

PROJECTO DA ESTRUTURA DE SUPORTE DAS ESCAVAÇÕES PARA A CONSTRUÇÃO DE UMA VIA RÁPIDA EM MEIO URBANO

BRUNO DANIEL PINTO CORREIA

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Manuel de Matos Fernandes

OUTUBRO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

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 - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha Família
e à Sónia

A curiosidade é mais importante do que o conhecimento
Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Deseja o autor expressar os seus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e entidades que contribuíram para a elaboração deste trabalho, em especial:

- Ao Professor Manuel Matos Fernandes, orientador deste projecto, pelo apoio, disponibilidade e constante preocupação que sempre demonstrou ao longo do desenvolvimento deste trabalho;
- Às Estradas de Portugal pela autorização para o uso dos elementos de projecto do Sublanço Buraca – Pontinha da CRIL;
- À Sónia que sempre motivou e apoiou em especial nas alturas mais difíceis;
- A todos os colegas e amigos de Geotecnia que sempre estiveram presentes nos momentos de maiores interrogações e sempre responderam com muita amizade e companheirismo;
- A todos aqueles que, directa ou indirectamente, apoiaram e tornaram possível a realização deste trabalho.

RESUMO

No presente projecto pretende-se estudar o comportamento da estrutura de suporte às escavações para a construção de uma via rápida em meio urbano. Trata-se da construção de uma via rápida, com perfil de auto-estrada, numa zona densamente habitada. A via será construída em vala, mas coberta em fase definitiva com uma laje de betão armado, de modo a minimizar os impactes à superfície.

As escavações estudadas são suportadas por cortinas de estacas de betão armado monoapoiadas, escoradas pela laje de cobertura constituindo um falso túnel, sendo o faseamento construtivo do tipo “top-down”. As escavações ultrapassam os 12 m de profundidade e situam-se nas proximidades de edifícios. Os solos são da era terciária, com elevada resistência.

Os esforços nas cortinas são, numa fase inicial, calculados por equilíbrio limite segundo o método “free earth support” recorrendo a um programa de cálculo elaborado para o efeito. Pretende-se comparar os resultados obtidos segundo diferentes formas de considerar a segurança e avaliar o contributo da elevada coesão efectiva dos solos.

São feitas várias análises por elementos finitos em que se pretende estudar a influência que algumas opções estruturais, como o tipo da ligação da laje de cobertura à cortina de estacas, têm nos esforços para dimensionamento, nos assentamentos à superfície do terreno e nos deslocamentos das estruturas. É estudado o efeito que a não simetria das secções tem na distribuição dos esforços na estrutura, e é analisada a importância que as opções estruturais têm nestas circunstâncias.

Pretende-se também avaliar os erros cometidos ao admitir simplificações na forma como são modelados os edifícios, e o efeito da consideração ou não consideração da percolação nas escavações em que o nível freático está acima da base de escavação.

Por último é feito o dimensionamento de todos os elementos estruturais que constituem a estrutura de suporte de uma secção de escavação, sendo o pré-dimensionamento efectuado com base nos esforços calculados por equilíbrio limite e os esforços de cálculo para o dimensionamento obtidos recorrendo a análises por elementos finitos. As opções estruturais tomadas no dimensionamento são baseadas nos estudos efectuados.

PALAVRAS-CHAVE: escavação urbana, túnel cut-and-cover, coesão efectiva, equilíbrio limite, elementos finitos.

ABSTRACT

The aim of this project is to study earth support structure for the construction of an expressway in an urban environment. The road will be ditch constructed and covered in the definitive phase by a concrete slab.

The earth retaining structure is a pile wall supported at the top by the concrete slab constructed by the top-down method. The excavation's depths exceed 12 meters and are made near buildings. The soils are from the tertiary age and have high resistance properties.

Structure's forces are initially calculated by the limit equilibrium method Free Earth Support with a program made to that propose. The calculations are made according to several approaches to the introduction of safety witch results are compared. It is also intended to check the influence of the surrounding buildings and the effective cohesion contribute to resultant forces on the structure.

Several finite elements analysis are made with the automatic calculation program PLAXIS to study the impact that some structural choices, like the type of slab-wall connection, have on structure forces and in terrain surface and structure displacements. The effect of the sections asymmetry on the structure forces is studied and combined with several structural options.

It is also intended to inquire the error inducted by some simplifications taken, concerning the buildings simulation and the effect of the consideration (or not) of the percolation in excavations where the ground water level is above the excavation's base.

Finally, all structural elements that constitute the earth retaining structure are designed. The pre-design is based on forces calculated with the limit equilibrium method and the design forces are obtained by finite elements analysis.

KEYWORDS: urban excavation, cut-and-cover tunnel, effective cohesion, limit equilibrium, finite elements.

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

ÍNDICE GERAL

1.Introdução.....	1
2.Dados de Projecto.....	5
2.1. DESCRIÇÃO DA OBRA.....	5
2.1.1. INTRODUÇÃO	5
2.1.2. ANTECEDENTES	7
2.1.3. PROJECTO ACTUAL	7
2.2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS.....	9
2.3. PROSPECÇÃO, ENSAIOS <i>IN SITU</i> E ENSAIOS LABORATORIAIS	10
2.4. TÚNEL DE BENFICA	12
2.4.1. GERAL	12
2.4.2. CONDICIONAMENTOS	13
2.4.3. ZONAMENTO GEOTÉCNICO	14
2.4.4. TIPOLOGIAS ESTRUTURAIS	15
2.4.5. FASEAMENTO CONSTRUTIVO	15
3.Programa de Cálculo de Cortinas Monoapoiadas	17
3.1. INTRODUÇÃO	17
3.2. INTRODUÇÃO DA SEGURANÇA	18
3.3. ESTADOS DE EQUILÍBRIO LIMITE.....	19
3.3.1. COEFICIENTES DE IMPULSO	19
3.3.2. IMPULSOS DE TERRAS.....	22
3.3.3. IMPULSOS DEVIDOS À ÁGUA	23
3.3.4. IMPULSOS EM MACIÇOS COESIVOS. TEOREMA DOS ESTADOS CORRESPONDENTES.	24
3.3.5. SOBRECARGAS	25

3.4. INTERFACE DO PROGRAMA	28
3.4.1. INTRODUÇÃO DE DADOS	28
3.4.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	29
3.5. REQUISITOS PARA O USO DO PROGRAMA.....	30
3.6. DESCRIÇÃO DAS SUBROTINAS PRINCIPAIS	30
3.7. EXEMPLO DE APLICAÇÃO. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	32
3.7.1. CONSIDERAÇÕES	32
3.7.2. INSERÇÃO DOS DADOS DA SECÇÃO.....	33
3.7.3. RESULTADOS	34
 4. Cálculos pelo método de equilíbrio limite. Pré-dimensionamento.....	 39
4.1. INTRODUÇÃO	39
4.2. BASES DE CÁLCULO	39
4.2.1. CÁLCULO DE CORTINAS MONOAPOIADAS.....	39
4.2.2. CONSIDERAÇÃO DA SEGURANÇA.....	40
4.2.3. DEFINIÇÃO DAS SECÇÕES DE REFERÊNCIA.....	40
4.2.4. PARÂMETROS DE CÁLCULO	43
4.2.5. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	43
4.3. CÁLCULO DAS SECÇÕES DE REFERÊNCIA. RESULTADOS.....	44
4.3.1. CÁLCULOS DESPREZANDO A COESÃO	44
4.3.2. CÁLCULOS CONSIDERANDO A COESÃO	48
4.3.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA COESÃO NAS SECÇÕES DE REFERÊNCIA.....	51
4.3.4. INFLUÊNCIA DAS SOBRECARGAS DOS EDIFÍCIOS	53
4.4. ANÁLISE PARAMÉTRICA DA INFLUÊNCIA DA COESÃO	54
4.4.1. INTRODUÇÃO	54
4.4.2. RESULTADOS	56
4.5. PRÉ-DIMENSIONAMENTO	58
4.5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	58
4.5.2. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA LAJE.....	58
4.5.3. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS CORTINAS DE ESTACAS	59
4.5.4. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO ALINHAMENTO DE PILARES-ESTACA CENTRAIS.....	62
4.6. CONCLUSÕES	63

5. Análise das Soluções Estruturais Recorrendo ao Método de Elementos Finitos	65
5.1. INTRODUÇÃO	65
5.2. BASES DE CÁLCULO	65
5.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	65
5.2.2. ANÁLISE 1.2-2	66
5.2.3. ANÁLISE 1.2-1	67
5.2.4. PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS	68
5.3. COMPARAÇÃO COM O MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE	69
5.3.1. INTRODUÇÃO	69
5.3.2. RESULTADOS.....	70
5.3.2.1. Análises desprezando a coesão	70
5.3.2.2. Análises considerando o contributo da coesão	72
5.4. AVALIAÇÃO DO ERRO COMETIDO AO ADMITIR QUE NÃO OCORRE PERCOLAÇÃO	74
5.4.1. INTRODUÇÃO	74
5.4.2. RESULTADOS.....	75
5.5. INFLUÊNCIA DA LIGAÇÃO LAJE-CORTINA	80
5.5.1. INTRODUÇÃO	80
5.5.2. RESULTADOS.....	81
5.6. INFLUÊNCIA DAS ASSIMETRIAS DEVIDAS AO DECLIVE DO TERRENO	84
5.6.1. INTRODUÇÃO	84
5.6.2. RESULTADOS.....	85
5.7. INFLUÊNCIA DA FORMA COMO OS EDIFÍCIOS SÃO CONSIDERADOS	90
5.7.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	90
5.7.2. DESCRIÇÃO DAS ANÁLISE EFECTUADAS	90
5.7.3. RESULTADOS.....	92
5.8. CONCLUSÕES.....	95
 6. Dimensionamento	 97
6.1. INTRODUÇÃO	97
6.2. ENVOLVENTE DE ESFORÇOS.....	98
6.2.1. COMBINAÇÕES.....	98
6.2.2. DIAGRAMA DE ESFORÇOS	99

