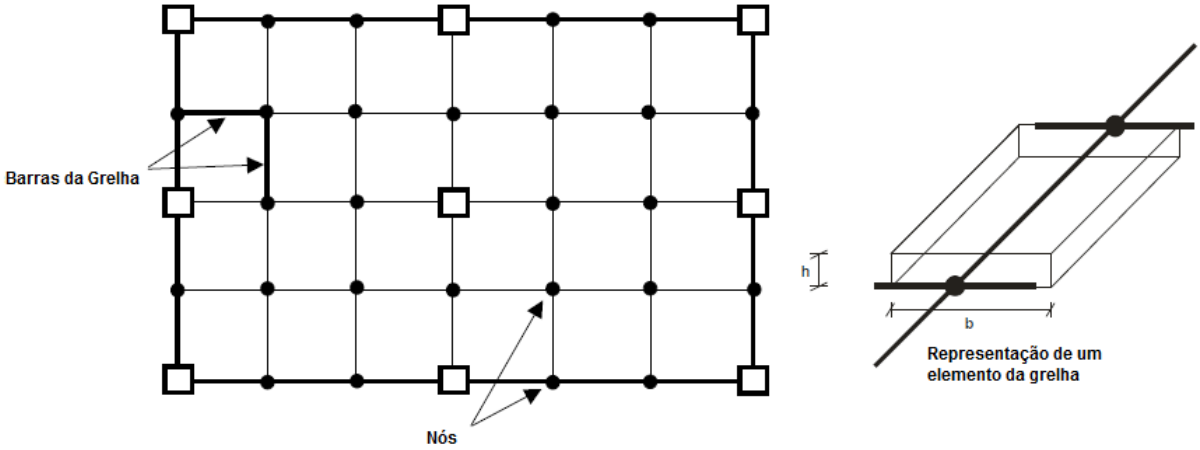

Figura 2.6 – Exemplo da aplicação a uma laje do método de elementos de grelha (adaptado de [14] e [15])

Dória [14], refere que esta técnica foi implementada pela primeira vez em 1959 por Lightfoot e Swako. Estes investigadores constataram que os procedimentos de análise de pórticos planos e grelhas pelo método dos deslocamentos eram bastante parecidos e que as equações básicas de compatibilidade

de deformações eram muito semelhantes nos dois casos. Dado isto, decidiram adaptar um programa de cálculo de pórticos, para que também permitisse calcular malhas de elementos de barra.

Segundo Castro [9] os fundamentos deste método são de fácil aplicação e intuitivos, sendo baseados em conceitos físicos de significado quase imediato. Para além disto, a análise e posterior utilização dos resultados vem bastante facilitada (ao contrário do método dos elementos finitos).

Apesar dos resultados obtidos neste método serem apenas uma aproximação do comportamento real do elemento, a validade da sua aplicação não pode ser posta em causa, pois os resultados obtidos estão sempre majorados pelo lado da segurança.

No entanto, para que os resultados obtidos possam ter o significado desejado, há alguns cuidados a ter quando se efetua este tipo de modelação, nomeadamente:

- Definição do nº de elementos de grelha que se deve considerar na análise e a sua localização.
- Definição das características geométricas a atribuir aos elementos de grelha de modo a que a modelação conduza a resultados o mais perto possível do que se passa no elemento.
- Definição, com rigor, dos tipos de apoio a considerar nos nós pertencentes a bordos apoiados e quais as cargas a considerar na modelação do carregamento atuante.
- Determinação da relação existente entre os deslocamentos nodais na grelha e os deslocamentos no elemento e a relação entre os esforços instalados em cada uma das barras utilizadas na modelação e os esforços a considerar no elemento.

2.2.4.1. MODELAÇÃO DE CASCAS OU MEMBRANAS COM ELEMENTOS DE GRELHA

Imagine-se um elemento de casca ou membrana sujeito a carregamento a atuar perpendicularmente a esse mesmo plano. Efetuando uma modelação deste elemento com recurso a um elemento de grelha (Figura 2.7).

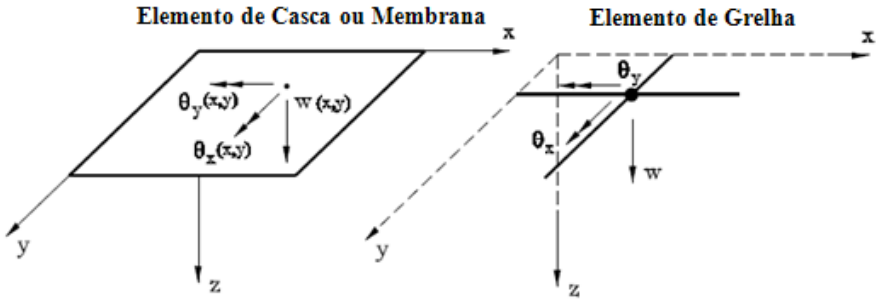

Figura 2.7 – Comparação de elementos (adaptado de Castro [9])

Em cada nó da grelha apenas será possível o deslocamento transversal *w* e duas rotações segundo duas direções ortogonais, θ_x e θ_y, ao contrário do elemento de casca ou membrana no qual se considera seis graus de liberdade (Figura 2.8).

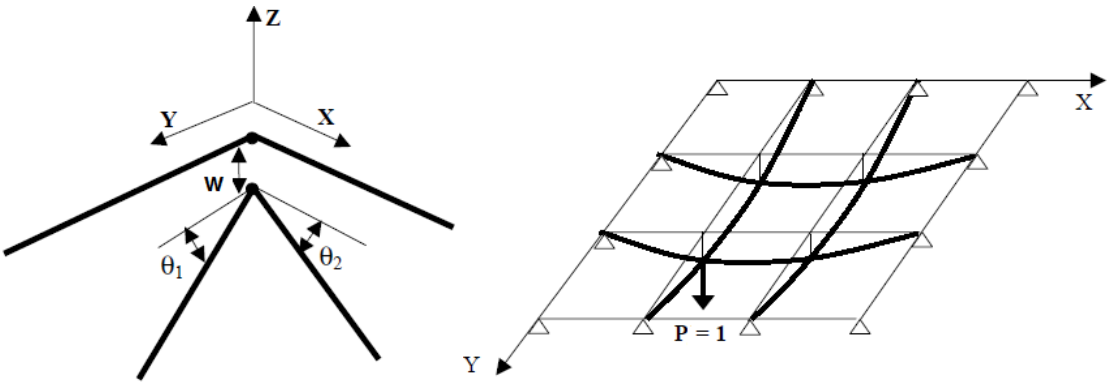

Figura 2.8 – Nº de graus de liberdade no nó da grelha: 1 translação e 2 rotações

É possível também relacionar os esforços necessários para a caracterização do comportamento dos elementos de casca ou membrana com os esforços que surgem em elementos de grelha dispostos em duas direções ortogonais. Desta forma, e tal como se encontra ilustrado na Figura 2.9, os momentos m_x e m_{xy} e o esforço transverso v_x estão diretamente associados aos esforços que existem em elementos de grelha com um eixo paralelo ao eixo x. Também os momentos flectores, torsores e esforços transversos em barras paralelas ao eixo y correspondem aos esforços m_y, m_{xy} e v_y, os quais se desenvolvem no elemento. O único aspecto a ter em conta diz respeito ao sentido positivo do momento torsor m_{xy} ao longo de x e o momento torsor nos elementos de grelha que possuem a mesma orientação.

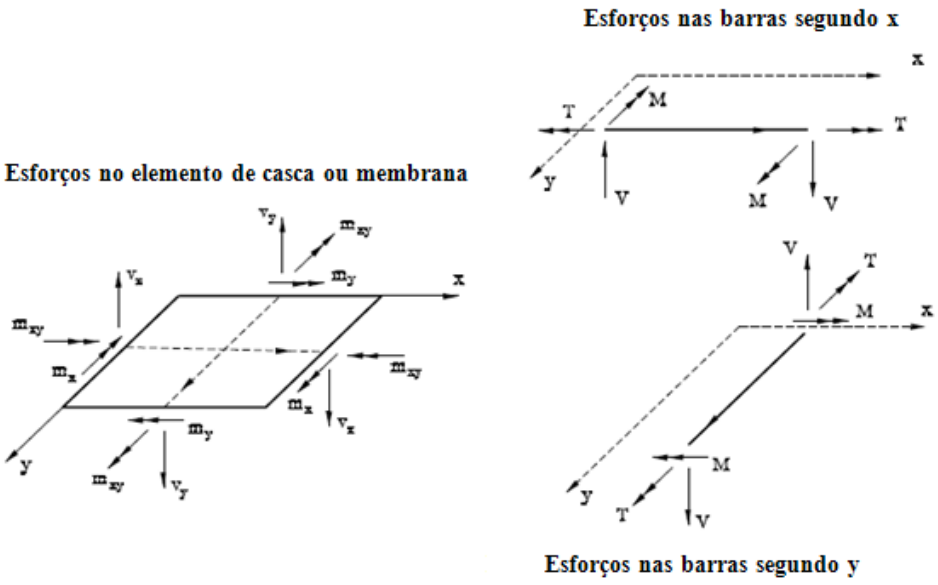

Figura 2.9 – Representação dos esforços (adaptado de Castro [9])

A grande diferença entre estes dois tipos de elementos estruturais está relacionada com o carácter bidimensional do comportamento das cascas ou membranas. Trata-se de uma estrutura laminar, em que não é possível dissociar o comportamento numa dada direção com o que se passa na outra. Já as grelhas são peças lineares, com um comportamento unidimensional. Desta forma, nunca se conseguirá

representar de forma exata o comportamento bidimensional com recurso a uma modelação com elementos unidimensionais, mesmo que se considerem espaçamentos muito pequenos entre os elementos de grelha.

Realça-se que esta técnica de modelação permite obter apenas resultados aproximados. Como foi referido acima, nunca se conseguirá com recurso a modelações com elementos unidimensionais reproduzir de forma exata o comportamento de uma estrutura bidimensional. Desta forma, não se pode afirmar que existe uma forma "certa" ou "correta" de efetuar a modelação pretendida. Para uma dada casca ou membrana podem existir, dentro de certos limites, diferentes modelações que podem conduzir a resultados bastantes satisfatórios. Assim um dos princípios básicos da modelação é o de tentar obter uma definição simples para a estrutura e carregamentos a utilizar na análise. Regra geral, a utilização de modelações muito "sofisticadas" não está necessariamente associada à obtenção de uma solução de muito melhor qualidade.

A distribuição de esforços resultante da modelação com elementos de grelha equilibra o carregamento aplicado à laje. Desta forma, pode afirmar-se que o dimensionamento efectuado com base nesta informação encontra-se no lado da segurança.

2.2.4.2. DISCRETIZAÇÃO A ADOPTAR

A modelação de um elemento de casca ou membrana, com recurso a elementos de grelha, inicia-se com a determinação da malha dos elementos de grelha a utilizar.

Um elemento de grelha representa uma faixa (troço) e tem a tarefa de modelar o comportamento desse troço do elemento de casca ou membrana.

Considere-se uma laje simplesmente apoiada. Pode-se subdividir a mesma num conjunto de faixas com 1 m de largura, dispostas segundo *x* e segundo *y*, tal como se encontra representado na Figura 2.10.

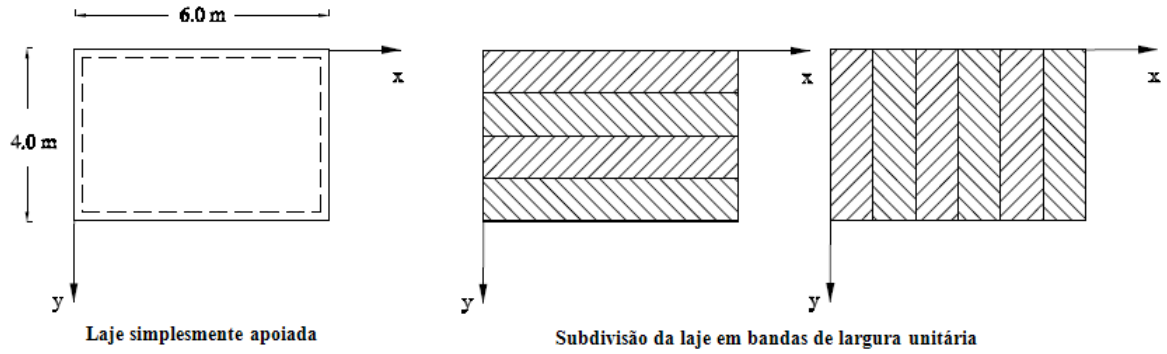

Figura 2.10 – Divisão em faixas (adaptado de Castro [9])

Substituindo cada uma destas faixas de laje por um elemento de grelha disposto a meio da banda, obtém-se o esquema representado na Figura 2.11.

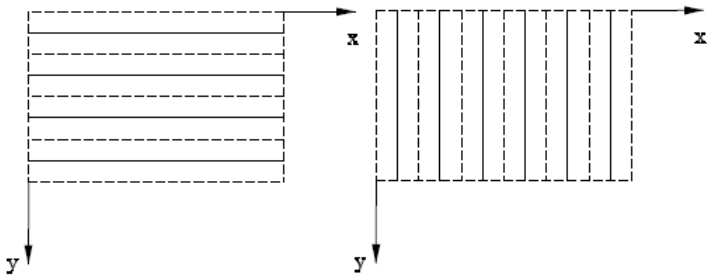

Figura 2.11 – Eixos dos elementos de grelha a considerar na modelação (adaptado de Castro [9])

Juntando as barras definidas em ambas as direções, obtém-se a modelação representada na Figura 2.12.

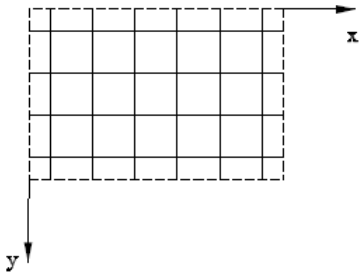

Figura 2.12 – Malha final: modelação com recurso a elementos de grelha (adaptado de Castro [3])

Embora esta forma de definir a distribuição dos elementos de grelha seja a que mais sentido faz de um ponto de vista intuitivo, não é a que mais correntemente se utiliza. Para tornar mais simples a definição da estrutura a utilizar na análise, começa-se por efetuar a identificação da localização dos elementos de grelha a considerar. Desta forma, depois de se subdividir a laje em bandas, como se encontra representado na Figura 2.12 para o exemplo em estudo, consideram-se que os elementos de grelha existem nas extremidades de cada uma delas.

Este procedimento dá origem à grelha representada na figura 2.13. Realça-se que quando se forem determinar as propriedades a atribuir a cada uma destas barras é necessário ter em atenção que a largura da faixa que elas representam deixa de ser idêntica, tal como se encontra ilustrado na Figura 2.13. As barras que se encontram dispostas sobre os bordos simplesmente apoiados modelam uma banda de laje com 0.5 metros de largura, enquanto que as barra "interiores" continuam a modelar faixas com 1.0 metro.

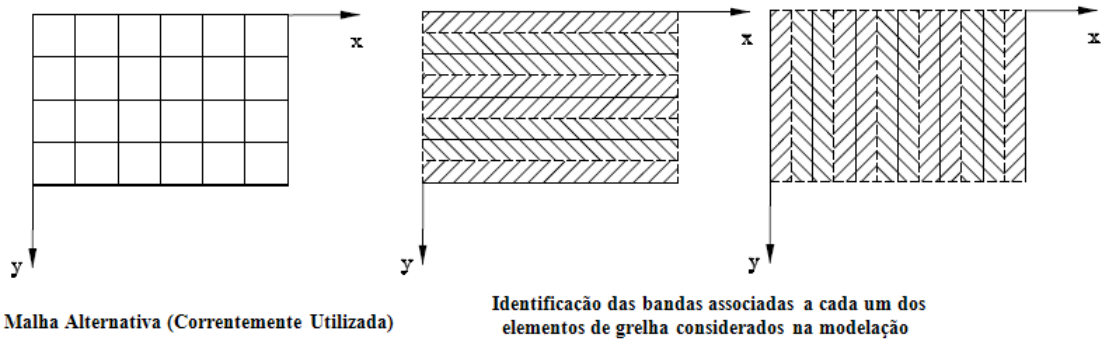

Figura 2.13 – Malha normalmente utilizada em elementos de grelha (adaptado de Castro [9])

Este é o procedimento que é seguido. Contudo, é necessário realçar alguns aspectos importantes a ter na utilização desta metodologia. Como é fácil de entender pela descrição da metodologia envolvida na distribuição dos elementos de grelha e também tendo em conta a ilustração desta técnica apresentada na Figura 2.14, existem barras dispostas sobre os bordos da laje.

Estas barras devem existir sempre que se trate de um bordo livre (para se conseguir determinar o momento flector e o momento torsor ao longo desse lado) e de um bordo simplesmente apoiado (para se conseguir modelar a distribuição correspondente de momentos torsores). Já quando se trata de um bordo encastrado, não se torna necessário considerar a existência de barras ao longo desse lado, podendo estas ser removidas da modelação.

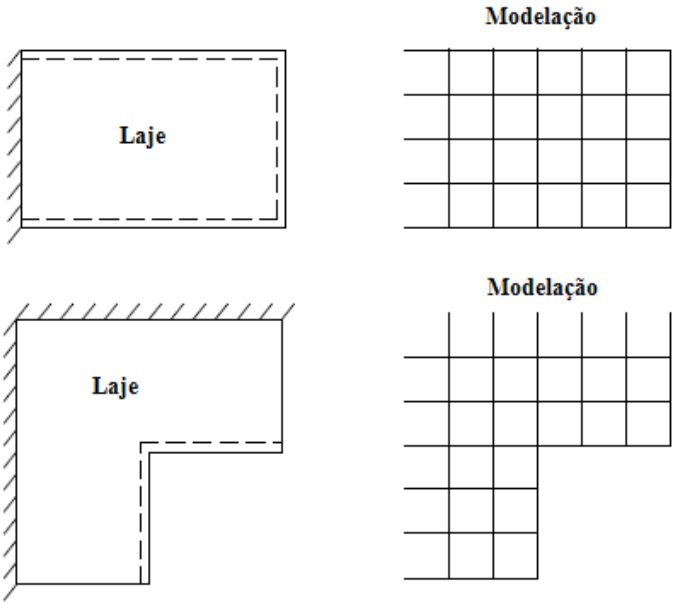

Figura 2.14 – Exemplos de modelação com elementos de grelha: bordo livre e encastrado (adaptado de Castro [9])

Outra situação que merece alguma atenção diz respeito à existência de pilares. Sempre que tal aconteça, é necessário que se garanta que nesse ponto passa um nó da grelha, para que seja posteriormente possível a correta definição das condições de apoio correspondentes. Este cuidado encontra-se ilustrado nas modelações apresentadas na Figura 2.15.

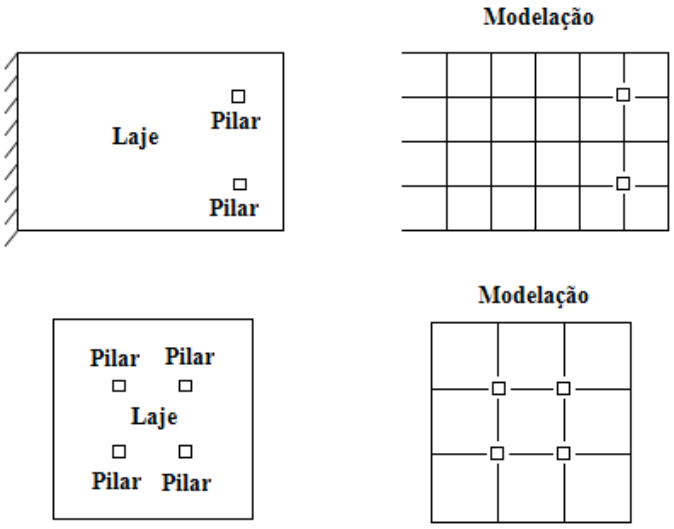

Figura 2.15 – Exemplos de modelação com elementos de grelha: laje com pilares (adaptado de Castro [9])

Observando de novo esta modelação surge a seguinte questão: qual é a largura ideal de cada uma das bandas para que a modelação com grelhas permita obter a melhor solução possível? Não existe uma resposta certa para esta questão.

De uma forma intuitiva, admite-se que a largura de banda deve estar relacionada de certa forma com a dimensão da laje a analisar. Devem evitar-se modelações em que a largura das bandas consideradas seja muito grande quando comparada com o vão representativo da laje a analisar. Por outro lado, larguras de banda exageradamente pequenas apenas dificultam a definição da geometria da grelha, sem que os resultados aproximados obtidos melhorem significativamente de qualidade.

Existem várias regras empíricas para a definição destes espaçamentos. Uma regra empírica é considerar a divisão do vão por dez espaços. Para as lajes correntes de edifícios, pode considerar-se que o espaçamento utilizado na discussão que se está a efetuar (1.0 metro) é perfeitamente razoável.

Hennrichs [15] acrescenta ainda algumas regras básicas, a ter na definição da malha da grelha:

- Colocar vigas da grelha em posições pré-determinadas pelo projeto, tais como em linhas de apoio, ao longo de vigas de bordo ou de outras que existirem, que contenham uma ação específica, etc;
- Para elementos isotrópicos, cada barra deve ter uma largura no máximo 1/4 do vão transversal;
- Para elementos ortotrópicos, na direção da menor inércia, deve-se considerar a largura das barras no máximo 40% do vão transversal;
- Quanto menores forem as larguras das barras e, portanto mais densa a malha, melhores serão os resultados; porém, essa melhoria deixa de ter significado quando a largura das barras for menor que 2 ou 3 vezes a espessura do elemento;
- Em lajes em consola é necessário colocar pelo menos duas barras transversais ao seu vão;
- Deve-se colocar sempre uma barra no bordo livre do elemento, cuja largura para o cálculo do momento de inércia à torção deve ser reduzida de 0.3*h*, pois é nessa distância, a partir do

bordo que, aproximadamente, a força de corte vertical, resultante das tensões verticais de corte devidas à torção, atua (*h* é a altura junto ao bordo livre);

- Junto às regiões com grande concentração de esforços, tais como apoios ou cargas concentradas, é recomendável que a largura das barras não seja superior a 3 ou 4 vezes a espessura do elemento;
- Aberturas na laje cuja maior dimensão não exceda a 3h não precisam ser considerados, a não ser que estejam muito próximo dos pilares;
- Aberturas de grande dimensão na laje devem ser consideradas como bordo livre, sendo válidas as recomendações anteriores;
- De modo a permitir uma distribuição uniforme de cargas, os espaçamentos das barras em cada uma das direções não devem ser muito diferentes.

É importante salientar que estas regras devem ser adaptadas para cada situação de laje plana, em função da geometria e das condições de apoio existentes.

2.2.4.3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS ELEMENTOS DE GRELHA

As propriedades geométricas a atribuir a cada uma das barras devem ser escolhidas de modo a que o comportamento da grelha escolhida permita representar, da forma mais aproximada possível, o comportamento do elemento que se pretende modelar.

Estas propriedades dos elementos de grelha que simulam o comportamento de um dado elemento são a rigidez à flexão, *EI* e a rigidez de torção, *GJ*.

Segundo Carvalho [16], um dos maiores inconvenientes da modelação de elementos de placa usando-se elementos de grelha, é a não consideração da deformação transversal das barras, que é uma das principais características dos elementos de placa. Este aspecto provoca pequenas diferenças entre os deslocamentos e esforços mesmo que se use uma malha pouco espaçada, já que a influência do coeficiente de Poisson é distinta nos dois elementos.

Castro e Leitão [3] apresentam uma explicação física bem simples para este facto. Imagine-se uma laje modelada como um somatório de vigas com eixo paralelo a *x* colocadas umas ao lado das outras (Figura 2.16 a)). Ao serem carregadas, em cada viga as fibras longitudinais inferiores encontram-se traccionadas e as superiores comprimidas. Se tiver em conta o efeito de Poisson, a deformada transversal de cada viga terá o aspecto da Figura 2.16 b).

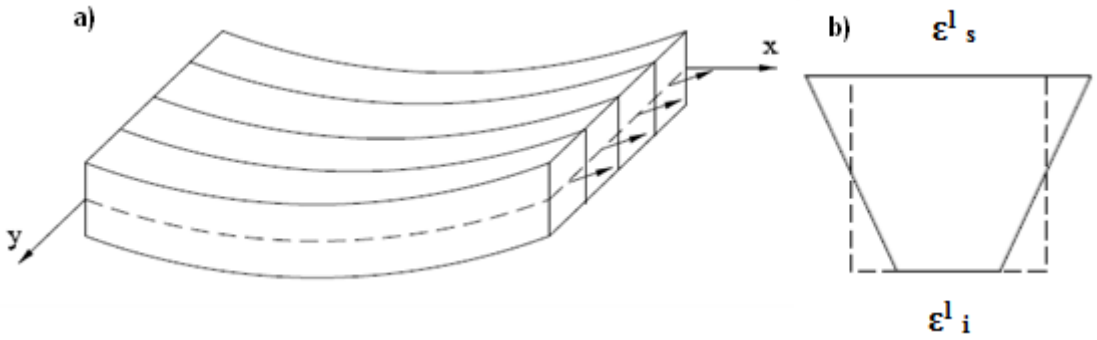

Figura 2.16 – a) Deformação por flexão das vigas com eixo paralelo ao eixo x; b) Deformação da secção transversal (adaptado de Castro e Leitão [3])

Em que $\varepsilon^{l}{}_{s}$ representa a extensão axial das fibras longitudinais na face superior da viga e $\varepsilon^{l}{}_{i}$ a da face inferior da viga.

Sobrepondo a deformada transversal de todas as vigas que simulam a laje obtém-se a Figura 2.17.

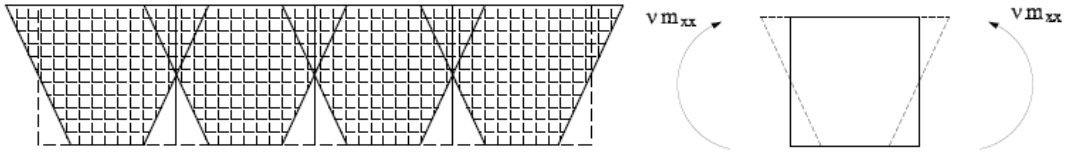

Figura 2.17 - Deformada das secções transversais; momento a aplicar segundo a direção transversal (adaptado de castro e Leitão [3])

Verifica-se que a "soma" das deformadas conduz a uma situação absurda, na qual existem zonas de sobreposição de material e outras onde surgem "buracos" na deformada. Para que esta situação não ocorra, é necessário que as secções transversais consideradas se mantenham sem deformações, para que a deformada global permaneça compatível. Isto faz com que tenha de existir um momento flector aplicado ao longo da direção transversal, momento esse que provoque deformações iguais e de sinal contrário às que são induzidas pela deformada de flexão ao longo de *x*. Não é difícil verificar que esse momento é dado por $m_{yy} = \nu\, m_{xx}$, tal como se encontra esquematicamente ilustrado na Figura 2.17.

Com base neste exemplo e as relações constitutivas para as lajes de Kirchhoff, Castro [9] determina quais as propriedades geométricas a considerar na aplicação deste método (2.1).

$$\begin{bmatrix} m_x(x,y) \\ m_y(x,y) \\ m_{xy}(x,y) \end{bmatrix} = \frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi_x(x,y) \\ \chi_y(x,y) \\ \chi_{xy}(x,y) \end{bmatrix} \qquad (2.1)$$

De modo a estimar o valor da rigidez de flexão para as barras com eixo paralelo à coordenada x, considere-se que a laje se encontra sujeita a um estado de flexão cilíndrica com $\chi_x \neq 0$ e $\chi_y = \chi_{xy} = 0$. Tendo em conta as relações de elasticidade expressas na forma (2.1), a relação momentos-curvaturas m_x/χ_x pode ser escrita na equação (2.2).

$$m_x = \frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)} \chi_x \qquad (2.2)$$

Escrevendo a relação habitual nas vigas $M = EI\,\chi$, obtém-se o valor da inércia equivalente, I_{eq} , que deverá ser considerada para modelar o comportamento à flexão de uma faixa de laje com 1.0 metro de largura. Tem-se a equação (2.3).

$$I_{eq} = \frac{h^3}{12\left(1-\nu^2\right)} \qquad (2.3)$$

Caso a largura da banda não seja unitária, a equação (2.3) transforma-se na equação (2.4).

$$I_{eq} = b\frac{h^3}{12\left(1-\nu^2\right)} \qquad (2.4)$$

onde *b* corresponde à largura da faixa considerada. Verifica-se que a rigidez à flexão a considerar para modelar uma banda de laje com largura de *b* metros é muito semelhante à rigidez que se teria de utilizar se se estivesse a analisar uma peça linear com essas mesmas dimensões, resultando mesmo idêntica se o coeficiente de Poisson se anular.

De modo a ter em conta o comportamento à torção, considere-se agora que a laje se encontra sujeita ao estado de deformação caracterizado por $\chi_{xy} \neq 0$ e $\chi_x = \chi_y = 0$. Tendo em conta as relações constitutivas (2.1), o campo de momento torsores vem dado pela igualdade da equação (2.5).

$$m_{xy} = \frac{Eh^3}{12\left(1+\nu\right)}\chi_{xy} = E\frac{h^3}{12\left(1+\nu\right)}\chi_x = \frac{E}{2\left(1+\nu\right)}\times\frac{h^3}{6}\chi_{xy} = G\frac{h^3}{6}\chi_{xy} \qquad (2.5)$$

Comparando agora a equação anterior (2.5) com a equação constitutiva que relaciona os momentos torsores, *T*, (2.6) com as deformações por torção, ϕ_t , em elementos de grelha.

$$T = GJ\phi_t \qquad (2.6)$$

é possível determinar qual o valor da rigidez de torção "equivalente", J_{eq}, que deverá se considerada na modelação da laje (2.7.).

$$J_{eq} = \frac{h^3}{6} \qquad (2.7)$$

A igualdade anterior permite concluir que a rigidez equivalente a considerar para o caso da torção é igual a metade da rigidez à torção de um elemento de viga com a secção transversal com as mesmas dimensões. De facto, se se considerar uma secção rectangular com $b >> h$, é possível verificar que a teoria de peças lineares permite definir a equação (2.8).

$$J_{eq} = \frac{h^3}{3} \qquad (2.8)$$

A explicação para este facto é simples e intuitiva. No caso das lajes existem dois momentos torsores que atuam em simultâneo. De uma forma um pouco mais rigorosa, pode afirmar-se então que para o aparecimento de uma curvatura de torção unitária contribuem os momentos torsores ao longo de *x* (m_{xy}) e os momentos torsores ao longo de *y* ($m_{yx} = m_{xy}$).

Se a largura da banda a modelar não for unitária, a rigidez de torção equivalente transforma-se na equação (2.9).

$$J_{eq} = b\frac{h^3}{6} \qquad (2.9)$$

onde *b* representa de novo a largura da faixa em consideração.

Sublinhe-se desde já que uma vez que a consideração direta do efeito do momento torsor dificulta a tarefa de dimensionamento das lajes, é frequente que nas grelhas se despreze o valor da rigidez de torção, assumindo então que $GJ = 0$. Esta opção faz com que o carregamento seja equilibrado apenas com o recurso a distribuições de momentos flectores. Esta consideração está porém do lado da segurança, uma vez que mais uma vez se consideram diagramas de esforços que satisfazem as condições de equilíbrio no domínio e na fronteira.

2.2.4.4. SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE APOIO

Bordos encastrados

Nesta situação todos os nós que estiverem sobre um bordo encastrado devem considerar-se de imediato como nós encastrados, onde todos os deslocamentos de encontram impedidos.

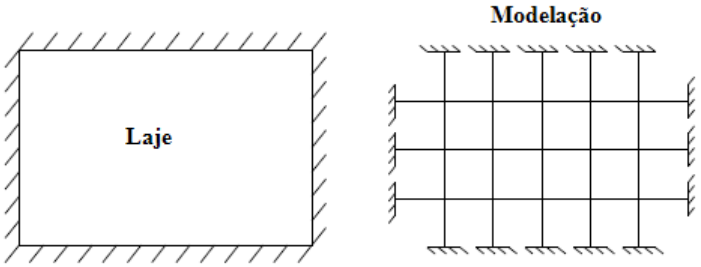

Figura 2.18 – Exemplo: bordo encastrado (adaptado de Castro [9])

Bordos simplesmente apoiados

Nos nós existentes sobre o bordo simplesmente apoiado devem restringir-se o deslocamento transversal e as rotações em torno da normal exterior ao bordo em causa. Isto corresponde a considerar-se a existência de apoios cilíndricos em cada um destes nós, nos quais o eixo do cilindro é coincidente com o bordo da laje.

Na figura 2.19 encontram-se esquematizados os apoios a considerar nos nós existentes no contorno de uma laje simplesmente apoiada. Repare-se que os nós de canto têm todos os deslocamentos impedidos.

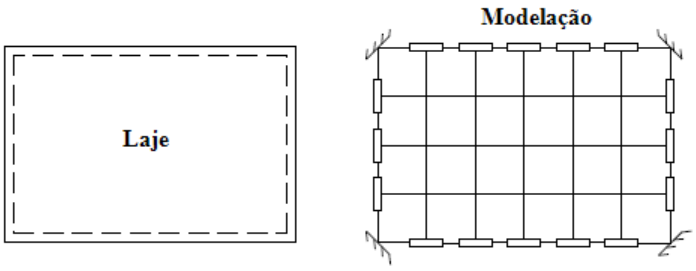

Figura 2.19 – Exemplo: bordo simplesmente apoiado (adaptado de Castro [9])

Pilares

Sempre que existam pilares, devem ser colocado apoios esféricos nos nós correspondentes da modelação. Este tipo de apoio apenas impede o deslocamento transversal. Na Figura 2.20 apresenta-se uma modelação para uma laje, onde os únicos apoios existentes correspondem aos quatro pilares identificados na figura.

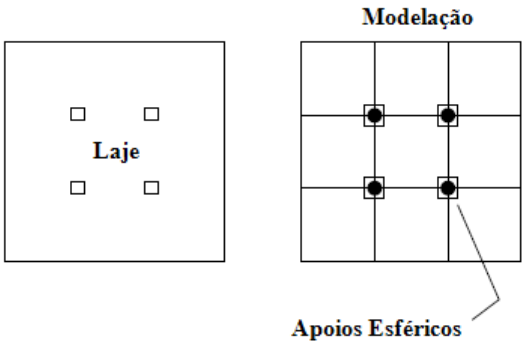

Figura 2.20 – Exemplo: pilares (adaptado de Castro [9])

Bordos de continuidade

Imagine-se agora a situação definida na Figura 2.21, onde se considera a existência de um apoio de rigidez infinita. Este apoio pode corresponder, por exemplo, à existência de uma parede existente sob a laje. Quando se efetua a modelação, todos os nós existente sobre este eixo devem estar sujeitos a um apoio cilíndrico, tal como se encontra representado na figura.

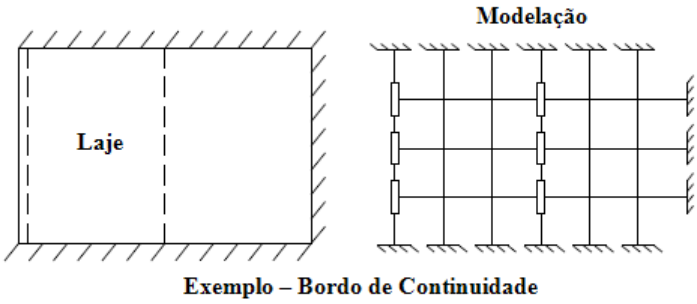

Figura 2.21 – Exemplo: Bordo de Continuidade (adaptado de Castro [9])

Apoios elásticos de fundação

O método das grelhas também pode ser usado na simulação de lajes de fundação. Para tal em cada nó da grelha colocam-se apoios elásticos de translação, sendo as constantes elásticas definidas em função do módulo de elasticidade do solo e da área de influência do nó da malha (ver subcapítulo 2.3).

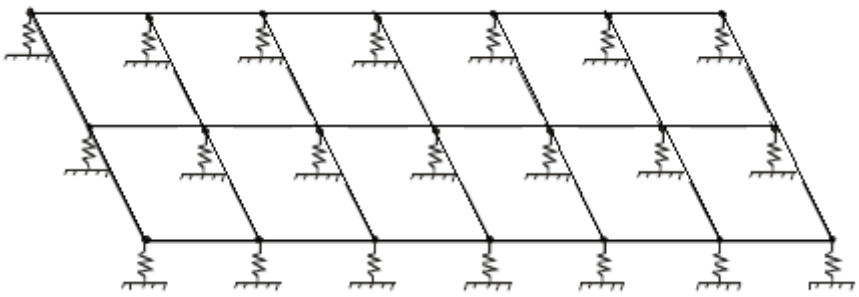

Figura 2.22 – Simulação de grelha em laje de fundação com apoios elásticos

2.2.4.5. CARREGAMENTO A CONSIDERAR

Tendo em conta que esta forma para modelar elementos de casca ou membrana apenas permite determinar uma solução aproximada, não faz sentido sofisticar em demasia o processo de determinação da distribuição de cargas pelas barras da estrutura.

Assim sendo, é normal considerar-se que o carregamento aplicado é sempre constituído por carga uniformemente distribuída, q, aplicada em todo o domínio.

A distribuição das cargas nos elementos da grelha pode ser efectuada dos seguintes modos:

- Aplicar em cada elemento de grelha um carregamento trapezoidal, correspondente à forma como as lajes descarregam em cada uma das vigas fictícias.
- Considerar que todas as barras da grelha se encontram sujeitas à ação de uma carga uniformemente distribuída. A carga q deve ser "repartida" pelas duas direções, considerando-se que as barras paralelas ao eixo x são responsáveis pelo equilíbrio de parte da carga, enquanto que a parcela restante é "absorvida" pelas barras dispostas segundo a direção y. Desta forma, se considerar que todas as barras dispostas segundo x estão sujeitas à ação de uma carga uniforme com o valor $\alpha \times q$, enquanto que para as barras segundo y se aplica uma carga distribuída dada por $(1-\alpha)\times q$. O valor do parâmetro α depende da geometria da laje e das condições de fronteira especificadas. Para lajes quadrangulares com a mesma condição de apoio definida para todos os bordos, faz todo o sentido considerar que $\alpha = 0.5$.
- Aplicar apenas cargas transversais nodais, bastando para tal determinar a correspondente área de influência, conforme representado na Figura 2.23, e multiplicá-la pelo valor da carga uniformemente distribuída.

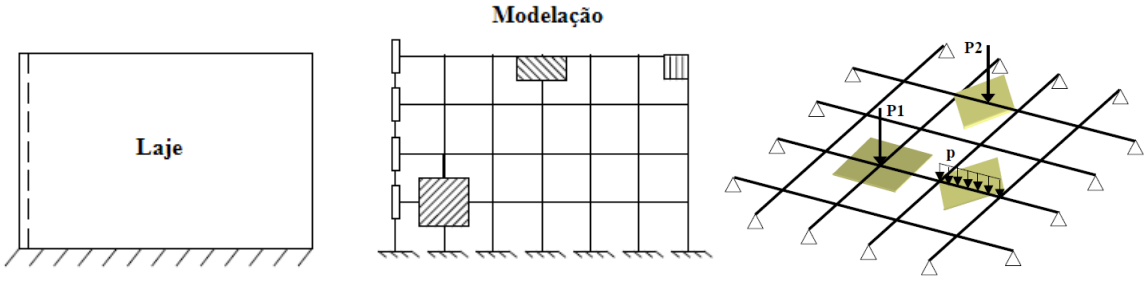

Figura 2.23 – Áreas de influência a considerar na determinação das cargas nodais concentradas ou cargas distribuídas nas barras (adaptado de Castro [9] e Hennrichs [15])

Dos três métodos apresentados, o primeiro é o que aparentemente apresenta um maior o volume de cálculos envolvido na determinação dos correspondentes valores para cada uma das barras da discretização. No entanto, hoje em dia os programas de cálculo automático permitem a criação de planos de cargas (por exemplo, função "claddings" do programa ROBOT), efectuado automaticamente a distribuição das cargas nas barras. Esta distribuição pode ser efectuada numa só direção ou nas duas direções.

2.2.4.6. ANÁLISE DA SOLUÇÃO

Definida a solução referente à análise da grelha, torna-se necessário estimar os valores dos esforços correspondentes ao elemento que se pretende modelar.

Em cada nó da discretização, os três deslocamentos obtidos, w, θ_x e θ_y correspondem aos deslocamentos no elemento, tal como se encontra esquematicamente representado na Figura 2.7.

Na conversão dos esforços obtidos em cada barra para o elemento a analisar, é necessário ter em consideração a relação entre os esforços nas barras (Figura 2.9), e ter em atenção que os esforços na laje são definidos por unidade de comprimento, ou seja, é necessário dividir os esforços referentes ao elemento de grelha pela largura da banda do elemento que tal barra pretende modelar.