6.3. LAJE DE COBERTURA	102
6.4. CORTINA DE ESTACAS	106
6.5. ALINHAMENTO DE PILARES-ESTACA CENTRAL	109
6.6. VIGAS DE COROAMENTO.....	110
6.6.1. VIGAS DE COROAMENTO DAS CORTINAS DE ESTACAS.....	110
6.6.2. VIGA DE COROAMENTO DO ALINHAMENTO DE PILARES-ESTACA CENTRAL.....	111
6.7. VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITE DE UTILIZAÇÃO	112
6.8. ALTERNATIVAS À SOLUÇÃO APRESENTADA	114
 7. Conclusões	 115
 BIBLIOGRAFIA	 117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esboço do aspecto final da obra numa zona semi-coberta.....	2
Figura 2.1 – Circular Regional Interior de Lisboa – CRIL/IC17 – na Área Metropolitana de Lisboa	6
Figura 2.2 – Esboço coreográfico da obra (Coba, 2006a).....	8
Figura 2.3 – Enquadramento da obra na carta geológica de Portugal (http://e-geo.ineti.pt).....	9
Figura 2.4 – Corte geológico-geotécnico pelo eixo do túnel entre o ;,km 1+425 e o ;,km 1+500	10
Figura 2.5 – Secção típica do Túnel de Benfica	12
Figura 2.6 – Secção típica nas zonas semi-cobertas entre os túneis que constituem o Túnel de Benfica.....	13
Figura 2.7 – Esquematização do faseamento construtivo	16
Figura 3.1 – Aproximações adoptadas para os coeficientes de impulso activo	20
Figura 3.2 – Aproximações adoptadas para os coeficientes de impulso passivo	21
Figura 3.3 – Esquematização das divisões introduzidas nos horizontes e dos impulsos	23
Figura 3.4 – Simplificação para considerar a coesão efectiva dos solos segundo o teorema dos estados correspondentes	24
Figura 3.5 – Pressões de terras resultantes segundo o teorema dos estados correspondentes	24
Figura 3.6 – Carga linear.....	26
Figura 3.7 – Carga distribuída sobre uma faixa de terreno de desenvolvimento infinito.....	27
Figura 3.8 – Folha de introdução de dados (Folha “Dados”)	28
Figura 3.9 – Folha para definição de cargas lineares e cargas distribuídas por uma faixa de terreno.....	28
Figura 3.10 – Folha de apresentação dos resultados detalhados	29
Figura 3.11 – Folha de resumo dos resultados.....	30
Figura 3.12 – Esquema da secção.....	32
Figura 3.13 – Introdução dos dados geométricos e das propriedades dos horizontes	33
Figura 3.14 – Introdução dos dados relativos ao carregamento.....	34
Figura 3.15 – Introdução dos dados relativos à carga distribuída por uma faixa de terreno.....	34
Figura 3.16 – Resultados detalhados obtidos pelo programa de cálculo	35
Figura 3.17 – Diagramas pressões calculados manualmente	36
Figura 3.18 – Impulsos actuantes sobre a cortina	36
Figura 4.1 – Secção 1A (km 0+678) – do km 0+650 ao 0+694.....	41
Figura 4.2 – Secção 1C (km 0+878) – do km 0+850 ao km 0+925	41
Figura 4.3 – Secção 1D (km 0+975) – do km 0+925 ao km 1+000	41
Figura 4.4 – Secção 2A (km 1+170) – do km 1+100 ao km 1+190	41

Figura 4.5 – Secção 2B1 (km 1+250) – do km 1+190 ao km 1+280.....	41
Figura 4.6 – Secção 2B2 (km 1+350) – do km 1+280 ao km 1+360.....	41
Figura 4.7 – Secção 2B3 (km 1+387) – do km 1+360 ao km 1+425.....	42
Figura 4.8 – Secção 2B4 (km 1+450) – do km 1+425 ao km 1+500.....	42
Figura 4.9 – Secção 2C (km 1+528) – do km 1+500 ao km 1+550	42
Figura 4.10 – Secção 4.1 (km 1+928) – do km 1+900 ao km 1+990 e do km 2+030 ao km 2+096.....	42
Figura 4.11 – Secção 4.2 (km 2+000) – do km 1+990 ao km 2+030	42
Figura 4.12 – Altura enterrada calculada para as secções de referência, desprezando a coesão, pelos cinco métodos de considerar a segurança.....	44
Figura 4.13 – Momento flector máximo calculado para as secções de referência, desprezando a coesão, pelos cinco métodos de considerar a segurança.	45
Figura 4.14 – Profundidade do momento flector máximo calculada para as secções de referência, desprezando a coesão, pelos cinco métodos de considerar a segurança.	46
Figura 4.15 – Força na escora calculada para as secções de referência, desprezando a coesão, pelos cinco métodos de considerar a segurança.....	47
Figura 4.16 – Altura enterrada calculada para as secções de referência, pelos cinco métodos de considerar a segurança.	48
Figura 4.17 – Momento flector máximo calculado para as secções de referência, pelos cinco métodos de considerar a segurança.....	49
Figura 4.18 – Profundidade do momento flector máximo calculada para as secções de referência, pelos cinco métodos de considerar a segurança.	50
Figura 4.19 – Força na escora calculada para as secções de referência, pelos cinco métodos de considerar a segurança.	51
Figura 4.20 – Redução da altura enterrada devido à consideração da coesão (Abordagem de Cálculo 1 do EC7).....	52
Figura 4.21 – Redução do momento flector máximo na cortina devido à consideração da coesão (Abordagem de Cálculo 1 do EC7).....	53
Figura 4.22 – Aumentos da altura enterrada devido à influência dos edifícios (Abordagem de Cálculo 1 do EC7).....	53
Figura 4.23 – Aumento do momento flector máximo devido à influência dos edifícios (Abordagem de Cálculo 1 do EC7).....	54
Figura 4.24 – Escavação genérica utilizada na análise paramétrica da influência da coesão	55
Figura 4.25 – Variação da altura enterrada para vários valores da coesão efectiva $c'/(γ.h)$ – EC7 - 1.156	
Figura 4.26 – Variação da altura enterrada para vários valores da coesão efectiva $c'/(γ.h)$ – EC7 - 1.256	
Figura 4.27 – Variação do momento máximo para vários valores da coesão efectiva $c'/(γ.h)$ – EC7 - 1.1	57
Figura 4.28 – Variação do momento máximo para vários valores da coesão efectiva $c'/(γ.h)$ – EC7 - 1.2	57

Figura 4.29 – Modelo estrutural da laje de cobertura (para uma secção com vãos de 17,7 m)	58
Figura 4.30 - Momentos flectores na laje admitindo a laje encastrada nas extremidades (Zona 1)	61
Figura 4.31 – Momentos flectores na laje admitindo a laje encastrada nas extremidades (Zonas 2A, 2C e 4).....	61
Figura 5.1 – Malha de elementos finitos utilizada nas análises para comparar com o método de equilíbrio limite (elementos triangulares de 15 nós).....	69
Figura 5.2 – Tensões horizontais efectivas na interface com a cortina calculadas pelo método de equilíbrio limite e pelo método de elementos finitos, desprezando a coesão: a) segundo a Abordagem 1.1 do EC7; b) segundo a Abordagem 1.2 do EC7.....	70
Figura 5.3 – Diagramas de momentos flectores (kN.m/m) e de esforços transversos (kN/m) obtidos pelos métodos de equilíbrio limite e pelo método de elementos finitos, desprezando a coesão: a) segundo a Abordagem 1.1 do EC7; b) segundo a Abordagem 1.2 do EC7	71
Figura 5.4 – Momentos flectores máximos obtidos pelos diferentes métodos, desprezando a coesão.....	72
Figura 5.5 – Impulsos sobre a cortina (kN/m^2) calculado pelos métodos de equilíbrio limite e pelo método de elementos finitos: a) segundo a abordagem 1.1 do EC7; b) segundo a abordagem 1.2 do EC7.....	72
Figura 5.6 – Diagramas de momentos flectores (kN.m/m) e esforços transversos (kN/m) obtidos pelos métodos de equilíbrio limite e pelo método de elementos finitos: a) Abordagem 1.1 do EC7; b) Abordagem 1.2 do EC7	73
Figura 5.7 – Momentos flectores máximos obtidos pelos diferentes métodos	74
Figura 5.8 – Pressões sobre a cortina em nas modelações AP e AH segundo a Análise 1.2-1: a) pressões da água; b) pressões de terras; c) pressões totais	76
Figura 5.9 – Pressões sobre a cortina em nas modelações AP e AH segundo a Análise 1.2-2: a) pressões da água; b) pressões de terras; c) pressões totais	77
Figura 5.10 – Pressões sobre a cortina em nas modelações CP e CH segundo a Análise 1.2-1: a) pressões da água; b) pressões de terras; c) pressões totais	78
Figura 5.11 – Pressões sobre a cortina em nas modelações CP e CH segundo a Análise 1.2-1: a) pressões da água; b) pressões de terras; c) pressões totais	79
Figura 5.12 – Malha de elementos finitos utilizada na modelação admitindo a secção simétrica (elementos triangulares de 15 nós).....	80
Figura 5.13 – Diagrama de momentos flectores (kN.m/m) na cortina com ligação à laje rígida e articulada.	81
Figura 5.14 – Tensões horizontais efectivas na cortina (kPa) com ligação à laje rígida (SR) e articulada (SA): a) Análise 1.2-1; b) Análise 1.2-2	82
Figura 5.15 – Momentos flectores (kN.m/m) na laje de cobertura com ligação à cortina rígida e articulada.	82
Figura 5.16 – Deslocamentos horizontais da cortina de estacas no final da escavação	83
Figura 5.17 – Assentamentos verticais previstos à superfície do terreno no final da escavação	83

Figura 5.18 - Malha de elementos finitos utilizada na modelação admitindo a secção real, com o declive do terreno (elementos triangulares de 15 nós)	85
Figura 5.19 – Momentos flectores na cortina esquerda (kN.m/m): a) Análise 1.2-1; b) Análise 1.2-2 .	85
Figura 5.20 – Momentos flectores na cortina direita (kN.m/m): a) Análise 1.2-1; b) Análise 1.2-2.....	86
Figura 5.21 – Momentos flectores na laje de cobertura (kN.m/m): a) Análise 1.2-1; b) Análise 1.2-2 .	87
Figura 5.22 – Deslocamentos horizontais nas cortinas de estacas: a) cortina esquerda; b) cortina direita.	88
Figura 5.23 – Assentamentos à superfície do terreno junto às contenções: a) esquerda; b) direita....	89
Figura 5.24 – Pontos em cedência junto à cortina esquerda para a análise R1p com os valores característicos das propriedades dos solos e das sobrecargas.	89
Figura 5.25 – Formas estudadas para considerar os edifícios: EDF - carga distribuída a toda a largura do edifício; EDR - carga distribuída a toda a largura do edifício aplicada sobre um elemento rígido; EFF - cargas distribuídas aplicadas em faixas reduzidas; EFR - cargas distribuídas aplicadas em faixas reduzidas ligadas rigidamente	91
Figura 5.26 – Malha de elementos finitos utilizada nas modelações para avaliar a influência da forma como são considerados os edifícios (elementos triangulares de 15 nós).....	92
Figura 5.27 – Tensões efectivas horizontais (kPa) para as várias formas de considerar o edifício calculadas com os valores característicos das propriedades dos solos e sobrecargas	92
Figura 5.28 – Assentamentos à superfície do terreno nas diferentes formas de considerar o edifício	93
Figura 5.29 – Deslocamentos horizontais à superfície para as diferentes formas de considerar o edifício	94
Figura 5.30 – Relação dos danos em edifícios com a distorção angular e extensão horizontal (Boscardin and Cording, 1989).....	95
Figura 6.1 – Secção 2A ao km 1+170	97
Figura 6.2 – Malha de elementos finitos para o cálculo da secção 2A (elementos triangulares de 15 nós).....	98
Figura 6.3 – Diagramas de momentos flectores na laje de cobertura (kN.m/m).....	99
Figura 6.4 – Diagramas de esforços transversos na laje de cobertura (kN/m).....	99
Figura 6.5 – Diagramas de momentos flectores na cortina esquerda (kN.m/m)	100
Figura 6.6 – Diagramas de esforços transversos na cortina esquerda (kN/m).....	100
Figura 6.7 – Diagramas de momentos flectores na cortina direita (kN.m/m).....	101
Figura 6.8 – Diagramas de esforços transversos na cortina direita (kN/m)	101
Figura 6.9 – Determinação dos locais de dispensa de armadura na laje	103
Figura 6.10 – Zonas em que é necessária armadura de esforço transverso na laje de cobertura.....	105
Figura 6.11 - Determinação dos locais de dispensa de armadura nas cortinas de estacas: a) cortina esquerda; b) cortina direita.	107
Figura 6.12 – Secção rectangular equivalente	108

Figura 6.13 – Zonas em que se considerou a armadura transversal mínima nas cortinas de estacas	109
Figura 6.14 – Esquema do espaçamento das estacas	110
Figura 6.15 – Diagrama de momentos flectores (kN.m/m) em serviço na laje de cobertura.....	112

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Relação dos trabalhos de prospecção geotécnica e ensaios realizados nas várias campanhas (Coba, 2006a).....	11
Quadro 2.2 – Principais características de cada zona geotécnica considerada	14
Quadro 2.3 – Parâmetros geotécnicos de cada zona considerada	14
Quadro 3.1 – Coeficientes de segurança preconizados nos diferentes métodos	19
Quadro 3.2 – Subrotinas principais do programa de cálculo	31
Quadro 3.3 – Propriedades dos solos que constituem os horizontes considerados para a secção fictícia	32
Quadro 3.4 – Cálculo do somatório de impulsos e momentos flectores	37
Quadro 4.1 – Parâmetros geotécnicos considerados nos cálculos por equilíbrio limite.....	43
Quadro 4.2 – Pré-dimensionamento da laje de cobertura	59
Quadro 4.3 – Afastamentos e diâmetros mínimos para garantir um momento reduzido de 0,15	60
Quadro 4.4 – Altura enterrada mínima calculada por equilíbrio limite segundo a Abordagem de Cálculo 1, desprezando e considerando a coesão dos solos.....	62
Quadro 4.5 – Cálculo da altura enterrada mínima dos alinhamentos de pilares centrais	62
Quadro 5.1 – Valores característicos dos parâmetros geotécnicos dos materiais considerados nas modelações	66
Quadro 5.2 – Valores de cálculo dos parâmetros geotécnicos dos materiais, considerados nas Análises 1.2-2.....	66
Quadro 5.3 – Valores de cálculo dos parâmetros geotécnicos dos materiais, considerados nas Análises 1.2-1a.....	67
Quadro 5.4 – Propriedades das cortinas de estacas consideradas nos estudos efectuados	68
Quadro 5.5 – Propriedades dos alinhamentos de pilares centrais considerados nos estudos efectuados.....	68
Quadro 5.6 – Propriedades das lajes considerados nos estudos efectuados.....	68
Quadro 5.7 – Propriedades das vigas de contraventamento considerados nos estudos das zonas semi-cobertas	68
Quadro 5.8 – Análises para avaliar o erro cometido ao admitir que não ocorre percolação.....	75
Quadro 5.9 – Designação e características das modelações para avaliar a influência da ligação laje-cortina.....	80
Quadro 5.10 – Designação e características das análises efectuadas para avaliar a influência do declive do terreno	84
Quadro 5.11 – Designação das modelações efectuadas para avaliar a influência da forma como os edifícios são considerados	91
Quadro 5.12 – Extensões e distorções angulares máximas nas modelações EDF e EFF	94

Quadro 6.1 – Combinações de acções consideradas.....	98
Quadro 6.2 – Cálculo da armadura de flexão da laje para os momentos nos apoios (armadura superior).....	102
Quadro 6.3 – Cálculos da armadura de flexão da laje para os momentos nos vãos (armadura inferior).....	102
Quadro 6.4 – Momento flector resistente para as distribuições de armadura consideradas na laje ..	103
Quadro 6.5 – Armadura transversal mínima de retracção na laje de cobertura	104
Quadro 6.6 – Armadura de distribuição na laje	104
Quadro 6.7 – Valor de cálculo do esforço transverso resistente sem armadura para esse fim ($V_{rd,c}$).....	105
Quadro 6.8 – Esforço transverso resistente máximo	105
Quadro 6.9 – Cálculo armadura de esforço transverso na laje de cobertura	105
Quadro 6.10 – Armadura de longitudinal nas cortinas de estacas	106
Quadro 6.11 – Momento flector resistente para a armadura longitudinal considerada nas cortinas de estacas	106
Quadro 6.12 – Armadura transversal nas cortinas de estacas	108
Quadro 6.13 – Esforço transverso resistente considerando o espaçamento máximo entre estribos.	108
Quadro 6.14 – Armadura longitudinal no alinhamento de pilares-estaca central	110
Quadro 6.15 – Armadura longitudinal de torção na viga de coroamento.....	111
Quadro 6.16 – Armadura longitudinal mínima de retracção na viga de coroamento.....	111
Quadro 6.17 – Armadura de flexão na viga de coroamento central	111
Quadro 6.18 – Armadura de esforço transverso na viga de coroamento central	112
Quadro 6.19 – Armadura mínima considerada na viga de coroamento central.....	112
Quadro 6.20 – Cálculo da posição do eixo neutro	113
Quadro 6.21 – Tensão em serviço no betão e na armadura para os momentos máximos nos vãos	113
Quadro 6.22 – Tensão em serviço no betão e na armadura para os momentos máximos nos apoios.....	113
Quadro 6.23 – Cálculo do diâmetro máximo dos varões para controlo de fendilhação	114

1

INTRODUÇÃO

A falta de espaço é um problema que condiciona a execução de qualquer tipo de obra em meio urbano, sendo este problema muitas vezes ultrapassado através da ocupação dos espaços subterrâneos. A execução de obras rodoviárias em meio urbano é, muitas vezes, predominantemente condicionada pelo impacte e restrições impostas pela sua envolvente.

A construção de obras rodoviárias subterrâneas, fruto da proximidade de edificações e da falta de espaço, envolve em geral escavações verticais, suportadas por estruturas de contenção projectadas para esse efeito. Entre as diversas estruturas de contenção salientam-se as cortinas de estacas e as paredes moldadas em betão armado, cuja construção permite realizar as operações de escavação em segurança e servir como estrutura definitiva.

O sublanço Buraca Pontinha da Circular Regional Interna de Lisboa (CRIL-IC17) trata-se de uma via rápida, com perfil de auto-estrada, numa zona densamente habitada.

O projecto para este sublanço é um exemplo das dificuldades inerentes à construção deste tipo de obras em meio urbano. Foi objecto de consideráveis alterações ao longo do tempo, no essencial devido à dificuldade de conciliação com elementos classificados como Monumento Nacional como o Aqueduto das Águas Livres e das Francesas, e às dificuldades de integração do empreendimento em espaços de forte densidade urbanística de diferenciada tipologia urbana e elevada densidade de construção clandestina degradada (Coba, 2003).

O troço em estudo, que tem uma extensão de cerca de 4 km, será construído em vala, coberta em algumas zonas com uma laje de betão armado constituindo assim um falso túnel, de modo a reduzir os impactes à superfície. O traçado projectado assim como as soluções estruturais a adoptar para suportar as escavações são condicionados ao longo de toda a obra pela envolvente.

O presente trabalho incide sobre o projecto da estrutura de suporte das escavações de parte da obra designada de Túnel de Benfica nas zonas em que a solução estrutural para a contenção prevista no estudo prévio consiste em cortinas de estacas monoapoiadas.

O processo construtivo nas zonas estudadas é o “top-down”, em que as escavações só se iniciam após a execução das estacas e da laje de cobertura. As escavações estudadas variam entre os 8 m e os 13 m de profundidade e situam-se em algumas zonas nas proximidades de edifícios. Na Figura 1.1 pode-se ver um esboço do aspecto final da obra numa zona semi-coberta.



Figura 1.1 – Esboço do aspecto final da obra numa zona semi-coberta

Este trabalho foi orientado no sentido de focar a atenção na obtenção dos esforços de dimensionamento.

As análises efectuadas assentam nos elementos de projecto incluídos no estudo prévio (Coba 2006a e 2006b) onde, entre outros, estão definidas as imposições relativas ao traçado e a sua definição, são elaboradas orientações para as soluções a adoptar e está incluído o relatório geológico-geotécnico.

O trabalho está organizado em sete capítulos e três anexos, sendo neste primeiro descritos a motivação, objectivos e estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 faz-se uma descrição da obra onde se aborda o seu enquadramento e a sua importância, define-se a parte da obra que será estudada nos restantes capítulos, referem-se as características geológico-geotécnicas do local da obra e apresentam-se os parâmetros geotécnicos a utilizar nos estudos.

No Capítulo 3 apresenta-se o programa de cálculo de cortinas monoapoiadas pelo método de equilíbrio limite concebido no âmbito deste trabalho, e que foi utilizado nos cálculos apresentados no Capítulo 4. É feita uma descrição dos cálculos que o programa efectua, apresentada a interface e a validação dos resultados através do cálculo de uma secção e comparação com o cálculo manual.

O Capítulo 4 incide sobre as análises efectuadas pelo método de equilíbrio limite tendo como objectivo pré-dimensionar os elementos estruturais. Além do cálculo das secções de referência definidas, são feitos estudos com o fim de avaliar a influência de diversos factores sobre os resultados, com sejam os edifícios, a coesão dos solos e os próprios métodos de considerar a segurança.

No Capítulo 5 são feitas modelações recorrendo ao programa de cálculo por elementos finitos PLAXIS tendo como objectivo a compreensão do funcionamento das estruturas envolvidas e a interacção destas com os solos para uma opção fundamentada das soluções estruturais. Apresenta-se ainda uma comparação com os resultados previamente obtidos pelo método de equilíbrio limite.

No Capítulo 6 é feito o dimensionamento dos elementos estruturais que constituem a estrutura de suporte para uma secção. No dimensionamento foram tomadas as opções estruturais que se consideraram mais convenientes tendo em conta os estudos efectuados nos restantes capítulos. Os desenhos relativos à solução calculada são apresentados no Anexo C

Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas algumas conclusões gerais acerca dos estudos efectuados.

Em relação aos anexos, no Anexo A é apresentado o corte Geológico Geotécnico longitudinal do Túnel de Benfica (Coba 2006b), no Anexo B é apresentado o código do programa de cálculo de cortinas monoapoiadas e no Anexo C apresenta-se a pormenorização da armadura da solução estrutural calculada.

2

DADOS DE PROJECTO

2.1. DESCRIÇÃO DA OBRA

2.1.1. INTRODUÇÃO

O Itinerário Complementar (IC 17), mais conhecido por CRIL (Circular Regional Interior de Lisboa), é uma auto-estrada prevista no Plano Rodoviário Nacional e no Plano de Transportes da Região de Lisboa, estando parcialmente construída.

Desenvolve-se a Norte e no limite da cidade de Lisboa, entre os concelhos de Lisboa e os concelhos de Oeiras, Amadora e Loures. Dará continuidade às travessias rodoviárias do Tejo, a nascente e a poente, ligando diversas radiais que se desenvolvem do centro da cidade para o exterior. A Figura 2.1 mostra o enquadramento da obra na área metropolitana de Lisboa.