Os momentos flectores m_x, esforços transversos v_x e momentos torsores m_{xy} são obtidos com base nos valores dos esforços nas barras paralelas ao eixo x, os quais vêm aqui denotados por M_x , V_x e T_x, onde l_b corresponde à largura da faixa de laje modelada pelo elemento de grelha em causa.

$$m_x = \frac{M_x}{l_b} \qquad (2.10)$$

$$v_x = \frac{V_x}{l_b} \qquad (2.11)$$

$$m_{xy} = \frac{T_x}{l_b} \qquad (2.12)$$

Os esforços nas barras paralelas ao eixo y (M_y , V_y e T_y) permitem estimar para a laje o valor dos momentos flectores m_y, dos esforços transversos v_y e também dos momentos torsores m_{xy}.

$$m_y = \frac{M_y}{l_b} \qquad (2.13)$$

$$v_y = \frac{V_y}{l_b} \qquad (2.14)$$

$$m_{xy} = \frac{T_y}{l_b} \qquad (2.15)$$

2.2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS – BREVE REFERÊNCIA

A análise estrutural de um elemento laminar pode ser efectuada pelo já referido método dos elementos finitos. É um método numérico que possibilita uma obtenção aproximada de deslocamentos nodais e consequentemente tensões e esforços.

Consiste na divisão de um elemento estrutural em elementos de dimensões bastante mais reduzidas, os quais são denominados elementos finitos. Cada elemento finito mantém as propriedades do elemento original e encontra-se ligado aos elementos adjacentes através de nós.

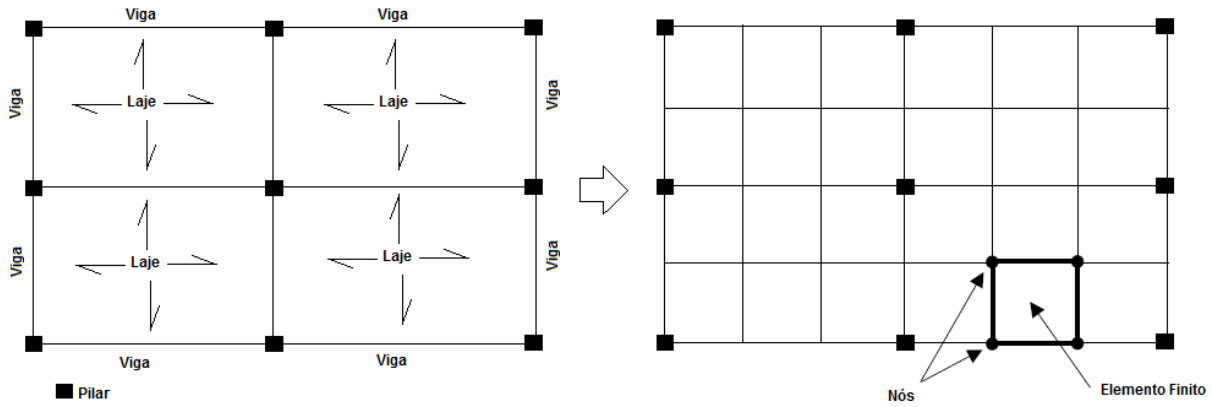

Figura 2.24 – Exemplo de uma malha de elementos finitos

Através da resolução de equações de equilíbrio estabelecidas nos nós, é feita uma compatibilização de deslocamentos nodais entre os nós de elementos vizinhos. Contudo, esta particularidade deste método não corresponde totalmente à verdade, pois no modelo real os elementos estão continuamente ligados.

As incógnitas fundamentais do problema são então os deslocamentos nodais, tal como acontece numa análise matricial de estruturas porticadas. A partir destes e recorrendo-se a funções interpoladoras (ou funções de forma) e das matrizes constitutivas é possível conhecer em qualquer ponto o campo de tensões e de deformações.

Assim sendo, percebe-se que a obtenção de resultados mais precisos seja função do número de elementos (à medida que o número de elementos aumenta, isto é, há um refinamento da malha, a precisão do modelo também aumenta) e do número de nós que o elemento possui, ou seja, elementos finitos com funções de forma com grau mais elevado normalmente dão melhores resultados do que elementos com funções de forma com grau mais baixo. Isto quer dizer que por exemplo elementos finitos serendipity de 8 nós são mais precisos que os Lagrangeanos de 4 (mais nós implica mais deslocamentos nodais logo a interpolação é mais precisa).

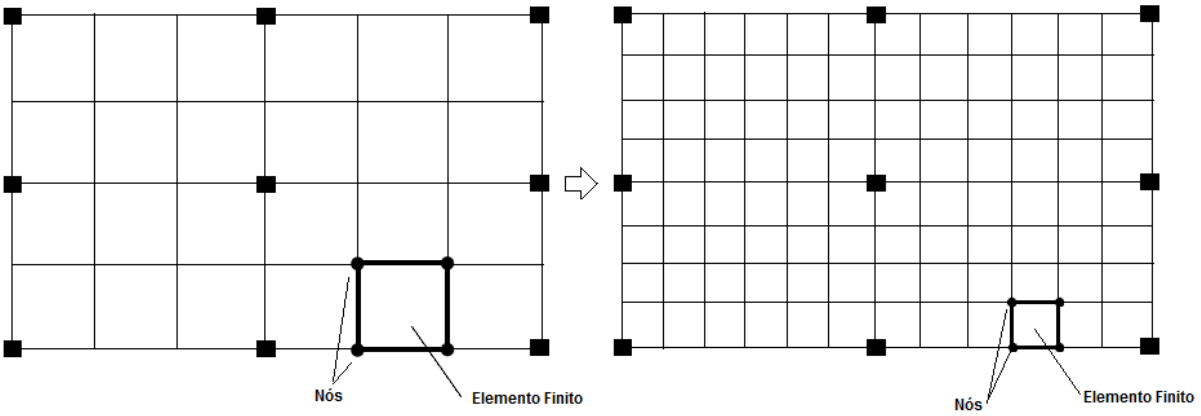

Figura 2.25 – Refinamento de uma malha de elementos finitos

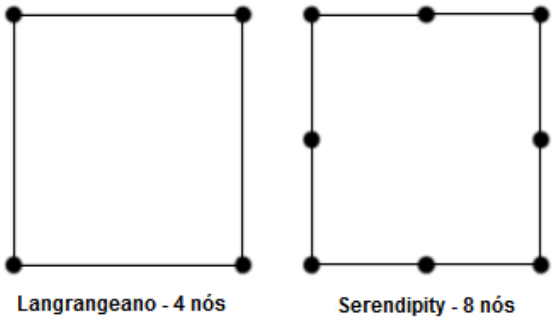

Figura 2.26 – Exemplo: elemento finito de 4 e 8 nós

Segundo Deaton [17] uma malha bem refinada é aquela que apesar de se poder sempre aumentar o número de elementos finitos não traz grandes alterações aos resultados.

Contudo, Orlando [18] refere que nem todas as quantidades fornecidas convergem à mesma taxa. Normalmente, pela razão que o campo de tensões é obtido a partir do campo de deslocamentos, as tensões têm uma precisão mais fraca do que os deslocamentos. Assim, apesar de haver uma convergência nas deformações as tensões poderão estar ainda longe da precisão adequada.

Assim sendo, a geração e discretização de um elemento, ou seja, quando se divide e refina-se um elemento contínuo em vários elementos de menor dimensão, é uma das etapas importantes deste método, pois uma má discretização pode originar erros de avaliação de esforços consideráveis.

A existência de pontos singulares, como cargas pontuais, condições particulares de apoio e aberturas, podem também influenciar. Normalmente estas zonas apresentam gradientes de tensão elevados pelo que uma análise rigorosa passa pelo refinamento local da malha, obtendo-se deste modo valores nodais próximos uns dos outros, logo os valores obtidos pela interpolação são mais precisos.

Outro factor que influencia significativamente os resultados obtidos é a definição do tipo de elemento, usado para simular o comportamento de uma estrutura laminar. Normalmente, os softwares de cálculo automático têm disponíveis elementos pré-definidos que representam os diferentes comportamentos da estrutura real. Estes elementos são:

- Cascas (Shell);
- Membrana (Membrane);
- Placa (Plate).

A diferença entre os elementos está no número de graus de liberdade, os quais são função das características do carregamento, condições de apoio e tipo de estrutura (Figura 2.27).

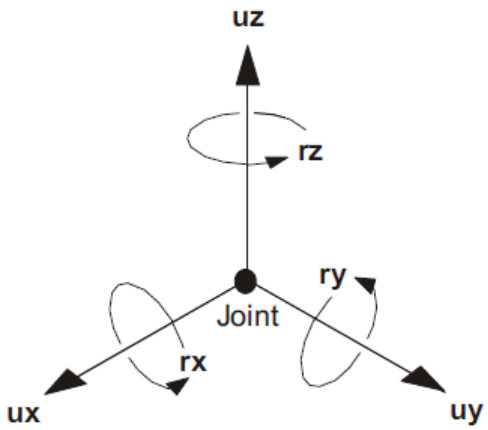

Figura 2.27 – Graus de liberdade num nó de um elemento finito

Nas estruturas laminares, o método dos elementos finitos baseia-se sobretudo nas teorias de Mindlin/Reissner e de Kirchhoff, as quais são utilizadas na simulação por elementos finitos do comportamento dessas estruturas. Na teoria de Kirchhoff (elementos finos) é necessário garantir a continuidade do deslocamento transversal e das suas primeiras derivadas entre elementos adjacentes. Na teoria de Mindlin/Reissner (elementos espessos), que contempla a deformação por corte, a rotação é independente do deslocamento transversal podendo-se utilizar funções de forma mais simples para assegurar a continuidade do campo dos deslocamentos (aplica-se a elementos laminares quando a sua espessura é maior que 1/10 da menor dimensão do plano).

Segundo Azevedo [6], muitos dos integrais que é necessário calcular no âmbito da aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) não são triviais, i.e., ou a primitiva da função integranda não existe explicitamente, ou é demasiado complicada para viabilizar a sua utilização prática. Por este motivo é essencial recorrer a técnicas de integração numérica, sendo a mais utilizada a Quadratura de Gauss.

Percebe-se então que a utilização deste método tenha-se tornado viável, no âmbito do projeto de estruturas, após o surgimento dos computadores e da sua evolução. Assim, com o aumento da velocidade de processamento dos computadores, o método desenvolveu-se bastante, sendo usado atualmente na maioria dos softwares de cálculo automático. Dada a potencialidade do método, hoje em dia é aplicado em diversas áreas da engenharia, nomeadamente estruturas, geotecnia, acústica e outras.

A breve descrição do MEF apresentada nesta secção pode ser complementada com a consulta de bibliografia da especialidade (Azevedo [6] e Zienkiewicz [7]).

2.2.4 BREVE DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS DE CÁLCULO UTILIZADOS

Nos pontos seguintes estão resumidamente apresentados os programas de cálculo automático usados na presente dissertação, nomeadamente Autodesk Robot Structural Analysis, SAP2000, CypeCad e Novo Metal 3D. São evidenciadas algumas particularidades dos mesmos, as opções mais importantes tomadas nos programas e as informações necessárias à interpretação dos resultados.

2.2.4.1. AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

Anteriormente designado de Robot Millenium, este programa foi criado no seguimento da tese de doutoramento de André Niznik, em 1983 no Instituto Francês de Engenharia Civil de Toulouse, França. Em 1985 começou a ser comercializado pela empresa Francesa "Robot Diffusion" tendo sido criado em 2000 a versão em ambiente Windows - Robot Millenium. Em 2008 a empresa Norte Americana "Autodesk" adquiriu os direitos de comercialização do programa Robot Millenium, e integrou-o com outros softwares de engenharia, os quais já comercializava, num conceito Building Information Modeling (BIM).

O Autodesk Robot Structural Analysis é um programa de cálculo automático destinado à análise estrutural com interface tridimensional. Utiliza o método dos elementos finitos e permite efetuar análises lineares e não-lineares estáticas e dinâmicas. Possibilita ainda a realização de verificações regulamentares com base nos vários códigos de construção que dispõe na sua base de dados, dos quais se podem destacar os Eurocódigos, bem como o fornecimento de informações para o dimensionamento das estruturas, como por exemplo, quantidades de armadura a dispor nos elementos.

Tem pré-definidos modelos de cálculo para vários tipos de elementos estruturais, bi ou tridimensionais. O nº de graus de liberdade destes modelos variam em função do tipo de elemento a analisar (Figura 2.28).

Figura 2.28 – Tipos de cálculos ROBOT

A introdução de dados pode ser efectuada no próprio programa ou através da importação de um ficheiro em formato "dxf, dwg", ou seja vindo de um programa de desenho assistido por computador (p.e. Autocad). É auxiliada pela apresentação de perspectivas tridimensionais da geometria do modelo, o que torna possível a validação dos dados introduzidos, como, por exemplo, características das

secções e dos materiais atribuídos aos elementos da estrutura, contribuindo para a redução de possíveis erros na criação do modelo.

A modelação estrutural é então caracterizada principalmente por três tipos de objetos: ”Bars” (barras), “Panels” (painéis) e “Nodes” (nós).

Nos elementos “Bars” (pilares ou vigas) é possível definir a geometria e o material (betão, aço, madeira, etc…).

Os elementos “Panels” podem ser divididos em vários elementos finitos, no qual a malha e o nível de refinamento pode ser efectuada automaticamente pelo programa, em função de inputs do utilizador, ou personalizada pelo utilizador (desenhando-a no programa ou no Autocad).

Na definição automática da malha este programa dispõe de dois métodos para que a sua definição e discretização seja feita do um modo eficiente:

- O método de “Coons” – Divisão da estrutura em estudo em elementos triangulares ou quadriláteros, de modo a que lados opostos sejam divididos no mesmo número de segmentos. Ou seja, faces opostas da estrutura em estudo são divididas o mesmo número de vezes, existindo uma ligação entre os pontos de uma face com os pontos da face oposta (Figura 2.29 a));
- O método de “Delaunay” – Divisão optimizada em triângulos. Nota: apenas pode ser usado em elementos planos, ao contrário do método de “Coons” que pode ser utilizado em elementos volumétricos. A sua utilização é aconselhada em casos em que existam aberturas, ou em que a geometria seja mais complicada (Figura 2.29 b)).

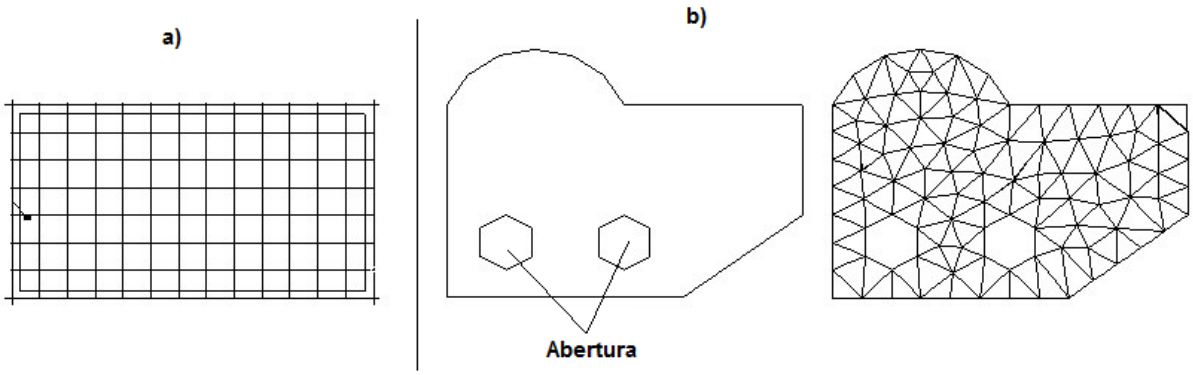

Figura 2.29 – Exemplo: malhas automáticas do ROBOT; a) Método de Coons ; b) Método Delaunay

O programa disponibiliza ainda ferramentas auxiliares, com vista ao refinamento da malha em zonas de aberturas, junto a cargas concentradas ou em zonas junto a apoios, por exemplo.

Os “Nodes” são caracterizados pelas restrições de translações (U_x, U_y e U_z) e rotações (R_x, R_y, R_z), ou seja, os graus de liberdade, (Figuras 2.27 e 2.35). É possível definir constantes elásticas “elastic” bem como impor deslocamentos.

É possível a visualização dos eixos locais (eixos x, y e z) de cada elemento. Por defeito o eixo z é sempre normal ao elemento. Os outros dois eixos dependem da orientação espacial bem como a numeração dos nós. Por este motivo, normalmente é necessária a rotação dos eixos, de modo a tornar

mais perceptível a leituras dos resultados. Isto pode ser efectuado no programa através do comando "local system orientation".

A convenção de sinais usada no programa, para os esforços no próprio plano, momentos flectores e torção é apresentada na Figura 2.30.

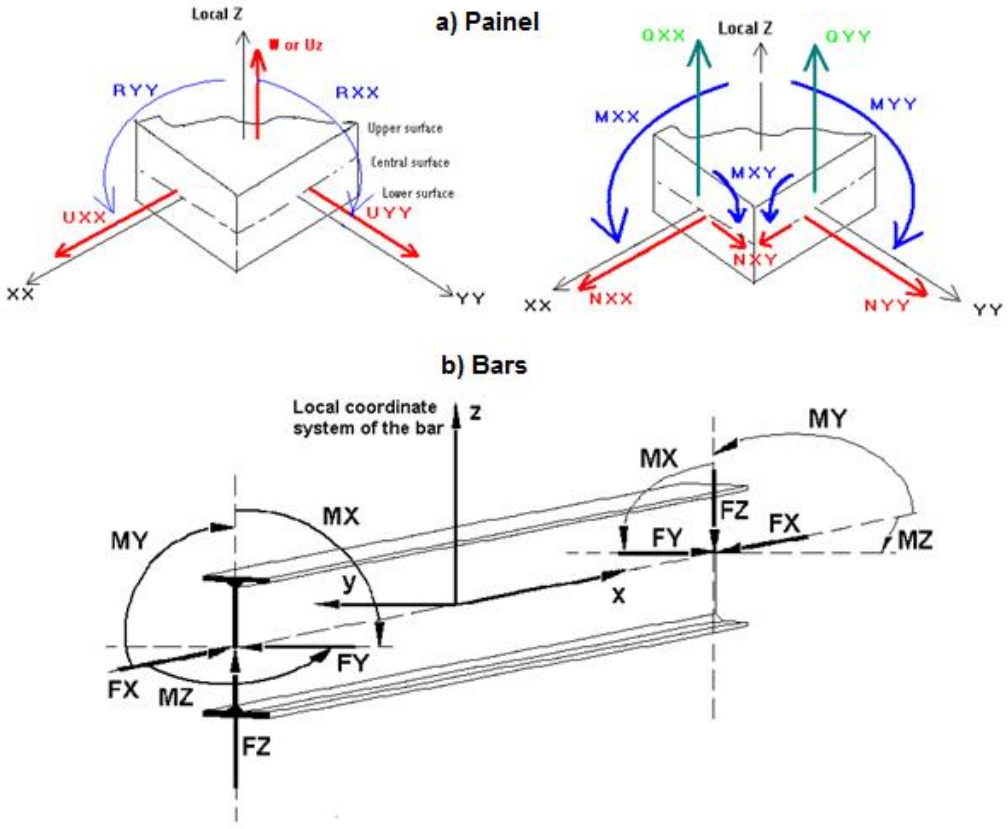

Figura 2.30 – Convenção de sinais do programa ROBOT: a) Em painéis; b) Em barras

Os resultados da análise são apresentados através de mapas ou através de diagramas, porém estes podem ser consultados através de tabelas com a descrição detalhada dos valores nodais. Outra opção que disponibiliza, a qual se torna bastante útil no sentido de averiguar possíveis erros na criação do modelo ou na definição das ações, é a possibilidade de visualização da deformada da estrutura em 3D.

O programa permite efetuar a análise dinâmica através de vários métodos, sendo que na presente dissertação é utilizada a técnica de análise modal com a resposta dinâmica da estrutura obtida através da sobreposição modal, utilizando os espectros de resposta da norma europeia NP EN-1998-1 [19]. Os resultados dos vários deslocamentos e esforços obtidos, para cada modo de vibração, são combinados através do método de combinação quadrática completa (CQC).

Sublinha-se que os aspectos aqui mencionados dizem respeito à versão 2013 do programa. Alguma dúvida que surja, pode ser facilmente clarificada no manual ou bibliografia do software [20] e [21].

2.2.4.2. SAP2000

O programa foi desenvolvido na Universidade da Califórnia, em Berkeley, através do trabalho de pesquisa de Edward L. Wilson. Em 1975 Ashraf Habibullah criou a "CSi Computers & Structures, inc.", empresa que viria a comercializar o programa.

O SAP2000 é um programa de análise estrutural com interface tridimensional. Utiliza o método dos elementos finitos permitindo efetuar análises lineares e não-lineares estáticas e dinâmicas. Possibilita ainda a realização de verificações regulamentares com base nos vários códigos de construção que dispõe na sua base de dados, dos quais se podem destacar os Eurocódigos, bem como o fornecimento de informações para o dimensionamento das estruturas, como por exemplo, quantidades de armadura a dispor nos elementos.

O software vem pré-definido com "templates" para vários tipos de elementos estruturais, bi ou tridimensionais. O nº de graus de liberdade, destes "templates", varia em função do tipo de elemento a analisar (Figura 2.31).

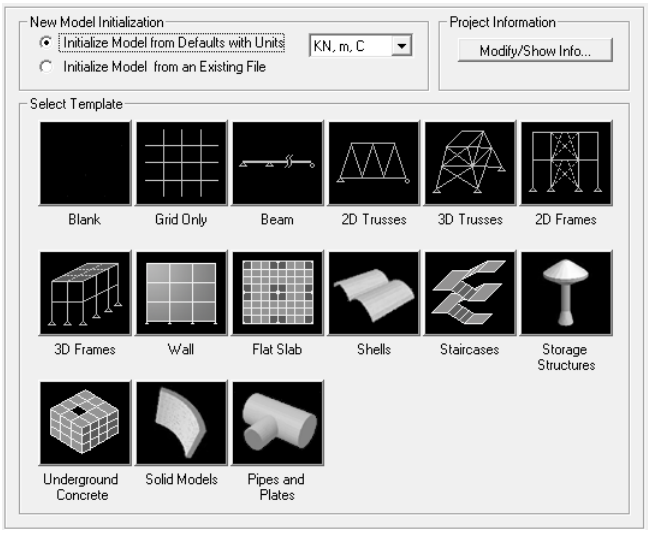

Figura 2.31 – Template SAP2000

A modelação estrutural pode ser efectuada no próprio programa ou através da importação de um ficheiro em formato "dxf", ou seja vindo de um programa de desenho assistido por computador (p.e. Autocad). Esta é caracterizada principalmente por três tipos de objetos: "Frame" (barras), "Area"(áreas) e "Joint" (nós).

Nos elementos "Frame" (pilares ou vigas) é possível definir a geometria e o material (betão, aço, madeira, etc…).

Os elementos "Area" podem ser divididos em vários elementos finitos (Figura 2.32), no qual a malha e o nível de refinamento pode ser efectuada automaticamente pelo programa, em função de inputs do utilizador, ou personalizada pelo utilizador (desenhando-a no programa ou no Autocad).

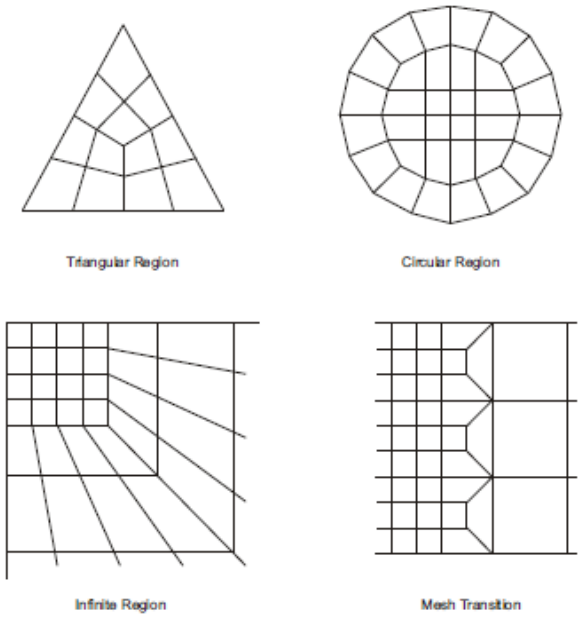

Figura 2.32 – Exemplo de malhas geradas pelo SAP2000: elemento quadrangular de 4 nós

Os elementos finitos podem ser de três tipos: "Shell", "Plane" ou "Axisysmmetric Solid" (os elementos laminares enquadram-se nos elementos "Shell", pelo que apenas estes serão abordados).

Cada elemento finito tipo "Shell" é caracterizado em função do tipo de comportamento:

- "Shell" (casca), comportamento de casca, permite rotações e deslocamentos em torno de todos os eixos locais do elemento (recomenda-se a utilização deste tipo de elemento);
- "Plate" (lajes), comportamento de placa (laje) puro, permite deformações segundo o eixo 3, e rotações em torno dos eixos locais 1 e 2;
- "Membrane" (paredes), comportamento de membrana puro, permite deformações axiais e rotações em torno dos eixos locais 1 e 2.

Podem ser do tipo quadrangulares ou triangulares, de quatro ou três nós, respectivamente (Figura 2.33). A análise destes pode ser efectuada através da formulação apresentada por Kirchhoff, para os elementos finos, "Thin", ou por Mindlin/Reissner, para os elementos espessos, "Thick".

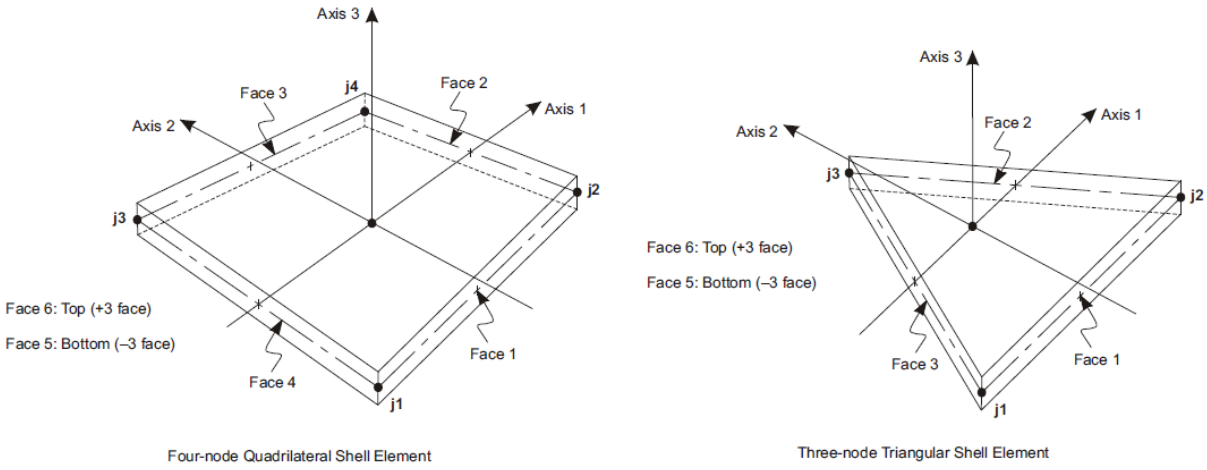

Figura 2.33 – Tipo de elementos finitos SAP2000

Na maioria dos programas de elementos finitos, em elementos isoparamétricos, as tensões são calculadas nos pontos de Gauss. Em muitos desses programas de cálculo, as tensões são apresentadas ou desenhadas nestes pontos. No SAP2000 as tensões são calculadas pelo programa nos pontos de Gauss (2x2) e em seguida extrapoladas para os pontos nodais. São estes valores nodais que são apresentados ao utilizador.

Os "Joint" são caracterizados pelas restrições, "restraints", de translações (U_x, U_y e U_z) e rotações (R_x, R_y, R_z), ou seja, os graus de liberdade, (Figuras 2.27 e 2.35). É possível definir constantes elásticas "springs" bem como impor deslocamentos "displacements".

É fundamental que o projetista tenha o conhecimento da convenção de sinais bem como a respectiva orientação dos eixos locais do elemento. No SAP2000 é possível a visualização dos eixos locais (eixos 1, 2 e 3) de cada elemento. Por defeito o eixo 3 é sempre normal ao elemento. Os outros dois eixos dependem da orientação espacial bem como a numeração dos nós. Por este motivo, normalmente é necessária a rotação dos eixos, de modo a tornar mais perceptível a leitura dos resultados. Isto pode ser efectuado no programa através do comando em "Assign/Area/Local Axes" e "Assign/Area/Reverse Local 3".

Para os elementos tipo "Shell" a convenção de sinais usada no programa, para os esforços no próprio plano, momentos flectores e torção é o constante na Figura 2.34.

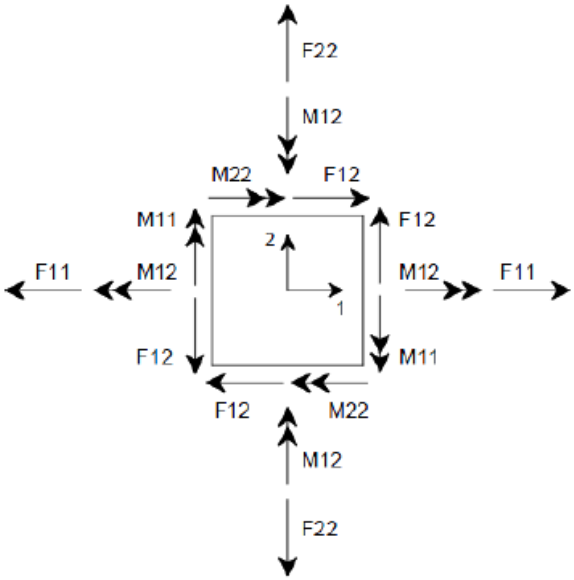

Figura 2.34 – Convenção de sinais de um elemento finito no programa SAP2000

Os resultados da análise são apresentados através de mapas ou através de diagramas. Porém estes podem ser consultados através de tabelas com a descrição detalhada dos valores nodais. Outra opção que disponibiliza, a qual se torna bastante útil no sentido de averiguar possíveis erros na criação do modelo ou na definição das ações, é a possibilidade de visualização da deformada da estrutura em 3D.

O programa permite efetuar a análise dinâmica através de vários métodos, sendo que na presente dissertação é utilizada a técnica de análise modal com a resposta dinâmica da estrutura obtida através da sobreposição modal, utilizando os espectros de resposta da norma europeia NP EN-1998-1 [19]. Os

resultados dos vários deslocamentos e esforços obtidos, para cada modo de vibração, são combinados através do método de combinação quadrática completa (CQC).

Sublinha-se que os aspectos aqui mencionados dizem respeito à versão 15 do programa. Alguma dúvida que surja, pode ser facilmente clarificada no manual ou bibliografia do software [22], [23] e [24].

2.2.4.3. CYPECAD

O programa é desenvolvido e comercializado pela empresa espanhola "CYPE Ingenieros S.A.". A primeira versão do programa apareceu 1983 e funcionava em ambiente MS-DOS, em modo texto. Em 1997 aparece a primeira versão em ambiente Windows, tendo sido sucessivamente melhorado ao longo do tempo.

O CYPECAD foi principalmente concebido para realizar a análise estrutural e dimensionamento de edifícios de betão armado e mistos, com geração automática da discretização da estrutura, das ações verticais e horizontais. A verificação regulamentar pode ser feita com base nos vários códigos de construção que dispõe na sua base de dados, dos quais se podem destacar os Eurocódigos.

A introdução de dados é simples, apresenta os menus de uma forma sequencial e intuitiva proporcionando fluidez na introdução.

A análise estrutural realiza-se através de um cálculo espacial em 3D, por métodos matriciais de rigidez, considerando todos os elementos que definem a estrutura: pilares, paredes, muros, vigas e lajes.

Estabelece-se a compatibilidade de deformações em todos os nós, considerando 6 graus de liberdade, e cria-se a hipótese de indeformabilidade do plano de cada piso, para simular o comportamento rígido da laje, impedindo os deslocamentos relativos entre os nós do mesmo (diafragma rígido). Por isso, cada piso apenas poderá rodar e deslocar-se no seu conjunto (3 graus de liberdade).

Quando num mesmo piso existirem zonas independentes, considerar-se-á cada uma destas como uma parte distinta relativamente à indeformabilidade dessa zona e não se terá em conta no seu conjunto. Por isso, os pisos comportam-se como planos indeformáveis independentes. Um pilar não ligado considera-se zona independente.

O software permite desligar o efeito de diafragma rígido às vigas que não estejam em contacto com lajes. Elimina automaticamente a suposição de diafragma rígido, ao nível do piso, nos muros que não estejam também em contacto com nenhuma laje.

Para todos os estados de carga realiza-se um cálculo estático (excepto quando se considerarem ações dinâmicas de sismo, em cujo caso se utiliza a análise modal espectral) e supõe-se um comportamento linear dos materiais, isto é, um cálculo de primeira ordem, com vista à obtenção de deslocamentos e esforços.

O programa permite efetuar a análise sísmica através do método dinâmico modal espectral, sendo que na presente dissertação é utilizado os espectros de resposta da norma europeia NP EN-1998-1 [19]. Os resultados dos vários deslocamentos e esforços obtidos, para cada modo de vibração, são combinados através do método de combinação quadrática completa (CQC).

A estrutura discretiza-se em elementos tipo barra (pilares e vigas), grelha (lajes) e elementos finitos triangulares (muros).

A discretização dos panos de laje maciça realiza-se em malhas de elementos tipo barra de tamanho máximo de 25 cm e efetua-se uma condensação estática (método exato) dos graus de liberdade. Tem-se em conta a deformação por corte e mantém-se a hipótese de diafragma rígido. Considera-se a rigidez à torção dos elementos.

A discretização dos muros é efectuada por elementos finitos tipo lâmina espessa tridimensional, que considera a deformação por corte. Todos os nós gerados correspondem a nós dos triângulos dos elementos de discretização. Os elementos finitos são constituídos por seis nós, localizados nos vértices e nos pontos médios dos lados, com seis graus de liberdade cada um. A sua forma é triangular. O programa cria automaticamente a malha do muro em função das suas dimensões, geometria, aberturas, com refinamento em zonas críticas, o que reduz a dimensão dos elementos nas proximidades de ângulos, bordos e singularidades.

O programa apresenta como resultados os diagramas de esforços, os deslocamentos verticais, as quantidades de armaduras e a pormenorização das armaduras. Relativamente aos diagramas de esforços, o programa apresenta o diagrama de momentos flectores, de momentos torsores, de esforço transverso e de esforço transverso total. Apresenta ainda um diagrama de deslocamentos verticais e os diagramas de quantidades de armadura, sendo que o cálculo da armadura é baseado nos momentos Wood-Armer. Outra opção que disponibiliza, a qual se torna bastante útil no sentido de averiguar possíveis erros na criação do modelo ou na definição das ações, é a possibilidade de visualização da deformada da estrutura em 3D.

O programa permite ainda gerar as peças desenhadas, e também as escritas, para ficheiros que poderão ser editados posteriormente e trabalhados por cada engenheiro.

Sublinha-se que os aspectos aqui mencionados dizem respeito à versão 2013 do programa. Alguma dúvida que surja, pode ser facilmente clarificada no manual ou bibliografia do software [25].

2.2.4.4. NOVO METAL 3D

O programa é desenvolvido e comercializado pela empresa espanhola “CYPE Ingenieros S.A.”. Concebido para realizar o cálculo de estruturas, em 3D ou 2D, com elementos tipo barra que podem ser de aço, de betão, de madeira, de alumínio ou de qualquer outro material. Se a estrutura for de aço, madeira ou alumínio, obtém-se o seu dimensionamento e optimização.

A introdução de dados consiste basicamente na definição de barras e cotas. O programa considera um comportamento elástico e linear dos materiais. As barras definidas são elementos lineares.

As cargas aplicadas nas barras podem-se estabelecer em qualquer direção. O programa admite qualquer tipologia: uniformes, triangulares, trapezoidais, pontuais, momentos e incrementos de temperatura diferentes em faces opostas. Nos nós podem-se colocar cargas pontuais em qualquer direção. O tipo de nó que se utiliza é totalmente genérico e admite-se que a vinculação interior seja encastrada ou articulada. Relativamente aos extremos das barras é possível definir coeficientes de encastramento (entre 0 e 1) ou através da sua rigidez rotacional (momento/rotação).

Pode-se utilizar qualquer tipo de apoio, encastrado ou articulado, ou vinculando algum dos seus graus de liberdade. Os apoios (vinculação exterior) podem ser elásticos, definindo as constantes correspondentes a cada grau de liberdade condicionado.

A partir das ações básicas pode-se definir e calcular qualquer tipo de combinação com diferentes coeficientes de combinação, seja de acordo com a norma selecionada ou definida pelo utilizador.

A partir da geometria e cargas que se introduzam, obtém-se a matriz de rigidez da estrutura, assim como as matrizes de cargas por ações simples. Invertendo a matriz de rigidez por métodos frontais, obter-se-á a matriz de deslocamentos dos nós da estrutura. Com os deslocamentos por ação, calculam-se todas as combinações para todos os estados e os esforços em qualquer secção a partir dos esforços nos extremos das barras e as cargas aplicadas nas mesmas.

O programa permite ainda gerar as peças desenhadas, e também as escritas, para ficheiros que poderão ser editados posteriormente e trabalhados por cada engenheiro.

Sublinha-se que os aspectos aqui mencionados dizem respeito à versão 2013 do programa. Alguma dúvida que surja, pode ser facilmente clarificada no manual ou bibliografia do software [26].

2.3. MODELAÇÃO DAS FUNDAÇÕES DE ESTRUTURAS – MÉTODO DE WINKLER

A simulação da interação real do solo com as fundações duma estrutura pode ser efectuada num modelo de cálculo automático através da estimativa da rigidez elástica do solo, ou seja através de apoios elásticos, os quais permitem deslocamentos de translação tridimensionais (U_x, U_y e U_z).

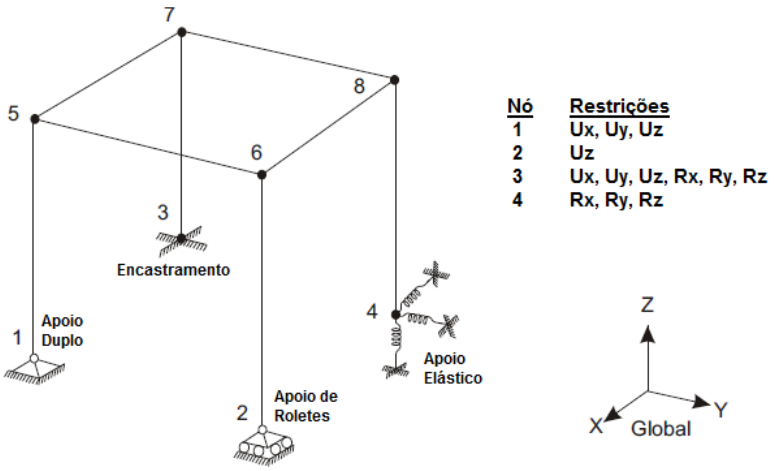

Figura 2.35 – Tipo de apoios numa fundação (adaptado de [23])

Em alguns programas de cálculo (p.e. SAP2000), esta simulação pode também ser feita através do método dos elementos finitos, com elementos de volume. Contudo, neste caso é necessário um conhecimento mais profundo do solo de fundação. Neste método é possível simular o comportamento do solo entrando-se com todos os estratos geológicos obtidos num estudo geotécnico. A comparação de resultados obtidos por este método, como os do método de apoios elásticos é uma das maneiras de se testar o modelo de cálculo. Porém, esta metodologia não foi alvo de estudo na presente dissertação mas, para mais informação sobre este assunto poderá ser consultada a bibliografia [27].

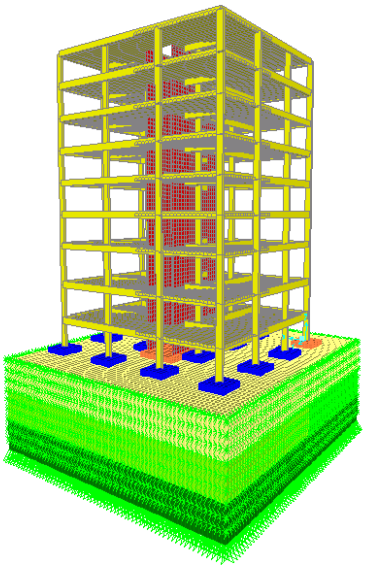

Figura 2.36 – Exemplo de Interação do solo com o modelo estrutural com recuso a elementos finitos volumétricos (adaptado de Monteiro [27])

Um dos modelos de previsão da rigidez elástica real dos solos é o sugerido por Winkler, no qual se admite que o deslocamento, *s*, de qualquer ponto situado na superfície do solo é diretamente proporcional à força aplicada (2.16).

$$F = K \times s \qquad (2.16)$$

em que,

- F – força aplicada (kN)
- K – coeficiente de rigidez da mola (kN/m)
- s – assentamento da sapata (m)

Segundo Fernandes [28] "Para avaliar a adequação de uma dada fundação é em regra necessário estimar os deslocamentos verticais descendentes, isto é, os assentamentos associados às cargas verticais por ela transmitidas ao maciço subjacente. O assentamento total, s (2.17), é a soma de três componentes: o assentamento imediato s_i, o assentamento por consolidação primária, s_c, e o assentamento por consolidação secundária ou por fluência, s_d."

$$s = s_i + s_c + s_d \qquad (2.17)$$

Regra geral, o peso das duas últimas parcelas no assentamento total é reduzido e como tal normalmente é desprezado podendo-se considerar insignificantes quando comparadas com o valor correspondente ao assentamento imediato, pelo que, os coeficientes de mola serão calculados com base no valor do assentamento imediato das fundações, s_i (2.18).

$$s_i = p \times B \times \frac{1-\nu^2}{E_s} \times I_s \qquad (2.18)$$

em que:

- s_i – assentamento da sapata (m);
- p = N / (BxL) – pressão aplicada ao nível da superfície da sapata (kN/m^2), sendo que B é a menor dimensão da sapata;
- N – esforço axial ao nível da sapata (kN);
- ν – coeficiente de Poisson do solo;
- E_s – módulo de deformabilidade do solo (kN/m^2);
- I_s – parâmetro que depende da geometria da área carregada e do ponto sobre o qual se pretende obter o assentamento. I_s é máximo no centro da área carregada e mínimo nos bordos (Nota: este valor é possível obter consultando o livro de Mecânica dos Solos [28], sendo que para sapatas quadradas é igual a I_s = 0,92).