Actualmente liga Sacavém à Pontinha (12 km) e a Buraca a Algés (4 km). Quando completa terá 20 km e materializará um anel de circulação rodoviária na região de Lisboa. O início da construção do troço entre a Pontinha e a Buraca, numa extensão aproximada de 4 km, tem sido sucessivamente adiado devido a questões ambientais e a providências cautelares movidas por moradores da zona afectada.

Esta estrutura circular assegura a melhoria da circulação nesta região metropolitana. Assim, a necessidade do empreendimento é justificada por (Coba, 2003):

- assegurar as interligações entre diversas radiais, incluindo as travessias do Tejo e sua ligação à margem sul;
- assegurar a distribuição e canalização do tráfego rodoviário, ligeiro e pesado, que diariamente estabelece relações com a cidade de Lisboa minimizando a travessia das zonas centrais da cidade e assegurando a libertação do tráfego em eixos saturados;
- melhorar a vivência urbana para quem habita e trabalha nas imediações dos grandes eixos de circulação urbanos que actualmente atravessam a cidade;
- permitir que a penetração no tecido urbano seja assegurada a partir do eixo radial que determina a distância mais curta ao local de origem/destino;
- assegurar a diminuição do tráfego e, conseqüentemente, os congestionamentos nas zonas centrais da cidade, melhorando a qualidade de vida urbana e ambiental e as condições sociais, económicas e de vivência e habitabilidade urbanas.

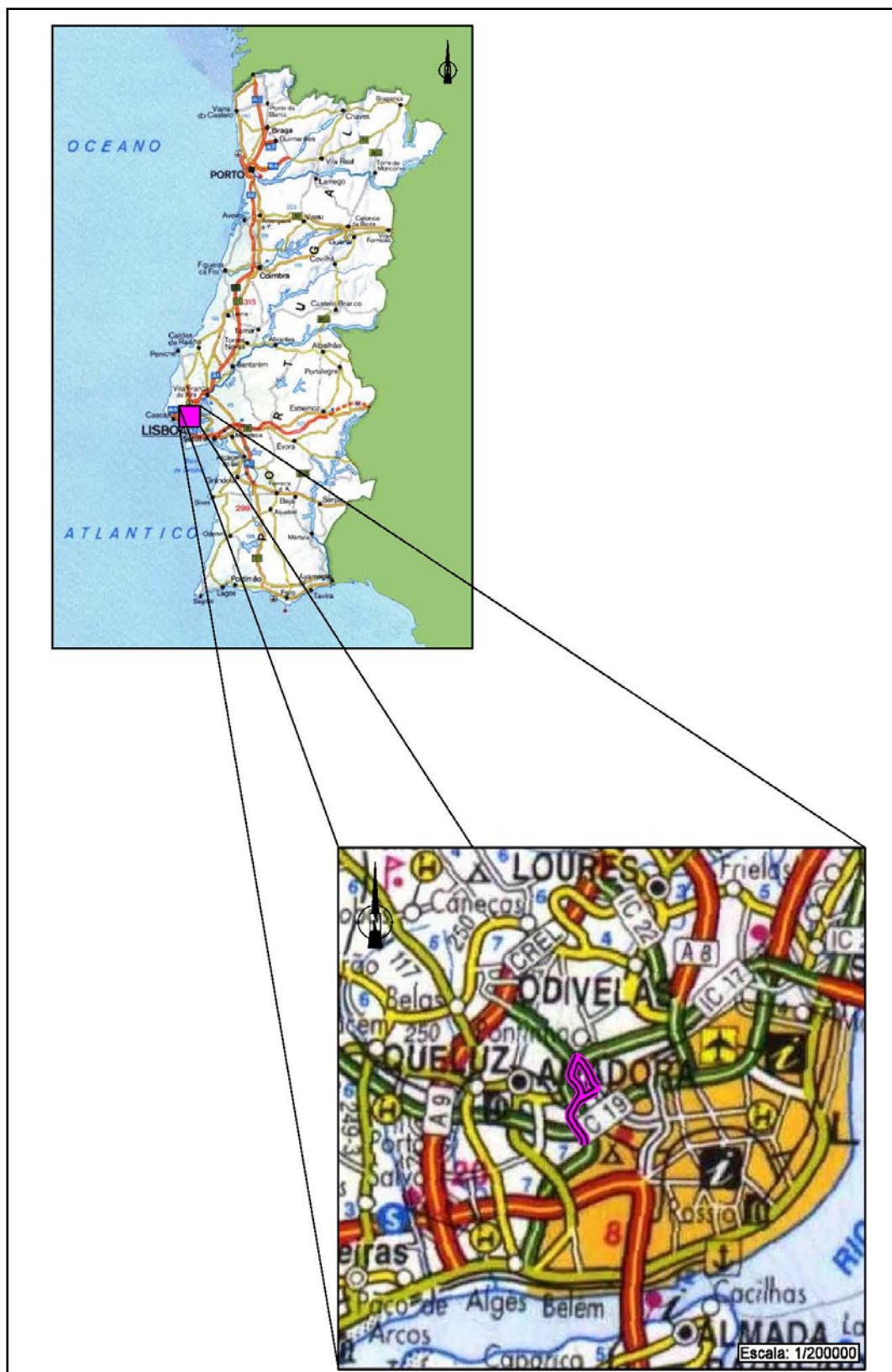


Figura 2.1 – Circular Regional Interior de Lisboa – CRIL/IC17 – na Área Metropolitana de Lisboa

2.1.2. ANTECEDENTES

Desde os anos 70 tem vindo a ser proposto o projecto do sublanço Buraca-Pontinha, datando o seu Estudo Prévio de 1989.

Durante o Projecto de Execução foram estudadas diversas opções que passaram por soluções em túnel e (ou) viaduto. Contudo, em ambos os casos, diversas situações impediam o seu desenvolvimento.

Apesar de o projecto já ser antigo, tem-se vindo a demonstrar difícil proceder à sua construção devido à elevada densidade de habitação degradada que se desenvolvera na faixa da CRIL dificultando a sua construção imediata.

Foi já em 2002, após se ter procedido ao realojamento de expressivo número dessas unidades habitacionais degradadas, que se desenvolveu a última solução do projecto, a qual, desde logo, mereceu contestação pública. Esta contestação conduziu a nova alteração ao projecto, considerando, no essencial, a redução de 4 para 3 vias por sentido de tráfego na zona entre o ;:,km 1+100 e o ;:,km 1+700 (Coba, 2003).

2.1.3. PROJECTO ACTUAL

Actualmente estão reunidas condições que permitiram, dentro das múltiplas condicionantes territoriais e ambientais, assegurar o início da construção deste novo e importante eixo viário na estrutura urbana periférica do concelho de Lisboa, o qual assume uma fulcral relevância no contexto das ligações urbanas e destas com a respectiva área metropolitana.

Na solução proposta actualmente, parte do traçado será em túnel, existindo algumas zonas semi-cobertas e outras zonas que, apesar de descobertas, serão construídas a uma cota inferior ao nível do terreno.

No que se refere a obras de arte estão previstos: 6 falsos túneis com extensões variáveis apresentando, o mais extenso, um desenvolvimento de 540 m; dois viadutos; obras de arte correntes; passagens superiores, passagens inferiores, o alargamento da PSB1 no nó da Buraca e o eventual reforço da obra de arte do caminho de ferro.

De facto, o novo projecto que está a ser implementado resulta, por um lado, da importância do fecho deste itinerário na malha urbana e viária da cidade de Lisboa e Área Metropolitana onde se insere e, por outro, do balanço das sugestões e preocupações evidenciadas pelos principais intervenientes no decurso das consultas públicas e avaliação ambiental a que o projecto foi sujeito (Coba 2003).

Na Figura 2.2, apresenta-se o esboço coreográfico da obra onde fica evidente a densidade de edificações na envolvente.

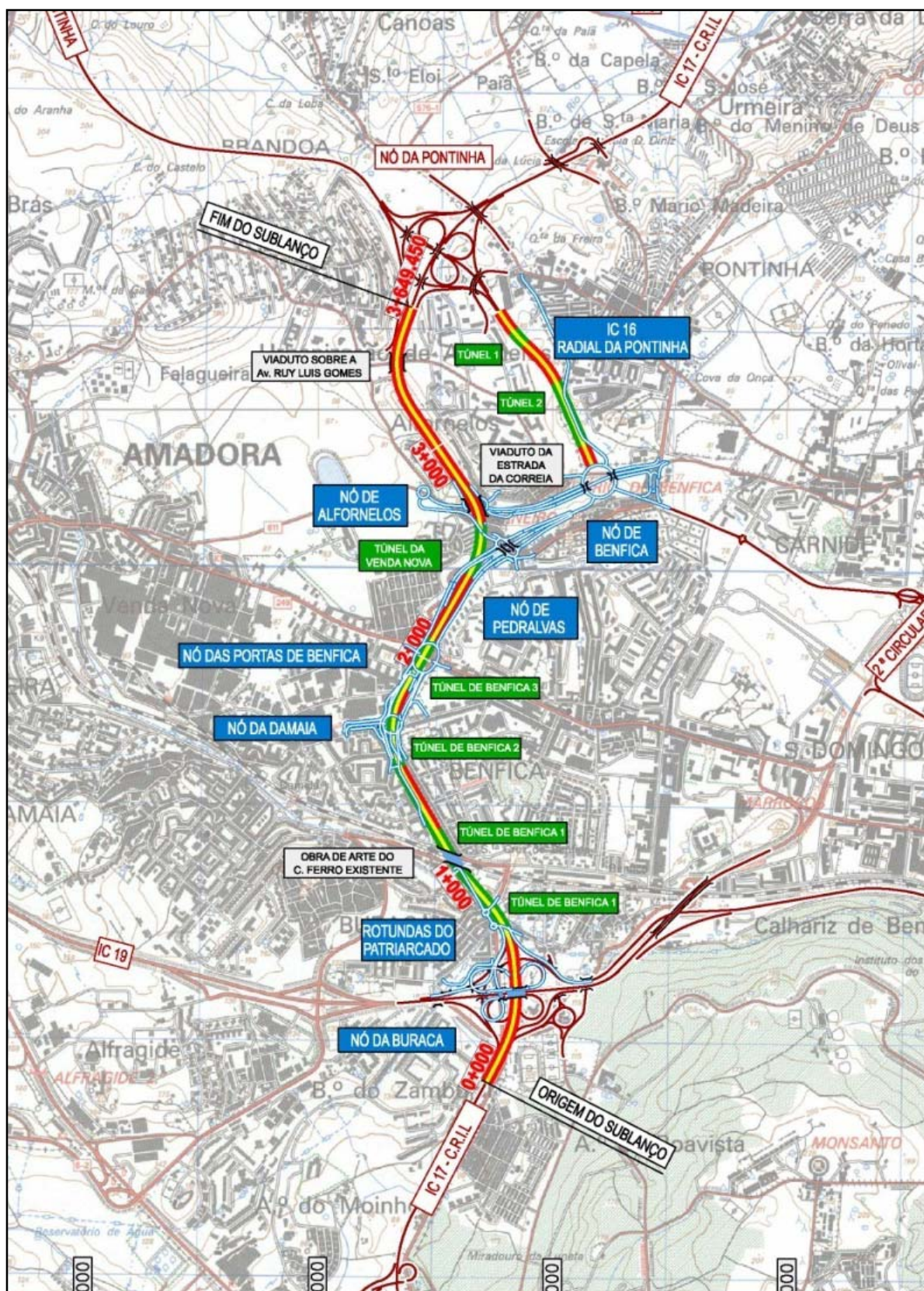


Figura 2.2 – Esboço coreográfico da obra (Coba, 2006a)

2.2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

De um ponto de vista geomorfológico pode considerar-se que o traçado em estudo se desenvolve praticamente ao longo de uma única unidade, cujo modelado está intimamente associado às características de resistência das formações geológicas aflorantes (Coba, 2006a).