Relacionando as expressões (2.16) e (2.18) obtém-se uma expressão que permite estimar a componente vertical da constante elástica de uma fundação, k_z.

$$k_z = \frac{N}{s_i} = \frac{L \times E_s}{\left(1-\nu^2\right) \times I_s} \qquad (2.19)$$

Além dos referidos assentamentos verticais (U_z), existem deslocamentos (U_x e U_y) provocados pelas rotações nas fundações (Figura 2.37), devido à existência de momentos flectores.

Segundo Fernandes [28], "A composição dos assentamentos associados à carga vertical com aquelas rotações vai fazer com que os deslocamentos verticais passem a ser variáveis de ponto para ponto da base da sapata, mesmo que esta seja rígida".

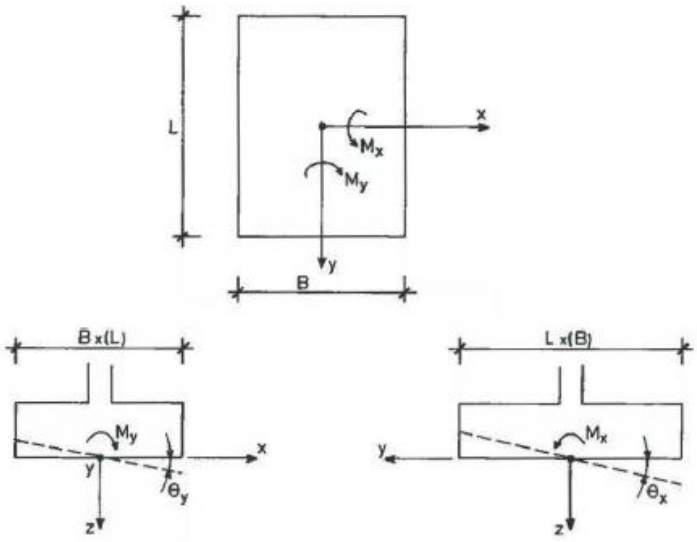

Figura 2.37 – Rotações de uma sapata assente num meio elástico sob ação de momentos (adaptado de Fernandes [28])

As rotações das sapatas associadas aos dois momentos M_x e M_y podem ser estimadas pelas expressões (2.20) e (2.21) apresentadas por Fernandes [28].

$$tg(\theta_x) = \frac{M_x}{B \times L^2} \times \frac{1-\nu^2}{E} \times I_{\theta x} \qquad (2.20)$$

$$tg(\theta_y) = \frac{M_y}{B^2 \times L} \times \frac{1-\nu^2}{E} \times I_{\theta y} \qquad (2.21)$$

Em que $I_{\theta x}$ e $I_{\theta y}$ são parâmetros adimensionais que para sapatas rígidas podem ser calculados pelas expressões (2.22) e (2.23).

$$I_{\theta x} = \frac{16}{\left(1+0{,}22\frac{L}{B}\right)\times\pi} \qquad (2.22)$$

$$I_{\theta y} = \frac{16}{\left(1+0{,}22\frac{B}{L}\right)\times\pi} \qquad (2.23)$$

Considerando que a rotação é infinitesimal, torna-se verdadeira a expressão (2.24). Da mesma forma, conhecidos os valores das rotações das sapatas nas duas direções, é possível determinar a expressão pela qual se determinam os coeficientes de rotação de mola, os quais se encontram indicados nas expressões (2.25) e (2.26).

$$\theta \cong tg(\theta) \qquad (2.24)$$

$$k_x = \frac{M_x}{tg\theta_x} = \frac{B \times L^2 \times E_s}{(1-\nu^2)\times I_{\theta x}} \qquad (2.25)$$

$$k_y = \frac{M_y}{tg\theta_y} = \frac{B^2 \times L \times E_s}{(1-\nu^2)\times I_{\theta y}} \qquad (2.26)$$

Conforme referido acima, na simulação em modelos de cálculo automático normalmente é aplicado um apoio elástico por fundação. No entanto, pode haver situações em que seja relevante a distribuição dos apoios elásticos na área ocupada pela fundação, sobretudo nos casos de fundações com geometria assimétrica, excêntricas, assentes em solo heterogéneo, com predominância de esforços numa dada direção e nos casos das fundações em laje. Nestes casos é possível simular o comportamento do solo

através da aplicação de várias molas, distribuídas pela área ocupada pela fundação, considerando que a rigidez de cada mola é determinada pela respectiva área de influência segundo o módulo de deformabilidade do solo onde se apoia (Figura 2.38).

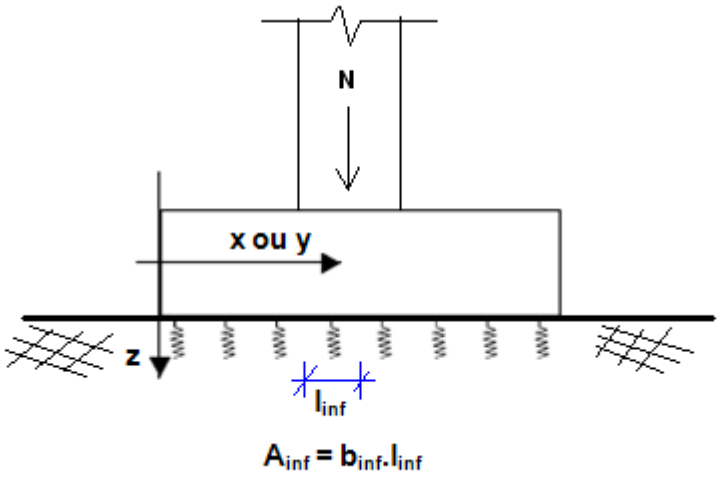

Figura 2.38 – Distribuição de apoios elásticos ao longo de uma fundação

3

CASO DE ESTUDO Nº1: TUNÉIS DE COMPOSTAGEM

3.1. INTRODUÇÃO

A "*VALNOR – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos do Norte Alentejano, S.A*" lançou, em 2006, 2008 e 2010, concursos públicos de concepção construção para uma nova central de tratamento e valorização orgânica de resíduos sólidos urbanos (CVO). Estes concursos foram ganhos pelo consórcio Português/Espanhol "*SOMAGUE ENGENHARIA, S.A./MASIAS RECYCLING, S.L.*". Os projectos de construção civil foram elaborados pela "*S.E. – Serviços de Engenharia*".

Localizada no Concelho de Avis, na Freguesia de Figueira e Barros, a central é constituída por um grande pavilhão industrial (40.000 m^2), dividido em vários compartimentos sequencialmente interligados, no qual se efetua o tratamento e a valorização de resíduos sólidos urbanos (Figura 3.1).

Tem uma capacidade de tratamento mecânico de 100.000 t/ano, capacidade de tratamento biológico de 30.000 t/ano (20.000 t/ano RSU e 10.000 t/ano lamas de ETAR), produz 10.000 t/ano de composto e produz 2750 GWh/ano de energia eléctrica através de biogás.

É constituída ainda por vários pequenos edifícios anexos: edifício administrativo, edifício laboratorial, edifício oficinal, edifício para o posto de transformação. A central possui ainda um passadiço elevado, ao longo do pavilhão principal, de modo a possibilitar visitas de estudo.

Figura 3.1 – Fotografia aérea: localização GPS: N 39° 05´22,14"; W 07° 43´28,67"

3.2. DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA CVO

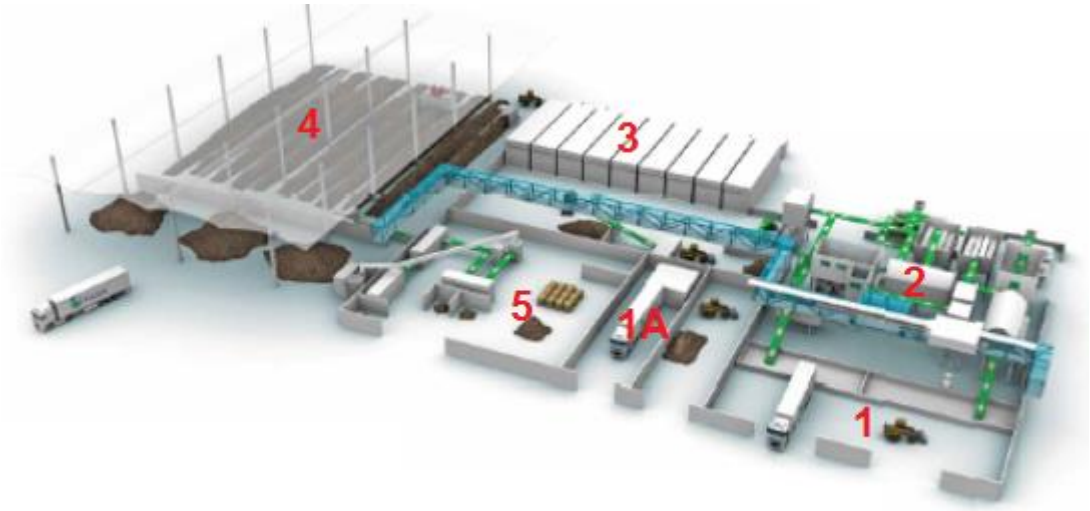

Figura 3.2 – Esquema da CVO

O processo do tratamento e valorização de resíduos sólidos urbanos inicia-se com o despejo do lixo, vindo de camião, na fossa de recepção existente na área de recepção (compartimento 1 da Figura 3.2). Paralelo à mesma área (compartimento 1 A da Figura 3.2), existe um fosso apenas para o despejo de lamas provenientes de ETAR, vindas de camião (a central permite também a valorização deste tipo de resíduos).

O lixo da fossa de recepção é recolhido por uma grua em ponte rolante, a qual transporta-o para os vários equipamentos que estão no compartimento do tratamento mecânico (compartimento 2 da Figura 3.2).

O tratamento mecânico consiste na separação da fracção orgânica dos materiais passíveis de serem valorizados e reciclados.

Figura 3.3 – Grua em ponte rolante; tratamento mecânico (arquivo pessoal)

Segue-se o tratamento biológico (compartimento 3 da Figura 3.2) onde a fracção orgânica, proveniente do tratamento mecânico e do fosso de lamas, é misturada com um material estruturante - estilha de

madeira - e esta é submetida a um processo de decomposição/digestão controlada em túneis de compostagem (pré-compostagem).

O processo de decomposição/digestão pode ser feito por via aeróbia (com oxigénio) e por via anaeróbia (sem oxigénio).

Na compostagem aeróbia, a decomposição é realizada por microorganismos decompositores que só vivem na presença de oxigénio, os quais comem, trituram, degradam e digerem as células e moléculas que compõem a matéria orgânica. A temperatura pode chegar até aos 70ºC, os odores libertados não são agressivos e a decomposição é mais veloz.

Na compostagem anaeróbia, também conhecida como biogasificação ou metanização, a decomposição é realizada por microorganismos decompositores que podem viver em ambientes sem a presença de oxigénio. A temperatura é mais baixa do que na aeróbia, (pode chegar até aos 42ºC), gera biogás, que é formado por cerca de 50%-60% de metano (CH_4) e que pode ser utilizado como combustível. Contudo leva mais tempo até que a matéria orgânica se estabilize. O resíduo sólido da biogasificação pode ser posteriormente tratado aerobicamente de modo a formar composto orgânico.

A central possui túneis de compostagem aeróbia e anaeróbia (Figuras 3.4 e 3.5).

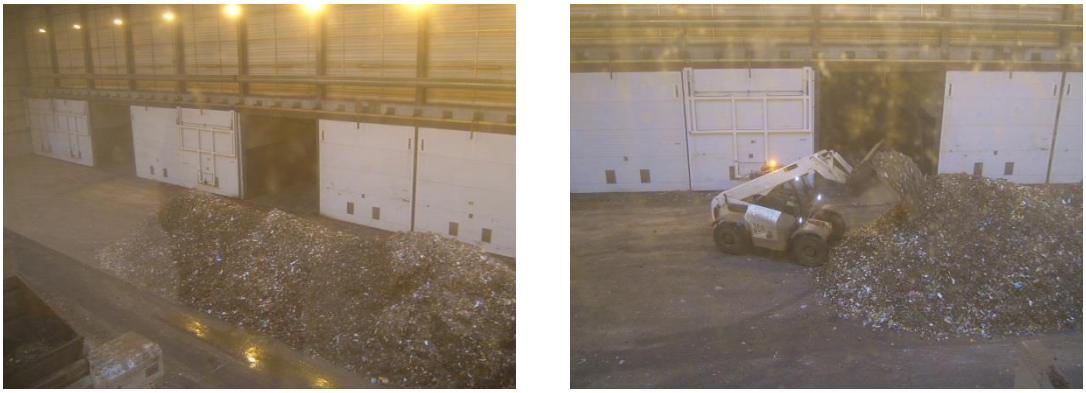

Figura 3.4 – Túneis de compostagem via aeróbia (arquivo pessoal)

Figura 3.5 – Esq.) Túneis de compostagem (via anaeróbia); Dir.) Depósito/reator de percolato/lixiviados

Em ambos os casos os túneis são em betão armado, podem ser fechados através de porta hermética e possuem no interior um sistema de rega, um sistema de recolha de água de lixiviados (a qual é reaproveitada na rega) e um sistema de arejamento mecânico (Figura 3.6).

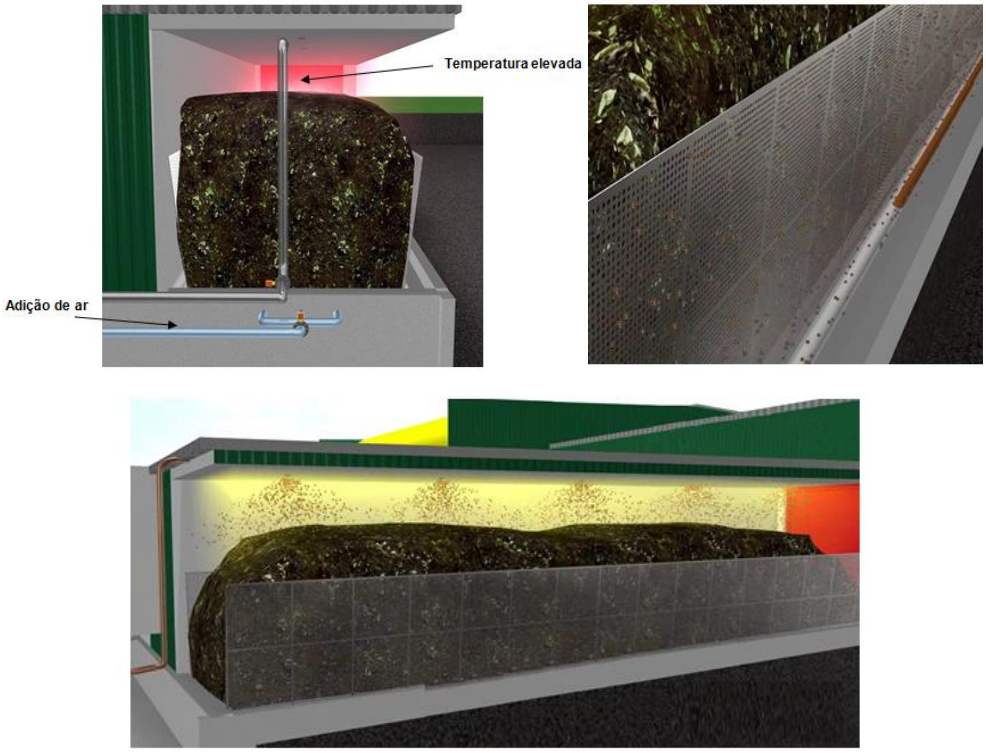

Figura 3.6 – Esquemas do sistema de adição de ar, do sistema de recolha de água e do sistema de rega

Os túneis de compostagem anaeróbia (Figura 3.5) são dotados ainda de um sistema de recolha do biogás, o qual é armazenado num gasómetro, sendo posteriormente utilizado como combustível nos motogeradores que vão produzir a energia eléctrica (Figura 3.8).

De modo a optimizar e racionalizar este processo, a água de lixiviados (percolato) recolhida a partir dos diversos fluxos é encaminhada para um depósito/reator (Figura 3.5), o qual tem a função de armazenar o percolato, nivelar o nível de acidez dos diferentes túneis e recuperar cerca de 20 – 30% de CH_4 (Biogás).

O reator está termicamente isolado, sendo aquecido a uma determinada temperatura (30 a 40 ºC) de modo a produzir biogás. Este aquecimento é efectuado com tubos de aquecimento no seu interior, sendo a energia térmica consumida no depósito obtida através da cogeração. O reator possui ainda uma cobertura especial para acumulação do CH_4.

O percolato (pré-aquecido), que se encontra no reator, é reencaminhado para os túneis para regar o material que se encontra dentro dos mesmos, garantindo uma temperatura estável durante a fase anaeróbia, suprimindo as necessidades de água e dotando a mistura da capacidade de originar os microrganismos desejados. O sistema não necessita de mais água do que a que é introduzida no início do processo, dado que esta é recirculada. No caso de haver excesso de líquidos, o sistema está conectado à rede de lixiviados dos túneis de compostagem. Existe também a possibilidade de proceder a um escoamento com controlo manual. Em caso de haver necessidade de introdução de água no processo, o sistema também está preparado para esta eventualidade.

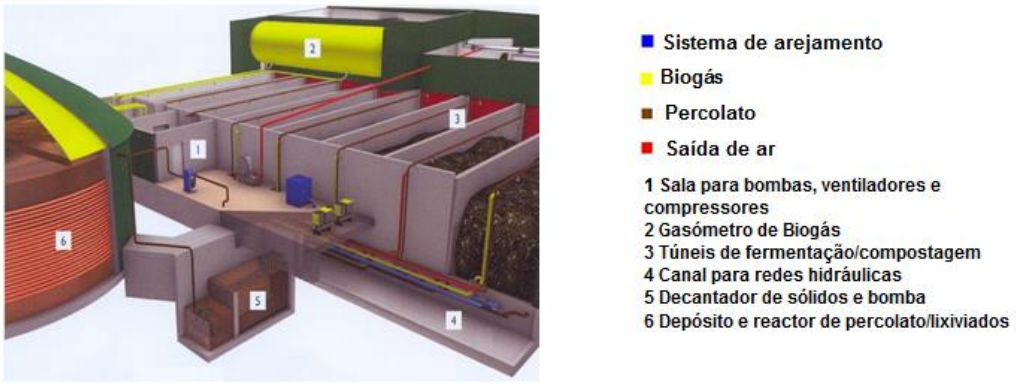

Figura 3.7 – Esquema de funcionamento da compostagem anaeróbia

Ao fim dos 21 dias, quando termina a fase de fermentação, o ar do túnel apresenta um teor em CH_4 inferior a 50%, porém, como se trata de um material explosivo, é necessário reduzir o seu teor para um valor inferior a 5%. Esta operação é realizada recorrendo a uma chama de gás pobre (Figura 3.7). Utiliza-se o gás acumulado no gasómetro, misturando com este gás pobre (< 50% CH_4), para serem queimados na chama. A partir do momento em que o gás apresenta um teor em CH_4 inferior a 5%, já se pode abrir a porta do túnel e proceder ao esvaziamento do mesmo.

Figura 3.8 – Motogerador e queimador de gás (arquivo pessoal)

Em ambos os processos, o ar que sai dos túneis durante a fase de enchimento dos mesmos, e durante a ativação do processo em modo aeróbio, antes de serem lançados para atmosfera passam pelo biofiltro (Figura 3.9).

Figura 3.9 – Biofiltro (arquivo pessoal)

Após a pré-compostagem o material resultante (composto) é levado para a área coberta exterior onde vai terminar o processo de maturação (compostagem). É colocado em pilhas, sendo periodicamente regado (compartimento 4 da Figura 3.2 e Figura 3.10).

Figura 3.10 – Compostagem/maturação em pilhas (arquivo pessoal)

Terminada a maturação, o composto resultante é ensacado (compartimento 5 da Figura 3.2) e armazenado em stock (compartimento 6 da Figura 3.2).

O composto é um produto higienizado e estabilizado, resultante da decomposição natural de matéria orgânica. As suas características promovem um aumento da capacidade de retenção de água nos solos, uma redução da necessidade de herbicidas e pesticidas, aumentando a resistência das plantas a doenças e pragas, e aumento do teor de matéria orgânica dos solos.

3.3. TÚNEIS DE COMPOSTAGEM – CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

Para o primeiro caso de estudo da presente dissertação selecionou-se, dos vários elementos estruturais que constituem a central, a estrutura dos túneis de compostagem via aeróbia.

3.3.1. GEOMETRIA

A estrutura dos túneis de compostagem é totalmente em betão armado. Apresenta uma geometria tubular quadrangular, no qual um dos topos é fechado e o outro apresenta uma porta. Tem um desenvolvimento longitudinal de 20 metros, uma altura de 5 metros e uma largura de 5 metros. Os túneis estão estruturalmente agrupados em módulos de 2 unidades, sendo que em termos operacionais podem não estar a funcionar todos ao mesmo tempo (Figuras 3.11, 3.12 e 3.13).

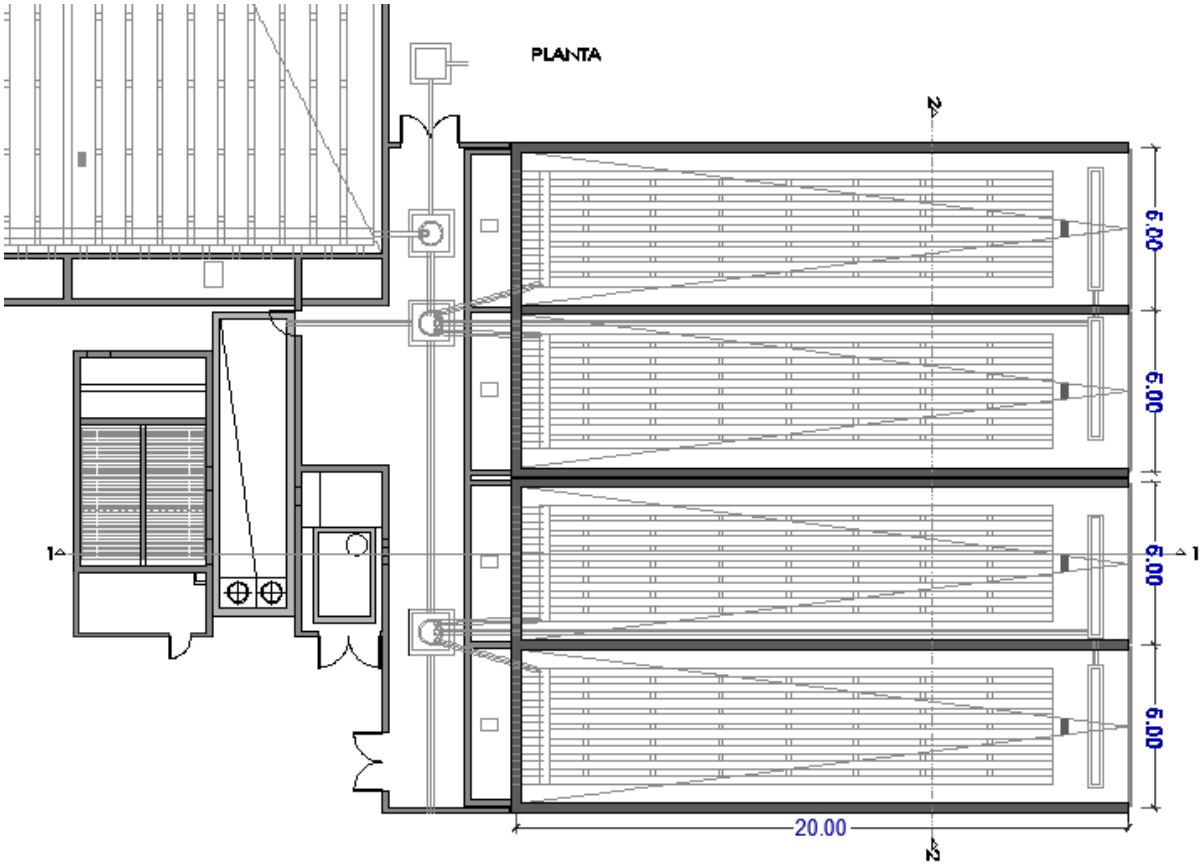

Figura 3.11 – Túneis de compostagem: planta (s/ escala)

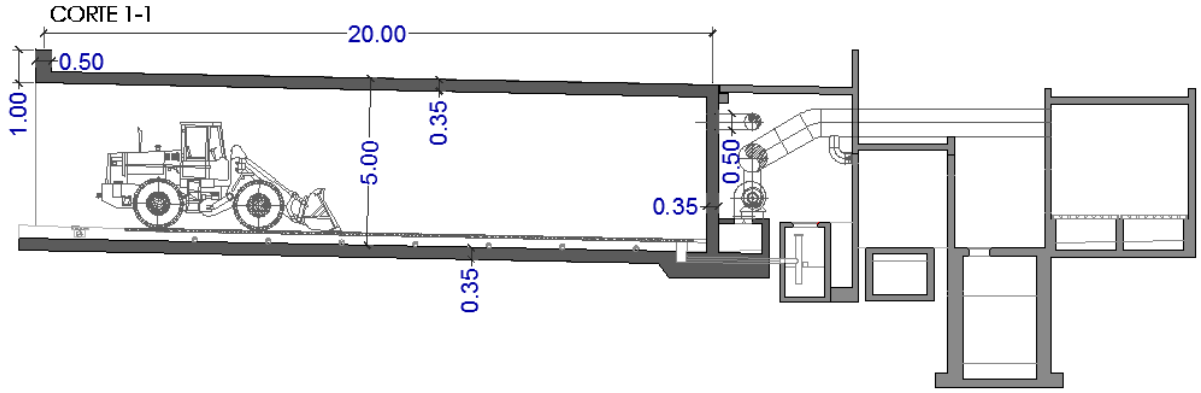

Figura 3.12 – Túneis de compostagem: corte 1-1 (s/ escala)

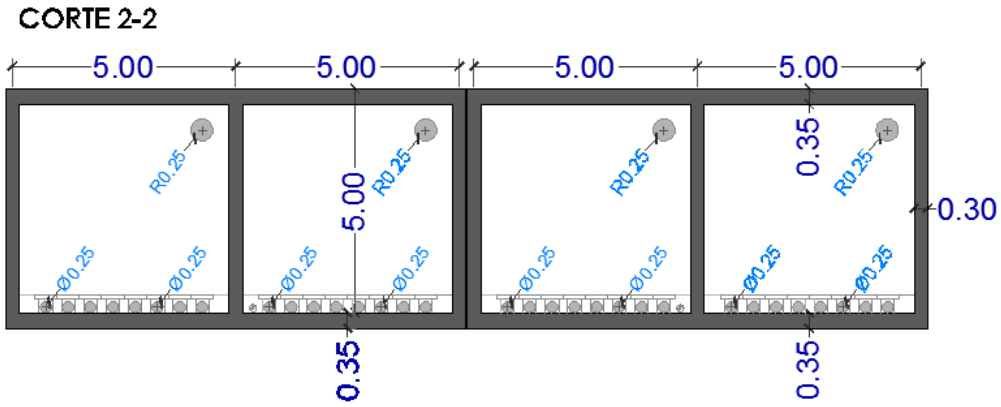

Figura 3.13 – Túneis de compostagem: corte 2-2 (s/ escala)

3.3.2. MATERIAIS E DURABILIDADE

A norma NP EN 1990 [29], define valores indicativos para o tempo de **vida útil** das estruturas. Refere ainda que as estruturas devem ser projetadas de modo a que a sua deterioração, ao longo da sua vida útil, não reduza o seu desempenho abaixo do prescrito, tendo em conta o ambiente e o nível de manutenção previsto. Isto pode ser conseguido através da **durabilidade** dos materiais.

Numa estrutura, o conceito de durabilidade é condicionado por diversos factores como a utilização prevista ou futura da estrutura, os critérios requeridos para o projeto, as condições ambientais previstas, as propriedades do solo, a composição, as propriedades e o desempenho dos materiais e dos produtos, a escolha do sistema estrutural, a forma dos seus elementos e as disposições construtivas, a qualidade da execução e o seu nível de controlo, as medidas específicas de proteção e a manutenção prevista durante o tempo de vida útil de projeto.

Destes factores, o meio ambiente condiciona fortemente a durabilidade duma estrutura, pelo que na fase de projeto devem ser identificadas as condições ambientais, de modo a poder-se estimar a sua importância em relação à durabilidade e permitir que se tomem medidas adequadas para a proteção dos materiais utilizados na estrutura. Medidas definitivas, em que não seja necessária a manutenção ao longo da sua vida útil, como por exemplo a escolha das características do betão a utilizar, bem como o controlo da sua qualidade e fabrico, são factores fundamentais na durabilidade das estruturas.

A presente estrutura enquadra-se na norma NP EN 1990 [29], como "outras estruturas correntes", ou seja, o tempo de vida útil é de **50 anos**. Pretende-se que durante o seu período de utilização, atendendo

às condições ambientais e de funcionamento previstas, a estrutura não necessite de grandes intervenções a nível de manutenção e de reparações, para além das inicialmente estipuladas ou definidas em caderno de encargos.

O normal funcionamento deste tipo de estruturas implica que, ao longo da sua vida útil, esteja exposta a ambientes muito agressivos devido ao contacto com material de compostagem, de águas de lixiviados resultantes da rega do composto e de gases gerados no processo.

A norma NP EN 206-1 [30] define os requisitos mínimos da especificação, desempenho, produção e conformidade do betão armado. Estes requisitos são em função da exposição ambiental e intensidade a que uma estrutura está submetida - Classes de exposição (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Classes de exposição (adaptado de [30])

Tipo de exposição ou ataque	Designação das classes
Sem risco de corrosão ou ataque	X0
Corrosão induzida por carbonatação	XC1, XC2, XC3, XC4
Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar	XD1, XD2, XD3
Corrosão induzida por cloretos da água do mar	XS1, XS2, XS3
Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes	XF1, XF2, XF3, XF4
Ataque químico	XA1, XA2, XA3

Verifica-se que a classificação tem em consideração os dois principais tipos de ataque ao betão armado ou pré-esforçado:

- Ataque à resistência do betão (fissuração) - gelo-degelo e ataque químico;
- Ataque à corrosão das armaduras ou outros materiais embebidos - corrosão induzida por carbonatação ou por iões de cloreto.

No presente caso, e tendo em conta as características químicas da água dos lixiviados e do material do composto, a estrutura enquadra-se numa classe de exposição ambiental tipo XA, ou seja, betões expostos a ataques químicos provenientes de solos naturais e de águas agressivas. A intensidade do ataque é função das características químicas da água e do solo (SO_4^{2-}, pH, CO_2, NH_4^+, Mg_2^+ e acidez dos solos) em contacto com o betão, que neste caso é do tipo 3, ou seja a classe de exposição é **XA3**.

Para uma classe de exposição XA3, a NP EN 206-1 [30], define valores limite para a composição e propriedades do betão:

- Máxima razão A/C – 0.45
- Mínima classe de resistência – C35/45
- Mínima dosagem de cimento – 360 kg/m^3
- Outros requisitos – cimento resistente aos sulfatos
- Classe de teor de cloretos – cl0.4

É igualmente importante garantir que seja utilizado na betonagem um betão compacto, ou seja, de baixa porosidade, com inertes de granulometria extensa no qual a máxima dimensão do inerte não seja superior a 20mm. Devem ser igualmente tomadas medidas durante a betonagem (cofragem e cura) que

assegurem um controlo cuidado da fendilhação pois, caso contrário, as fendas serão um caminho para a entrada de agentes agressivos, o que colocará em causa a durabilidade da estrutura.

Para minimizar a ação dos agentes agressivos do meio ambiente sobre a armadura é necessária também a especificação da espessura de recobrimento, a qual é obviamente função da classe de exposição.

A norma NP EN 1992-1-1 [1] define que o recobrimento das armaduras ou recobrimento nominal (c_{nom}) é a distância entre a superfície da armadura (incluindo ganchos, cintas, estribos e armadura de pele, quando relevante) e a superfície exterior de betão mais próxima.

O recobrimento nominal é obtido somando a um recobrimento mínimo (c_{min}), o qual é função dos requisitos de aderência, da classe de exposição e do tempo de vida útil/classe estrutural, uma margem de cálculo para as tolerâncias de execução, Δc_{dev}.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \qquad (3.1)$$

$$c_{min} = max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10mm\} \qquad (3.2)$$

$c_{min,b}$ – Recobrimento mínimo para os requisitos de aderência (diâmetro do varão ou diâmetro equivalente, $Ø_n$). Se o diâmetro do agregado for superior a 32mm aumentar 5mm;

$c_{min,dur}$ – Recobrimento mínimo relativo às condições ambientais – Quadro 3.2;

$\Delta c_{dur,\gamma}$ – Margem de segurança (o valor recomendado no anexo nacional é de 0mm);

$\Delta c_{dur,st}$ – Redução do recobrimento mínimo no caso de utilização de aço inoxidável (na ausência de informação considerar 0mm);

$\Delta c_{dur,add}$ – Redução do recobrimento mínimo no caso de proteção adicional (na ausência de informação considerar 0mm).

Nota: o valor recomendado para Δc_{dev} é 10 mm.

Quadro 3.2 – Valores de $c_{min,dur}$ em mm (adaptado de [30])

Classe Estrutural	Classe de Exposição Ambiental						
	X0	XC1	XC2/3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
1	10	10	10	15	20	25	30
2	10	10	15	20	25	30	35
3	10	10	20	25	30	35	40
4	10	15	25	30	35	40	45
5	15	20	30	35	40	45	50
6	20	25	35	40	45	50	55

O Quadro 3.2 é omisso no que respeita à classe XA (ataque químico). No entanto a norma NP EN 1992-1-1 [1] refere que, para estas classes, a adopção de um recobrimento definido neste

quadro será normalmente suficiente. Refere ainda que para um tempo de vida útil de 50 anos a classe estrutural é S4.

Porém, a classe estrutural pode ser diminuída caso haja uma garantia especial de controlo da qualidade de produção do betão, o que se verifica neste caso, pois segundo a NP ENV 13670-1 [31], este tipo de estruturas enquadra-se numa classe de inspeção tipo 3, no qual a certificação do controlo de produção é obrigatória.

Assim sendo, para o presente estudo o c_{nom} = 50mm. Este valor obtém-se considerando o recobrimento mais desfavorável do Quadro 3.2 para a classe estrutural S3, isto é, $c_{min,dur}$ = 40mm com a respectiva soma dos 10 mm correspondentes ao Δc_{dev}.

3.3.3. AÇÕES E COMBINAÇÕES

As ações consideradas na presente análise estrutural para a determinação dos esforços nas secções são as ações permanentes, resultantes dos pesos próprios, estruturais e não estruturais, as ações variáveis de sobrecargas de utilização, a ação térmica operacional, o vento e sismo, prescritas no Regulamento de Segurança e Ações em Estruturas de Edifícios e Pontes [32],e na norma europeia NP EN 1991-1-1 [33]. Na quantificação da ação térmica foi utilizada a norma europeia NP EN 1991-1-5 [34]. Para a ação sísmica foi utilizada a norma europeia NP EN 1998 1 [19].

Quadro 3.3 – Ações consideradas

Pesos Volúmicos	
Peso volúmico do betão armado	γ_{BA}= 25.00 kN/m^3
Peso volúmico do composto	γ_{Comp}= 17.00 kN/m^3
Peso volúmico do betão enchimento	γ_{BEnch}= 25.00 kN/m^3
Peso volúmico do godo	γ_{Godo}= 17.00 kN/m^3
Ações Permanentes	
Revestimentos no piso (30 cm enchimento variável + placas arejamento)	R_P= 6.00 kN/m^2
Revestimentos na cobertura (tela impermeabilização + godo)	R_{Cob}= 1.50 kN/m^2
Ações Variáveis	
Ação de Sobrecarga	
Sobrecarga no piso devido ao composto (4m altura) *	SC_{PC}= 68.00 kN/m^2
Sobrecarga no piso devido à pá carregadora *	SC_{PPC}= 10.00 kN/m^2
Sobrecarga na cobertura (não acessível)	SC_C= 1.00 kN/m^2
Ação Térmica	
Temperatura operacional máxima dentro dos túneis	$T_{Op.}$= 70 ºC
Variação uniforme da temperatura **	$T_{Uni.}$= 55 ºC
Variação diferencial de temperatura **	ΔT_{Tecto}= 42 ºC ΔT_{Parede}= 38 ºC

Ação do Vento	
Localização: Zona A Rugosidade: Tipo II	W_k= 0.90 kN/m^2
Ação do Sismo	
Zona Sísmica: B Ação Sísmica Tipo 1	a_g = 1.90 m/s^2
Ação Sísmica Tipo 2	a_g = 1.10 m/s^2
Coeficiente de comportamento	q = 3.00
Coeficiente de amortecimento	ζ = 5.00 %

*Nota: nos cálculos apenas é considerada a carga devida ao composto, por ser mais desfavorável (dentro dos túneis a carga do composto não soma com a carga da pá carregadora). Devido ao facto de a carga do composto permanecer vários dias dentro dos túneis nas combinações de ações, considera-se para esta ação, um valor reduzido ψ_0= ψ_1= ψ_2=1,00.

**Nota: ver justificação na secção 3.3.4. De igual modo, devido ao facto de a carga do composto permanecer vários dias dentro dos túneis nas combinações de ações, considera-se para esta ação, um valor reduzido ψ_0= ψ_1= ψ_2=1,00.

***Nota: a ação do sismo é introduzida automaticamente pelo programa de cálculo, segundo o espectro da NP EN 1998 1 [19].

Na determinação dos esforços de dimensionamento, em relação ao estado limite último (ULS), utilizam-se as combinações de ações definidas na expressão fundamental [29].

$$E_d = \sum_{j\geq 1} \gamma_{Gj} . G_{k,j} + \gamma_{Q,1} . Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} . \psi_{0,i} . Q_{k,i} \qquad (3.3)$$

No caso da ação sísmica, os esforços de dimensionamento são determinados pela expressão (3.4).

$$E_d = \sum_{j\geq 1} G_{k,j} + \gamma_I . A_{Ed} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} . Q_{k,i} \qquad (3.4)$$

Na determinação dos esforços de dimensionamento, em relação ao estado limite utilização (SLS), utilizam-se as combinações de ações definidas para a combinação característica [29].

$$E_d = \sum_{j\geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} \sum_{i>1} \psi_{0,i} . Q_{k,i} \qquad (3.5)$$

3.3.4. AÇÃO TÉRMICA – JUSTIFICAÇÃO

Segundo a norma europeia EN 1991-1-5 [34] as ações térmicas devem ser classificadas como ações variáveis e indiretas. Podem ser de origem climática ou operacional.

Componentes da temperatura

Num dado elemento estrutural a distribuição da temperatura pode ser decomposta nas seguintes quatro componentes essenciais, representadas na Figura 3.14:

a) Componente da variação uniforme de temperatura, ΔT_u;

b) Componente linear da variação diferencial de temperatura ao longo do eixo z, ΔT_{MY} ;

c) Componente linear da variação diferencial de temperatura ao longo do eixo y, ΔT_{MZ} ;

d) Componente não linear da variação diferencial de temperatura ΔT_E. A esta componente corresponde um sistema de tensões auto-equilibradas com esforços resultantes nulos no elemento.

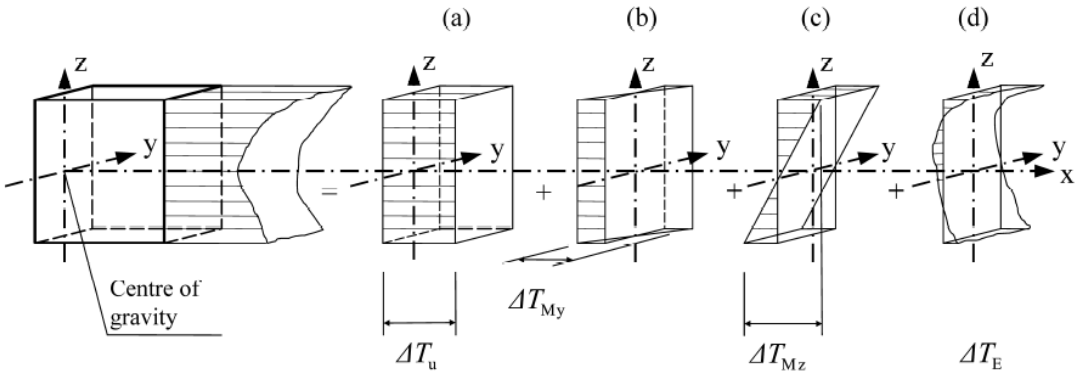

Figura 3.14 – Diagrama das componentes de um perfil de temperatura

Deve também ser considerado no projeto o efeito da radiação solar, o qual poderá ser traduzido por uma distribuição gradual da temperatura ao longo do perímetro da estrutura.

A componente da variação uniforme de temperatura e a componente da variação diferencial linear de temperatura, devidas à temperatura operacional, devem igualmente ser consideradas.

Simultaneidade das componentes da temperatura

Quando se considera uma combinação das ações térmicas devidas apenas aos efeitos climáticos ou, aos efeitos climáticos com as devidas aos efeitos do processo industrial (fluxo de gases aquecidos, líquidos ou materiais aquecidos), deverão combinar-se as seguintes componentes:

a) Variação uniforme de temperatura (ver Figura 3.15(a));

b) Distribuição em escada da temperatura (ver Figura 3.15(b));

c) Linearidade da variação diferencial de temperatura entre as faces interior e exterior da parede (ver Figura 3.15(c)).

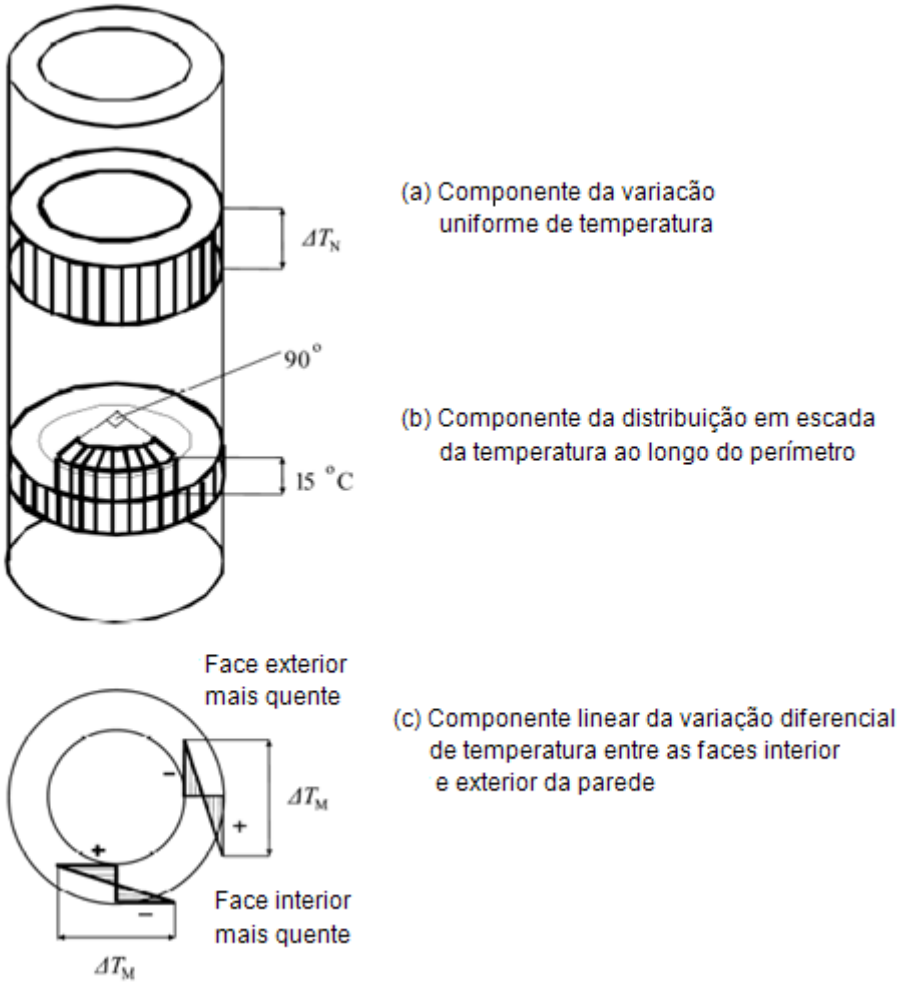

Figura 3.15 – Principais componentes da temperatura para condutas, silos, reservatórios e torres de arrefecimento

Deverá considerar-se que a componente da distribuição em escada da temperatura atua simultaneamente com o vento.

Determinação das componentes da temperatura

O presente caso de estudo enquadra-se no capítulo 7 da NP EN 1991-1-5 [34], ou seja variações da temperatura em chaminés industriais, condutas, silos, reservatórios e torres de arrefecimento.

De facto a ação térmica no interior dos túneis de compostagem assemelha-se à ação térmica existente dentro de um silo.

Assim sendo, este tipo de estrutura, que está em contacto com fluxos gasosos, com líquidos ou com materiais com diferentes temperaturas, deve ser projetada para as seguintes situações:

- Ações térmicas resultantes de efeitos climáticos devidos à variação da temperatura do ar à sombra e da radiação solar;
- Distribuição da temperatura relativa a condições de funcionamento, normais e anormais;

- Efeitos da interação entre a estrutura e o seu conteúdo durante as variações da temperatura (por exemplo, a retração da estrutura com um conteúdo sólido e rígido ou a dilatação de um conteúdo sólido durante o aquecimento ou o arrefecimento).

Temperatura do ar à sombra

O valor característico das temperaturas mínimas e máxima do ar à sombra, no local da obra, obtém-se nos mapas nacionais de isotérmicas, ou seja:

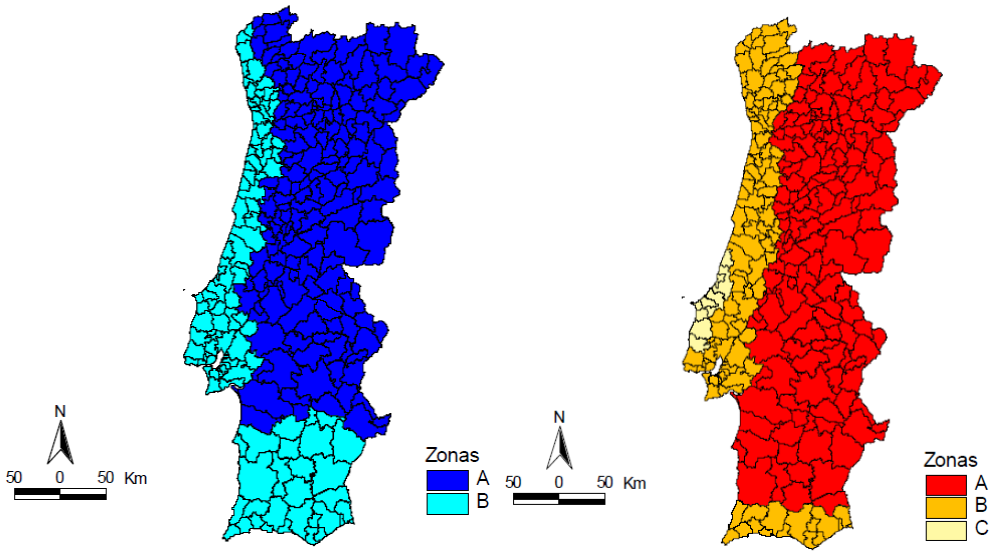

Figura 3.16 – Mapa de Portugal com zonamento térmico para as condições de Inverno (T_{min}) e verão (T_{max}) por concelhos

Quadro 3.4 – T_{min} e $T_{máx}$ em Portugal

	T_{min}	T_{max}
Zona A	-5ºC	45ºC
Zona B	0ºC	40ºC
Zona C	*5ºC	35ºC

* Madeira e Açores

Os valores apresentados encontram-se referidos à cota zero. Para obter os valores a cotas diferentes deve utilizar-se o preconizado na presente Norma, e que consiste em subtrair 0.5 ºC, por cada 100 m de altitude, ao valor fornecido para T_{min}, para as condições de Inverno, e 1.0 ºC, por cada 100 m de altitude, ao valor fornecido para T_{max}, para as condições de Verão.

A estrutura do presente caso de estudo situa-se no concelho de Alter do Chão, à cota altimétrica 200 m. Assim sendo, T_{min} = -6ºC e T_{max} = 47ºC.

Temperatura no interior da estrutura

Neste caso, a temperatura interior considerada é a temperatura operacional do túnel de compostagem, que conforme já referido é de 70ºC.

Determinação da Componente Variação Uniforme de Temperatura

A componente da variação uniforme e a componente linear da variação diferencial de temperatura devem ser determinadas tendo em conta os efeitos climáticos e as especificações operacionais.

A variação uniforme de temperatura ΔT_u, tendo em conta apenas os efeitos climáticos, é obtida pela diferença entre a temperatura média T de um elemento e a sua temperatura inicial T_0.

$$\Delta T_u = T - T_0 \qquad (3.6)$$

Nos casos em que a temperatura operacional é superior ou inferior à temperatura média climática, considera-se que T corresponde à temperatura operacional.

De acordo com o anexo de aplicação nacional da NP EN 1991-1-5 [34], nos casos em que não seja possível prever a temperatura inicial T_0 de um elemento estrutural na fase relevante do seu travamento (conclusão), deve considerar-se a temperatura média durante o período de construção. Se não existirem informações, T_0 pode ser considerado como 15 ºC.

No presente estudo tem-se: $\Delta T_u = 70 - 15 = 55ºC$

Determinação da Componente Variação Diferencial de Temperatura

A componente linear da variação diferencial de temperatura ΔT_M, na parede ou laje em camadas desta, deve ser considerada como sendo resultante da diferença entre a temperatura mínima (ou máxima) do ar à sombra na sua face exterior e o valor da temperatura do líquido ou do gás na sua face interior, tendo em conta os efeitos do isolamento ou seja utilizando um perfil de temperatura.

$$\Delta T_M = T_{out} - T_{in} \qquad (3.7)$$

Perfil de Temperatura

Os perfis de temperatura podem ser determinados a partir da teoria da transmissão térmica. No caso de um elemento em camada simples (por exemplo: laje, parede, casca), na hipótese de não existirem pontes térmicas locais e admitindo um equilíbrio térmico estável, a temperatura T(x) a uma distância x da superfície interior da secção transversal é obtida por:

$$T(x) = T_{in} - \frac{R(x)}{R_{tot}}(T_{in} - T_{out}) \qquad (3.8)$$

Em que:

T_{in} – Temperatura do ar ambiente interior;

T_{out} – Temperatura do ar ambiente exterior;

R_{tot} – Resistência térmica total do elemento incluindo a resistência de ambas as superfícies;

$R(x)$ – Resistência térmica na superfície interior adicionada à resistência térmica do elemento, medida desde a superfície interior até ao ponto x (ver a Figura 3.17).

$$R_{tot} = R_{in} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i} + R_{out} \qquad (3.9)$$

Em que:

R_{in} – Resistência térmica ao nível da superfície interior [m^2.K/W] (varia de 0.10 [m^2.K/W] a 0.17 [m^2K/W], dependendo da orientação do fluxo de calor);

R_{out} – Resistência térmica ao nível da superfície exterior [m^2K/W] (igual a 0.04 para todas as orientações);

λ_i – Condutibilidade térmica [W/m.K];

h_i – Espessura da camada *i* [m].

$$R(x) = R_{in} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i} \qquad (3.10)$$

São consideradas apenas as camadas (ou parte de uma camada) desde a superfície interior até ao ponto x (ver a Figura 3.17).

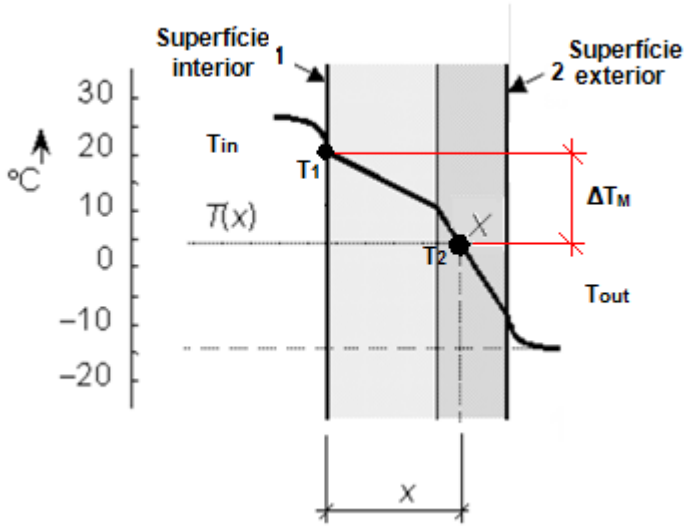

Figura 3.17 – Perfil térmico de elemento de duas camadas; esquema da variação de temperatura

No presente caso de estudo temos:

- Nas paredes (Inverno):

  T_{in} = 70ºC

  T_{out} = -6ºC

$$R_{tot} = R_{in} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i} + R_{out} \Rightarrow \begin{array}{l} R_{tot} = 0.13 + \dfrac{0.30}{1.75} + 0.04 = 0.341 m^2 {}^\circ C/W \\ R_2 = 0.13 + \dfrac{0.30}{1.75} = 0.301 m^2 {}^\circ C/W \end{array}$$

$$T(x) = T_{in} - \frac{R(x)}{R_{tot}}(T_{in} - T_{out}) \Rightarrow \begin{array}{l} T_1 = 70 - \dfrac{0.13}{0.341}(70 - (-6)) = 41.06^\circ C \\ T_2 = 70 - \dfrac{0.301}{0.341}(70 - (-6)) = 2.91^\circ C \end{array} \Rightarrow \Delta T \cong 38^\circ C$$

- Na cobertura (Inverno):

  T_{in} = 70ºC

  T_{out} = -6ºC

$$R_{tot} = R_{in} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i} + R_{out} \Rightarrow \begin{array}{l} R_{tot} = 0.10 + \frac{0.30}{1.75} + 0.04 = 0.311 m^2 {}^o C/W \\ R_2 = 0.10 + \frac{0.30}{1.75} = 0.271 m^2 {}^o C/W \end{array}$$

$$T(x) = T_{in} - \frac{R(x)}{R_{tot}}(T_{in} - T_{out}) \Rightarrow \begin{array}{l} T_1 = 70 - \frac{0.10}{0.311}(70 - (-6)) = 45.60^o C \\ T_2 = 70 - \frac{0.271}{0.311}(70 - (-6)) = 3.67^o C \end{array} \Rightarrow \Delta T \cong 42^o C$$

- Nas paredes (Verão):

  T_{in} = 70ºC

  T_{out} = 47ºC+2ºC (superfície de cor clara) = 49ºC

$$T(x) = T_{in} - \frac{R(x)}{R_{tot}}(T_{in} - T_{out}) \Rightarrow \begin{array}{l} T_1 = 70 - \frac{0.13}{0.341}(70 - 49) = 62.00^o C \\ T_2 = 70 - \frac{0.301}{0.341}(70 - 49) = 50.85^o C \end{array} \Rightarrow \Delta T \cong 11^o C$$

- Na cobertura (Verão):

  T_{in} = 70ºC

  T_{out} = 47ºC+2ºC (superfície de cor clara) = 49ºC

$$T(x) = T_{in} - \frac{R(x)}{R_{tot}}(T_{in} - T_{out}) \Rightarrow \begin{array}{l} T_1 = 70 - \frac{0.10}{0.311}(70 - 49) = 63.26^o C \\ T_2 = 70 - \frac{0.271}{0.311}(70 - 49) = 69.13^o C \end{array} \Rightarrow \Delta T \cong 6^o C$$

Constata-se que a ação térmica no Verão não é condicionante para o dimensionamento estrutural, pelo que não será considerada.

3.4. MODELAÇÃO EM PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

Na presente dissertação efetuou-se e comparou-se os seguintes modelos estruturais para os túneis de compostagem:

- Modelo de cálculo com recurso a elementos de grelha – Programa Autodesk Robot Structural Analysis 2013;
- Modelo de cálculo com recurso a elementos finitos – Programas Autodesk Robot Structural Analysis 2013 e SAP2000 versão 15.

Em cada modelo de cálculo os casos de ações estão denominados de acordo com o Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Denominação das ações consideradas nos modelos cálculo

Ação		Observação
1	PP_REV	Peso próprio e revestimentos
2	SOBRE_PISO	Sobrecarga no piso dos túneis nº1 e 2
3	SOBRE_PISO_1	Sobrecarga só no piso do túnel nº1
4	SOBRE_COB	Sobrecarga só na cobertura
5	TEMP	Temperatura uniforme e diferencial
6	TEMP_1	Temperatura uniforme e diferencial no túnel nº1
7	VENTO	Só existe vento na direção x numa parede e na cobertura
8	SISMO	X,Y e Z

3.4.1. MODELO DE ELEMENTOS DE GRELHA

Para o desenvolvimento do modelo tridimensional constituído por elementos de grelha, recorreu-se ao template "Frame 3D Design", disponibilizado pelo programa para o estudo de estruturas com elementos de barra tridimensionais, o qual considera 6 graus de liberdade por nó: 3 graus correspondentes a deslocamentos segundo os 3 eixos principais (U_x, U_y e U_z) e outros 3 graus correspondentes a rotações segundo esses mesmos eixos (R_x, R_y e R_z).

Tendo em conta a geometria dos túneis, na presente modelação considerou-se que uma grelha com uma malha de 50x50 cm (Figura 3.18) seria razoável e capaz de fornecer resultados com um nível de precisão aceitável.

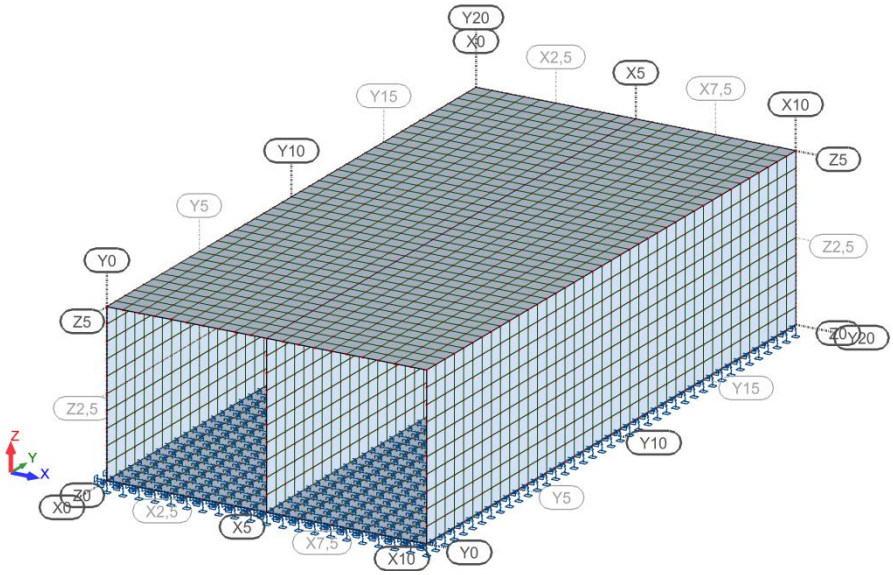

Figura 3.18 – Esquema 3D dos túneis com elementos de barra

A secção das barras está definida de modo a ser tida em conta o efeito deformação transversal das barras (principal característica dos elementos de casca). Para tal, calcula-se a inércia equivalente (equação 2.4) e impondo uma largura de 50cm determina-se a variável espessura. A secção das barras é de 50 cm de largura (excepto nos extremos no qual se considera a largura igual à espessura do elemento) por 30.5 ou 35.5 cm de espessura. Está ainda introduzida, na entrada do túnel, a viga com 50x100 cm representada no corte 1-1 da Figura 3.12.

Todos os apoios de fundação são elásticos e estão colocados em cada nó da grelha da laje de fundação. O estudo geotécnico efectuado no local caracteriza o solo de fundação como uma argila siltosa/arenosa e xisto decomposto, com um módulo de deformação de 25 a 30 MPa. Com base nesta informação e nas expressões do subcapítulo 2.3, os valores das constantes elásticas em função da área de influência são os que constam no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Valor das constantes elásticas dos apoios de fundação

Área de Influência (m^2)	K_z (kN/m)	K_x (kN/m)	K_y (kN/m)
0.50x0.50	17917	987	987
0.25x0.50 (nós extremos)	12600	225 ou 583	583 ou 225

As cargas no modelo estão introduzidas de dois modos: cargas permanentes, sobrecargas e vento estão por metro quadrado, num plano virtual criado no programa com recurso à ferramenta "cladding", o qual distribuiu as cargas pelas barras, nas duas direções. As cargas térmicas estão introduzidas manualmente em todas as barras, pois a ferramenta "cladding" não permite a introdução de cargas térmicas.

Neste método é frequente desprezar o valor da rigidez de torção (ver secção 2.2.4.3), isto é, GJ = 0. Tendo ainda em conta que o programa considera automaticamente o peso próprio e de modo a não haver duplicação deste, devido à grelha, são considerados dois tipos de materiais: um betão C35/45, da base de dados do programa, no qual foi alterado o módulo de distorção para um valor praticamente nulo, e um betão C35/45 no qual é considerado um peso específico e um módulo de distorção praticamente nulo.

O cálculo é realizado em duas etapas: primeiro o cálculo estático e em seguida a análise modal com a resposta dinâmica da estrutura obtida através da sobreposição modal, utilizando os espectros de resposta da norma europeia NP EN-1998-1 [19], para a respectiva localização sísmica (Figura3.23). Os resultados dos vários deslocamentos e esforços obtidos, para cada modo de vibração, são combinados através do método de combinação quadrática completa (CQC).

A apresentação dos resultados obtidos é efectuada na secção 3.4.3, juntamente com os resultados dos outros modelos.

3.4.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

O desenvolvimento dos modelos tridimensionais constituídos por elementos finitos está efectuado nos templates “Shell 3D Design” e “Blank”, disponibilizado pelos programas respectivos para o estudo de estruturas tridimensionais com elementos finitos, o qual considera 6 graus de liberdade por nó: 3 graus correspondentes a deslocamentos segundo os 3 eixos principais (U_x, U_y e U_z) e outros 3 graus correspondentes a rotações segundo esses mesmos eixos (R_x, R_y e R_z).

Tendo em conta a geometria dos túneis, e de modo a assemelhar-se à malha do modelo de grelha, considera-se igualmente uma malha de 50x50 cm (Figura 3.19 e 3.21).

A discretização do modelo em elementos finitos é efectuada através das ferramentas para a geração automática da malha disponível nos programas.

No Robot é utilizado o método de Coons referido na secção 2.2.4.1 da presente dissertação. A malha de elementos finitos é constituída predominantemente por elementos quadriláteros de 4 nós com dimensões máximas de 0,50 m (Figura 3.19).

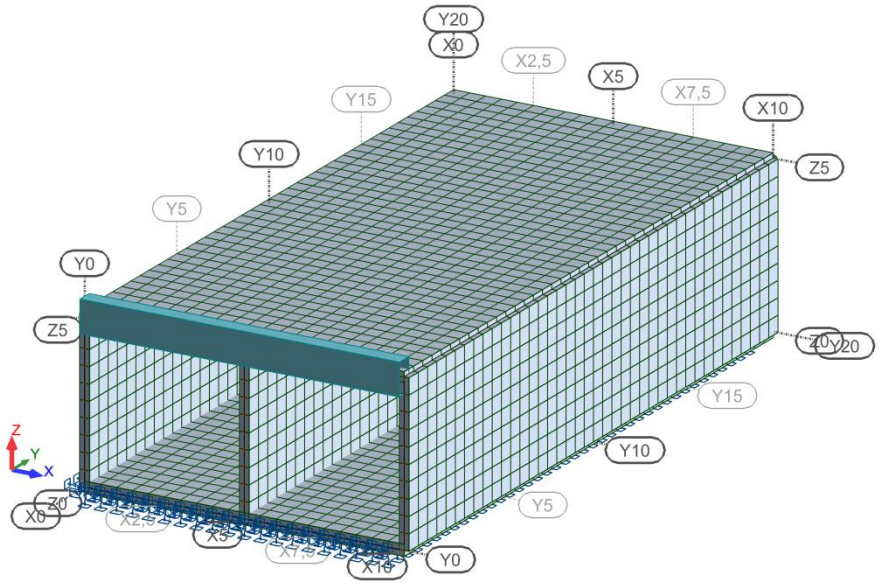

Figura 3.19 – Esquema 3D dos túneis com a discretização dos elementos finitos (ROBOT)

No SAP2000 são considerados elementos finitos do tipo "Shell-Thin", e é utilizada a ferramenta "Divide Areas" para auxiliar na discretização. A malha de elementos finitos é constituída predominantemente por elementos quadriláteros de 4 nós com dimensões máximas de 0,50 m (Figura 3.20).

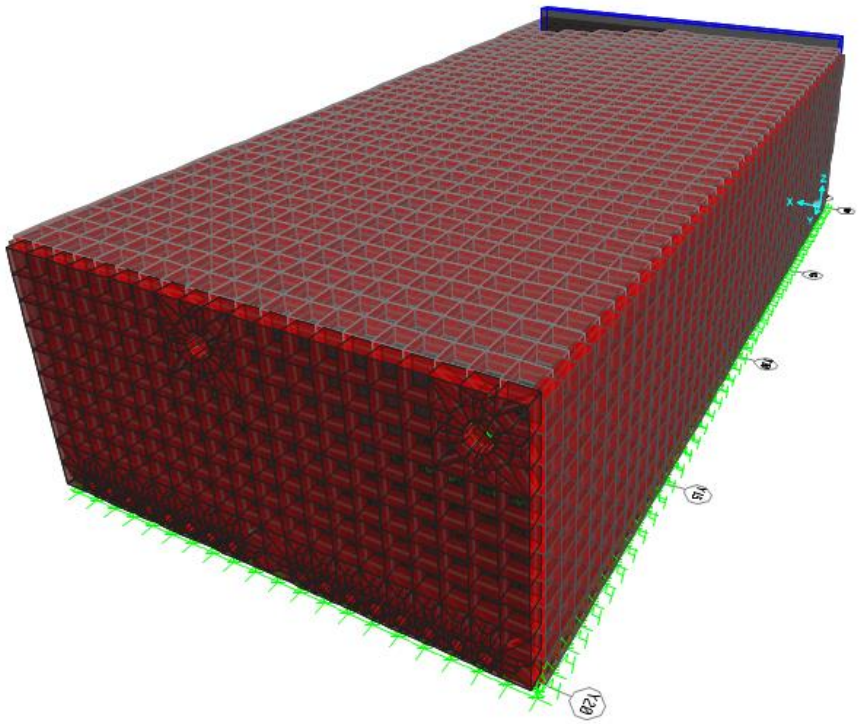

Figura 3.20 – Esquema 3D dos túneis com a discretização dos elementos finitos (SAP2000)

A parede do fundo apresenta negativos para a passagem de tubos de ventilação e de recolha de água. O refinamento da malha junto aos negativos no programa ROBOT (Figura 3.21), está efectuada através da ferramenta de geração automática. No programa SAP2000 o refinamento está efectuado manualmente (Figura 3.22).

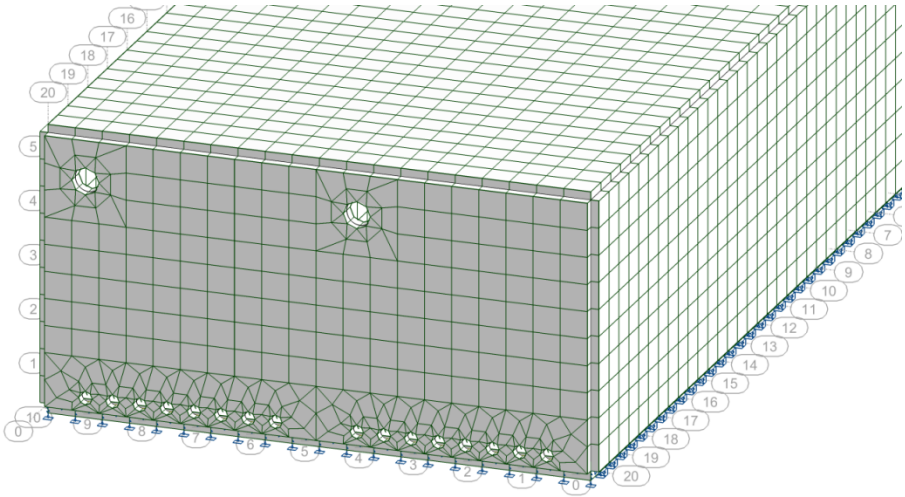

Figura 3.21 – Discretização da parede do fundo no túnel (ROBOT): negativos para ventilação

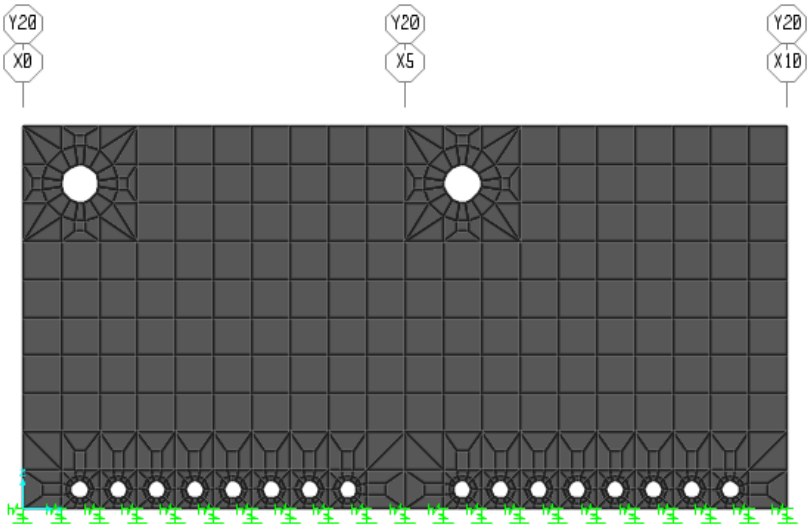

Figura 3.22– Discretização da parede do fundo no túnel (SAP2000): negativos para ventilação

Consideram-se apoios elásticos em cada nó dos elementos finitos da laje de fundação. Tendo em conta que a malha é igual à malha dos elementos de grelha, o valor das constantes elásticas é igual ao que consta no Quadro 3.6.

As cargas no ROBOT estão introduzidas nos painéis que simulam as paredes e as lajes.

No SAP2000 as cargas estão introduzidas em cada elemento finito. Sublinha-se que no caso da carga térmica a temperatura diferencial neste programa é em ºC/m, ou seja, é necessário dividir a temperatura pela espessura do elemento. Para a carga de temperatura uniforme a introdução é em ºC.

Ambos os programas geram automaticamente o peso próprio.

O cálculo é igualmente realizado em duas etapas: primeiro o cálculo estático e em seguida a análise modal com a resposta dinâmica da estrutura obtida através da sobreposição modal, utilizando os espectros de resposta da norma europeia NP EN-1998-1 [19], para a respectiva localização sísmica (Figuras 3.23 e 3.24). Os resultados dos vários deslocamentos e esforços obtidos, para cada modo de vibração, são combinados através do método de combinação quadrática completa (CQC).

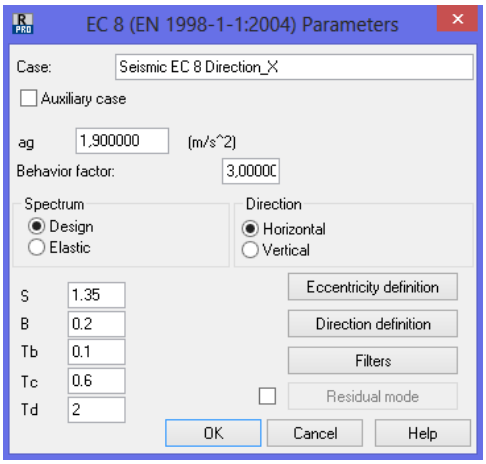

Figura 3.23 – Menu do espectro sísmico, ROBOT

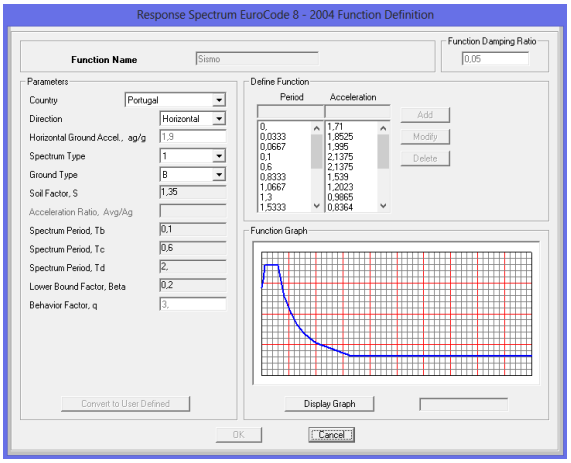

Figura 3.24 – Menu do espectro sísmico, SAP2000

A apresentação dos resultados obtidos é efectuada na secção 3.4.3, juntamente com os resultados do modelo de grelha.

3.4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta secção apresenta-se os efeitos das ações na estrutura, para cada modelo estrutural e programa de cálculo automático. É efectuado também a respectiva comparação de resultados.

De modo a facilitar a interpretação de resultados, a deformada é apresentada antes dos esforços.

Devido à grande extensão de resultados, são apenas destacados e comparado alguns deslocamentos e esforços, em zonas da estrutura mais solicitadas.

A comparação de resultados está efectuada através de quadros com as respectivas diferenças percentuais. É utilizado o sistema de eixos da Figura 3.25 para auxiliar a localização dos esforços.

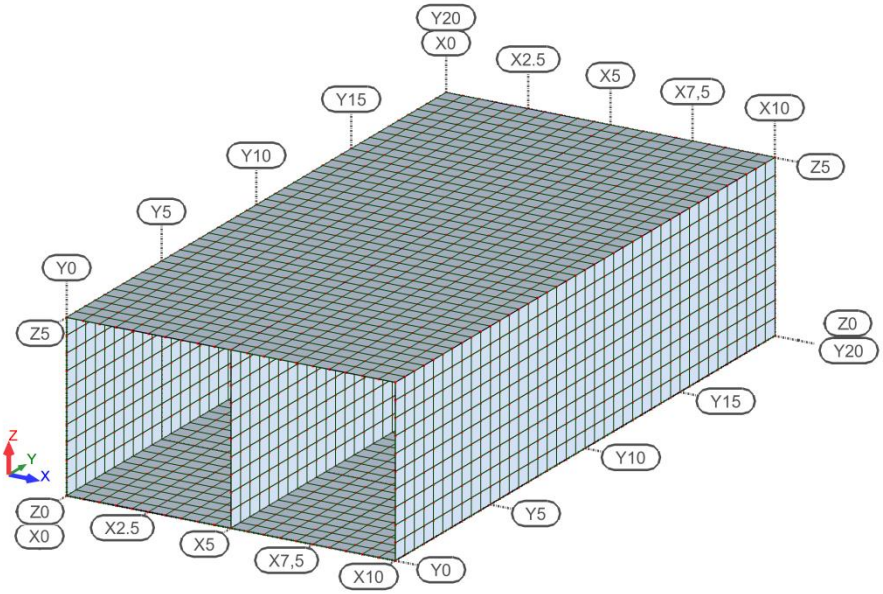

Figura 3.25 – Sistema de eixos dos túneis

3.4.3.1. AÇÃO PERMANENTE

Ação caracterizada por provocar esforços logo após a sua construção os quais instalam-se na estrutura e permanecem ao longo da sua vida.

- ***Deformada***

O deslocamento vertical máximo ocorre no eixo y-14, a meio vão da laje.

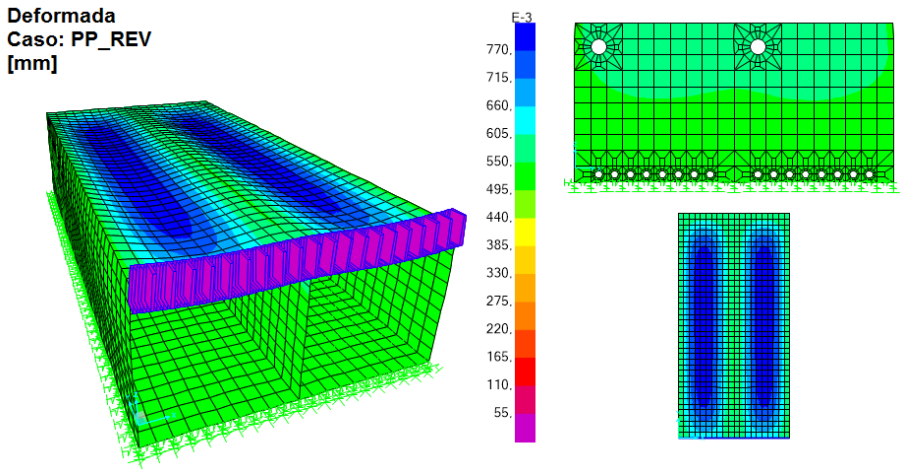

Figura 3.26 – Deformada para a ação PP_REV (SAP2000)

Quadro 3.7 – Comparação do U_z entre modelos (PP_REV)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos				Elem. Grelha
		Deslocamento	SAP2000 (1)		ROBOT (2)		ROBOT (3)
PP_REV	[2.5;14;5]	U_z (mm)	0.82		0.86		0.85
		Diferença	Δ (1-2)	-0.04 4.9%	Δ (2-3)	0.01 1.2%	Δ (3-1)	0.03 3.7%

A deformada da estrutura em relação às ações permanentes é semelhante nos três modelos.

- ***Momento Flector***

Na direção x, os momentos flectores máximos na laje de cobertura, ocorrem próximo do eixo y-10. Na direção y, observa-se que o momento é máximo na parede do fundo, próximo do eixo x-7.5.

A barra que simula a viga da entrada dos túneis, pela sua grande rigidez, apresenta esforços consideráveis. Neste caso, o momento na direção x corresponde ao M_y (eixo local da barra).

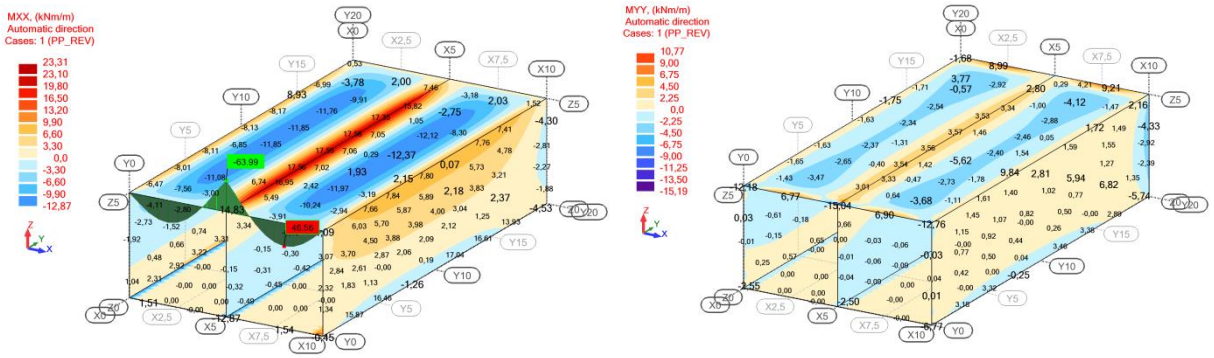

Figura 3.27 – Momentos flectores em x e y da ação PP_REV (ROBOT, modelo de elementos finitos)

Quadro 3.8 – Comparação do M_x e do M_y entre modelos (PP_REV)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos				Elem. Grelha
		Esforços	SAP2000 (1)		ROBOT (2)		ROBOT (3)
PP_REV	[2.5;10;5]	$M_{x,\,máx}^{vão}$ (kN.m/m)	12.16		11.68		11.74
		Diferença	Δ (1-2)	0.48 4.1%	Δ (2-3)	-0.06 0.5%	Δ (3-1)	-0.42 3.6%
	[5;10;5]	$M_{x,\,máx}^{Apoio}$ (kN.m/m)	23.08		23.31		23.28
		Diferença	Δ (1-2)	-0.23 1.0%	Δ (2-3)	0.03 0.1%	Δ (3-1)	0.20 0.9%
	[7.5;20;5]	$M_{y,\,máx}^{Apoio}$ (kN.m/m)	9.21		9.18		9.58
		Diferença	Δ (1-2)	0.03 0.3%	Δ (2-3)	-0.40 4.4%	Δ (3-1)	0.37 4.0%
PP_REV	Barra [2;0;5]	$M_{y,\,máx}^{vão}$ (kN/m)	46.57		46.56		44.05
		Diferença	Δ (1-2)	0.01 0.0%	Δ (2-3)	2.51 5.7%	Δ (3-1)	-2.52 5.7%
	Barra [5;0;5]	$M_{y,\,máx}^{Apoio}$ (kN/m)	57.13		63.99		60.91
		Diferença	Δ (1-2)	-6.86 12.0%	Δ (2-3)	3.08 5.1%	Δ (3-1)	3.78 6.6%

Os momentos na laje são semelhantes nos três modelos. A barra da entrada apresenta ligeiras diferenças, as quais podem justificar-se pela redistribuição de cargas e esforços efectuadas pelos programas e pelo modelo de cálculo.

- ***Esforço Transverso***

O esforço de corte máximo na direção x, na laje de cobertura, ocorre próximo do eixo y-10. Na direção y ocorre no apoio na parede do fundo, próximo do eixo x-7.5.

A barra de entrada, pela sua grande rigidez, apresenta esforços consideráveis.