A esta unidade correspondem basicamente, como se pode ver na Figura 2.3, os terrenos argilo-arenosos mais resistentes, em geral sobreconsolidados, da “Formação de Benfica”, e as formações rochosas muito alteradas e fracturadas do “Complexo Vulcânico de Lisboa”, que conferem à orografia um modelado suave e arredondado, típico de um perfil de erosão e meteorização. Estas formações encontram-se localmente cobertas por aterros modernos, coluviões e aluviões.

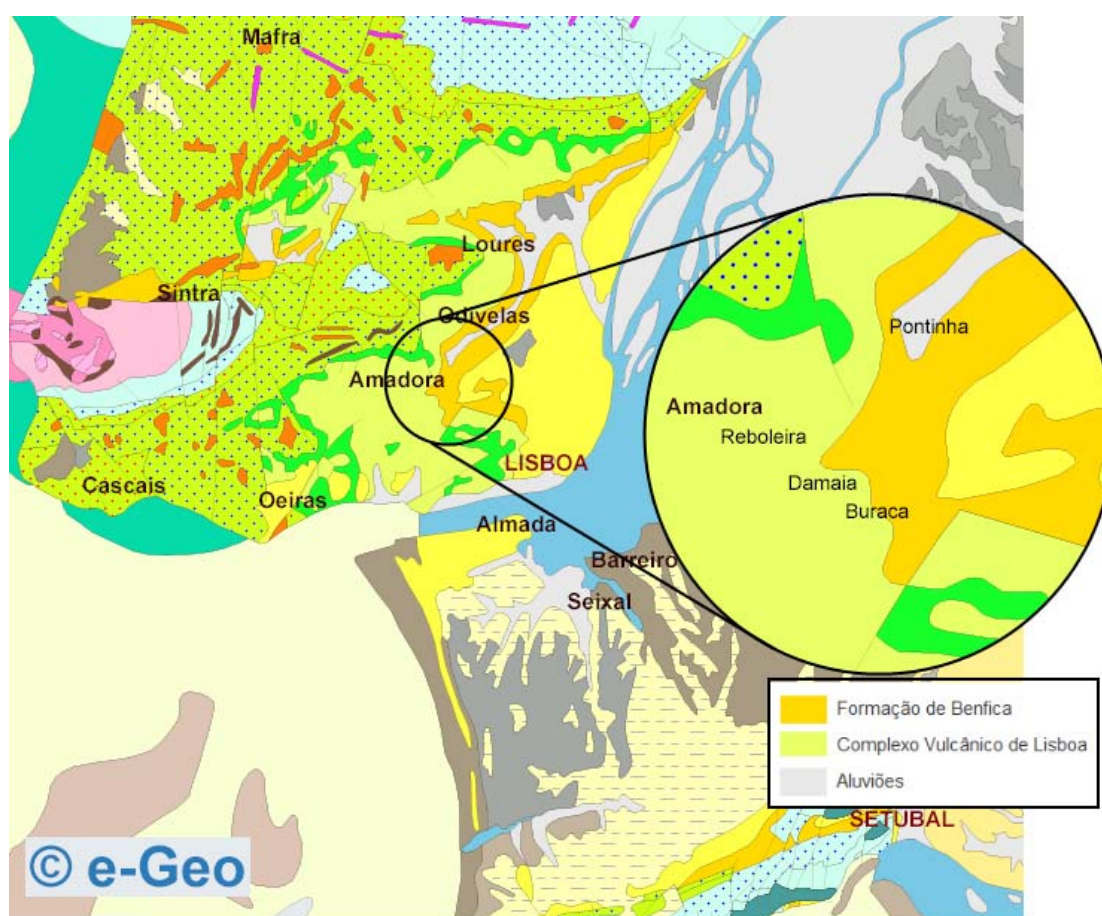


Figura 2.3 – Enquadramento da obra na carta geológica de Portugal (<http://e-geo.ineti.pt>)

Outro aspecto importante da geomorfologia local é relativa à densa malha urbana que se desenvolveu, conferindo uma maior suavização da superfície em resultado das sucessivas modelações e criação de aterros.

As baixas aluvionares detectadas encontram-se actualmente sob uma camada de materiais de aterro de espessura muito variável, resultantes das sucessivas modelações do terreno. Revelam maior

Quadro 2.1 – Relação dos trabalhos de prospecção geotécnica e ensaios realizados nas várias campanhas
(Coba, 2006a)

	CAMPANHAS							TOTAL
	1989	1993 /94	1995	1997	2003	2004	2006	
PROSPECÇÃO E ENSAIOS <i>IN SITU</i>								
Perfis Sísmicos de Refracção (un)	1	10						11
Poços de Reconhecimento com colheita de amostras remexidas (un)	7	4			3			14
Trados mecânicos (un)		2						2
Sondagens mecânicas de furação (un)	35	37	5	2	5	28	24	136
Comprimento de furação (m)	323,8	560,4	65,5	40,0	90,0	403,4	361,9	1844,9
Colheitas de amostras indeformadas (un)		22	1				6	29
Piezómetros (un)		15				3	7	25
Ensaio SPT (un)	215	205	43	26	29	249	227	994
Ensaio do tipo Lugeon (un)		26			7			33
Ensaio do tipo Lefranc (un)		55						55
Ensaio com Pressiómetro de Ménard (un)		46						46
Ensaio com Pressiómetro Autoperfurador (un)		4						4
Ensaio sísmicos “Cross-Hole” (un)		3						3
Ensaio sísmicos “Down-Hole” (un)		3						3
ENSAIOS LABORATORIAIS								
Ensaio de Identificação								
Análises granulométricas (un)	24	34	1				6	65
Granulometrias por Sedimentação (un)		12	1					13
Limites de Atterberg (un)	24	34	1				6	65
Teor em água natural (un)	5	33	1				6	45
Densidade das partículas (un)							6	6
Proctor-CBR (un)	3	2						5
Expansibilidade (un)		18						18
Edométrico (un)		8	1				3	12
Corte Directo (un)		7	1				3	11
Corte Triaxial (convencional) (un)		6						6
Corte Triaxial (tensão imposta) (un)		2						2
Ultra-sons (un)		6						6
Compressão Uniaxial (un)		14			5			19
Carga Pontual (un)		20						20

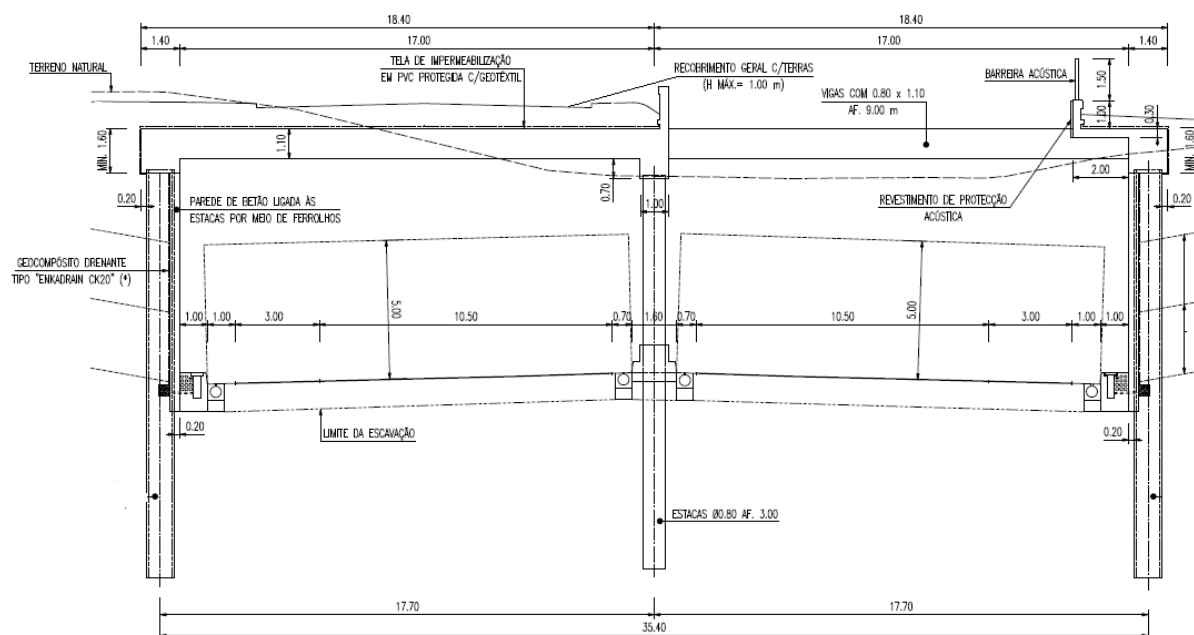


Figura 2.6 – Secção típica nas zonas semi-cobertas entre os túneis que constituem o Túnel de Benfica

2.4.2. CONDICIONAMENTOS

As principais condicionantes às soluções estruturais e ao faseamento construtivo a adoptar estão relacionadas com o facto de as obras se encontrarem inseridas no todo ou em parte em zonas fundamentalmente residenciais.

Assim, as soluções estruturais e os faseamentos construtivos foram concebidos de forma a permitir a execução dos arranjos finais nas áreas intervencionadas o mais rápido possível e a limitar os níveis de ruídos durante a construção,

Os túneis disporão de um recobrimento com terra com espessura tal que permita o tratamento paisagístico definido.

Pelo facto de a obra se situar na proximidade de edifícios e estruturas existentes, soluções estruturais e construtivas deverão ser concebidas de forma a limitar os assentamentos e deformações horizontais à superfície e ao nível das fundações das estruturas existentes de modo a minimizar os danos nessas estruturas.

2.4.3. ZONAMENTO GEOTÉCNICO

Com base no conhecimento dos terrenos onde se desenvolve o trecho do túnel, e de acordo com o reconhecimento geológico de superfície realizado e com os resultados das campanhas de prospecção geotécnica e ensaios realizadas, bem como da sua análise, foi possível definir um cenário geológico expectável e um zonamento geotécnico dos terrenos em profundidade e no desenvolvimento do túnel.

Apresenta-se no Quadro 2.2 as principais características geotécnicas de cada zona considerada e no Quadro 2.3 os respectivos parâmetros geotécnicos. Refira-se que os parâmetros geotécnicos tiveram em consideração a heterogeneidade e a anisotropia que caracterizam as formações presentes e estão definidos no relatório geológico-geotécnico elaborado pela Coba (2006b). Os parâmetros geotécnicos adoptados nos estudos efectuados nos capítulos seguintes foram baseados nestes intervalos de valores tendo em conta o estudo do relatório geológico-geotécnico.