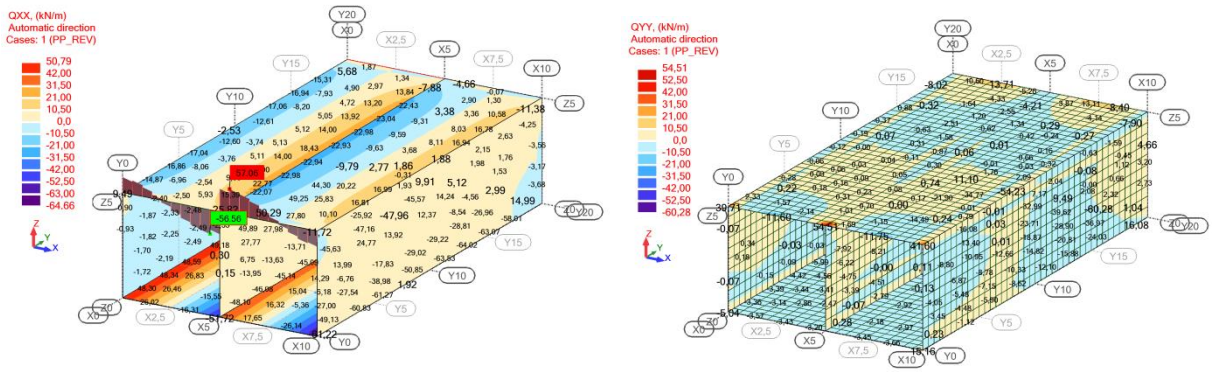

Figura 3.28 – Esforço de corte em x e y da ação PP_REV (ROBOT, modelo de elementos finitos)

Quadro 3.9 – Comparação do V_x e do V_y entre modelos (PP_REV)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos		Elem. Grelha
		Esforços	SAP2000 (1)	ROBOT (2)	ROBOT (3)
PP_REV	[0;10;5]	$V_{x,\,máx}^{Apoio.}$ (kN/m)	17.46	17.03	19.52
		Diferença	Δ (1-2) 0.43 / 2.5%	Δ (2-3) -2.49 / 14.6%	Δ (3-1) 2.06 / 11.8%
	[5;10;5]	$V_{x,\,máx}^{Apoio}$ (kN/m)	22.99	22.86	25.08
		Diferença	Δ (1-2) 0.13 / 0.6%	Δ (2-3) -2.22 / 9.7%	Δ (3-1) 2.09 / 9.1%
	[7.5;20;5]	$V_{y,\,máx}^{Apoio}$ (kN./m)	13.79	13.99	15.48
		Diferença	Δ (1-2) -0.20 / 1.5%	Δ (2-3) -1.49 / 10.7%	Δ (3-1) 1.69 / 12.3%
PP_REV	Barra [0;0;5]	$V_{z,\,máx}^{Apoio}$ (kN)	34.20	35.70	33.22
		Diferença	Δ (1-2) -1.50 / 4.4%	Δ (2-3) 2.48 / 7.5%	Δ (3-1) -0.98 / 3.0%
	Barra [4,5;0;5]	$V_{z,\,máx}^{Apoio.}$ (kN)	52.36	56.56	52.22
		Diferença	Δ (1-2) -4.20 / 8.0%	Δ (2-3) 4.34 / 8.3%	Δ (3-1) -0.14 / 0.3%

O esforço de corte na laje é ligeiramente maior no modelo de grelha. A barra da entrada apresenta ligeiras diferenças, as quais podem justificar-se novamente, pela redistribuição de cargas e esforços efectuadas pelos programas e pelo modelo de cálculo.

- ***Esforço Axial***

O esforço axial vertical na parede do fundo apresenta-se distribuído segundo a Figura 3.29.

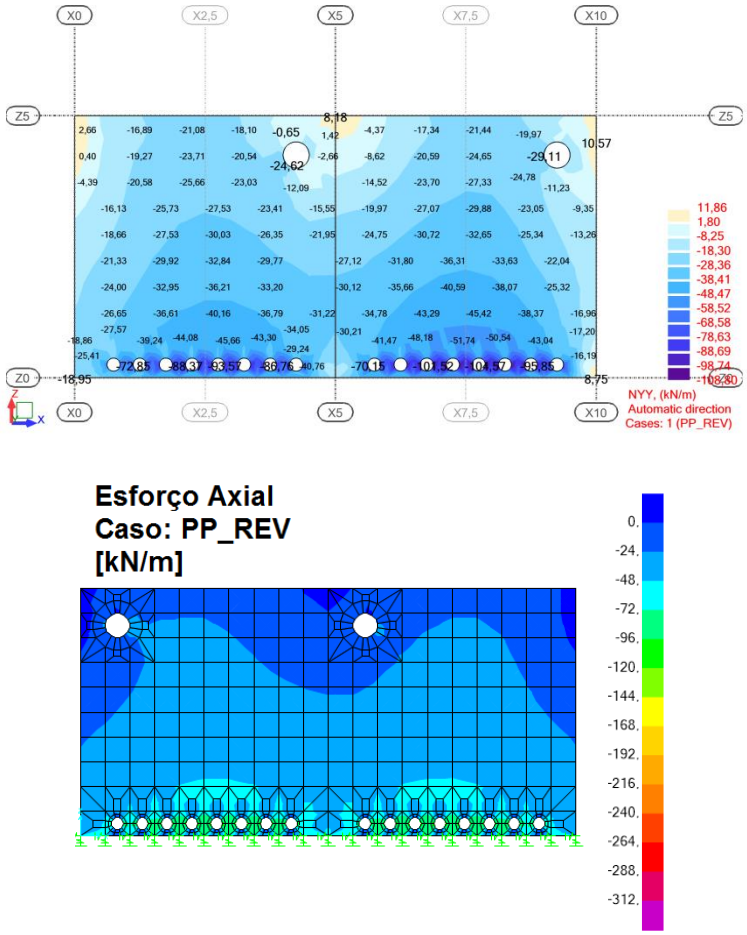

Figura 3.29 – Esforço axial da ação PP_REV (ROBOT, modelo de elementos finitos e SAP2000)

Quadro 3.10 – Comparação do N_y entre modelos (PP_REV)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos				Elem. Grelha
		Esforços	SAP2000 (1)	ROBOT (2)			ROBOT (3)
PP_REV	[2.5;20;1]	N (kN/m)	50.02	43.25			50.00
		Diferença	Δ (1-2) 6.77 / 15.7%		Δ (2-3) -6.75 / 15.6%	Δ (3-1) -0.02 / 0.0%	
	[5;20;0]	N (kN/m)	28.32	24.33			33.54
		Diferença	Δ (1-2) 3.99 / 16.4%		Δ (2-3) -9.21 / 37.9%	Δ (3-1) 5.22 / 18.4%	

A distribuição do esforço axial vertical na parede é ligeiramente diferente no modelo do ROBOT em relação aos outros modelos. Os esforços no modelo de grelha são mais próximos do modelo do SAP2000.

3.4.3.2. SOBRECARGAS

Pelo facto de a sobrecarga na cobertura ser baixa, e tendo em conta que o comportamento da estrutura sob esta ação é análoga à da ação permanente, não se apresentam resultados.

Relativamente à sobrecarga no piso, é considerada a alternância de sobrecarga entre os dois túneis. Os esforços obtidos na laje de fundo devido a esta ação são reduzidos, como tal, apenas são apresentados os deslocamentos verticais.

- ***Deformada***

Os valores máximos do deslocamento, para esta carga, ocorrem próximo do eixo Y-10.

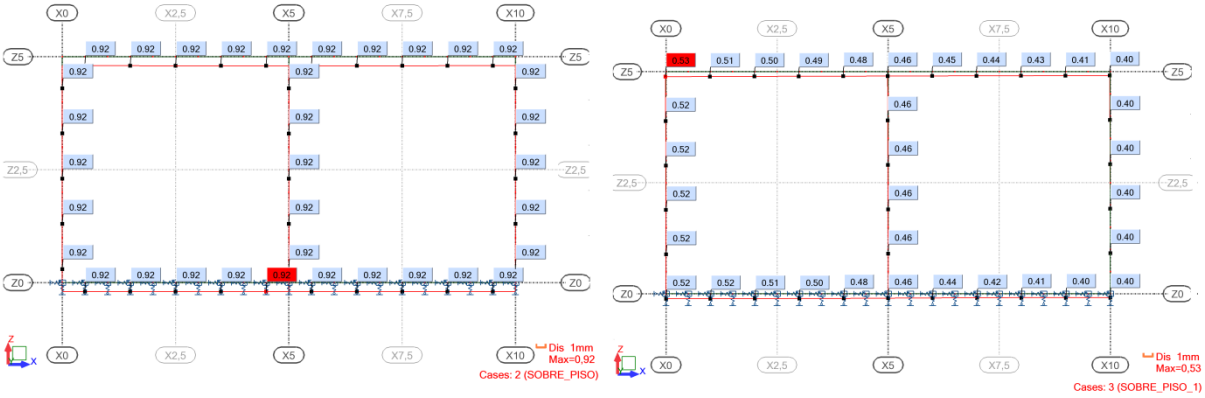

Figura 3.30 – Deformada da ação SOBRE_PISO e SOBRE_PISO_1 (ROBOT, modelo de elementos de grelha)

Quadro 3.11 – Comparação do U_z entre modelos (SOBRE_PISO e SOBRE_PISO_1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos				Elem. Grelha
		Deslocamentos	SAP2000 (1)		ROBOT (2)		ROBOT (3)
SOBRE_PISO	[0;10;0]	U_z (mm)	0.92		0.95		0.92
		Diferença	Δ (1-2)	-0.03 3.3%	Δ (2-3)	0.03 3.3%	Δ (3-1) 0.00 0.0%
SOBRE_PISO_1	[0;10;0]	U_z (mm)	0.52		0.60		0.52
		Diferença	Δ (1-2)	-0.08 15.4%	Δ (2-3)	0.08 15.4%	Δ (3-1) 0.00 0.0%

O comportamento da estrutura estando a fundação totalmente carregada é semelhante nos 3 modelos. Quando apenas está um túnel carregado, entre o SAP2000 e o ROBOT a diferença percentual é significativa, contudo, em termos absolutos é baixa (0.08mm).

3.4.3.3. AÇÃO TÉRMICA OPERACIONAL

As componentes uniforme e diferencial da ação térmica operacional, ocorrem em simultâneo na estrutura, e podem ocorrer nos dois túneis ou em apenas um.

- ***Deformada***

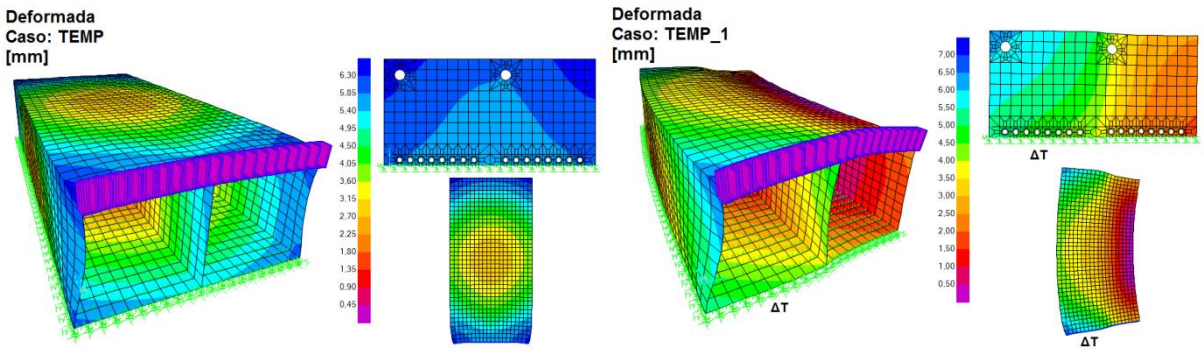

Figura 3.31 – Deformada da ação TEMP e TEMP_1 (SAP2000)

Quadro 3.12 – Comparação do U_x, U_y e U_z entre modelos (TEMP)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos		Elem. Grelha
		Deslocamentos	SAP2000 (1)	ROBOT (2)	ROBOT (3)
TEMP	[0;0;5]	U_x (mm)	2.69	2.47	2.72
		Diferença	Δ (1-2) 0.22 / 8.9%	Δ (2-3) -0.25 / 10.1%	Δ (3-1) 0.03 / 1.1%
		U_y (mm)	5.54	5.54	5.60
		Diferença	Δ (1-2) 0.00 / 0.0%	Δ (2-3) -0.06 / 1.1%	Δ (3-1) 0.06 / 1.1%
		U_z (mm)	2.44	2.42	2.58
		Diferença	Δ (1-2) 0.02 / 0.8%	Δ (2-3) -0.16 / 6.6%	Δ (3-1) 0.14 / 5.7%
	[0;10;5]	U_x (mm)	2.75	2.55	2.79
		Diferença	Δ (1-2) 0.20 / 7.8%	Δ (2-3) -0.24 / 9.4%	Δ (3-1) 0.04 / 1.5%
		U_z (mm)	2.74	2.79	2.76
		Diferença	Δ (1-2) -0.05 / 1.8%	Δ (2-3) 0.03 / 1.1%	Δ (3-1) 0.02 / 0.7%
	[0;20;5]	U_x (mm)	2.73	2.58	2.73
		Diferença	Δ (1-2) 0.15 / 5.8%	Δ (2-3) -0.15 / 5.8%	Δ (3-1) 0.00 / 0.0%
		U_y (mm)	5.44	5.57	5.49
		Diferença	Δ (1-2) -0.13 / 2.4%	Δ (2-3) 0.08 / 1.5%	Δ (3-1) 0.05 / 0.9%
		U_z (mm)	2.70	2.74	2.73
		Diferença	Δ (1-2) -0.04 / 1.5%	Δ (2-3) 0.01 / 0.4%	Δ (3-1) 0.03 / 1.1%

Quadro 3.13 – Comparação do U_x, U_y e U_z entre modelos (TEMP)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos		Elem. Grelha
		Deslocamentos	SAP2000 (1)	ROBOT (2)	ROBOT (3)
TEMP_1	[5;0;5]	U_x (mm)	3.03	3.80	1.71
		Diferença	Δ (1-2) -0.77 / 25.4%	Δ (2-3) 2.09 / 222.2%	Δ (3-1) -1.32 / 77.2%
		U_y (mm)	3.27	3.25	3.44
		Diferença	Δ (1-2) 0.02 / 0.6%	Δ (2-3) -0.19 / 5.8%	Δ (3-1) 0.17 / 5.2%
		U_z (mm)	3.13	3.19	2.98
		Diferença	Δ (1-2) -0.06 / 1.9%	Δ (2-3) 0.21 / 7.0%	Δ (3-1) -0.15 / 5.0%
	[5;10;5]	U_x (mm)	0.24	0.39	1.54
		Diferença	Δ (1-2) -0.15 / 62.5%	Δ (2-3) -1.15 / 394.9%	Δ (3-1) 1.30 / 641.7%
		U_z (mm)	2.91	2.92	2.72
		Diferença	Δ (1-2) -0.01 / 0.3%	Δ (2-3) 0.20 / 7.4%	Δ (3-1) -0.19 / 7.0%
	[5;20;5]	U_x (mm)	2.89	3.80	1.22
		Diferença	Δ (1-2) -0.91 / 31.5%	Δ (2-3) 2.58 / 311.5%	Δ (3-1) -1.67 / 236.9%
		U_y (mm)	3.65	3.74	3.29
		Diferença	Δ (1-2) -0.09 / 2.5%	Δ (2-3) 0.45 / 13.7%	Δ (3-1) -0.36 / 10.9%
		U_z (mm)	1.91	1.89	3.01
		Diferença	Δ (1-2) 0.02 / 1.1%	Δ (2-3) -1.12 / 59.3%	Δ (3-1) 1.10 / 57.6%

De um modo geral, os deslocamentos em y e z são semelhantes nos 3 modelos. Quando se tem alternância de uso nos túneis, na direção x do modelo de grelha, os deslocamentos são bastante diferentes dos outros dois modelos. Tal poderá dever-se ao facto de não ser considerada corretamente a deformação transversal das barras neste modelo, e como tal a deformabilidade segundo este eixo é maior, originando assim deslocamentos maiores a meio do túnel e menores nas extremidades.

Entre os modelos de elementos finitos a diferença é significativa na direção x, quando se tem alternância de uso nos túneis, sobretudo nas extremidades.

- ***Momento Flector***

É selecionado o eixo y-10 para comparar, na direção x, os momentos flectores na laje de cobertura.

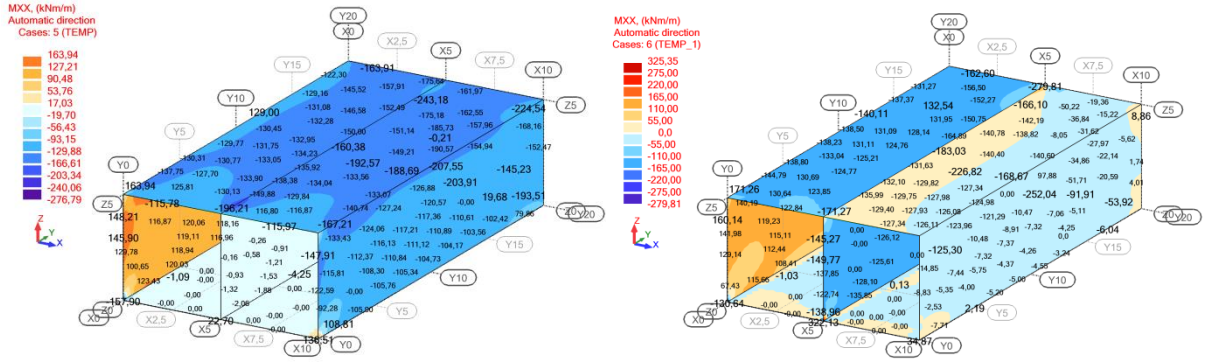

Figura 3.32 – Momentos flectores em x da ação TEMP e TEMP_1 (ROBOT, modelo de elementos finitos)

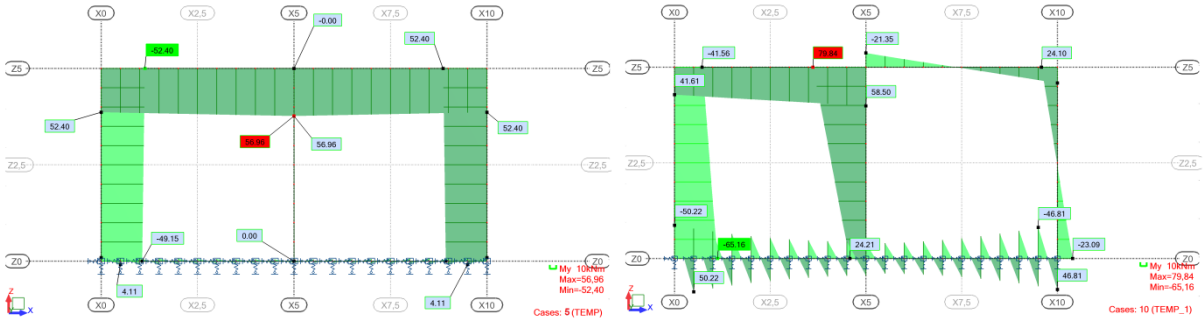

Figura 3.33 – Momentos flectores em x eixo y-10 da ação TEMP e TEMP_1 (ROBOT, modelo de elementos grelha)

Quadro 3.14 – Comparação do M_x entre modelos (TEMP)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos				Elem. Grelha
		Esforços	SAP2000 (1)		ROBOT (2)		ROBOT (3)
TEMP	[0;10;5]	M_x (kN.m/m)	125.89		128.82		104.80
		Diferença	Δ (1-2)	-2.93 / 2.3%	Δ (2-3)	24.02 / 22.9%	Δ (3-1)	-21.09 / 20.1%
	[2,5;10;5]	M_x (kN.m/m)	130.99		132.03		109.50
		Diferença	Δ (1-2)	-1.04 / 0.8%	Δ (2-3)	22.53 / 20.6%	Δ (3-1)	-21.49 / 19.6%
	[5;10;5]	M_x (kN.m/m)	135.84		135.03		113.92
		Diferença	Δ (1-2)	0.81 / 0.6%	Δ (2-3)	21.11 / 18.5%	Δ (3-1)	-21.92 / 19.2%

Os momentos nos modelos de elementos finitos são semelhantes. No modelo de grelha, os esforços obtidos são mais baixos (aproximadamente 17%).

Quadro 3.15 – Comparação do M_x entre modelos (TEMP_1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos				Elem. Grelha
		Esforços	SAP2000 (1)		ROBOT (2)		ROBOT (3)
TEMP_1	[0;10;5]	M_x (kN.m/m)	127.65		139.8		83.22
		Diferença	Δ (1-2)	-12.15 / 9.5%	Δ (2-3)	56.58 / 68.0%	Δ (3-1)	-44.43 / 53.4%
	[2,5;10;5]	M_x (kN.m/m)	123.75		126.24		100.26
		Diferença	Δ (1-2)	-2.49 / 2.0%	Δ (2-3)	25.98 / 25.9%	Δ (3-1)	-23.49 / 23.4%
	[5;10;5]	M_x^{esq} (kN.m/m)	119.7		112.89		117.00
		Diferença	Δ (1-2)	6.81 / 6.0%	Δ (2-3)	-4.11 / 3.6%	Δ (3-1)	-2.70 / 2.3%
	[5;10;5]	M_x^{dir} (kN.m/m)	26.46		19.23		42.70
		Diferença	Δ (1-2)	7.23 / 37.6%	Δ (2-3)	-23.47 / 222.0%	Δ (3-1)	16.24 / 61.4%
	[10;10;5]	M_x (kN.m/m)	28.43		16.16		48.20
		Diferença	Δ (1-2)	12.27 / 75.9%	Δ (2-3)	-32.04 / 298.3%	Δ (3-1)	19.77 / 69.5%

Entre os modelos de elementos finitos a diferença é significativa quando temos alternância de uso nos túneis. Comparando o modelo de grelha com os outros, os esforços obtidos são mais baixos no túnel em funcionamento e mais altos no túnel vazio.

É selecionado o eixo x-2.5 para comparar, na direção y, os momentos flectores na laje de cobertura.

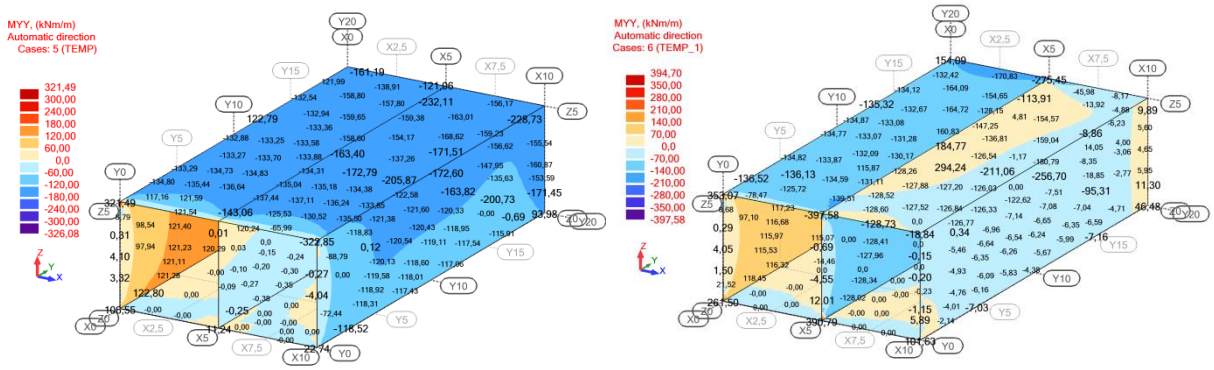

Figura 3.34 – Momentos flectores em y da ação TEMP e TEMP_1 (ROBOT, modelo de elementos finitos)

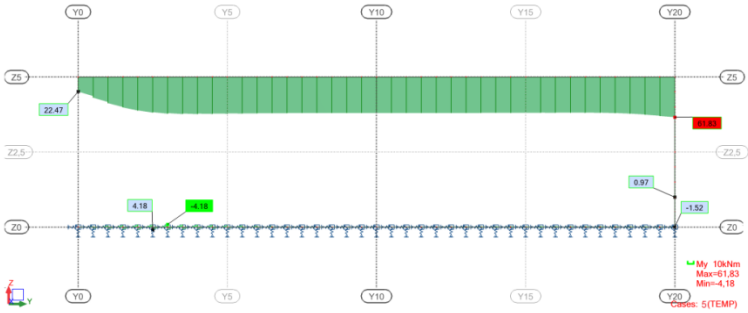

Figura 3.35 – Momentos flectores em x eixo x-2.5 da ação TEMP (ROBOT, modelo de elementos grelha)

Quadro 3.16 – Comparação do M_y entre modelos (TEMP e TEMP_1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos				Elem. Grelha
		Esforços	SAP2000 (1)		ROBOT (2)		ROBOT (3)
TEMP	[2.5;20;5]	M_y (kN.m/m)	153.47		156.09		123.66
		Diferença	Δ (1-2)	-2.62 1.7%	Δ (2-3)	32.43 26.2%	Δ (3-1) -29.81 24.1%
	[2.5;10;5]	M_y (kN.m/m)	132.18		133.43		110.66
		Diferença	Δ (1-2)	-1.25 0.9%	Δ (2-3)	22.77 20.6%	Δ (3-1) -21.52 19.4%
	[2.5;0;5]	M_y (kN.m/m)	32.65		34.80		44.94
		Diferença	Δ (1-2)	-2.15 6.6%	Δ (2-3)	-10.14 29.1%	Δ (3-1) 12.29 37.6%
TEMP_1	[2.5;20;5]	M_y (kN.m/m)	169.59		172.90		132.80
		Diferença	Δ (1-2)	-3.31 2.0%	Δ (2-3)	40.10 30.2%	Δ (3-1) -36.79 27.7%
	[2.5;10;5]	M_y (kN.m/m)	130.27		132.18		109.52
		Diferença	Δ (1-2)	-1.91 1.5%	Δ (2-3)	22.66 20.7%	Δ (3-1) -20.75 18.9%
	[2.5;0;5]	M_y (kN.m/m)	42.75		42.61		46.56
		Diferença	Δ (1-2)	0.14 0.3%	Δ (2-3)	-3.95 9.3%	Δ (3-1) 3.81 8.9%

Entre os modelos de elementos finitos os resultados são semelhantes. No modelo de grelha os esforços obtidos são em geral mais baixos, sendo apenas mais altos junto à barra da entrada.

3.4.3.4. AÇÃO DO VENTO

A envolvente arquitectónica da estrutura apenas permite a ação do vento numa das paredes e na cobertura. Como os esforços na estrutura são muito reduzidos, apenas é apresentado e comparado o deslocamento máximo na direção x, o qual ocorre a meio da parede.

- ***Deformada***

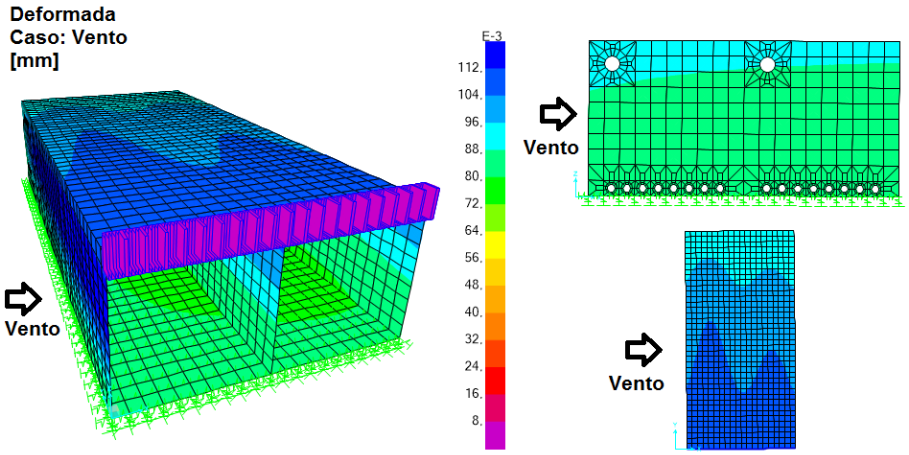

Figura 3.36 – Deformada da ação VENTO

Quadro 3.17 – Comparação do U_x entre modelos (VENTO)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos				Elem. Grelha
		Deslocamentos	SAP2000 (1)		ROBOT (2)		ROBOT (3)
VENTO	[0;10;2,5]	U_X (mm)	0.11		0.12		0.11
		Diferença	Δ (1-2)	-0.01 9.1%	Δ (2-3)	0.01 9.1%	Δ (3-1)	0.00 0.0%

O comportamento da estrutura em relação ao vento é semelhante nos 3 modelos.

3.4.3.5. AÇÃO DO SISMO

Na análise está considerada a ação sísmica na direção x, y e z.

- ***Deformada***

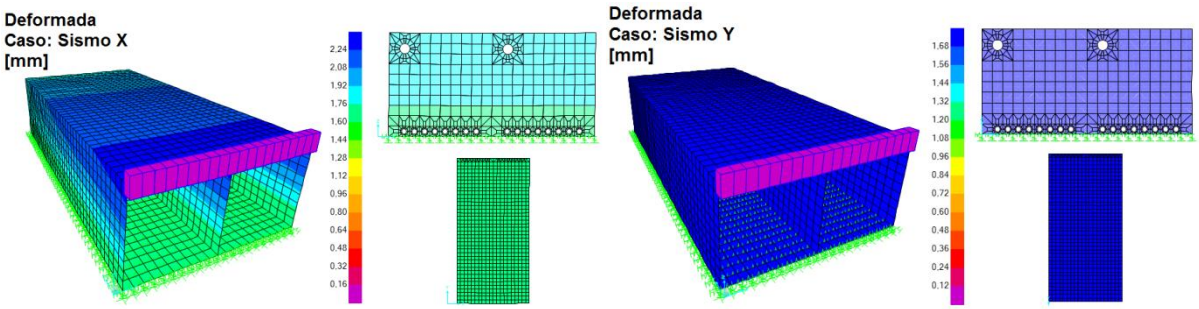

Figura 3.37 – Deformada da ação SISMO X e Y TIPO 1

Quadro 3.18 – Comparação do U_x e do U_y entre modelos (SISMO X e Y TIPO 1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos		Elem. Grelha
		Deslocamentos	SAP2000 (1)	ROBOT (2)	ROBOT (3)
SISMO X TIPO 1	[0;10;0]	U_X (mm)	1.64	4.95	5.05
		Diferença	Δ (1-2) -3.31 / 301.8%	Δ (2-3) -0.10 / 2.0%	Δ (3-1) 3.41 / 307.9%
SISMO Y TIPO 1	[2.5;20;0]	U_y (mm)	1.70	5.12	5.24
		Diferença	Δ (1-2) -3.42 / 301.2%	Δ (2-3) -0.12 / 2.3%	Δ (3-1) 3.54 / 308.2%
Correção dos valores no programa ROBOT					
SISMO X TIPO 1	[0;10;0]	U_X (mm)	1.64	1.65	1.68
		Diferença	Δ (1-2) -0.01 / 0.6%	Δ (2-3) -0.03 / 1.8%	Δ (3-1) 0.04 / 2.4%
SISMO Y TIPO 1	[2.5;20;0]	U_y (mm)	1.70	1.71	1.75
		Diferença	Δ (1-2) -0.01 / 0.6%	Δ (2-3) -0.04 / 2.3%	Δ (3-1) 0.05 / 2.9%

O comportamento da estrutura em relação ao sismo é semelhante nos 3 modelos.

Nota: o programa ROBOT apenas aplica o coeficiente de comportamento aos esforços e tensões. Nos deslocamentos considera um valor unitário para este coeficiente. A diferença de deslocamentos apresentada no Quadro 3.17 justifica-se com este facto. Esta informação consta no manual do programa [20] e [21].

- ***Momento Flector e Esforço Transverso***

É selecionado o eixo y-10 para comparar, na direção x, os momentos flectores e o esforço transverso.

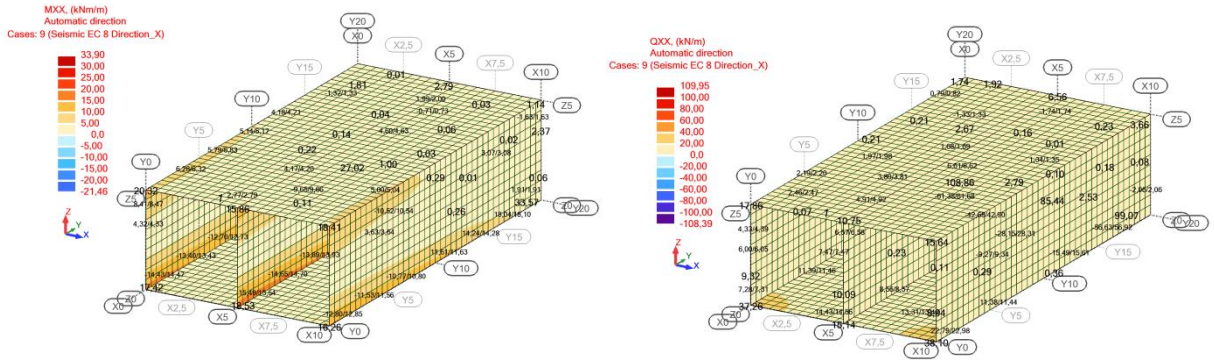

Figura 3.38 – Momentos flectores e esforço transverso em x da ação SISMO X TIPO1 (ROBOT, modelo de elementos finitos)

Quadro 3.19 – Comparação do M_x e do V_x entre modelos (SISMO X TIPO 1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos				Elem. Grelha
		Esforços	SAP2000 (1)		ROBOT (2)		ROBOT (3)
SISMO X TIPO 1	[0;10;0]	M_x (kN.m/m)	11.44		13.89		11.12
		Diferença	Δ (1-2)	-2.45 / 21.4%	Δ (2-3)	2.77 / 24.9%	Δ (3-1)	-0.32 / 2.9%
	[0;10;0]	Vx (kN/m)	6.62		7.30		6.42
		Diferença	Δ (1-2)	-0.68 / 10.3%	Δ (2-3)	0.88 / 13.7%	Δ (3-1)	-0.20 / 3.1%

Os esforços no modelo de grelha são mais baixos, contudo, mais próximos do modelo do SAP2000. O modelo de elementos finitos do ROBOT apresenta valores mais elevados.

3.4.3.6. COMBINAÇÃO DE AÇÕES

As combinações mais desfavoráveis são as combinações com os túneis em funcionamento. É selecionada a combinação 1.35 PP_REV + 1.50 SOBRE_PISO + 1.50 SOBRE_COB + 1.5 TEMP + 0.60 VENTO para comparar esforços.

- ***Momento Flector***

É selecionado o eixo y-10 e x-2.5 para comparar, na direção x e y os momentos flectores na laje de cobertura.

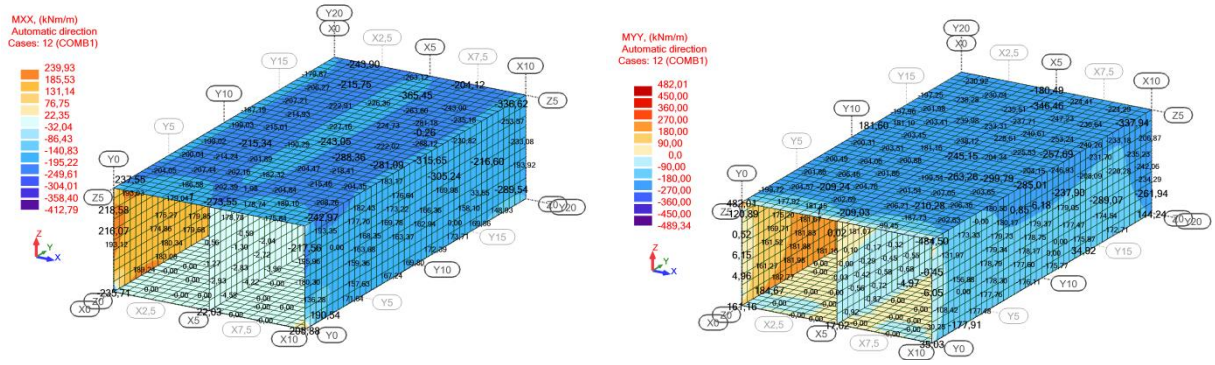

Figura 3.39 – Momentos flectores em x e y da combinação de ação COMB 1 (ROBOT, modelo de elementos finitos)

Quadro 3.20 – Comparação do M_x e do M_y entre modelos (COMB 1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos		Elem. Grelha
		Esforços	SAP2000 (1)	ROBOT (2)	ROBOT (3)
COMB 1	[0;10;5]	M_x (kN.m/m)	174.69	180.53	142.92
		Diferença	Δ (1-2) -5.84 / 3.3%	Δ (2-3) 37.61 / 26.3%	Δ (3-1) -31.77 / 22.2%
	[2,5;10;5]	M_x (kN.m/m)	214.03	215.25	181.54
		Diferença	Δ (1-2) -1.22 / 0.6%	Δ (2-3) 33.71 / 18.6%	Δ (3-1) -32.49 / 17.9%
	[5;10;5]	M_x (kN.m/m)	169.76	168.37	137.54
		Diferença	Δ (1-2) 1.39 / 0.8%	Δ (2-3) 30.83 / 22.4%	Δ (3-1) -32.22 / 23.4%
	[2.5;20;5]	M_y (kN.m/m)	216.55	221.04	171.36
		Diferença	Δ (1-2) -4.49 / 2.1%	Δ (2-3) 49.68 / 29.0%	Δ (3-1) -45.19 / 26.4%
	[2.5;10;5]	M_y (kN.m/m)	201.77	203.39	165.92
		Diferença	Δ (1-2) -1.62 / 0.8%	Δ (2-3) 37.47 / 22.6%	Δ (3-1) -35.85 / 21.6%
	[2.5;0;5]	M_y (kN.m/m)	46.26	42.19	56.96
		Diferença	Δ (1-2) 4.07 / 9.6%	Δ (2-3) -14.77 / 35.0%	Δ (3-1) 10.70 / 23.1%

Os esforços obtidos no modelo de grelha são em geral mais baixos, sendo apenas mais elevados junto à barra da entrada. Os momentos nos modelos de elementos finitos são semelhantes.

- ***Esforço Transverso***

É selecionado o eixo y-10 e x-2.5 para comparar, na direção x e y os momentos flectores na laje de cobertura.

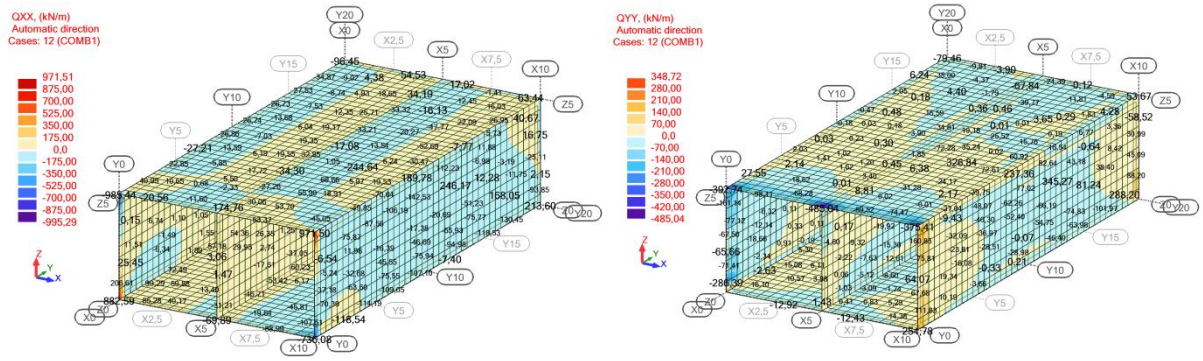

Figura 3.40 – Esforço transverso em x e y da combinação de ação COMB 1 (ROBOT, modelo de elementos finitos)

Quadro 3.21 – Comparação do V_x e do V_y entre modelos (COMB 1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos				Elem. Grelha
		Esforços	SAP2000 (1)		ROBOT (2)		ROBOT (3)
COMB 1	[0;10;5]	V_x (kN/m)	26.28		27.12		31.88
		Diferença	Δ (1-2)	-0.84 3.2%	Δ (2-3)	-4.76 17.6%	Δ (3-1)	5.60 21.3%
	[5;10;5]	V_x (kN/m)	32.06		32.24		34.34
		Diferença	Δ (1-2)	-0.18 0.6%	Δ (2-3)	-2.10 6.5%	Δ (3-1)	2.28 7.1%
	[2.5;20;5]	V_y (kN/m)	4.16		4.24		12.24
		Diferença	Δ (1-2)	-0.08 1.9%	Δ (2-3)	-8.00 288.7%	Δ (3-1)	8.08 294.2%

Os momentos nos modelos de elementos finitos são semelhantes. No modelo de grelha, os esforços obtidos são em geral mais altos.

- ***Esforço Axial***

É selecionado o eixo y-10 para comparar o esforço axial nas paredes.

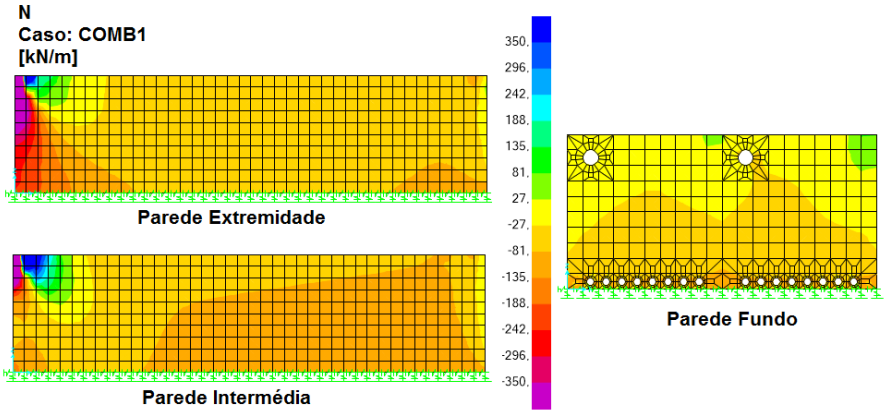

Figura 3.41 – Esforço axial vertical da combinação de ação COMB 1 (SAP2000, modelo de elementos finitos)

Quadro 3.22 – Comparação do N_x entre modelos (COMB 1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos				Elem. Grelha
		Esforços	SAP2000 (1)		ROBOT (2)		ROBOT (3)
COMB 1	[0;10;0]	N_x (kN/m)	70.93		76.81		76.50
		Diferença	Δ (1-2)	-5.88 / 8.3%	Δ (2-3)	0.31 / 0.4%	Δ (3-1) 5.57 / 7.9%
	[0;10;5]	N_x (kN/m)	33.87		31.80		34.78
		Diferença	Δ (1-2)	2.07 / 6.5%	Δ (2-3)	-2.98 / 9.4%	Δ (3-1) 0.91 / 2.7%
	[5;10;0]	N_x (kN/m)	98.99		108.10		104.96
		Diferença	Δ (1-2)	-9.11 / 9.2%	Δ (2-3)	3.14 / 3.0%	Δ (3-1) 5.97 / 6.0%
	[5;10;5]	N_x (kN/m)	70.24		73.38		72.24
		Diferença	Δ (1-2)	-3.14 / 4.5%	Δ (2-3)	1.14 / 1.6%	Δ (3-1) 2.00 / 2.8%

Na base, os valores são mais altos no modelo de elementos finitos do ROBOT. No SAP2000 são mais baixos. No topo os valores estão mais aproximados entre os modelos.

3.4.3.7. CONCLUSÃO

De um modo geral diferença de resultados entre os modelos de elementos finitos é pequena. Estas pequenas diferenças devem-se ao facto dos programas terem formulações diferentes para os elementos finitos de 4 nós.

Quando se tem a ação térmica, sobretudo quando há a alternância de temperatura nos túneis, esta diferença é significativa na direção x. Tal poderá dever-se ao facto de os programas apresentarem também formulações diferentes para a ação térmica diferencial. No SAP2000, a temperatura é introduzida em ºC/m, sendo a ação degradada ao longo da espessura do elemento. No ROBOT, a ação é introduzia em ºC.

Comparando o método de elementos de grelha com o método dos elementos finitos, pode-se concluir que de um modo geral a diferença de resultado é ligeira, sendo apenas significativa na ação térmica. Tal poder-se-á dever ao facto de não ser considerada corretamente a deformação transversal das barras neste modelo, logo torna-o mais deformável, sobretudo nas paredes, originando assim deslocamentos maiores a meio do túnel e menores nas extremidades.

4

CASO DE ESTUDO Nº2: TANQUE/REATOR

4.1. INTRODUÇÃO

Dos vários elementos estruturais que constituem a central selecionou-se a estrutura do tanque/reator de apoio à produção de biogás. Esta estrutura está modelada em dois programas de cálculo automático.

4.2. TANQUE/REATOR DA CVO – CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

4.2.1. BREVE EXPLICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO

Conforme referido no subcapítulo 3.2, neste tanque vai ser armazenado o percolato, com vista e recuperar cerca de 20 – 30% de CH_4 (Biogás) e reutilizar água usada nos túneis de compostagem anaeróbia.

O reator está termicamente isolado, sendo aquecido a uma determinada temperatura (30 a 40 ºC) através de tubos de aquecimento no seu interior (55ºC). O reator possui ainda uma cobertura especial para acumulação do CH_4 (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Tanque/reator de produção de biogás (arquivo pessoal)

4.2.2. GEOMETRIA

A estrutura do tanque é totalmente em betão armado. Apresenta uma geometria circular, está simplesmente apoiado na fundação e o topo é aberto. Tem um raio de 16 metros e uma altura de 6 metros. A espessura das paredes e da laje de fundo é de 0.30 metros (Figura 4.2).

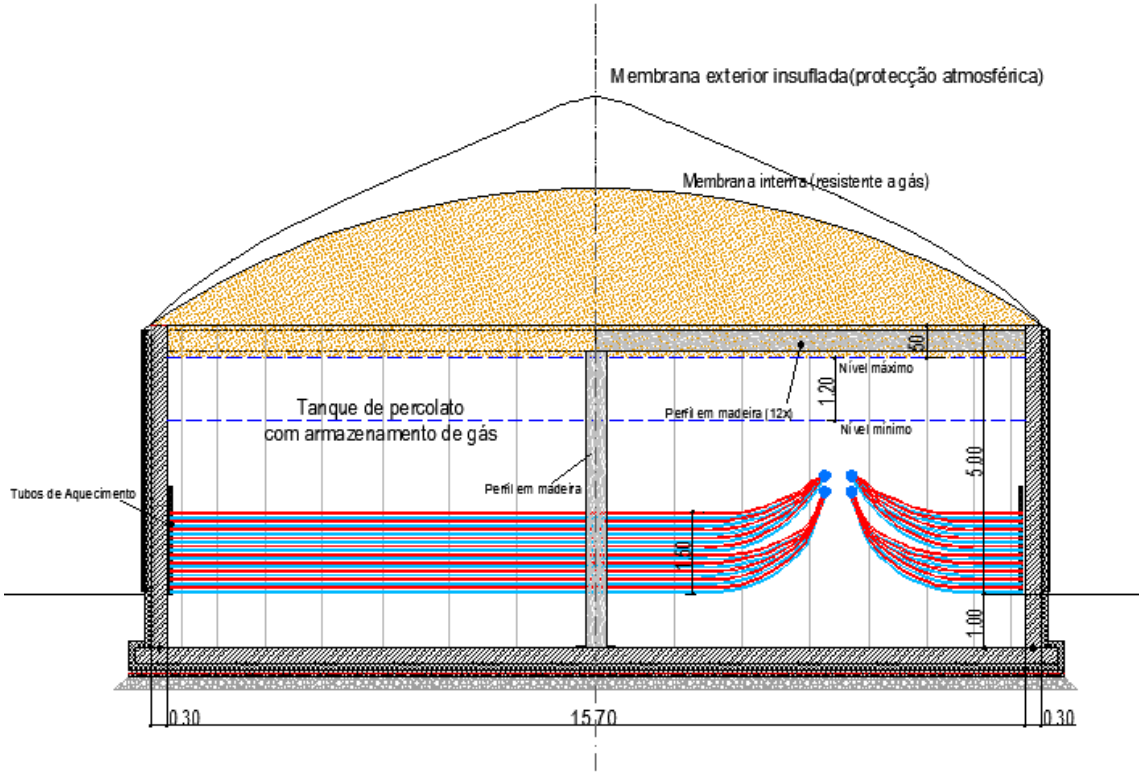

Figura 4.2 – Corte do tanque reator (s/ escala)

4.2.3. MATERIAIS E DURABILIDADE

Conforme explicado na secção 3.3.2 e tendo em conta as característica químicas das águas residuais, a estrutura enquadra-se numa classe de exposição ambiental tipo XA, ou seja, betões expostos a ataques químicos provenientes de solos naturais e de águas agressivas. A intensidade do ataque é função das características químicas da água e do solo (SO_4^{2-}, pH, CO_2, NH_4^+, Mg_2^+ e acidez dos solos) em contacto com o betão, que neste caso é do tipo 3, ou seja a classe de exposição é **XA3**.

Para uma classe de exposição XA3 a NP EN 206-1 [30] define valores limites para a composição e propriedades do betão:

- Máxima razão A/C – 0.45
- Mínima classe de resistência – C35/45
- Mínima dosagem de cimento – 360 kg/m^3
- Outros requisitos – cimento resistente aos sulfatos
- Classe de teor de cloretos – cl0.4

A explicação da secção 3.3.2 para o recobrimento das armaduras aplica-se à presente estrutura, ou seja é de 50mm.

4.2.4. AÇÕES

As ações a considerar neste tipo de estrutura são as ações permanentes, resultantes dos pesos próprios, estruturais e não estruturais, as ações variáveis de sobrecargas de utilização, a ação térmica, o vento e o sismo.

Quadro 4.1 – Ações consideradas

Pesos Volúmicos		
Peso volúmico do betão armado	γ_{BA}= 25.00	kN/m^3
Peso volúmico da água residual	γ_{ARES}= 10.00	kN/m^3
Ações Permanentes		
Ações Variáveis		
Ação de Sobrecarga		
Água residual na laje de fundo (1,5m)	SC_{ARES}= 15.00	kN/m^2
Impulso máximo da água residual nas paredes (1,5m)	IM_{ARES}= 15.00	kN/m^2
Ação Térmica*		
Variação uniforme da temperatura (zona com tubos de aquecimento)	$T_{Uni.}$= 40	ºC
Variação uniforme da temperatura (restante zonas)	$T_{Uni.}$= 25 ou 35	ºC
Ação do Vento		
Localização: Zona A Rugosidade: Tipo II	W_k= 0.90	kN/m^2
Ação do Sismo		
Zona Sísmica: B Ação Sísmica Tipo 1	a_g = 1.90	m/s^2
Ação Sísmica Tipo 2	a_g = 1.10	m/s^2
Coeficiente de comportamento	q = 3.00	
Coeficiente de amortecimento	ζ = 5.00	%

*Nota: ver justificação na secção 4.2.5

4.2.5. AÇÃO TÉRMICA – JUSTIFICAÇÃO

Tendo em conta que o tanque se encontra isolado termicamente e que operacionalmente existe uma ação térmica imposta no interior das paredes através de tubos de aquecimento (55ºC), pode-se considerar que apenas existe ação de variação térmica uniforme.

Assim sendo, considerando uma temperatura inicial de 15ºC, a variação de temperatura uniforme é de 40ºC.

Na zona da parede que não contém os tubos de aquecimento é considerada uma variação térmica uniforme de 25ºC a 35ºC

4.3. MODELAÇÃO EM PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

Efetuou-se e comparou-se os seguintes modelos estruturais para o tanque reator:

- Modelo de cálculo com recurso a elementos de grelha – Programa Novo Metal 3D;
- Modelo de cálculo com recurso a elementos finitos – Programa Autodesk Robot Structural Analysis 2013.

4.3.1. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

No desenvolvimento do modelo recorreu-se ao modo "Shell 3D Design" disponibilizado pelo programa para o estudo de estruturas tridimensionais com elementos finitos, o qual considera 6 graus de liberdade por nó: 3 graus correspondentes a deslocamentos segundo os 3 eixos principais (U_x, U_y e U_z) e outros 3 graus correspondentes a rotações segundo esses mesmos eixos (R_x, R_y e R_z).

A discretização do modelo em elementos finitos é efectuada através das ferramentas para a geração automática da malha disponíveis no programa. É utilizado o método de Coons referido na secção 2.2.4.1 da presente dissertação. A malha de elementos finitos é constituída por elementos quadriláteros de 4 nós com dimensão máxima de 1,00 m (Figura 4.3).

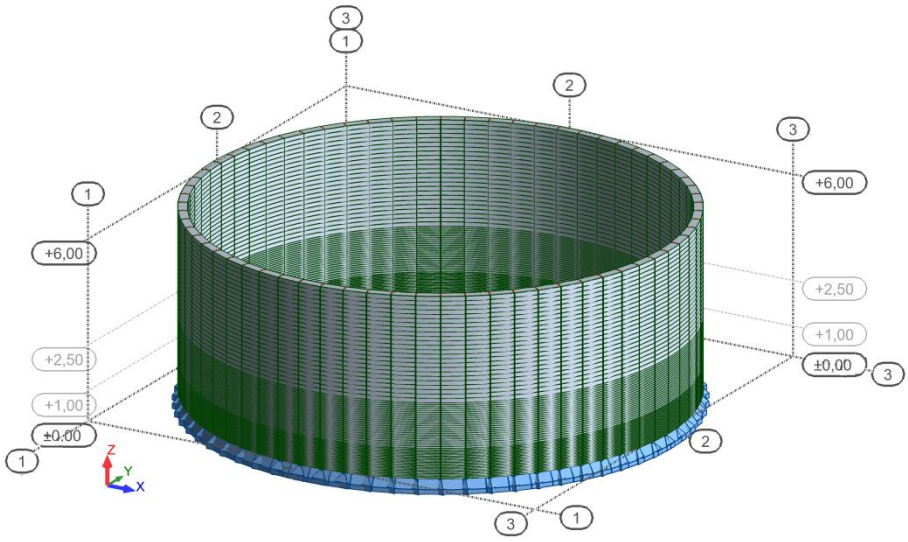

Figura 4.3 – Esquema 3D e malha de elementos finitos (ROBOT)

O depósito está simplesmente apoiado na laje de fundação, como tal, no modelo estão considerados apoios duplos. Neste caso de estudo não é modelada a laje de fundação.

As cargas no ROBOT estão introduzidas nos painéis que simulam as paredes. O peso próprio é gerado automaticamente pelo programa.

A apresentação dos resultados obtidos é efectuada na secção 4.3.3, juntamente com os resultados do outro modelo.

4.3.2. MODELO DE ELEMENTOS DE GRELHA

Para o desenvolvimento do modelo tridimensional constituído por elementos de grelha recorreu-se ao Novo Metal 3D. É um programa para o estudo de estruturas com elementos de barra tridimensionais, o qual considera 6 graus de liberdade por nó: 3 graus correspondentes a deslocamentos segundo os 3 eixos principais (U_x, U_y e U_z) e outros 3 graus correspondentes a rotações segundo esses mesmos eixos (R_x, R_y e R_z).

Tendo em conta a geometria do tanque, na presente modelação considerou-se que uma grelha com uma malha de 100x50 cm (Figura 4.4) seria razoável e capaz de fornecer resultados com um nível de precisão aceitável.

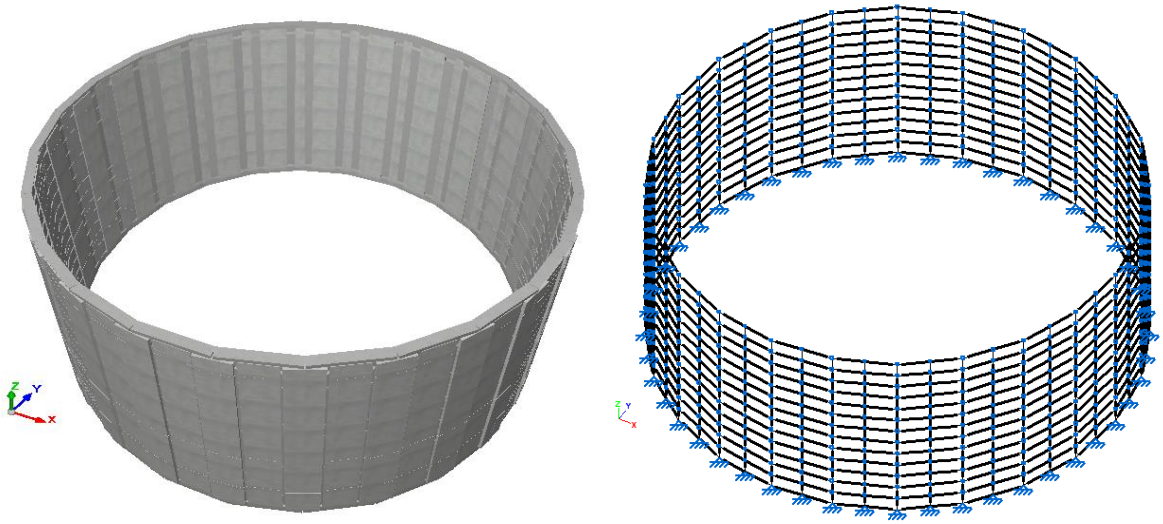

Figura 4.4 – Esquema 3D e malha de elementos de grelha (Novo Metal 3D)

A secção das barras está definida de modo a ser tido em conta o efeito da deformação transversal das barras (principal característica dos elementos de casca). Para tal, calcula-se a inércia equivalente (equação 2.4) e impondo uma largura de 50 ou 100 cm determina-se a variável espessura. A secção das barras é de 100 ou 50 cm de largura (excepto no topo e na base no qual se considera a largura igual 25cm) por 30.5cm de espessura.

Os apoios da fundação, conforme referido acima, são duplos.

As cargas no modelo estão introduzidas de dois modos: carga triangular de impulso da água por metro quadrado, num plano virtual criado no programa com recurso à ferramenta "panos", o qual distribuiu as cargas pelas barras, numa direção. As cargas térmicas estão introduzidas manualmente em todas as barras, pois a ferramenta "panos" não permite a introdução de cargas térmicas.

Neste método é frequente desprezar o valor da rigidez de torção (ver secção 2.2.4.3), isto é, $GJ = 0$. No entanto, este programa não permite alterar o módulo de distorção. Assim sendo, o valor do módulo de distorção não é alterado, conforme foi feito no caso de estudo anterior.

A apresentação dos resultados obtidos é efectuada na secção 4.3.3, juntamente com os resultados do outro modelo.

4.3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta secção são apresentados e comparados os efeitos das ações na estrutura, para cada modelo estrutural e programa de cálculo automático.

De modo a facilitar a interpretação de resultados, a deformada é apresentada antes dos esforços.

Devido à grande extensão de resultados são apenas destacados e comparados alguns deslocamentos e esforços, em zonas da estrutura mais solicitadas.

A comparação de resultados está efectuada através de quadros com as respectivas diferenças. É utilizado o sistema de eixos da Figura 4.3 para auxiliar a localização dos esforços.

Apenas se comparam as ações devido ao impulso da água e da temperatura, pois são as que introduzem esforços mais elevados.

Assim sendo, nos modelos são considerados os casos de ações do Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Denominação das ações consideradas nos modelos cálculo

	Ação	Observação
1	PP_REV	Peso próprio e revestimentos
2	IMP_AG	Impulso da água (nível mais elevado)
3	TEMP_UNIF	Variação uniforme de temperatura 40ºC e 35ºC
4	TEMP_UNIF_1	Variação uniforme de temperatura 40ºC e 25ºC

4.3.3.1. IMPULSO DA ÁGUA

- ***Deformada***

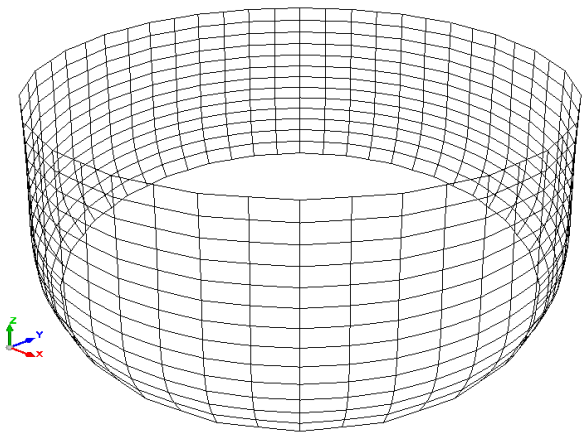

Figura 4.5 – Deformada devido à ação IMP_AG (Novo Metal 3D)

Quadro 4.3 – Comparação do U_x entre modelos (IMP_AG)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Deslocamento	ROBOT (1)	Metal 3D (2)
IMP_AG	[0;8;1]	U_x (mm)	-0.181	-0.181
		Diferença	Δ (1-2)	0.000 / 0.0%
	[0;8;2.5]	U_x (mm)	-0.205	-0.216
		Diferença	Δ (1-2)	0.011 / 5.1%
	[0;8;6]	U_x (mm)	0.025	0.013
		Diferença	Δ (1-2)	0.012 / 92.3%

De um modo geral os dois modelos apresentam deslocamentos semelhantes. Existe apenas diferença próximo do bordo livre.

- ***Momento flector e esforço transverso***

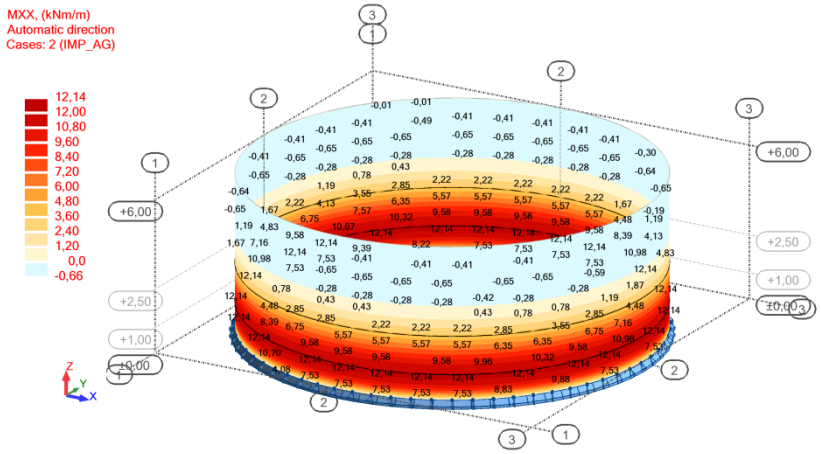

Figura 4.6 – Momento flector vertical devido à ação IMP_AG (ROBOT)

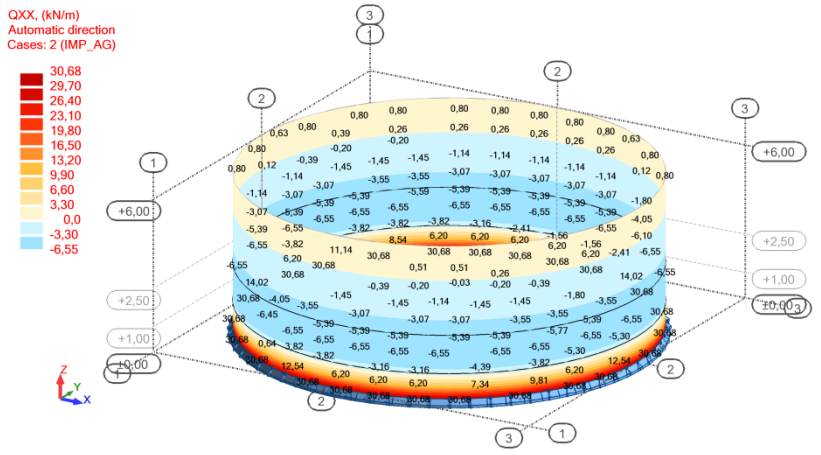

Figura 4.7 – Esforço transverso vertical devido à ação IMP_AG (ROBOT)

Quadro 4.4 – Comparação do $M_{vertical}$ e do $V_{vertical}$ entre modelos (IMP_AG)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Esforços	ROBOT (1)	Metal 3D (2)
IMP_AG	[0;8;1]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	12.10	12.01
		Diferença	Δ (1-2)	0.09
				0.7%
	[0;8;0]	$V_{vertical}$ (kN/m)	30.68	20.36
		Diferença	Δ (1-2)	10.32
				50.7%
	[0;8;2.5]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	3.96	4.00
		Diferença	Δ (1-2)	-0.04
				1.0%
		$V_{vertical}$ (kN/m)	5.39	5.75
		Diferença	Δ (1-2)	-0.36
				6.7%
	[0;8;5.5]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	0.29	0.25
		Diferença	Δ (1-2)	0.04
				16.0%
		$V_{vertical}$ (kN/m)	0.74	1.02
		Diferença	Δ (1-2)	-0.28
				37.8%

Entre os modelos, os momentos máximos são semelhantes. Existem ligeiras diferenças ao longo do diagrama de momentos entre os modelos. A diferença no esforço transverso máximo é significativa (mais baixo no modelo de grelha).

Estas diferenças entre os modelos devem-se ao comportamento no bordo livre ser ligeiramente diferente.

- ***Esforço axial***

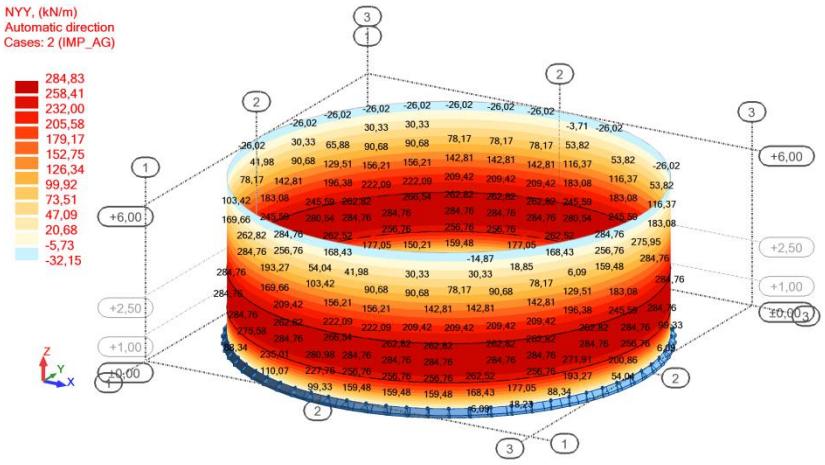

Figura 4.8 – Esforço axial horizontal devido à ação IMP_AG (ROBOT)

Quadro 4.5 – Comparação do $N_{horizontal}$ entre modelos (IMP_AG)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Esforços	ROBOT (1)	Metal 3D (2)
IMP_AG	[0;8;1]	$N_{horizontal}$ (kN/m)	230.90	232.52
		Diferença	Δ (1-2)	-1.62
				0.7%
	[0;8;2.5]	$N_{horizontal}$ (kN/m)	260.82	293.00
		Diferença	Δ (1-2)	-32.18
				12.3%
	[0;8;5.5]	$N_{horizontal}$ (kN/m)	6.71	10.30
		Diferença	Δ (1-2)	-3.59
				53.5%

Entre os modelos, o esforço axial máximo é semelhante. Existe diferenças, novamente, próximo do bordo livre.

4.3.3.2. TEMPERATURA

- ***Deformada***

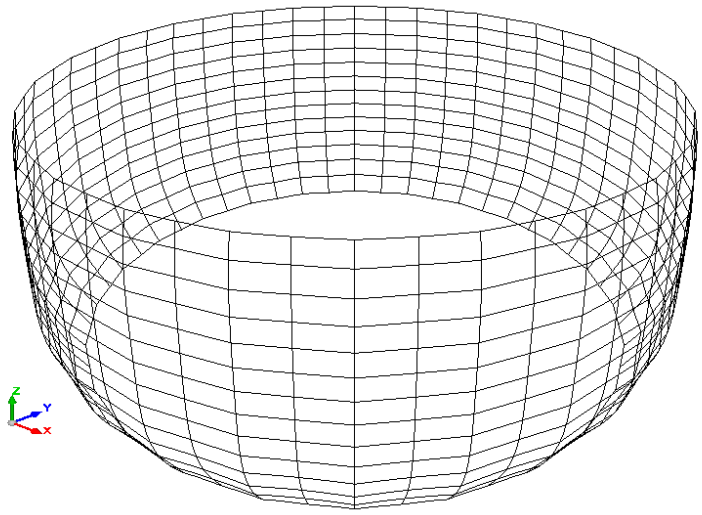

Figura 4.9 – Deformada devido à ação TEMP_UNIF (Novo Metal 3D)

Quadro 4.6 – Comparação do U_x, U_y e U_z entre modelos (TEMP_UNIF e TEMP_UNIF_1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Deslocamento	ROBOT (1)	Metal 3D (2)
TEMP_UNIF	[0;8;1]	U_x (mm)	2.187	2.228
		Diferença	Δ (1-2)	-0.041 1.9%
		U_z (mm)	0.396	0.335
		Diferença	Δ (1-2)	0.061 18.2%
	[0;8;2.5]	U_x (mm)	3.165	3.183
		Diferença	Δ (1-2)	-0.018 0.6%
		U_z (mm)	1.018	0.944
		Diferença	Δ (1-2)	0.074 7.8%
	[0;8;6]	U_x (mm)	2.728	2.757
		Diferença	Δ (1-2)	-0.029 1.1%
		U_z (mm)	2.233	2.351
		Diferença	Δ (1-2)	-0.118 5.3%
TEMP_UNIF_1	[0;8;1]	U_x (mm)	1.968	2.112
		Diferença	Δ (1-2)	-0.144 7.3%
		U_z (mm)	0.278	0.237
		Diferença	Δ (1-2)	0.041 17.3%
	[0;8;2.5]	U_x (mm)	2.702	2.844
		Diferença	Δ (1-2)	-0.142 5.3%
		U_z (mm)	0.913	0.849
		Diferença	Δ (1-2)	0.064 7.5%
	[0;8;6]	U_x (mm)	1.884	1.924
		Diferença	Δ (1-2)	-0.040 2.1%
		U_z (mm)	1.771	1.853
		Diferença	Δ (1-2)	-0.082 4.6%

De um modo geral os dois modelos apresentam deslocamentos semelhantes. Existe apenas diferença próximo do bordo livre, na direção x.

- ***Momento flector e esforço transverso***

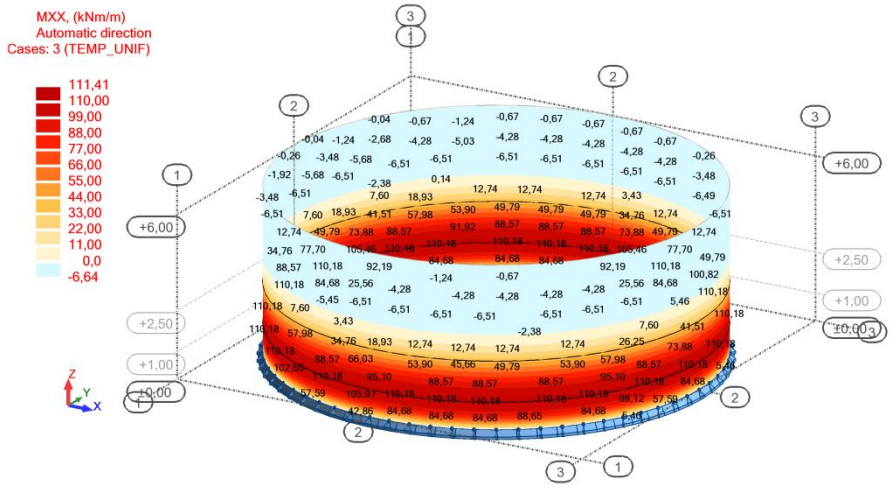

Figura 4.10 – Momento flector vertical devido à ação TEMP (ROBOT)

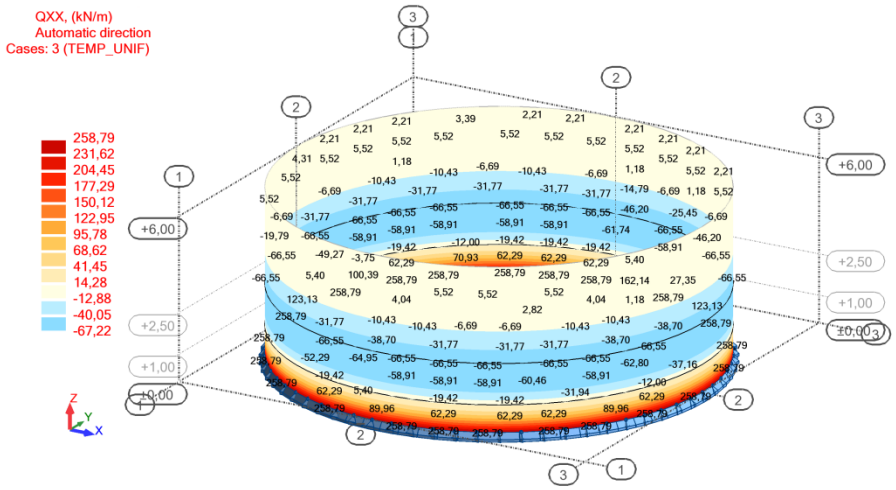

Figura 4.11 – Esforço transverso vertical devido à ação TEMP (ROBOT)

Quadro 4.7 – Comparação do $M_{vertical}$ e do $V_{vertical}$ entre modelos (TEMP_UNIF e TEMP_UNIF_1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Esforços	ROBOT (1)	Metal 3D (2)
TEMP_UNIF	[0;8;1]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	109.97	125.63
		Diferença	Δ (1-2)	-15.66
				14.2%
	[0;8;0]	$V_{vertical}$ (kN/m)	258.79	254.61
		Diferença	Δ (1-2)	4.18
				1.6%
	[0;8;2.5]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	39.43	44.14
		Diferença	Δ (1-2)	-4.71
				11.9%
		$V_{vertical}$ (kN/m)	66.55	69.84
		Diferença	Δ (1-2)	-3.29
				4.9%
	[0;8;5.5]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	1.19	0.78
		Diferença	Δ (1-2)	0.41
				52.6%
		$V_{vertical}$ (kN/m)	4.19	4.58
		Diferença	Δ (1-2)	-0.39
				9.3%
TEMP_UNIF_1	[0;8;1]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	101.05	128.55
		Diferença	Δ (1-2)	-27.50
				27.2%
	[0;8;0]	$V_{vertical}$ (kN/m)	196.00	203.79
		Diferença	Δ (1-2)	-7.79
				4.0%
	[0;8;2.5]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	43.10	60.95
		Diferença	Δ (1-2)	-17.85
				41.4%
		$V_{vertical}$ (kN/m)	98.67	128.09
		Diferença	Δ (1-2)	-29.42
				29.8%
	[0;8;5.5]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	2.01	1.13
		Diferença	Δ (1-2)	0.88
				77.9%
		$V_{vertical}$ (kN/m)	7.30	8.76
		Diferença	Δ (1-2)	-1.46
				20.0%

Entre os modelos, os momentos máximos são semelhantes. Existem diferenças no diagrama de momentos à medida que este se aproxima do bordo livre.

- ***Esforço axial***

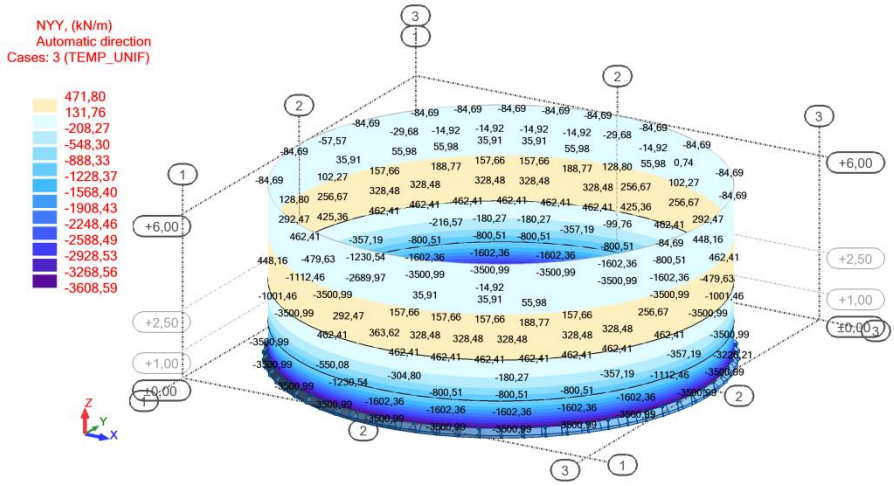

Figura 4.12 – Esforço axial horizontal devido à ação TEMP (ROBOT)

Quadro 4.8 – Comparação do $N_{horizontal}$ entre modelos (TEMP_UNIF e TEMP_UNIF_1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Esforços	ROBOT (1)	Metal 3D (2)
TEMP_UNIF	[0;8;1]	$N_{horizontal}$ (kN/m)	1293.89	1261.98
		Diferença	Δ (1-2)	31.91 / 2.5%
	[0;8;2.5]	$N_{horizontal}$ (kN/m)	43.84	24.50
		Diferença	Δ (1-2)	19.34 / 78.9%
	[0;8;5.5]	$N_{horizontal}$ (kN/m)	44.81	36.52
		Diferença	Δ (1-2)	8.29 / 22.7%
TEMP_UNIF_1	[0;8;1]	$N_{horizontal}$ (kN/m)	1572.98	1413.24
		Diferença	Δ (1-2)	159.74 / 11.3%
	[0;8;2.5]	$N_{horizontal}$ (kN/m)	635.13	463.80
		Diferença	Δ (1-2)	171.33 / 36.9%
	[0;8;5.5]	$N_{horizontal}$ (kN/m)	130.34	75.68
		Diferença	Δ (1-2)	54.66 / 72.2%

Entre os modelos, o esforço axial máximo é semelhante. Existem diferenças, novamente, próximo do bordo livre.

4.3.3.3. CONCLUSÕES

Entre os dois modelos, no que respeita aos esforços máximos as diferenças não são significativas.

O comportamento da estrutura junto do bordo livre é diferente entre os modelos, pelo que naturalmente vai afectar o desenvolvimento dos esforços à medida que estes se aproximam do bordo livre.

O facto de não ser considerada corretamente a deformação transversal das barras, no modelo de elementos de grelha, implica uma maior deformabilidade nas paredes. Como tal tem-se deslocamentos maiores, sobretudo nas zonas mais solicitadas. Assim sendo, é natural que o modelo de grelha apresente maiores deslocamentos junto ao fundo do tanque, influenciando deste modo os deslocamentos no topo (são menores), ou seja, junto ao bordo livre.

5

CASO DE ESTUDO Nº3: TANQUE DE ETAR

5.1. INTRODUÇÃO

A "Águas de Gondomar" lançou em 2011 um concurso público para a construção da empreitada "Reabilitação e Ampliação da Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) de Rio Tinto", tendo o projeto base de estabilidade sido efectuado pela S.E. – Serviços de Engenharia, Lda.

Localizada no concelho de Gondomar, na freguesia de Rio Tinto (Figura 5.1), a ETAR será constituída pela obra de entrada (nº1 da Figura 5.2), tratamento físico-químico (nº2 da Figura 5.2), decantação primária, (nº3 da Figura 5.2), tratamento biológico - leitos percoladores (nº4 da Figura 5.2), decantação secundária (nº5 da Figura 5.2), tratamento biológico – SBR (nº6 da Figura 5.2), espessamento de lamas (nº7 da Figura 5.2), desidratação mecânica de lamas (nº8 da Figura 5.2), desidratação de lamas - leitos de secagem (nº9 da Figura 5.2), e desodorização – biofiltro (nº10 da Figura 5.2). Desta descrição, os novos elementos são nº 1, 2, 6, 8 e 10. A ETAR passará a ter uma capacidade de tratamento de 10.000 habitantes equivalentes.

Figura 5.1 – Vista área da atual ETAR: localização GPS: N 41º 09´51,25"; W 08º 33´46,81"

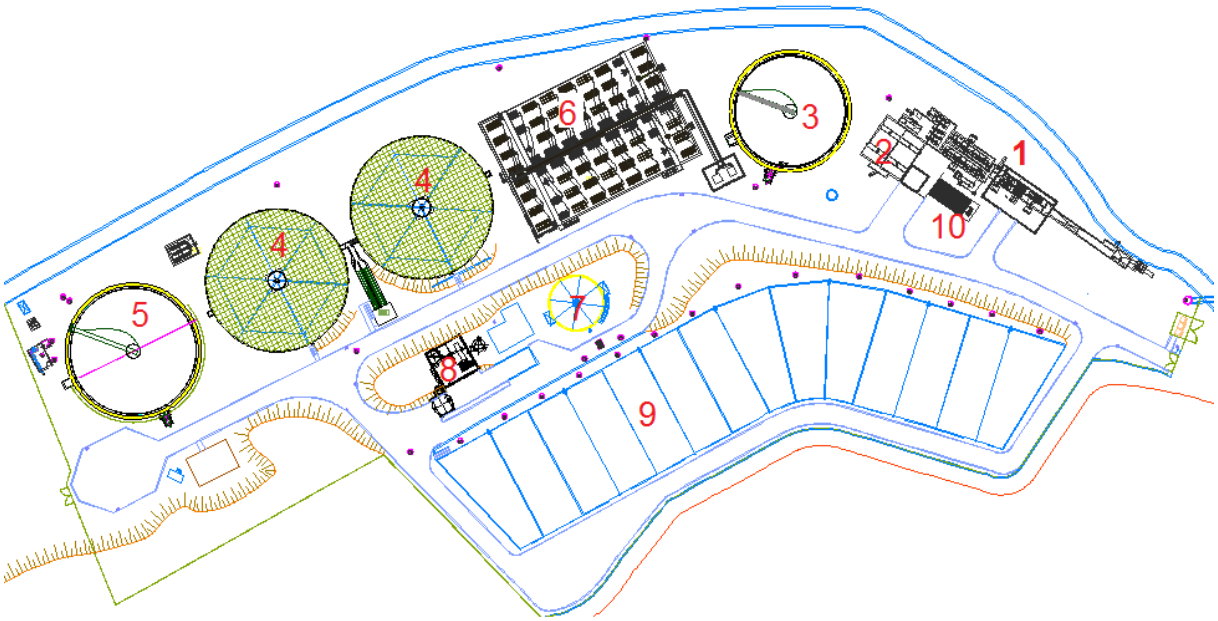

Figura 5.2 – Planta com a proposta para ampliação da ETAR

5.2. TANQUE DO TRATAMENTO BIOLÓGICO (SBR) – CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

Para o terceiro caso de estudo da presente dissertação selecionou-se, dos vários elementos estruturais que constituem a ETAR, a estrutura do tanque do tratamento biológico – SBR (Reatores Biológicos Sequenciais).

5.2.1. BREVE EXPLICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO

Operacionalmente, neste tanque (Figura 5.3 a)) vão ser criadas as condições adequadas ao desenvolvimento de uma população de microrganismos que permitirá a depuração biológica das águas residuais, ou seja, a denominada fase de equalização/homogeneização do processo de tratamento. Para tal será introduzido, na água, ar através de uma rede de ar comprimido o qual abastece difusores localizados no fundo do tanque (Figura 5.3 b)). A circulação da água é efectuada com recurso a equipamento do tipo pás rotativas.