No Anexo A apresenta-se o corte geológico-geotécnico longitudinal pelo eixo do túnel.

Quadro 2.2 – Principais características de cada zona geotécnica considerada

Zona Geotécnica	VP (m/s)	Grau de Fracturação	Grau de Alteração	N SPT	% de Recup.	% de RQD
ZG3	< 450	F5-4	W5 a W4-5	3-25	0-35	-
ZG2	< 1670	F5 a F4-5	W4-5	26-60	0-35	-
ZG1b	2000-2500	F4-5 a F3	W4-5 a W3	44-60	30-90	0-30
ZG1a	> 2500	F3 a F5-4	W3 a W4-5	> 60	50-100	0-70

Quadro 2.3 – Parâmetros geotécnicos de cada zona considerada

Zona Geotécnica	Parâmetro Geotécnicos			
	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (MPa)
ZG 3	19	0 - 10	25 - 30	10 - 20
ZG 2	19 - 21	10 - 30	25 - 30	40 - 60
ZG 1b	20 - 21	50	35	50 - 75
ZG 1a	21 -23	80 - 100	35	100 - 200

2.4.4. TIPOLOGIAS ESTRUTURAIS

Dadas as variações que ocorrem ao longo do traçado, nomeadamente, a qualidade dos maciços, a profundidade e a largura da escavação, a inclinação da superfície do terreno, a presença de edifícios e outras construções nas imediações das escavações, foram definidas zonas em que se prevêem esforços nas contenções significativamente distintos e em que as condicionantes obrigam a soluções estruturais distintas.

Assim admitiram-se quatro zonas principais que por sua vez apresentam subdivisões.

Nas zonas 1 e 2, localizadas entre o km 0+650 e o km 1+550, e na zona 4, localizada entre o km 1+900 e o fim do túnel, a estrutura do túnel é realizada com um pórtico de dois vãos, de betão armado, constituído por duas cortinas de estacas laterais e por um alinhamento de pilares centrais, todos encabeçados por vigas longitudinais, às quais fica ligada a laje de cobertura. Em zonas em que é necessário impermeabilizar o túnel a cortina é constituída por estacas secantes.

Na zona 3, que se desenvolve a partir do km 1+550 e o km 1+900, por não existirem importantes constrangimentos à implantação de taludes de escavação, a estrutura é constituída por um pórtico duplo de betão armado, fundado directamente através de laje de ensoleiramento ou de sapatas isoladas contínuas. Esta zona fica fora do âmbito do presente trabalho.

2.4.5. FASEAMENTO CONSTRUTIVO

Como se referiu no ponto anterior, nas zonas em estudo (zonas 1, 2 e 4), a solução estrutural a adoptar, apesar de algumas particularidades em determinados locais como nas zonas semi-cobertas, é na sua essência semelhante em todas elas.

Assim, para as zonas em estudo, o faseamento construtivo previsto, que pretende ir de encontro às exigências impostas, é o seguinte (Figura 2.7):

- i. execução das estacas das contenções laterais e do apoio central do túnel;
- ii. escavação até à cota da base da laje de cobertura;
- iii. execução das vigas de encabeçamento e da laje de cobertura;
- iv. escavação até à base do leito da plataforma com instalação dos geodrenos e remoção dos produtos da escavação;
- v. construção ascendente das restantes paredes de forro com a instalação do geocompósito drenante entre estacas;
- vi. execução dos restantes trabalhos.

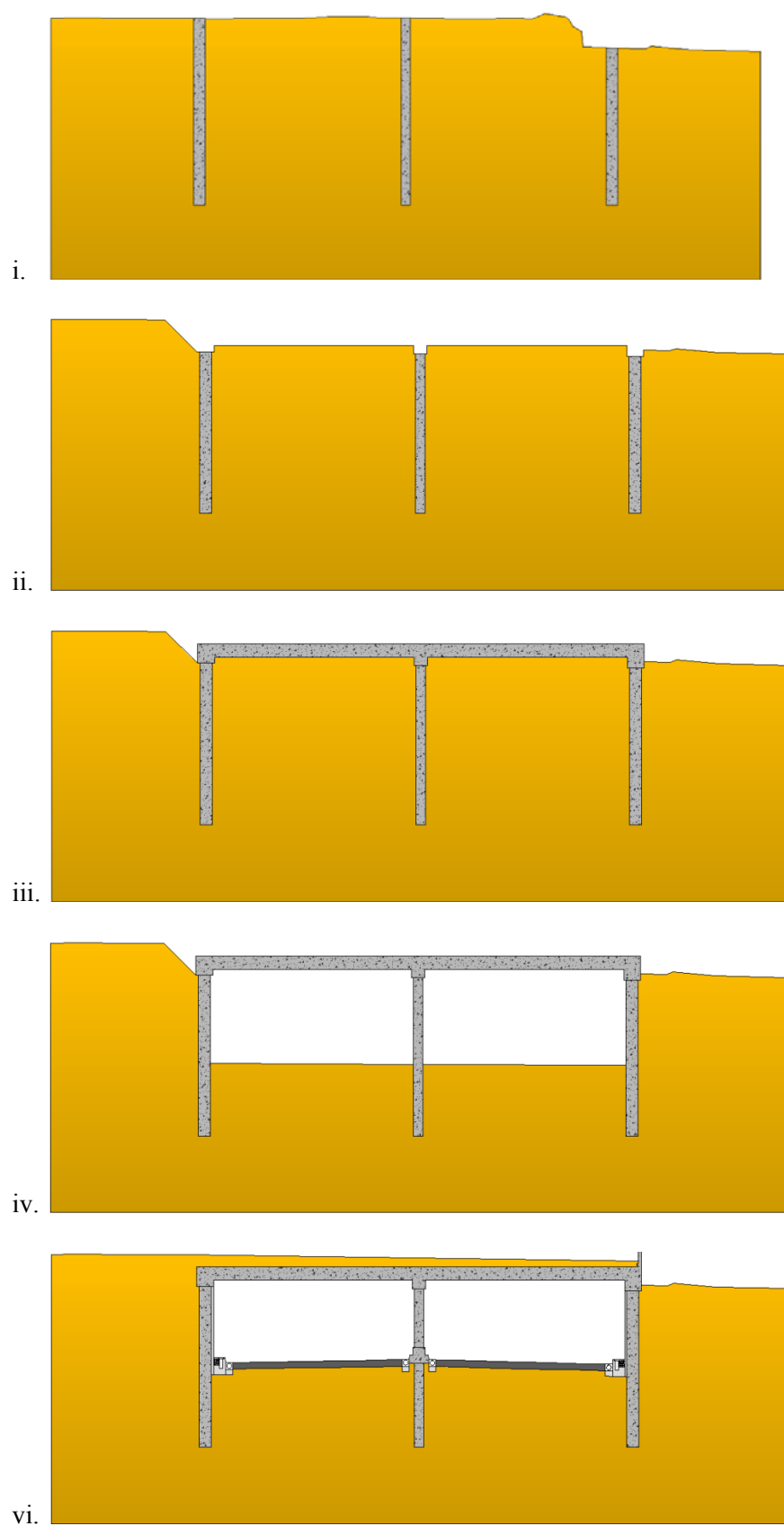


Figura 2.7 – Esquematisação do faseamento construtivo

3

PROGRAMA DE CÁLCULO DE CORTINAS MONOAPOIADAS

3.1. INTRODUÇÃO

Dado o número de secções e as diversas situações que se pretendiam estudar, foi desenvolvido de raiz um programa de cálculo automático que, a partir da definição das características dos solos, da posição do nível freático e dos carregamentos, calcula automaticamente os diagramas de esforços (momentos flectores e esforços transversos) e a altura enterrada da cortina recorrendo aos métodos de equilíbrio limite.

O programa de cálculo foi elaborado com base no Microsoft Excel 2007, recorrendo à ferramenta Visual Basic for Applications.

O ficheiro está dividido em nove folhas de cálculo, sendo duas delas destinadas à introdução de dados relativos à escavação em estudo, uma com um resumo dos resultados mais relevantes, cinco folhas com os resultados detalhados relativos ao cálculo segundo cada um dos 5 métodos de considerar a segurança e os respectivos diagramas de esforços e uma com os coeficientes de segurança que cada um dos métodos introduz.

Sem entrar em pormenores de programação, pretende-se aqui explicitar o funcionamento, as capacidades e limitações do programa, assim como os procedimentos utilizados.

3.2. INTRODUÇÃO DA SEGURANÇA

Foram implementadas no programa cinco métodos de considerar a segurança, os quais se passa a enumerar:

- Abordagem de Cálculo 1 do Eurocódigo 7 (Combinações 1 e 2 – designadas de EC7-1.1 e EC7-1.2, respectivamente);
- Abordagem de Cálculo 2 do Eurocódigo 7 (designada de EC7-2);
- Tschebotarioff (majoração dos esforços por 1,35 e da altura enterrada por 1,7);
- Tradicional (minoração dos impulsos passivos, $F_p=2$ e majoração dos esforços por 1,35).

No Quadro 3.1 apresentam-se os coeficientes de segurança preconizados por cada um dos métodos.

Note-se que estes coeficientes estão definidos na folha “DadosProg” podendo o utilizador alterá-los caso necessário.

Eurocódigo 7 – Abordagem de Cálculo 1

Esta abordagem envolve o cálculo para duas combinações, Combinação 1 e Combinação 2 que se assemelham aos casos B e C da versão anterior do Eurocódigo 7 (EN 1997-1:1994). Neste trabalho são abreviadamente designadas por Abordagem 1.1 e Abordagem 1.2 ou EC7-1.1 e EC7-1.2, respectivamente.

A primeira combinação consiste na majoração das acções por 1,35 e 1,5 conforme sejam acções permanentes ou variáveis, respectivamente. A segunda combinação consiste em minorar os parâmetros de resistência do terreno.

Eurocódigo 7 – Abordagem de Cálculo 2

Segundo esta abordagem, as acções são majoradas da mesma forma que na Abordagem 1.1, aplicando às acções permanentes e às acções variáveis factores iguais a 1,35 e 1,50 e, simultaneamente considera-se um factor de redução dos impulsos passivos de valor igual a 1,40.

Tschebotarioff – Coeficientes Globais de Segurança

Segundo este método, a geometria e os esforços são calculados com base nos valores característicos das acções e dos parâmetros de resistência do terreno, utilizando-se, no final, factores globais de segurança de 1,35 e 1,70 para os esforços e para a altura enterrada da cortina, respectivamente.

Tradicional – Minoração do Impulso Passivo ($F_p=2,0$)

Este método, habitualmente designado por tradicional, considera a segurança aplicando apenas um factor de redução do impulso passivo igual a dois ($F_p=2,0$), ou seja, reduzindo para metade a contribuição do impulso passivo para o equilíbrio.