Por ordem cronológica do processo de tratamento das águas residuais, a referida fase encontra-se a jusante do pré-tratamento e a montante do tratamento secundário.

Figura 5.3 – a) Exemplo tanque SBR; b) Exemplo de difusores de fundo

5.2.2. GEOMETRIA

O tanque é totalmente em betão armado e encontra-se 3 m enterrado. Apresenta uma geometria quadrangular (dois módulos de 15x36 m). Tem uma altura total de 6,75 m sendo que, em termos operacionais, poderá funcionar em dois níveis de água – 3 e 6 m e um dos módulos poderá estar vazio (Figuras 5.4, 5.5).

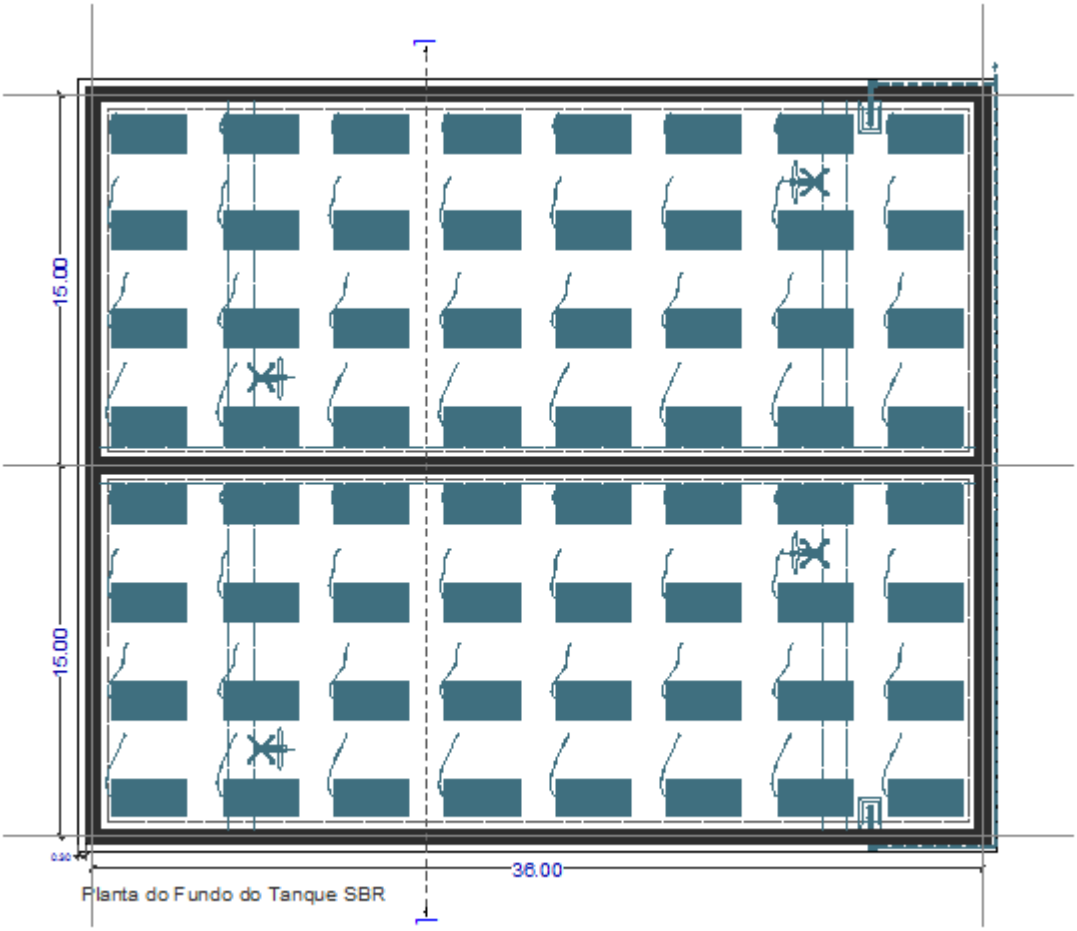

Figura 5.4 – Planta do fundo do tanque SBR (s/ escala)

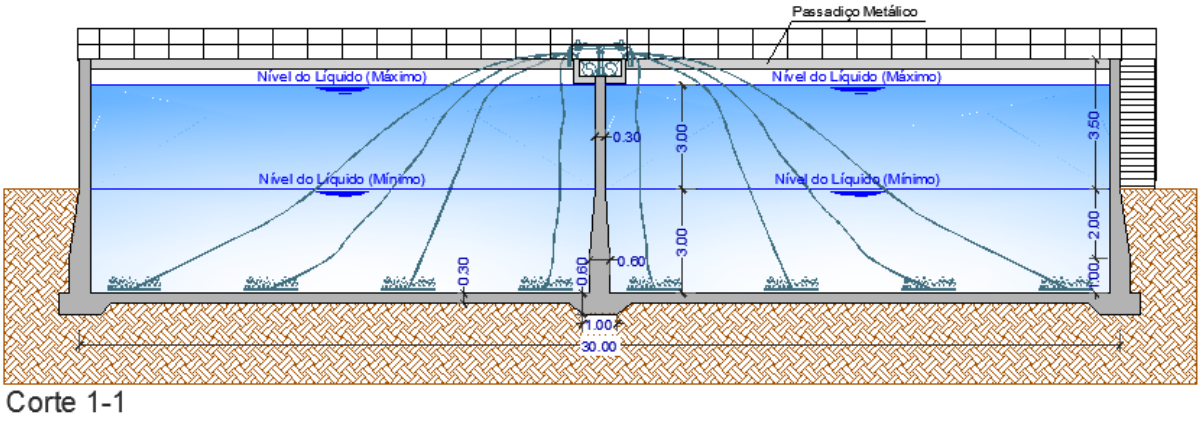

Figura 5.5 – Corte 1-1 do tanque SBR (s/escala)

5.2.3. MATERIAIS E DURABILIDADE

Conforme explicado na secção 3.3.2 e tendo em conta as característica químicas das águas residuais, a estrutura enquadra-se numa classe de exposição ambiental tipo XA, ou seja, betões expostos a ataques químicos provenientes de solos naturais e de águas agressivas. A intensidade do ataque é função das características químicas da água e do solo (SO_4^{2-}, pH, CO_2, NH_4^+, Mg_2^+ e acidez dos solos) em contacto com o betão, que neste caso é do tipo 3, ou seja a classe de exposição é **XA3**.

Para uma classe de exposição XA3, a NP EN 206-1 [30] define valores limites para a composição e propriedades do betão:

- Máxima razão A/C – 0.45
- Mínima classe de resistência – C35/45
- Mínima dosagem de cimento – 360 kg/m^3
- Outros requisitos – cimento resistente aos sulfatos
- Classe de teor de cloretos – cl0.4

A explicação dada na secção 3.3.2 para o recobrimento das armaduras aplica-se à presente estrutura, ou seja, é de 50mm.

5.2.4. AÇÕES

As ações a considerar neste tipo de estrutura são as ações permanentes, resultantes dos pesos próprios, estruturais e não estruturais, as ações variáveis de sobrecargas de utilização, a ação térmica, o vento e o sismo.

Quadro 5.1 – Ações consideradas

Pesos Volúmicos		
Peso volúmico do betão armado	γ_{BA}= 25.00	kN/m^3
Peso volúmico da água residual	γ_{ARES}= 10.00	kN/m^3
Peso volúmico do solo	γ_{Solo}= 18.00	kN/m^3
Ações Permanentes		
Impulso do solo (3m)	I_{solo}= 6.00	kN/m^2
Ações Variáveis		
Ação de Sobrecarga		
Sobrecarga no passadiço	SC_{Pass}= 3.00	kN/m^2
Peso da água residual na laje de fundo (6m)	SC_{ARES}= 60.00	kN/m^2
Impulso máximo da água residual nas paredes (6m)	IM_{ARES}= 60.00	kN/m^2
Ação Térmica*		
Variação uniforme da temperatura	$T_{Uni.\ Acima}$= -15	ºC
Zona B	$T_{Uni.\ Acima}$= 25	ºC
T_0 = 15ºC	$T_{Uni\ Abaixo}$= 0 a 3	ºC
	$T_{Uni.\ Abiaxo}$= 7 a 10	ºC
Ação do Vento		
Localização: Zona A Rugosidade: Tipo II	W_k= 0.90	kN/m^2
Ação do Sismo		
Zona Sísmica: D Ação Sísmica Tipo 1	a_g = 0.80	m/s^2
Ação Sísmica Tipo 2	a_g = 0.50	m/s^2
Coeficiente de comportamento	q = 3.00	
Coeficiente de amortecimento	ζ = 5.00	%

*Nota: ver justificação na secção 5.2.5

5.2.5. AÇÃO TÉRMICA – JUSTIFICAÇÃO

Tendo em conta as características geométricas e operacionais do tanque, pode-se considerar que apenas existe ação de variação térmica uniforme.

Segundo a EN 1991-1-5 [34], para a zona climática B, a temperatura máxima é de 40ºC e a mínima é de -15ºC. Para as zonas enterradas, o documento de aplicação nacional anexo a esta norma especifica uma temperatura máxima de 15ºC a 18ºC e uma temperatura mínima de 8ºC a 5ºC. Assim sendo, considerando uma temperatura inicial de 15ºC obtém-se, acima do solo, uma variação de temperatura uniforme máxima de 25ºC e mínima de -15ºC. Abaixo do solo a variação de temperatura uniforme máxima é de 0 a 3ºC e mínima de 7ºC a 10ºC.

5.3. MODELAÇÃO EM PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

Na presente dissertação efetuou e comparou-se os seguintes modelos estruturais para o tanque SBR:

- Modelo de cálculo com recurso a elementos finitos – Programa Autodesk Robot Structural Analysis 2013;
- Modelo de cálculo com recurso a elementos finitos – Programa CypeCad versão 2013.

5.3.1. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS – ROBOT

No desenvolvimento do modelo, recorreu-se ao modo "Shell 3D Design" disponibilizado pelo programa para o estudo de estruturas tridimensionais com elementos finitos, o qual considera 6 graus de liberdade por nó: 3 graus correspondentes a deslocamentos segundo os 3 eixos principais (U_x, U_y e U_z) e outros 3 graus correspondentes a rotações segundo esses mesmos eixos (R_x, R_y e R_z).

A discretização do modelo em elementos finitos é efectuada através das ferramentas para a geração automática da malha disponível no programa. É utilizado o método de Coons referido na secção 2.2.4.1 da presente dissertação. A malha de elementos finitos é constituída por elementos quadriláteros de 4 nós com dimensões máximas de 0,50 m (Figura 5.6).

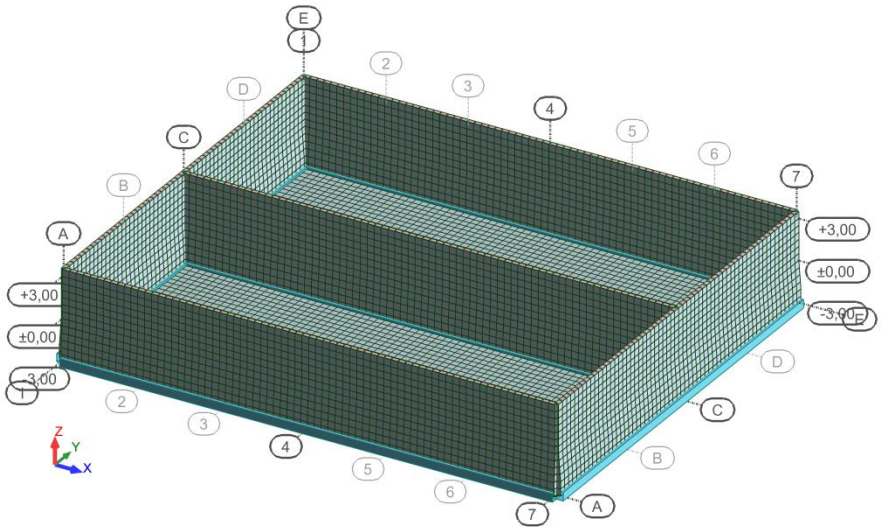

Figura 5.6 – Esquema 3D e malha de elementos finitos (ROBOT)

Todos os apoios de fundação são elásticos. O estudo geotécnico efectuado no local caracteriza o solo de fundação com um módulo de deformação de 21 MPa. Com base nesta informação e nas expressões do subcapítulo 2.3, os valores das constantes elásticas em função da área de influência são os que constam no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Valor das constantes elásticas dos apoios de fundação

Área Influência (m^2)	K_z (kN/m)	K_x (kN/m)	K_y (kN/m)
0.50x0.50	12542	691	691

As cargas no ROBOT estão introduzidas nos painéis que simulam as paredes e a laje de fundação. O peso próprio é gerado automaticamente pelo programa.

A apresentação dos resultados obtidos é efectuada na secção 5.3.3, juntamente com os resultados do outro modelo.

5.3.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS – CYPECAD

O CypeCad é um programa concebido principalmente para edifícios. Considera por defeito a hipótese de indeformabilidade do plano de cada piso, para simular o comportamento rígido da laje, impedindo os deslocamentos relativos entre os nós do mesmo (diafragma rígido). No entanto, permite desligar o efeito de diafragma rígido às vigas que não estejam em contacto com lajes e elimina automaticamente a suposição de diafragma rígido, ao nível do piso, nos muros que não estejam também em contacto com nenhuma laje. Assim sendo o objetivo desta modelação é o teste do comportamento dos muros do programa, quando estão em consola.

No desenvolvimento do modelo, para simular a variação de espessura no muro utilizaram-se vários troços com espessuras diferentes.

A discretização dos muros em elementos finitos é efectuada automaticamente pelo programa, sendo os elementos finitos triangulares constituídos por seis nós, localizados nos vértices e nos pontos médios dos lados, com seis graus de liberdade cada um.

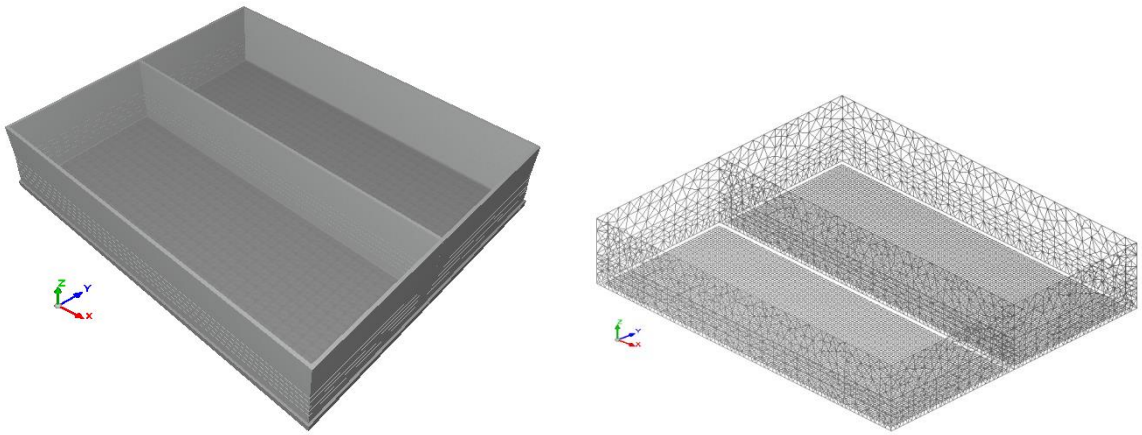

Figura 5.7– Esquema 3D e malha de elementos finitos (CypeCad)

A discretização da laje fundação realiza-se em malhas de elementos tipo barra de tamanho máximo de 25 cm e efetua-se uma condensação estática (método exato) dos graus de liberdade. Tem-se em conta a deformação por corte e mantém-se a hipótese de diafragma rígido. Considera-se a rigidez à torção dos elementos

Consideram-se apoios elásticos na laje de fundação, sendo o módulo de Winkler para o solo em questão igual a 50167 kN/m^3.

5.3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta secção são apresentados e comparados os efeitos das ações na estrutura, para cada modelo estrutural e programa de cálculo automático.

De modo a facilitar a interpretação de resultados, a deformada é apresentada antes dos esforços.

Devido à grande extensão de resultados são apenas destacados e comparados alguns deslocamentos e esforços, em zonas da estrutura mais solicitada.

A comparação de resultados está efectuada através de quadros com as respectivas diferenças. É utilizado o sistema de eixos da Figura 5.6 para auxiliar a localização dos esforços.

Uma vez que o programa CypeCad não permite a introdução na estrutura de ações térmicas, não se apresenta comparações.

A ação do vento não é comparada, porque o programa não permite a introdução manual da ação e quando introduzida automaticamente pelo programa, este não a considera nos muros em que existam impulsos de terras ou água.

Assim sendo, nos modelos são considerados os casos de ações constantes no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Denominação das ações consideradas nos modelos de cálculo

Ação		Observação
1	PP_REV	Peso próprio e revestimentos
2	IMP_SOLO	Impulso do solo
3	IMP_AG	Ação da água estando os 2 módulos cheios
4	IMP_AG_1	Ação da água estando só 1 módulo cheio

5.3.3.1. IMPULSO DA ÁGUA

- ***Deformada***

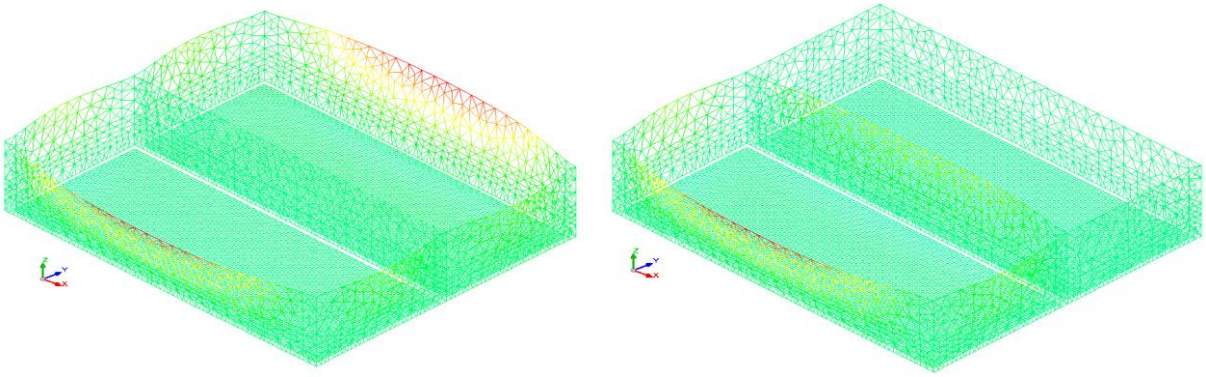

Figura 5.8 – Deformada devido à ação IMP_AG e IMP_AG_1 (CypeCad)

Quadro 5.4 – Comparação do U_x e U_y entre modelos (IMP_AG)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Deslocamentos	ROBOT (1)	CypeCad (2)
IMP_AG	[18;0;3.5] Eixo A	U_y (mm)	6.89	23.82
		Diferença	Δ (1-2)	-16.93 345.7%
	[7.5;0;-3] Eixo 1	U_x (mm)	4.97	8.60
		Diferença	Δ (1-2)	-3.63 73.0%
IMP_AG_1	[18;0;3.5] Eixo 1	U_y (mm)	4.92	8.41
		Diferença	Δ (1-2)	-3.49 70.9%

Entre os dois programas existem diferenças consideráveis nos deslocamentos no topo dos muros.

- ***Momento Flector e Esforço Transverso***

Os esforços do eixo A estão nas Figura 5.9 a 5.12.

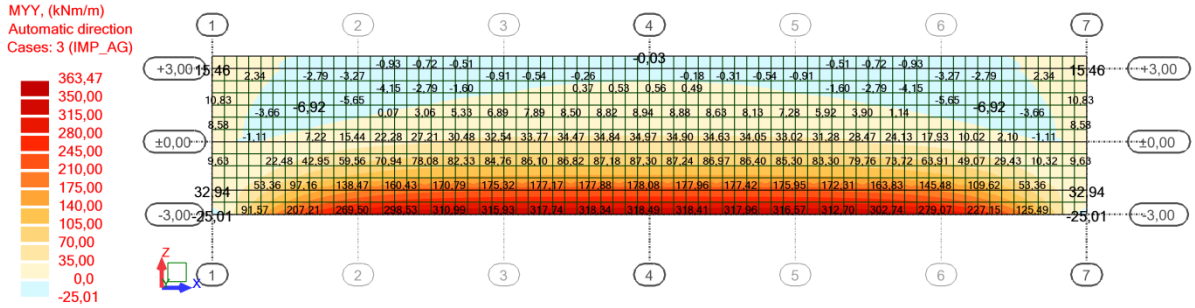

Figura 5.9 – Eixo A: momentos flectores verticais da ação IMP_AG (ROBOT)

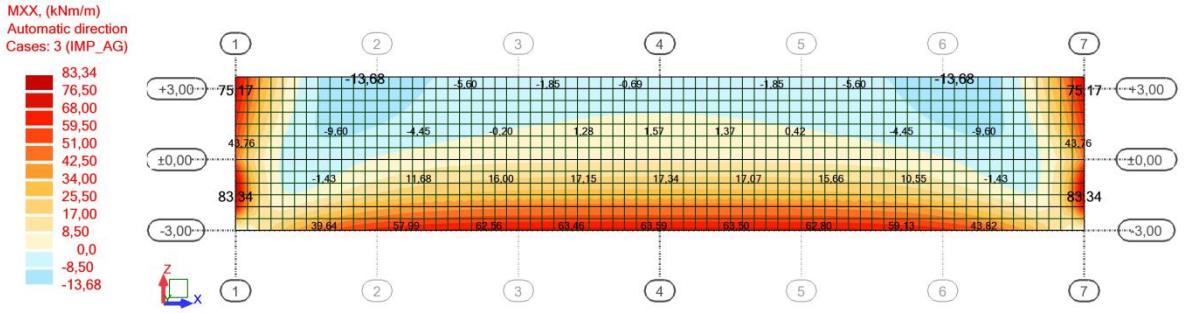

Figura 5.10 – Eixo A: momentos flectores horizontais da ação IMP_AG (ROBOT)

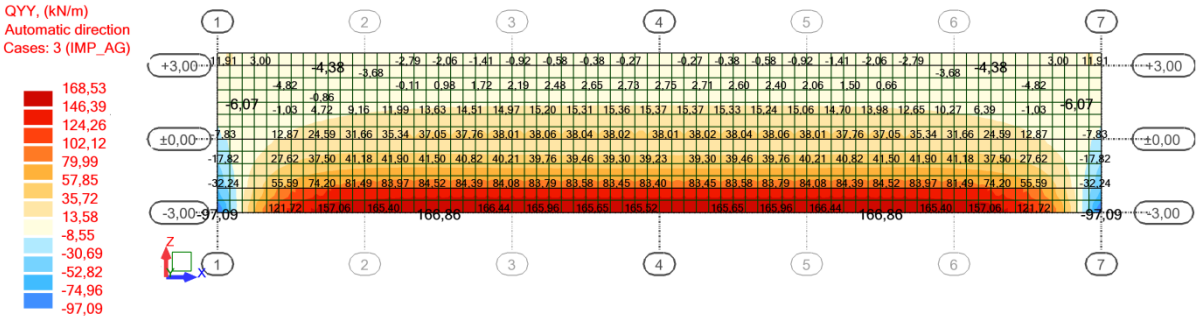

Figura 5.11 – Eixo A: esforço transverso vertical da ação IMP_AG (ROBOT)

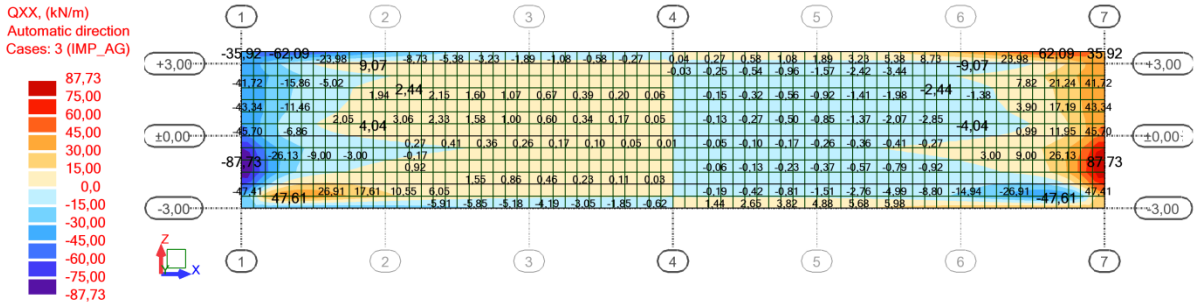

Figura 5.12 – Eixo A: esforço transverso horizontal da ação IMP_AG (ROBOT)

Quadro 5.5 – Eixo A e 1: comparação do M e do V entre modelos (IMP_AG)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Esforços	ROBOT (1)	CypeCad (2)
IMP_AG Eixo A	Eixo A-4 [18;0;-3]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	359.87	343.09
		Diferença	Δ (1-2)	16.78 4.9%
		$V_{vertical}$ (kN/m)	165.52	185.02
		Diferença	Δ (1-2)	-19.50 11.8%
	Eixo A-1 [0;0;-1.5]	$M_{horizontal}$ (kN.m/m)	83.34	296.26
		Diferença	Δ (1-2)	-212.92 355.5%
		$V_{horizontal}$ (kN/m)	85.09	315.88
		Diferença	Δ (1-2)	-230.79 371.2%

Os esforços máximos nos eixos A-4 são bastante idênticos entre os programas. No programa CypeCad, nas extremidades (Eixos A-1), os esforços horizontais são bastante superiores.

Os esforços do eixo 1 estão nas Figura 5.13 e 5.14.

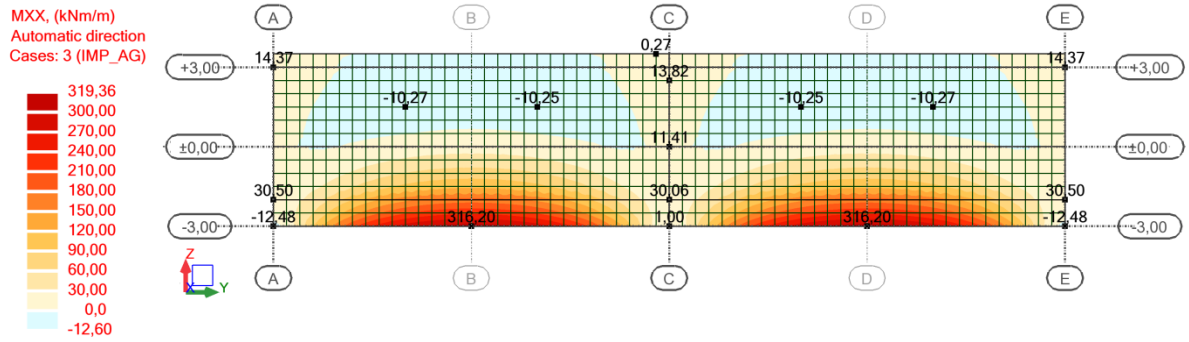

Figura 5.13 – Eixo 1: momentos flectores verticais da ação IMP_AG (ROBOT)

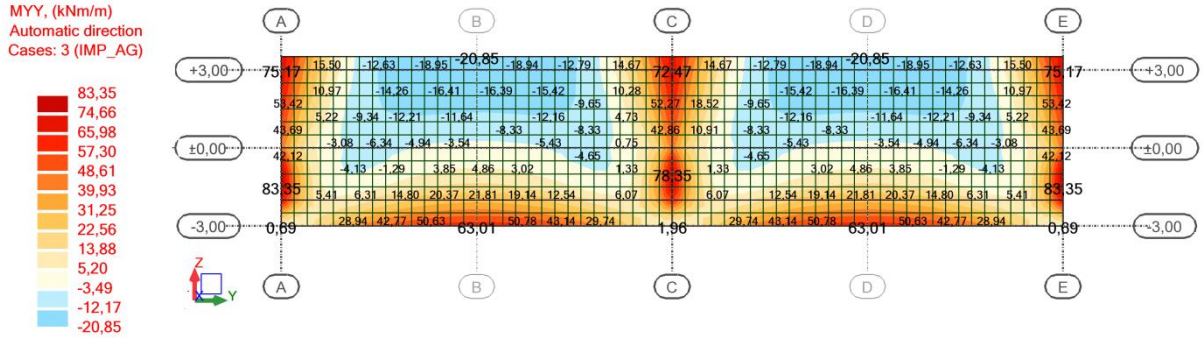

Figura 5.14 – Eixo 1: momentos flectores horizontais da ação IMP_AG (ROBOT)

Quadro 5.6 – Eixo 1: comparação do M e do V entre modelos (IMP_AG)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Esforços	ROBOT (1)	CypeCad (2)
IMP_AG Eixo 1	[7.5;0;-3]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	316.2	178.91
		Diferença	Δ (1-2)	137.29 76.7%
		$V_{vertical}$ (kN/m)	167.34	156.01
		Diferença	Δ (1-2)	11.33 7.3%
	[0;15;-1.5]	$M_{horizontal}$ (kN.m/m)	76.15	221.55
		Diferença	Δ (1-2)	-145.40 290.9%
		$V_{horizontal}$ (kN/m)	75.32	154.79
		Diferença	Δ (1-2)	-79.47 205.5%

Nas extremidades e na intersecção com o muro intermédio, no CypeCad os esforços horizontais são bastante superiores. A meio de cada depósito, os esforços máximos em cada modelo são influenciados pelo maior ou menor encastramento das extremidades.

Para o caso de alternância de uso os esforços estão nas Figura 5.15 a 5.17.

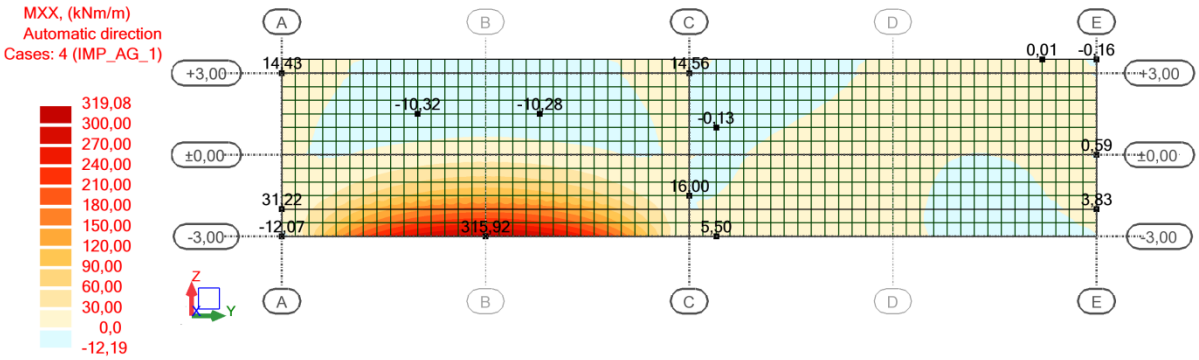

Figura 5.15 – Eixo 1: momentos flectores verticais da ação IMP_AG_1 (ROBOT)

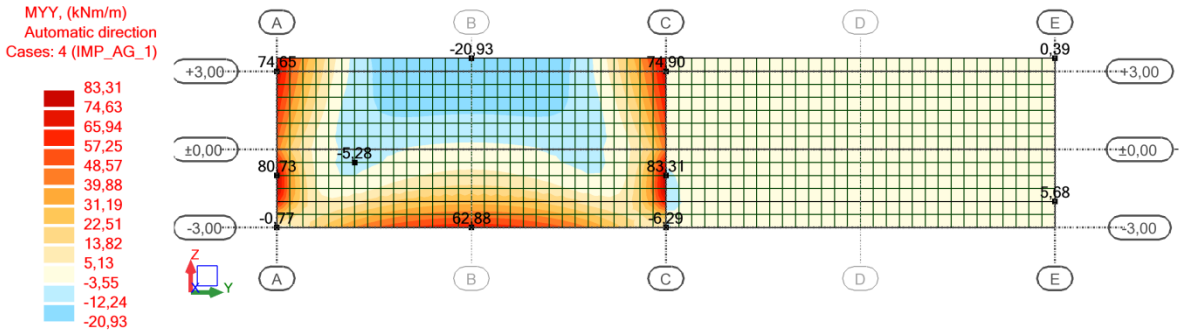

Figura 5.16 – Eixo 1: momentos flectores horizontais da ação IMP_AG_1 (ROBOT)

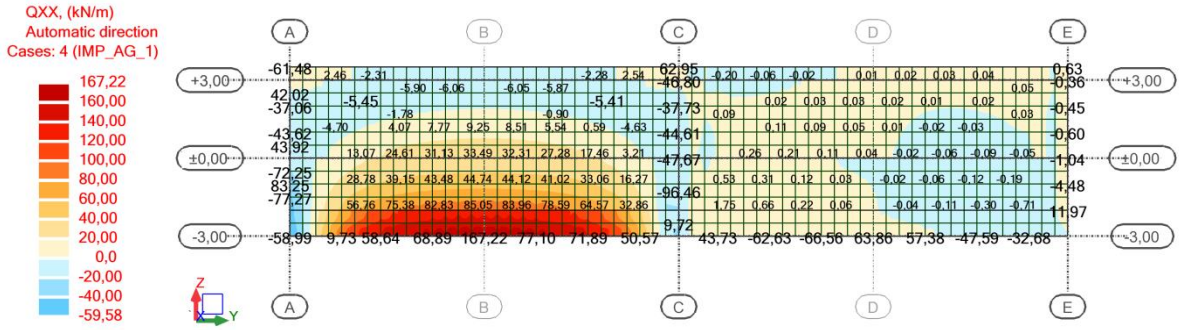

Figura 5.17 – Eixo 1: esforço transverso vertical da ação IMP_AG_1 (ROBOT)

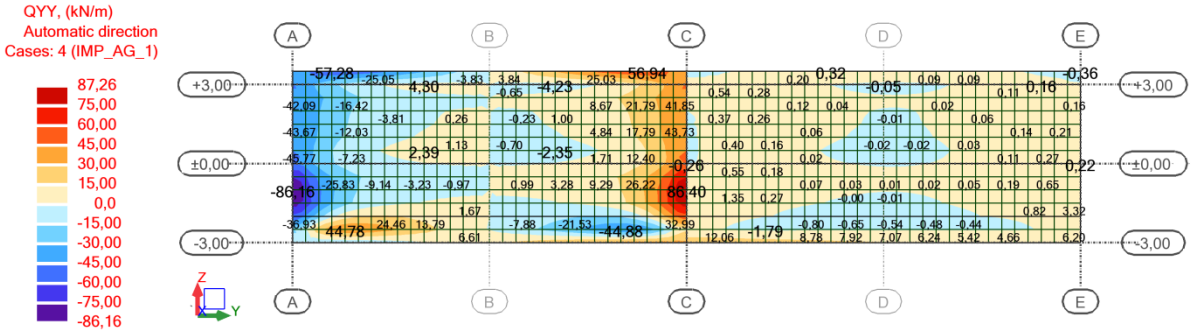

Figura 5.18 – Eixo 1: esforço transverso horizontal da ação IMP_AG_1 (ROBOT)

Quadro 5.7 – Eixo 1: comparação do M e do V entre modelos (IMP_AG_1)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Esforços	ROBOT (1)	CypeCad (2)
IMP_AG_1 Eixo 1	[7.5;0;-3]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	315.92	188.46
		Diferença	Δ (1-2)	127.46 / 67.6%
		$V_{vertical}$ (kN/m)	167.22	158.29
		Diferença	Δ (1-2)	8.93 / 5.6%
	[0;15;-1.5]	$M_{horizontal}$ (kN.m/m)	82.79	205.07
		Diferença	Δ (1-2)	-122.28 / 247.7%
		$V_{horizontal}$ (kN/m)	81.35	228.18
		Diferença	Δ (1-2)	-146.83 / 280.5%

As observações são semelhantes ao anterior caso.

5.3.3.2. IMPULSO DO SOLO

- ***Deformada***

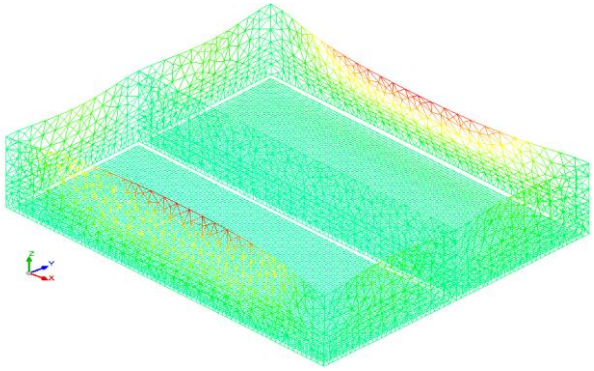

Figura 5.19 – Deformada para a ação IMP_SOLO (CypeCad)

Quadro 5.8 – Comparação do U_x e U_y entre modelos (IMP_SOLO)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Deslocamentos	ROBOT (1)	CypeCad (2)
IMP_SOLO	[18;0;3.5] Eixo A	U_y (mm)	0.33	2.45
		Diferença	Δ (1-2)	-2.12 742.4%
	[7.5;0;-3] Eixo 1	U_x (mm)	0.23	0.78
		Diferença	Δ (1-2)	-0.55 339.1%

Volta-se a registar as mesmas diferenças significativas.

- ***Momento Flector e Esforço Transverso***

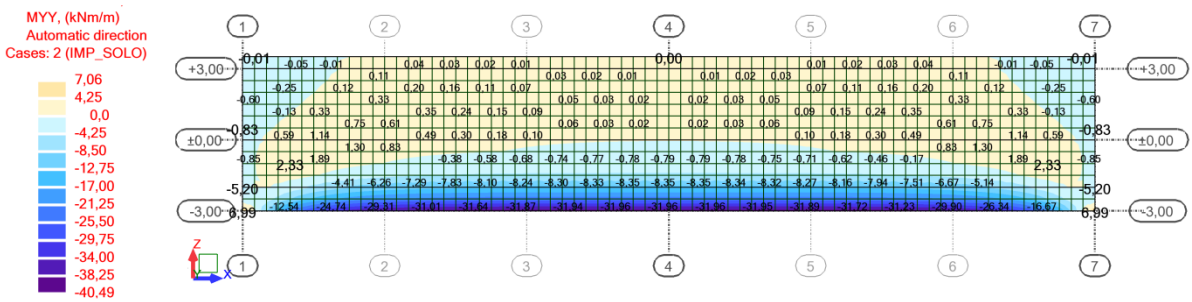

Figura 5.20 – Eixo A: momentos flectores em y da ação IMP_SOLO (ROBOT)

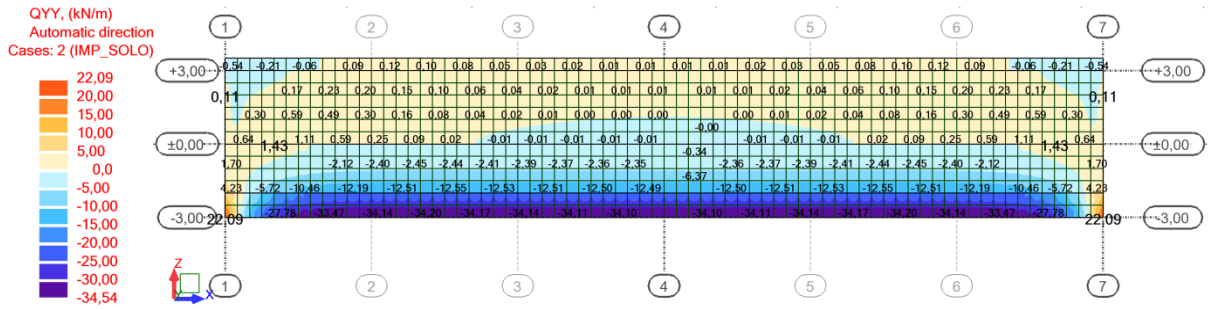

Figura 5.21 – Eixo A: esforço transverso em y da ação IMP_AG (ROBOT)

Quadro 5.9 – Eixo 1: comparação do M e do V entre modelos (IMP_SOLO)

Caso	Coord.	Modelo	Elem. Finitos	
		Esforços	ROBOT (1)	CypeCad (2)
IMP_SOLO Eixo A	[7.5;0;-3]	$M_{vertical}$ (kN.m/m)	316.2	178.91
		Diferença	Δ (1-2)	137.29 76.7%
		$V_{vertical}$ (kN/m)	167.34	156.01
		Diferença	Δ (1-2)	11.33 7.3%
	[7.5;0;-3]	$M_{horizontal}$ (kN.m/m)	76.15	221.55
		Diferença	Δ (1-2)	-145.40 290.9%
		$V_{horizontal}$ (kN/m)	75.32	154.79
		Diferença	Δ (1-2)	-79.47 205.5%

Registam-se novamente as mesmas diferenças significativas.

5.3.3.3. CONCLUSÕES

Entre os dois programas existem diferenças significativas de esforços nas uniões entre paredes. Perante esta diferença significativa, simulou-se no programa SAP2000 o mesmo depósito e chegou-se a resultados semelhantes aos obtidos no programa ROBOT.

O programa CypeCad é bastante fechado, como tal descobrir o porquê desta diferença torna-se difícil. No manual do CypeCad vem referido que o efeito de diafragma rígido desliga-se automaticamente nos muros que não estejam em contacto com nenhuma laje. No entanto, não faz nenhuma referência se existir intersecção de muros.

6
DIMENSIONAMENTO

6.1. INTRODUÇÃO

No anexo F da norma europeia NP EN 1992-1-1 [1] são apresentadas expressões relativas às armaduras de tração para tensões no próprio plano, isto é, esforços de membrana. Em relação às armaduras para elementos sujeitos a esforços de flexão com ou sem esforços de membrana, a referida norma é omissa.

Os elementos laminares são caracterizados por esforços de membrana e flexão.

Segundo a recomendação definida no MC90 [35], um elemento laminar sujeito a esforços de flexão deve ser dimensionado segundo o "Método das Três Camadas", ou seja, divide-se o elemento em três camadas (Figura 6.1) e dimensionam-se as camadas exteriores como se se tratassem de elementos sujeitos a carregamentos no seu plano. Para tal é necessário encontrar as forças equivalentes nas camadas exteriores às forças de membrana e flexão aplicadas no centro de gravidade dos elementos.

Determinadas as forças equivalentes, podem-se aplicar as expressões definidas no referido anexo F, para as camadas exteriores. A camada interior é dimensionada ao corte através das expressões para o esforço transverso da referida norma europeia [1].

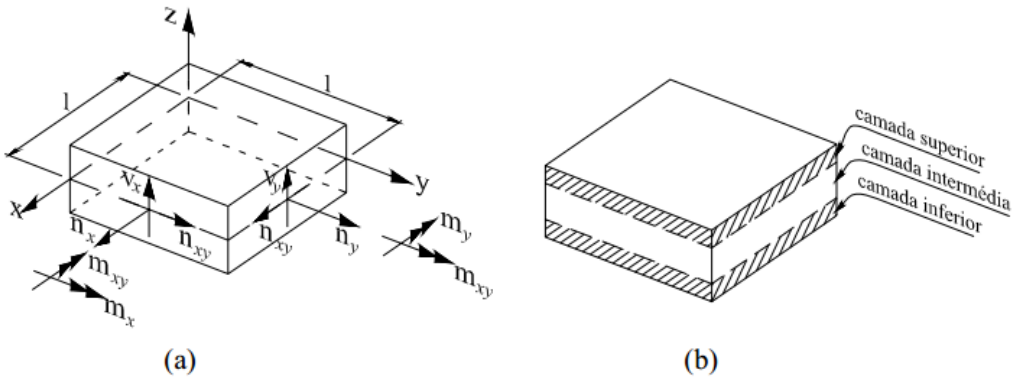

Figura 6.1 – Elemento laminar a) Tensões resultantes; b) Modelo das três camadas

6.2. METODOLOGIA DA NP EN 1992-1-1

As armaduras de tração num elemento sujeito a tensões ortogonais no próprio plano, σ_{Edx}, σ_{Edy} e τ_{Edxy} podem ser determinadas através do método apresentado no anexo F da NP EN 1992-1-1 [1], o qual se descreve nos pontos seguintes.

- As tensões de compressão são positivas, com $\sigma_{Edx} > \sigma_{Edy}$.

Nota: se $\sigma_{Edx} < \sigma_{Edy}$ é necessário trocar os eixos. Caso haja troca de eixos é necessário ter em atenção esta troca no dimensionamento da armadura.

- Nas zonas em que σ_{Edx} e σ_{Edy} são ambas tensões de compressão e $\sigma_{Edx} \times \sigma_{Edy} > \tau_{Edxy}^2$ não são necessárias armaduras.

$$Se: \sigma_{Edx} > \sigma_{Edy} \wedge \sigma_{Edx} \times \sigma_{Edy} > \tau_{Edxy}^2 \quad (6.1)$$ – Não é necessária armadura

$$\sigma_{cd} \leq f_{cd} \quad (6.2)$$ – Verificação obrigatória

- Nas zonas em que σ_{Edy}é uma tensão de tracção ou $\sigma_{Edx}.\sigma_{Edy} \leq \tau_{Edxy}^2$, são necessárias armaduras. As quantidades óptimas, identificadas pelo índice superior ´, e a correspondente tensão no betão são determinadas pelas equações seguintes.

$$Se: \sigma_{Edx} < \sigma_{Edy} \vee \sigma_{Edx} \times \sigma_{Edy} \leq \tau_{Edxy}^2 \quad (6.3)$$ – É necessária armadura

$$Se: \sigma_{Edx} \leq \left|\tau_{Edxy}\right| \quad (6.4)$$

$$f_{tdx}^{'} = \left|\tau_{Edxy}\right| - \sigma_{Edx} \quad (6.5)$$

$$f_{tdy}^{'} = \left|\tau_{Edxy}\right| - \sigma_{Edy} \quad (6.6)$$

$$\sigma_{cd} = 2\left|\tau_{Edy}\right| \leq \nu \times f_{cd} \quad (6.7)$$

$$Se: \sigma_{Edx} > \left|\tau_{Edxy}\right| \quad (6.8)$$

$$f_{tdx}^{'} = 0 \quad (6.9)$$

$$f_{tdy}^{'} = \frac{\tau_{Edxy}^2}{\sigma_{Edx}} - \sigma_{Edy} \quad (6.10)$$

$$\sigma_{cd} = \sigma_{Edx}\left(1 + \left(\frac{\tau_{Edxy}}{\sigma_{Edx}}\right)^2\right) \leq \nu \times f_{cd} \quad (6.11)$$

- O coeficiente de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transverso é dado pela expressão (6.12).

$$\nu = 0.6\left[1 - \frac{f_{ck}}{250}\right] \qquad (6.12)$$

A quantificação das tensões em elementos laminares sujeitos a esforços de flexão, com ou sem esforços de membrana, pode ser determinada aplicando o método das três camadas. Neste método, as camadas exteriores resistem às ações de membrana provenientes dos esforços por unidade comprimento m_{Edx} m_{Edy} m_{Edxy} n_{Edx} n_{Edy} n_{Edxy} , enquanto a camada interior resiste aos esforços de corte V_{Edx} e V_{Edy} (Figura 6.2 e 6.3).

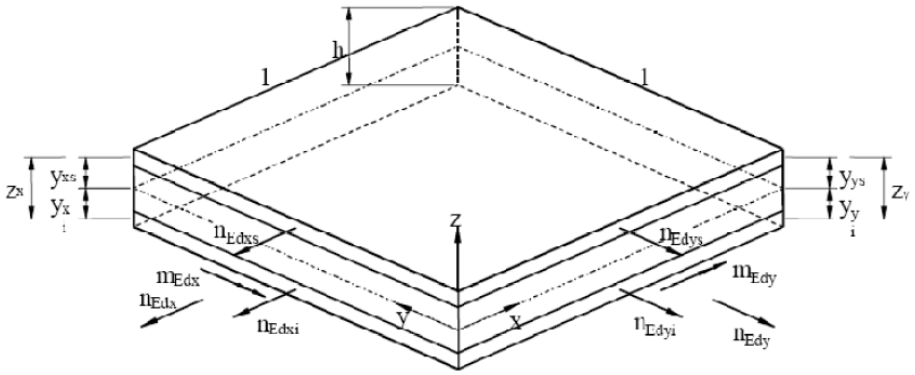

Figura 6.2 – Esforços normais e momentos flectores nas camadas exteriores

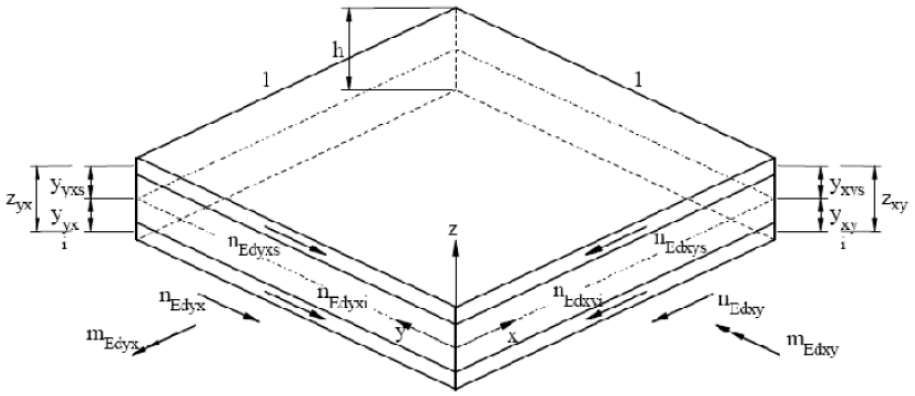

Figura 6.3 – Esforços de corte e momentos de torção nas camadas exteriores

- Para a camada superior, as tensões podem ser calculadas pelas expressões seguintes.

$$\sigma_{Edx} = \frac{\frac{n_{Edx}}{2} + \left(\frac{m_{Edx}}{z_x} \right)}{a_t} \qquad (6.13)$$

$$\sigma_{Edy} = \frac{\frac{n_{Edy}}{2} + \left(\frac{m_{Edy}}{z_y} \right)}{a_t} \qquad (6.14)$$

$$\tau_{Edxy} = \frac{\frac{n_{Edxy}}{2} - \left(\frac{m_{Edxy}}{z_{xy}} \right)}{a_t} \qquad (6.15)$$

- Para a camada inferior, as tensões podem ser calculadas pelas expressões seguintes.

$$\sigma_{Edx} = \frac{\frac{n_{Edx}}{2} - \left(\frac{m_{Edx}}{z_x} \right)}{a_b} \qquad (6.16)$$

$$\sigma_{Edy} = \frac{\frac{n_{Edy}}{2} - \left(\frac{m_{Edy}}{z_y} \right)}{a_b} \qquad (6.17)$$

$$\tau_{Edxy} = \frac{\frac{n_{Edxy}}{2} + \left(\frac{m_{Edxy}}{z_{xy}} \right)}{a_b} \qquad (6.18)$$

- a_t e a_b são as espessuras das camadas superior e inferior, respectivamente. A determinação destas espessuras é efectuada por um processo iterativo.

$$1^{a} iteração \rightarrow a_t = a_b = 0.2h \qquad (6.19)$$

$$z_x = z_y = z_{xy} = \frac{h - (a_t + a_b)}{2} \qquad (6.20)$$

$$\sigma_{cd} \leq \nu \times f_{cd} \qquad (6.21)$$

- Se a expressão 6.21 for verdadeira, terminam as iterações. Caso contrário determinam-se novas espessuras para as camadas até ser verdadeira.

$$2^{a}\,iteração \rightarrow a_t^2 = \frac{\sigma_{cd} \times a_t^1}{f_{cd\,2}} \quad (6.22)$$

$$2^{a}\,iteração \rightarrow a^2{}_b = \frac{\sigma_{cd} \times a_b^1}{f_{cd\,2}} \quad (6.23)$$

$$z_x^2 = z_y^2 = z_{xy}^2 = \frac{h - \left(a_t^2 + a_b^2\right)}{2} \quad (6.24)$$

$$\sigma_{cd} \le \nu \times f_{cd} \quad (6.25)$$

- A verificação ao esforço transverso, da camada intermédia, é efectuada pelas expressões seguintes.

$$V_{Ed\,0} = \sqrt{V_{Edx}^2 + V_{Edy}^2} \le V_{Rd} \quad (6.26)$$

- Para elementos que não necessitem de armadura de esforço transverso (normalmente estes elementos não necessitam) $V_{Rd} = V_{Rd,c}$.

$$V_{Rd,c} = \left[0.12k\left(100\rho_l f_{ck}\right)^{1/3} + 0.15\sigma_{cp}\right]b_w d \quad (6.27)$$

$$V_{Rd,c} \ge \left(\nu_{\min} + 0.15\sigma_{cp}\right)b_w d \quad (6.28)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \le 2.0 \quad (6.29)$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \le 0.02 \quad (6.30)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0.2\, f_{cd}\,[MPa] \quad (6.31)$$

$$\nu_{\min} = 0.035k^{2/3} f_{ck}^{1/2} \quad (6.32)$$

- A resistência à tração conferida pela armaduras são determinadas pelas expressões (6.33) à (6.36). As direções das armaduras devem coincidir com os eixos x e y

$$A_{sx}^{\sup} = \frac{f_{tdx}^{'}}{f_{yd}} a_t \qquad (6.33)$$

$$A_{sy}^{\sup} = \frac{f_{tdy}^{'}}{f_{yd}} a_t \qquad (6.34)$$

$$A_{sx}^{\inf} = \frac{f_{tdx}^{'}}{f_{yd}} a_b \qquad (6.35)$$

$$A_{sy}^{\inf} = \frac{f_{tdy}^{'}}{f_{yd}} a_b \qquad (6.36)$$

6.3. DIMENSIONAMENTO DE UM CASO DE ESTUDO – TÚNEIS DE COMPOSTAGEM

Através de uma folha de cálculo, elaborada segundo o método descrito no subcapítulo 6.2, efetuou-se o dimensionamento das armaduras para as combinações fundamentais expressas no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Combinação de ações consideradas no dimensionamento (ULS)

Combinação	Permanente	Sobrecarga Piso	Sobrecarga Cobertura	Ação Térmica	Vento	Sismo
COMB1	1.35	1.50	1.50	1.50	0.40x1.50	
COMB2	1.00	1.50	1.50	1.50	0.40x1.50	
COMB3	1.35	1.50		1.50	1.50	
COMB4	1.00	1.50		1.50	1.50	
COMB5	1.00	1.00		1.00		1.00
COMB6	1.00	1.00		1.00		1.00

Para cada ação, é retirado do modelo de elementos finitos do programa ROBOT a tabela de resultados e determina-se a armadura. A solução final é a envolvente de armaduras.

Na presente dissertação apenas se dimensionou a secção que passa no eixo Y-10.

Devido à grande extensão de resultados, é apenas apresentado ao pormenor o dimensionamento a meio vão do túnel nº1 para a combinação COMB1.

6.3.1. ESFORÇOS DE DIMENSIONAMENTO

Para a combinação COMB1 (os dois túneis em funcionamento), no eixo x-10 a meio vão do túnel nº1 os esforços obtidos são:

$$m_{xx} = -215.14 \ kN.m/m$$
$$m_{yy} = -203.51 \ kN.m/m$$
$$m_{xy} = 0.12 \ kN.m/m$$
$$n_{xx} = 3.51 \ kN/m$$
$$n_{yy} = 33.36 \ kN/m$$
$$n_{xy} = 2.03 \ kN/m$$
$$v_{xx} = 2.86 \ kN/m$$
$$v_{xy} = 0.08 \ kN/m$$

Nota: no programa ROBOT, os momentos flectores são negativos quando se tem trações na face inferior. As expressões da NP EN 1992-1-1 [1] consideram que as compressões são positivas. Assim sendo é necessário trocar o sinal dos momentos obtidos no programa ROBOT, de modo a serem consideradas corretamente as compressões e as trações nas expressões (6.13) a (6.18).

6.3.2. DIMENSIONAMENTO PELA METODOLOGIA DO ANEXO F

- **Verificação ao esforço transverso**

A verificação ao esforço transverso é efectuada pela expressão (6.26):

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} = 211.97 \ kN/m$$
$$V_{Ed0} = \sqrt{2.86^2 + 0.08^2} = 2.86 \leq V_{Rd} \rightarrow ok!$$

- **Determinação das tensões ortogonais**

A espessura da camada superior e inferior, para a primeira iteração, é considerada 20% da espessura do elemento:

$$1^a \, iteração \rightarrow a_t = a_b = 0.2 \times 0.30 = 0.06 \ m$$
$$z_x = z_y = z_{xy} = \frac{0.30 - (0.06 + 0.06)}{2} = 0.24 \ m$$

Aplicando as expressões (6.13) a (6.15) obtém-se para a camada superior:

$$\sigma_{Edx} = \frac{-\frac{3.51}{2} + \left(\frac{215.14}{0.24}\right)}{0.06} = 14.91\ MPa\ \left(compressão\right)$$

$$\sigma_{Edy} = \frac{-\frac{33.36}{2} + \left(\frac{203.51}{0.24}\right)}{0.06} = 13.85\ MPa\ \left(compressão\right)$$

Verificação complementar

$$\sigma_{Edx} > \sigma_{Edy} \rightarrow OK\ !Não\ troca\ eixos$$

$$\tau_{Edxy} = \frac{-\frac{2.03}{2} - \left(-\frac{0.12}{0.24}\right)}{0.06} = 0.01\ MPa$$

Aplicando as expressões (6.13) a (6.15) obtém-se para a camada superior:

$$\sigma_{Edx} = \frac{-\frac{3.51}{2} - \left(\frac{215.14}{0.24}\right)}{0.06} = -14.97\ MPa\ \left(tracção\right)$$

$$\sigma_{Edy} = \frac{\frac{33.36}{2} - \left(\frac{203.51}{0.24}\right)}{0.06} = -14.41\ MPa\ \left(tracção\right)$$

Verificação complementar

$$\sigma_{Edx} > \sigma_{Edy} \rightarrow KO\ !\ Troca\ eixos$$

$$\sigma_{Edx} = -14.41\ MPa\ \left(tracção\right)$$

$$\sigma_{Edy} = -14.97\ MPa\ \left(tracção\right)$$

$$\tau_{Edxy} = \frac{-\frac{2.03}{2} + \left(\frac{0.12}{0.24}\right)}{0.06} = 0.03\ MPa$$

- **Verificação da necessidade de armadura**

Para a camada superior a condição expressa em (6.1) e (6.2) é válida pelo que não é necessária armadura (apenas a armadura mínima regulamentar).

$\sigma_{Edx} > \sigma_{Edy} \wedge \sigma_{Edx} \times \sigma_{Edy} > \tau_{Edxy}^2$ – Não é necessária armadura

$\sigma_{cd} = 14.91\ MPa \leq f_{cd} = 23.23\ OK!$ – Verificação obrigatória

Para a camada inferior a condição expressa em (6.1) não é válida pelo que é necessária armadura. Como a condição (6.4) é válida vem:

$$\sigma_{Edx} \leq \left|\tau_{Edxy}\right|$$

$$f_{tdx}^{'} = 14.43\ MPa$$

$$f_{tdy}^{'} = 14.99\ MPa$$

$$\sigma_{cd} = 0.04\ MPa \leq \nu \times f_{cd}\ OK!$$

- **Dimensionamento da armadura**

Aplicando as expressões (6.33) a (6.36) determinam-se as armaduras:

$$A_{sx}^{\sup} = A_{s\min} = 4.16\ cm^2/m$$

$$A_{sy}^{\sup} = A_{s\min} = 4.16\ cm^2/m$$

$$A_{sx}^{\inf} = \frac{14.43}{435} \times 0.06 = 19.92\ cm^2/m$$

$$A_{sy}^{\inf} = \frac{14.99}{435} \times 0.06 = 20.69\ cm^2/m$$

Como houve troca de eixos na camada inferior, é necessário trocar os resultados das armaduras, de modo a estes estarem coerentes com os eixos inicialmente considerados.

Assim sendo, a solução final é:

$$A_{sx}^{\sup} = A_{s\min} = 4.16\ cm^2/m$$

$$A_{sy}^{\sup} = A_{s\min} = 4.16\ cm^2/m$$

$$A_{sx}^{\inf} = 20.69\ cm^2/m$$

$$A_{sy}^{\inf} = 19.92\ cm^2/m$$

6.3.3. DIMENSIONAMENTO PELA METODOLOGIA CONVENCIONAL

- **Dimensionamento da armadura**

Segundo a bibliografia [36], o valor reduzido de cálculo do momento flector resistente é dado pela expressão (6.37).

$$\mu = \frac{M_{Rd}}{bd^2 f_{cd}} \qquad (6.37)$$

A percentagem mecânica de armadura pode ser obtida pela expressão (6.38), em conjunto com as tabelas de betão armado [36].

$$\varpi = \frac{A_s}{b \times d} \times \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \qquad (6.38)$$

Na direção x:

$$\mu = \frac{215.14}{1 \times 0.25^2 \times 23.23} \cong 0.150$$

$$0.163 = \frac{A_s}{1 \times 0.25} \times \frac{435}{23.23} \Leftrightarrow A_s = 21.76 \ cm^2 / m$$

Na direção y:

$$\mu = \frac{203.51}{1 \times 0.25^2 \times 23.23} \cong 0.140$$

$$0.152 = \frac{A_s}{1 \times 0.25} \times \frac{435}{23.23} \Leftrightarrow A_s = 20.29 \ cm^2 / m$$

A armadura obtida é ligeiramente superior (cerca de 5%) à obtida no método anterior.

Contudo, este tipo de estrutura requer também uma análise ao estado limite de utilização, nomeadamente no que respeita ao controlo da fendilhação. Neste tipo de estruturas aconselha-se um valor limite de largura de fendas de 0.30 a 0.20mm (consoante o tipo de proteção interior que for especificada).

Na secção seguinte faz-se a verificação ao estado limite de abertura de fendas.

6.3.4. DIMENSIONAMENTO SEGUNDO O ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO

- **Esforços da combinação característica**

A meio vão do túnel nº1, na situação em que os dois túneis estão em funcionamento, os esforços obtidos para a combinação característica são:

$$m_{xx} = -143.40 \ \ kN.m/m$$
$$m_{yy} = -135.60 \ \ kN.m/m$$
$$m_{xy} = 0.08 \ \ kN.m/m$$
$$n_{xx} = 2.25 \ \ kN/m$$
$$n_{yy} = 23.03 \ \ kN/m$$
$$n_{xy} = 1.22 \ \ kN/m$$
$$v_{xx} = 1.85 \ \ kN/m$$
$$v_{xy} = 0.05 \ \ kN/m$$

- **Verificação se a secção está fendilhada**

O momento flector que provoca a abertura da primeira fenda, M_{cr} é dado pela expressão (6.40).

$$M_{cr} = W_{ci} \times f_{ctm} \qquad (6.40)$$

$$W_{ci} = \frac{I_{ci}}{v} \qquad (6.41)$$

$$M_{cr} = 0.0183 \times 3.20 = 58.70 \ \ kN.m/m$$

Como M_{cr} é maior que o momento flector para a combinação característica, a secção está fendilhada.

- **Tensões de tração na armadura em secção fendilhada**

Através das expressões e tabelas da bibliografia [37], e considerando a armadura para o estado limite último (Ø16//0.10 para a direção x e y), tem-se:

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = 0.80\% \ \Rightarrow \rho_{Tab} = \frac{\rho\alpha}{10} \cong 1.20\% \qquad (6.42)$$

$$C_s^{Tab} = 95.60 \ \Rightarrow C_s = \frac{C_s^{Tab}\alpha}{10} = 143.40 \ \ MPa \qquad (6.43)$$

Para o esforço que provoca a abertura da primeira fenda, a tensão na armadura é:

$$\sigma_{sr} = \frac{C_s \times M_{cr}}{bd^2} = 132.90 \ MPa \quad (6.44)$$

Para a direção x, a tensão na armadura é:

$$\sigma_s = \frac{C_s \times m_{xx}}{bd^2} = 329.08 \ MPa \quad (6.45)$$

Para a direção y, a tensão na armadura é:

$$\sigma_s = \frac{C_s \times m_{yy}}{bd^2} = 311.12 \ MPa \quad (6.46)$$

- **Cálculo da largura de abertura de fendas**

As expressões para o cálculo da largura de fendas são apresentadas a seguir.

$$\rho_r = \frac{A_s}{A_{c,eff}} \quad (6.47)$$

$$S_{rm}. = 50 + 0.25 k_1 k_2 \frac{\phi}{\rho_r} \quad (6.48)$$

$$\varepsilon_{sm}. = \frac{\sigma_s}{E_s}\left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s}\right)^2\right] \quad (6.49)$$

$$w_k = \beta . S_{rm} . \varepsilon_{sm} \quad (6.50)$$

Para o presente caso, $\beta = 1.30$ (h=0.30), $\beta_1 = 1.00$ (varões alta aderência), $\beta_2 = 0.50$ (vários ciclos de carga), $k_1 = 1.00$ (extrínseca) e $k_2 = 0.50$ (varões alta aderência)

$$\rho_r = 0.0296$$

$$S_{rm}. = 117.60 \ mm$$

Para a direção x obtém-se

$$\varepsilon_{sm}. = 1.511 \ \%\circ$$

$$w_k = 0.23 \ mm$$

Para a direção y obtém-se

$$\varepsilon_{sm}. = 1.414\ \%\circ$$

$$w_k = 0.22\ \ mm$$

- **Armadura mínima de controlo da fendilhação**

Segundo a NP EN 1992-1-1 [1], a armadura mínima para o controlo da fendilhação é dada pela expressão (6.51). Apesar de estar efectuado o controlo de fendilhação, o autor da presente dissertação considera que, numa estrutura deste tipo, a secção de betão deve possuir pelo menos a armadura mínima dada pela expressão (6.51).

$$A_{s,\min} = \frac{k_c k f_{ct,eff} A_{ct}}{\sigma_s} \qquad (6.51)$$

A_{ct} – Área de betão traccionado. A zona de betão traccionado é aquela em que, pelo cálculo da secção, se demonstra que está em tacão imediatamente antes da formação da primeira fenda;

σ_s– Valor absoluto da tensão máxima admissível na armadura imediatamente depois da formação da fenda. Poderá ser considerada igual à tensão de cedência da armadura,f_{yk}. No entanto, poderá ser necessário adoptar-se um valor mais baixo para satisfazer a largura máxima de fendas em função do diâmetro máximo ou do espaçamento máximo entre varões (ver ponto 7.3.3(2) da norma [1]);

$f_{ct,eff}$– Valor médio da resistência do betão à tracção à data em que se prevê que se possam formar primeiras fendas:$f_{ct,eff} = f_{ctm}$ ou um valor inferior, $\left(f_{ctm}(t)\right)$, se se prever uma fendilhação antes dos 28 dias.

k - Coeficiente que considera o efeito das tensões não uniformes auto-equilibradas, de que resulta uma redução dos esforços de coacção:

$k = 1.00$ para almas com h ≤ 300 mm ou para banzos com larguras inferiores a 300 mm;

$k = 0.65$ para almas com h > 800 mm ou para banzos com larguras superiores a 800 mm;

Valores intermédios poderão ser obtidos por interpolação.

k_c– Coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões na secção, imediatamente antes da fendilhação e da variação do braço do binário:

$k_c = 1.00$ – Tração simples

$k_c = 0.40$ – Flexão simples

Para Ø16 e $w_k = 0.20$ mm:

$$A_{s,\min} = \frac{0.40 \times 1.00 \times 3.2 \times 0.067}{200} = 4.30\ \ cm^2\ /\ m$$

Neste caso, conclui-se que dimensionando as armaduras para o estado limite, estas irão verificar também o estado limite de utilização.

6.3.5. SOLUÇÃO FINAL

Conforme referido, para o restante dimensionamento é utilizada uma folha de cálculo elaborada segundo método do anexo F.

O aspecto da folha de cálculo é apresentado de seguida:

m_{xx}	m_{yy}	m_{xy}	n_{sdx}	n_{sdy}	n_{sdxy}	V_{Edx}	V_{Edy}	V_{Ed0}	$V_{Ed0} \leq V_{rd,c}$
[kN.m/m]	[kN.m/m]	[kN.m/m]	[kN/m]			[kN/m]		[kN/m]	
-215.14	-203.51	0.12	3.51	33.36	2.03	2.86	0.08	2.86	OK!

Espessura das camadas	z	σ_{Edx}	σ_{Edy}	τ_{Edxy}	$\sigma_x > \sigma_y$	Verificação
	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		
a_t = 0.060 m	0.240	14.91	13.85	0.01	Sim	Não são necessárias armaduras
a_b = 0.060 m		-14.41	-14.97	0.03	Sim	São necessárias armaduras

$\sigma_{Edx} \leq \lvert\tau_{Edxy}\rvert$	f'_{tdx}	f'_{tdy}	σ_{cd}	Verificação	A_{sx}	A_{sy}
	[MPa]	[MPa]	[MPa[		cm^2/m	cm^2/m
	0.00	0.00	14.91	Sim	0.00	0.00
Sim	14.43	14.99	0.04	Sim	20.69	19.92

Figura 6.4 – Aspecto gráfico da folha de cálculo

A generalidade dos programas de elementos finitos exporta os resultados para folhas de cálculo. A metodologia preconizada pelo anexo F, permite que através de uma simples folha de cálculo, indexada aos resultados do programa de cálculo, se determine, de um modo quase "automático", as armaduras.

Na figura seguinte identifica-se os nós alvo de dimensionamento na presente dissertação.

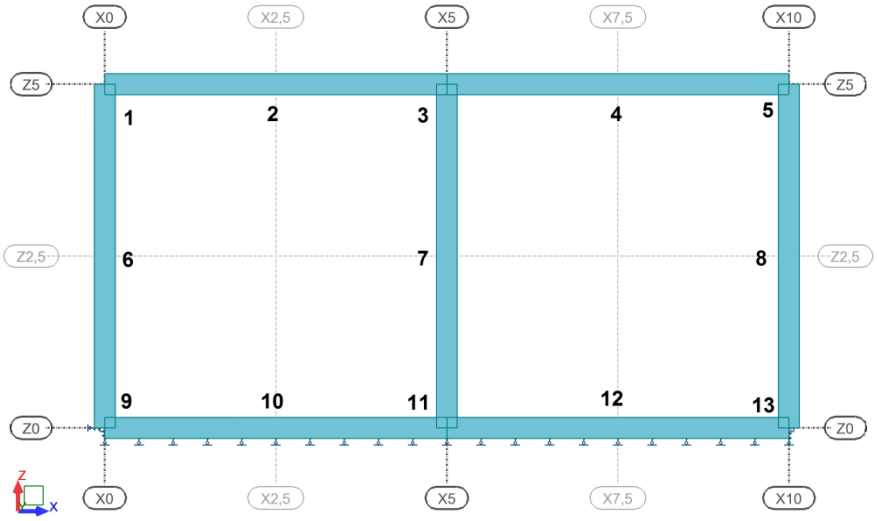

Figura 6.5 – Localização dos nós

No quadro seguinte é apresentada a envolvente de armaduras para os nós em questão.

Quadro 6.2 – Quadro resumo de armaduras

Nó	A_{sx}^{Sup} cm²/m	A_{sy}^{Sup} cm²/m	A_{sx}^{Inf} cm²/m	A_{sy}^{Inf} cm²/m
1	4.30	4.30	19.93	33.97
2	4.30	4.30	20.69	19.92
3	4.30	4.30	17.23	19.17
4	4.30	26.68	21.22	27.19
5	4.30	4.30	18.55	19.74
6	18.26	29.07	4.30	4.30
7	4.30	4.30	18.48	4.30
8	4.30	4.30	14.18	15.89
9	4.30	15.21	4.30	15.26
10	4.30	4.30	4.30	4.30
11	4.30	4.30	4.30	4.30
12	4.30	29.51	4.30	29.01
13	14.28	4.30	4.30	4.30

Salienta-se que no caso das paredes, a armadura superior é do lado de dentro dos túneis. Esta alteração deve-se aos eixos considerados no programa para as paredes.

Como nota final importa referir que foi consultada a bibliografia [38], [39] e [40], para o desenvolvimento das expressões apresentadas segundo a metodologia do anexo F [1].

7
CONCLUSÕES

7.1. CONCLUSÕES

A presente dissertação está orientada no sentido de compreender o funcionamento de programas de cálculo automático, através da análise comparativa de modelos de cálculo automático no âmbito do projeto de estruturas.

De um modo sucinto, apresenta-se as conclusões deste trabalho:

- A comparação entre modelos de elementos finitos (ROBOT e SAP2000) permitiu identificar que de um modo geral a diferença de resultados é pequena. Quando temos a ação térmica identificou-se algumas diferenças significativas. Tal poderá dever-se ao facto de os programas terem formulações diferentes para a ação térmica diferencial. No SAP2000, a temperatura é introduzida em ºC/m, sendo a ação degradada ao longo da espessura do elemento. No ROBOT, a ação é introduzia em ºC.

- Comparando o método de elementos de grelha com o método dos elementos finitos, pode-se concluir que para as cargas convencionais a diferença de resultados é ligeira. No caso de ter-se ações térmicas, foram registadas diferenças significativas. Tal poderá dever-se ao facto de não ser considerada corretamente a deformação transversal das barras neste modelo, logo torna-o mais deformável, sobretudo nas paredes, originando assim deslocamentos maiores nas zonas mais solicitadas.

- No caso do depósito circular simplesmente apoiado, registaram-se diferenças entre o modelo de elementos de grelha e o modelo de elementos finitos junto do bordo livre. O facto de não ser considerada, no modelo de elementos de grelha, corretamente a deformação transversal das barras, implica uma maior deformabilidade nas paredes e como tal junto às zonas mais solicitadas tem-se maiores deslocamentos. Assim sendo é natural que o modelo de grelha apresente maiores deslocamentos junto ao fundo do tanque, influenciando deste modo os deslocamentos no topo (são menores), ou seja, junto ao bordo livre.

  No entanto, entre os dois modelos, no que respeita aos esforços máximos, as diferenças não são significativas.

- Relativamente à comparação entre o programa ROBOT e CypeCad, para o caso exposto, foram detectadas diferenças significativas de esforços nas uniões entre paredes. Perante esta diferença significativa, simulou-se no programa SAP2000 o mesmo caso e chegou-se a resultados semelhantes aos obtidos no programa ROBOT.

  Como o programa CypeCad é bastante "fechado", não foi possível descobrir o porquê desta diferença. No entanto, no manual do CypeCad vem referido que o efeito de diafragma rígido desliga-se automaticamente nos muros que não estejam em contacto com nenhuma laje. Contudo não faz nenhuma referência se existir intersecção de muros. Assim sendo, é desaconselhado o uso deste programa (versão 2013) para este tipo de modelação estrutural.

Aproveitou-se ainda na presente dissertação para expor a metodologia preconizada no anexo F da norma europeia EN1992-1-1 [1]. Dimensionou-se segundo esta metodologia um dos casos estudados (túneis de compostagem) e comparou-se com o método tradicional. Efetuou-se ainda uma verificação ao estado limite de abertura de fendas, condição fundamental neste tipo de estruturas.

Concluiu-se que a metodologia do anexo F apresenta soluções finais cerca de 5% mais baixas.

Pretende-se que os casos de estudo da presente dissertação possam ainda servir como documento de apoio, nomeadamente em estruturas para túneis de compostagem, depósitos circulares e rectangulares.

Como conclusão final pode-se referir que este tipo de comparações são muito importantes para um Engenheiro Projetista. Estas vão permitir o conhecimento do funcionamento dos programas de cálculo automático, "ganhando" deste modo a "confiança" necessária e reduzindo-se deste modo o risco de erro.

7.2. SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No desenvolvimento da presente dissertação não foram avaliados alguns aspectos que poderão ter interesse em estudar:

- Analisar a influência da análise não linear estática e dinâmica (pushover e time history) numa modelação com recurso a elementos de grelha, comparando-a com o comportamento de uma modelação com elementos finitos;
- Analisar a influência da análise não linear material nos túneis de compostagem;
- Analisar a influência, na durabilidade, devido à temperatura alta, com vários ciclos, nos túneis de compostagem;
- Avaliar o efeito da temperatura alta na fluência do betão;
- Avaliar a possibilidade de aplicar em relação ao estado limite de utilização o método do anexo F da norma europeia NP EN 1992-1-1 [1].

BIBLIOGRAFIA

[1] NP EN 1992-1-1, ”Eurocódigo 2 - Projecto de Estruturas de Betão; Parte 1-1:Regras gerais para edifícios", Norma Europeia, Comité Europeu de Normalização, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, Março, 2010;

[2] “Vocabulário da Teoria das Estruturas”, LNEC, Norma Portuguesa NP-761, 1969;

[3] Castro, L. M. S.; Leitão, V. M. A., “Apontamentos Sobre Análise de Lajes”. Apontamentos da disciplina Análise de Estruturas I do Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013;

[4] R. Bares, “Tablas para el cálculo de placas y vigas pared”, Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 1981;

[5] Castro, L. M. S., "Elementos Finitos Para a Análise Elástica de Lajes", Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Fevereiro 2001;

[6] Azevedo, A, F. M., "Método dos Elementos Finitos", FEUP, Porto, Abril 2003;

[7] Zienkiewicz, O.C., The Finite Element Method, McGraw-Hill, New York, 1971;

[8] Castro, L. M. S., "Analise de Lajes com Método das Diferenças Finitas", Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Dezembro 2001;

[9] Castro, L. M. S., "Modelação de Lajes com Elementos de Grelha", Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2002;

[10] Azevedo, A, F. M., “Análise Não Linear de Estruturas Planas de Betão Armado”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1985;

[11] Silva, V. E. M.; “Desenvolvimento de Ferramentas Numéricas para a Análise Dinâmica não Linear de Estruturas”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009;

[12] Garcia, I.L.J., “Projecto de Estruturas de Betão Armado com Base na Análise Não Linear Material, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Março 2009;

[13] Araújo, V. B. F., “Modelos de Segurança na Análise não Linear de Estruturas de Betão Armado”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Junho 2010;

[14] Dória, L. E. S., “Projecto em Estrutura de Fundação em Concreto do Tipo Radier”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, 2007;

[15] Hennrichs, C.A., “Estudos sobre a Modelagem de Lajes Planas de Concreto Armado”, Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianóplis, Brasil, 2003 ;

[16] Carvalho, R. C., “Análise Não-linear de Pavimentos de Edifícios de Concreto através da Analogia de Grelha”, Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 1994;

[17] Deaton, J. B., “A Finite Element Approach to Reinforced Concret Slab Design”, Master Thesis , School of Civil and Environmental Engineering,Georgia Institute of Technology, Georgia, August 2005;

[18] Orlando, J. B. P, “ Análise de Estruturas II- Introdução ao Método dos Elementos Finitos na Análise de Problemas de Planos de Elasticidade”, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2005;

[19] NP EN 1998-1,"Eurocódigo 8 - Projecto de Estruturas para Resistência aos Sismos; Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios", Norma Europeia, Comité Europeu de Normalização, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, Março, 2010;

[20] "Autodesk Robot Structural Analysis - Metric Getting Started Guide", Autodesk, Inc, USA, 2010;

[21] "Autodesk® Robot™ Structural Analysis Professional 2010 Training Manual - Metric Version" Autodesk, Inc, USA, November 2009;

[22] Wilson, Edward L., "Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures - A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering", Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, Third Edition, January 2002.

[23] "CSI Analysis Reference Manual: For SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge™", Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, May 2011;

[24] " CSI Getting Started With SAP2000® - Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures", Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, February 2011;

[25] "Memória de Cálculo Cypecad", CYPE Ingenieros, S.A, Top-Informática, Lda, Braga, Março 2013

[26] "Memória de Cálculo Novo Metal 3D", CYPE Ingenieros, S.A, Top-Informática, Lda, Braga, Março 2013

[27] Monteiro, N. M. A.; " Dimensionamento de Fundações Superficiais de Acordo com os Eurocódigos 2 e 7 – Aplicação a Casos de Estudo Reais", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009;

[28] Fernandes, M. M.; "Mecânica dos Solos, II Volume"; FEUP, Porto, 2006;

[29] NP EN 1990, "Eurocódigo – Bases Para o Projecto de Estruturas", Norma Europeia, Comité Europeu de Normalização, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, Dezembro, 2009.

[30] NP EN 206-1, "Betão – Parte 1: Especificação, Desempenho, Produção e Conformidade", Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, 2007;

[31] NP ENV 13670-1, "Execução de Estruturas em Betão – Parte 1: Regras gerais", Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, 2007;

[32] "RSAEEP, Regulamento de Segurança e Acções Para Estruturas de Edifícios e Pontes", Decreto-Lei nº35/83 de 31 de Maio, 1983;

[33] NP EN 1991-1-1,"Eurocódigo 1 – Acções em Estruturas; Parte 1-1:Acções gerais; Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios", Norma Europeia, Comité Europeu de Normalização, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, Dezembro, 2009.

[34] NP EN 1991-1-5, "Eurocódigo 1 – Acções em Estruturas; Parte 1-5:Acções gerais; Acções térmicas", Norma Europeia, Comité Europeu de Normalização, Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, Dezembro, 2009;

[35] "CEB – Comité Euro-International du Beton. Bulletin d'information Nº 213/214 - CEB-FIP Model Code 1990", London: Thomas Telford, 1993;

[36] Lima, J.D; Monteiro, V.; Mun, M., "Betão Armado – Esforços Normais e Flexão", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1999.

[37] Figueiras, J. A., "Estruturas de Betão 2 – Verificação aos Estados Limites de Utilização", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2002;

[38] Pereira, F. A. C., "Dimensionamento de Estruturas de Betão Sujeitas a Esforços de Membrana Associados com Esforços de Flexão de Acordo com o Eurocódigo 2", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Junho 2010;

[39] Alves, J. A. M., "Determinação de Armaduras em Elementos Laminares (paredes) Carregadas no seu Próprio Plano", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Fevereiro 2008;

[40] Viana, J. T.A., "Determinação de Armaduras em Lajes Analisadas pelo MEF e Submetidas a Campos de Momentos com Torsores Importantes" Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Julho 2008;

ENDEREÇOS MULTIMÉDIA

www.csiportugal.com – Documentação de ao apoio ao utilizador de SAP2000;

www.autodesk.com – Documentação de apoio utilizador do Autodesk Robot Structural Analysis;

www.cype.pt/ – Documentação de apoio ao utilizador do CypeCad e Novo Metal 3D;

www.google.com – Motor de pesquisa onde é possível encontrar diversa documentação;

repositorio.up.pt/ – Documentação sobre outras dissertações de mestrado.

SOFTWARE USADO NA ELABORAÇÃO DO TRABALHO

Microsoft Excel 2010 - Tratamento de dados e folha de cálculo;

Microsoft Word 2010 - Redação do relatório;

Autodesk Robot Structural Analysis, v2013;

SAP2000, v15;

CypeCad, v2013 (versão after hours);

Novo Metal 3D, v2013 (versão after hours).