Quadro 3.1 – Coeficientes de segurança preconizados nos diferentes métodos

Método	Acções			Propriedades do Terreno			F _p	Coef. Global de Segurança	
	Permanentes		Variáveis	tg(ø')	c'	c _u		Esforços	Ficha
	Desfavorável	Favorável	Desfavorável						
EC7 - 1.1	1,35	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
EC7 - 1.2	1,00	1,00	1,30	1,25	1,25	1,40	1,00	1,00	1,00
EC7 - 2	1,35	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,40	1,00	1,00
Tchebotarioff	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,35	1,70
Tradicional	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,35	1,00

3.3. ESTADOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

3.3.1. COEFICIENTES DE IMPULSO

Foram implementadas duas formas de calcular os coeficientes de impulso, pelas tabelas de Caquot-Kérisel e pelo método numérico definido no anexo C.2 do EC7.

Dadas as limitações que implicaria o uso directo das tabelas de Caquot-Kérisel, foi feito um estudo de forma a averiguar a possibilidade de aproximar os valores dos coeficientes de impulso a várias leis matemáticas permitindo assim definir a equação da melhor aproximação possível para cada situação.

As aproximações estudadas foram as polinomiais e as exponenciais para os coeficientes de impulso activo e passivo, e as logarítmicas apenas para os coeficientes de impulso passivo. Apenas aqui se apresentam as curvas adoptadas que em todos os casos foram polinómios.

As curvas exponenciais também conduziam a boas aproximações. Contudo, para ângulos de atrito da ordem dos 20 - 30° conduziam a valores anti-conservativos, em especial para baixos valores do ângulo de atrito terreno-contenção.

Como se pode ver nas Figuras 3.1 e 3.2, nas curvas adoptadas as aproximações são muito boas e quando se afastam ligeiramente estão do lado da segurança.

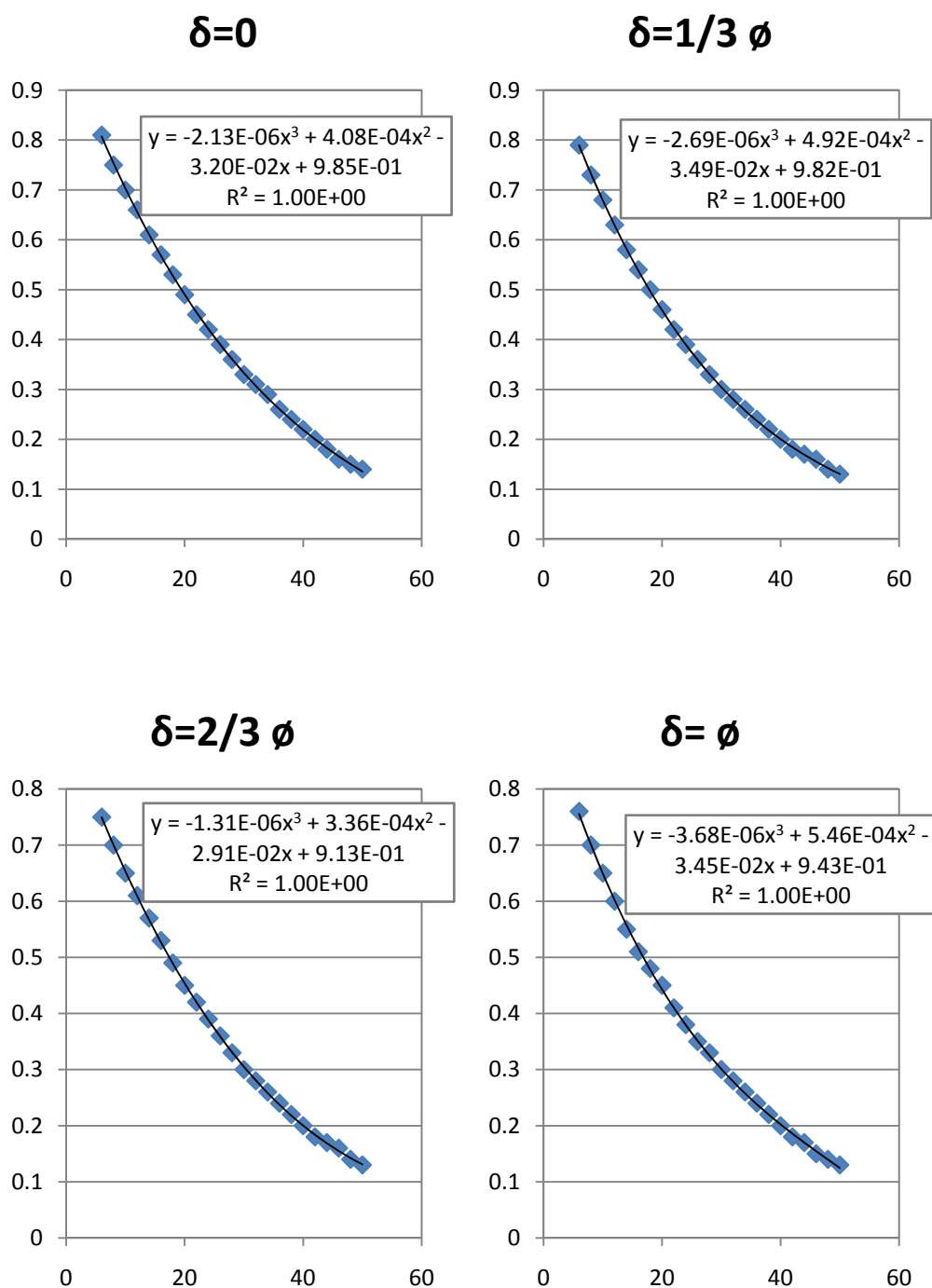


Figura 3.1 – Aproximações adoptadas para os coeficientes de impulso activo

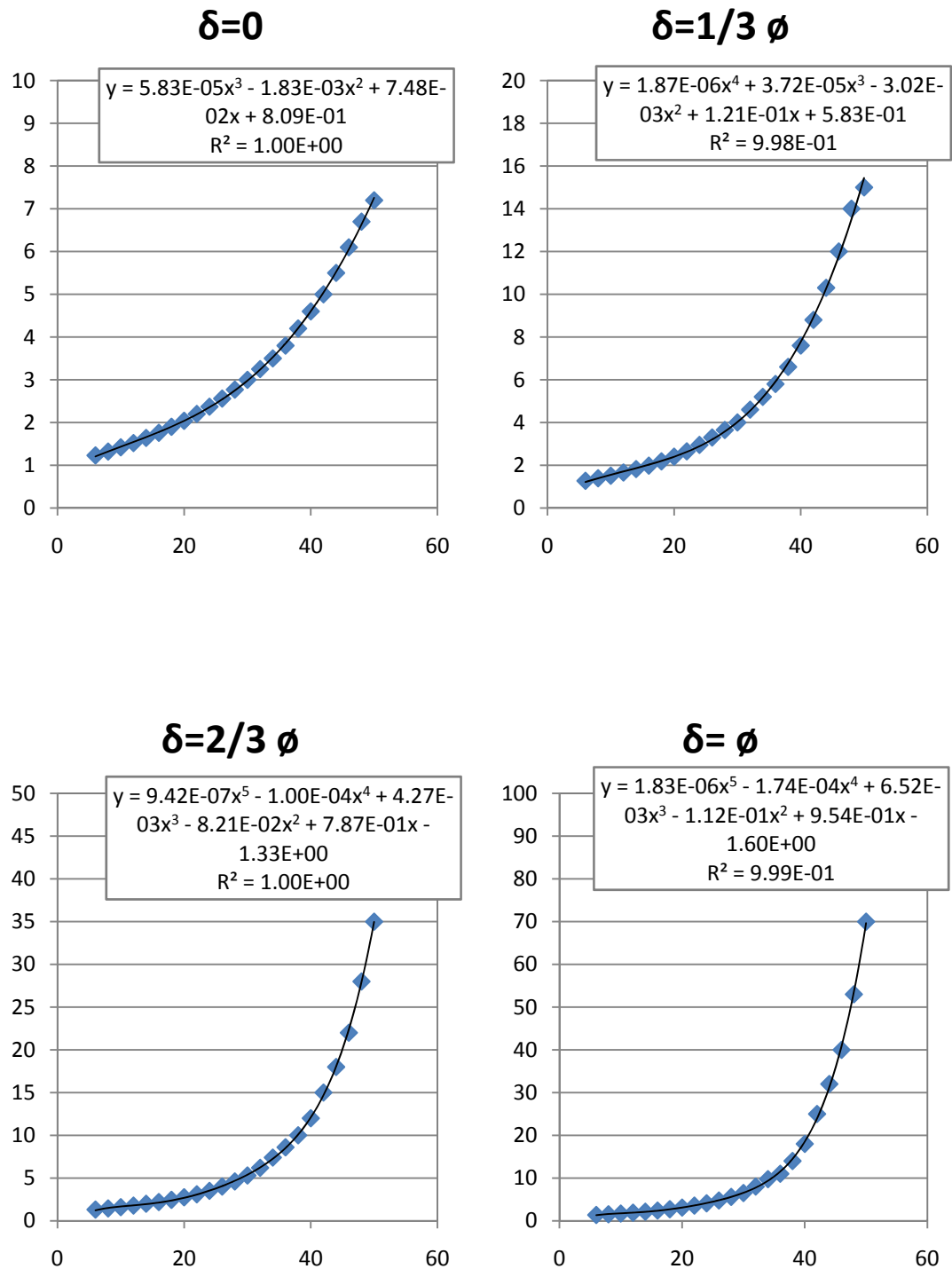


Figura 3.2 – Aproximações adoptadas para os coeficientes de impulso passivo

3.3.2. IMPULSOS DE TERRAS

Inicialmente, o programa analisa a geometria da secção introduzindo nos horizontes divisões que correspondem à profundidade da base de escavação e à posição do nível freático.

De forma a automatizar o cálculo, foi criada uma divisão entre os impulsos de cada horizonte isolado e os impulsos provocados pelas cargas transmitidas dos horizontes superiores e(ou) sobrecargas à superfície.

Assim os impulsos de cada horizonte isolado foram designados de I_{ah1} e I_{ph1} conforme estejam do lado activo ou passivo, respectivamente, e resultam de um diagrama triangular sendo o respectivo centro de gravidade a 1/3 da espessura da respectiva camada. Esses impulsos são calculados de acordo com as Expressões (3.1) e (3.3).

Os impulsos provocados pelo peso próprio dos horizontes superiores e(ou) sobrecargas foram designados de I_{ah2} e I_{ph2} , conforme estejam do lado activo ou passivo, e resultam de um diagrama rectangular ficando o centro de gravidade a meio do horizonte. São definidos pelas expressões (3.2) e (3.4).

$$I_{ah1,i} = \frac{1}{2} K_{ah,i} \cdot \gamma'_i \cdot h_i^2 \quad (3.1)$$

$$I_{ah2,i} = K_{ah,i} \cdot \sigma'_{v,i} \cdot h_i \quad (3.2)$$

$$I_{ph1,i} = \frac{1}{2} K_{ph,i} \cdot \gamma'_i \cdot h_i^2 \quad (3.3)$$

$$I_{ph2,i} = K_{ph,i} \cdot \sigma'_{v,i} \cdot h_i \quad (3.4)$$

Nas expressões (3.1) a (3.4):

- γ'_i – peso volúmico efectivo do solo correspondente ao horizonte i
- $K_{ah,i}$ e $K_{ph,i}$ – coeficientes de impulso activo e passivo horizontais, respectivamente, do solo correspondente ao horizonte i
- $\sigma'_{v,i}$ – tensão efectiva vertical no limite superior do horizonte i
- h_i – espessura do horizonte i

Na Figura 3.3 esquematizam-se as divisões introduzidas nos horizontes e a forma como o programa considera os impulsos.

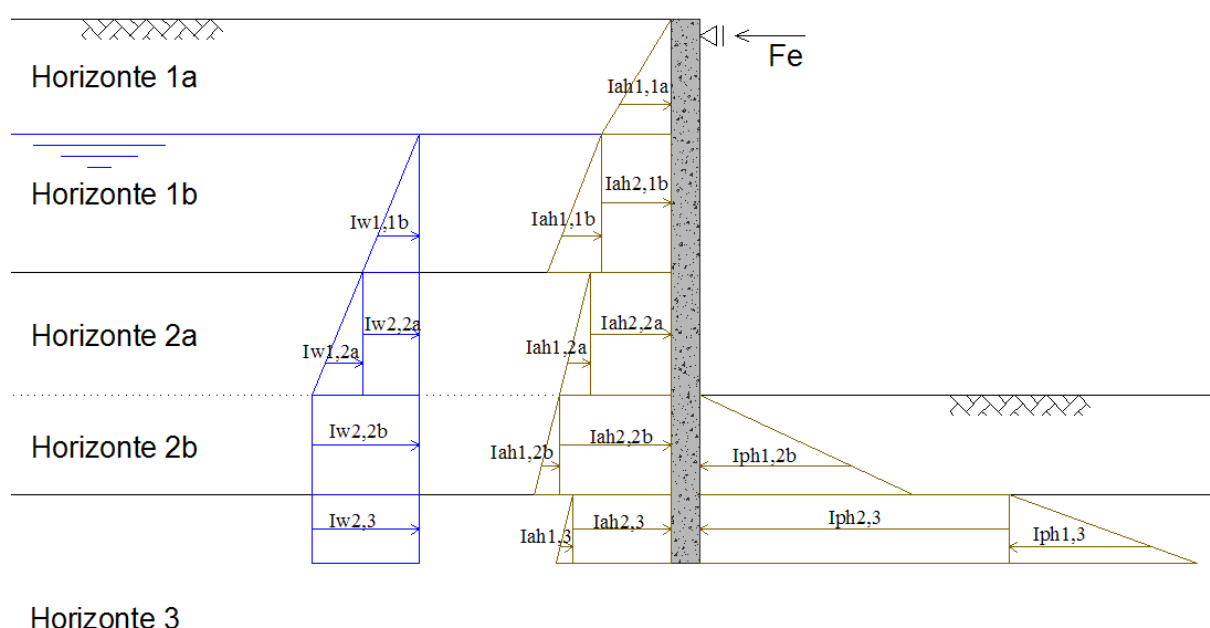


Figura 3.3 – Esquemática das divisões introduzidas nos horizontes e dos impulsos

3.3.3. IMPULSOS DEVIDOS À ÁGUA

A consideração dos impulsos devido à água só faz sentido no caso de a posição do nível freático dos dois lados da cortina ser distinta. No caso em que o nível freático é coincidente ou inferior à base de escavação, os impulsos da água anulam-se, sendo o seu impacto apenas ao nível das tensões efectivas, e consequentemente nos impulsos das terras.

Nos casos em que existe um nível freático acima da base de escavação que se mantém após a construção da cortina, o programa admite que do lado da escavação é rebaixado até ao nível da base da escavação e são considerados os impulsos correspondentes a uma situação estática, admitindo que não existe percolação. Tal consideração apenas corresponde à realidade no caso de o pé da cortina penetrar num estrato impermeável. Nos restantes casos, está-se a cometer um erro.

O erro cometido ao considerar pressões hidrostáticas onde na realidade existe percolação produz, ao nível das pressões da água e do solo, diferenças muito significativas. Todavia, como os efeitos que a percolação exerce naquelas duas pressões são de natureza oposta, os diagramas de pressões totais sobre a estrutura para as condições hidrostáticas e hidrodinâmicas em geral não diferem de forma tão importante como cada uma das componentes referidas e o erro cometido está do lado da segurança.

Assim, para fins de cálculo, o programa considera apenas a resultante das pressões hidrostáticas dos dois lados da cortina, ou seja, no caso de o nível freático estar acima da base de escavação obtém-se um diagrama triangular até à base de escavação, sendo a resultante constante a partir daí.

A designação dos impulsos devidos à água é semelhante à adoptada para os impulsos de terra. Assim, I_{w1} corresponde a um diagrama de pressões triangular e I_{w2} corresponde a um diagrama de pressões rectangular.

3.3.4. IMPULSOS EM MACIÇOS COESIVOS. TEOREMA DOS ESTADOS CORRESPONDENTES.

O teorema dos estados correspondentes é um artifício de cálculo que permite quantificar os impulsos produzidos por um solo coesivo em estado limite.

O cálculo dos impulsos activo e passivo que se instalam numa estrutura de suporte podem ser calculados como se esquematiza nas Figuras 3.4 e 3.5.

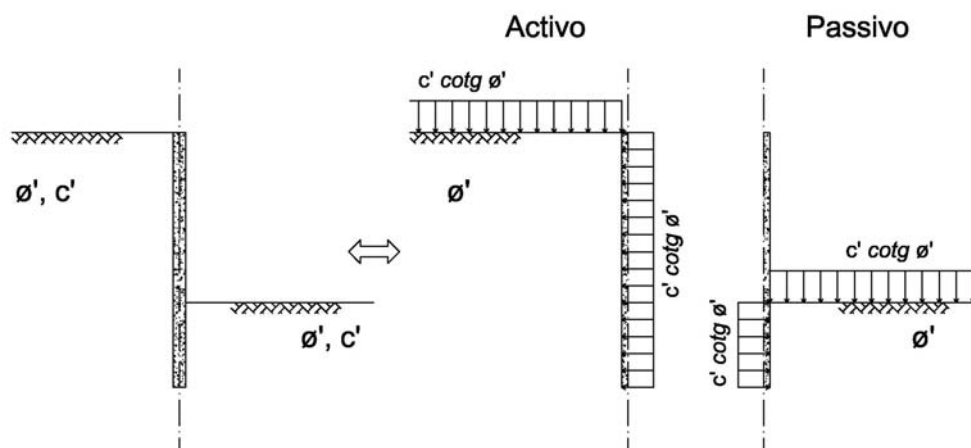


Figura 3.4 – Simplificação para considerar a coesão efectiva dos solos segundo o teorema dos estados correspondentes

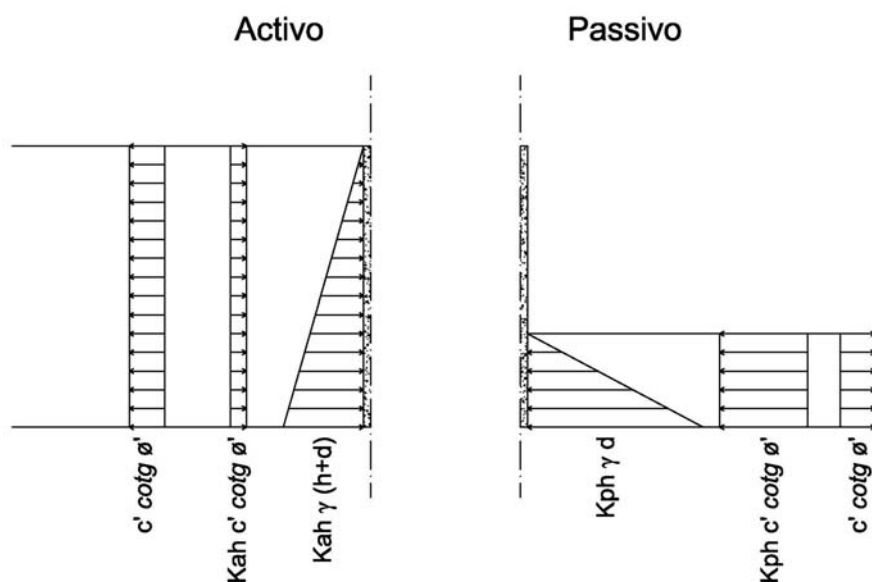


Figura 3.5 – Pressões de terras resultantes segundo o teorema dos estados correspondentes

Assim, as pressões de terras são dadas pelas expressões (3.5) e (3.6):

$$\sigma_{ah} = K_{ah} \cdot \gamma \cdot z + (K_{ah} - 1) \cdot c' \cot \phi' \quad (3.5)$$

$$\sigma_{ph} = K_{ph} \cdot \gamma \cdot z' + (K_{ph} - 1) \cdot c' \cot \phi' \quad (3.6)$$

No programa de cálculo, a redução do impulso activo devida à coesão é materializada pelo impulso denominado de $I_{ahc.tec}$ que não corresponde necessariamente à componente relativa ao teorema dos estados correspondentes da expressão (3.5) sob pena de se estar a considerar forças de tracção nos solos em determinadas zonas.

Assim, dado que a resultante da soma das pressões do lado activo resultante da aplicação da expressão (3.5) poderá ser negativa, nas zonas em que isso acontece, $I_{ahc.tec}$ assume o valor necessário para anular o impulso activo que se instalaria considerando o solo puramente friccional.

No que diz respeito aos impulsos passivos, o contributo da coesão, no programa de cálculo, é materializado pelo impulso denominado de $I_{phc.tec}$, que resulta da soma das componentes horizontais das pressões apresentadas na Figura 3.5.

3.3.5. SOBRECARGAS

Dado que em muitas das secções em estudo existem edifícios nas proximidades das escavações tornou-se indispensável dotar o programa com a capacidade de levar em consideração as pressões transmitidas por estas estruturas.

Assim, foi implementada a possibilidade de adicionar quer cargas lineares e(ou) cargas distribuídas numa faixa de terreno a determinada distância da cortina.

As pressões provocadas por estas cargas são calculadas de acordo com a teoria da elasticidade. Além da definição das cargas interessa definir se são permanentes ou variáveis e se são aplicadas antes ou depois da execução da cortina de estacas.

A altura ou ordem em que são aplicadas as sobrecargas em relação à execução da cortina tem um impacto significativo na sua grandeza. Se a carga é aplicada num meio elástico semi-indefinido as tensões por ela produzidas, que podem ser calculadas pela teoria da elasticidade, produzem deformações, que no caso de existir um paramento rígido a determinada distância da aplicação da carga são impedidas. As pressões necessárias para impedir tais deformações são iguais às que as provocariam. Sendo assim, no caso de a carga ser aplicada depois da execução da cortina, as pressões podem atingir o dobro das que se instalariam no caso contrário. Assim, os valores de σ_x calculados pelas expressões a seguir apresentadas são multiplicados por 2 no caso de as cargas serem aplicadas após a execução das cortinas.

No programa, os impulsos totais resultantes destas cargas são denominados de I_{cargas} e a profundidade do ponto de aplicação é b_{cargas} que no caso de se referirem a mais de uma carga assume a resultante e a posição do centro de gravidade, respectivamente.

Carga linear

As cargas lineares ficam totalmente definidas pelo seu valor P , pela distância x e pela profundidade a que são aplicadas como se pode ver na Figura 3.6.

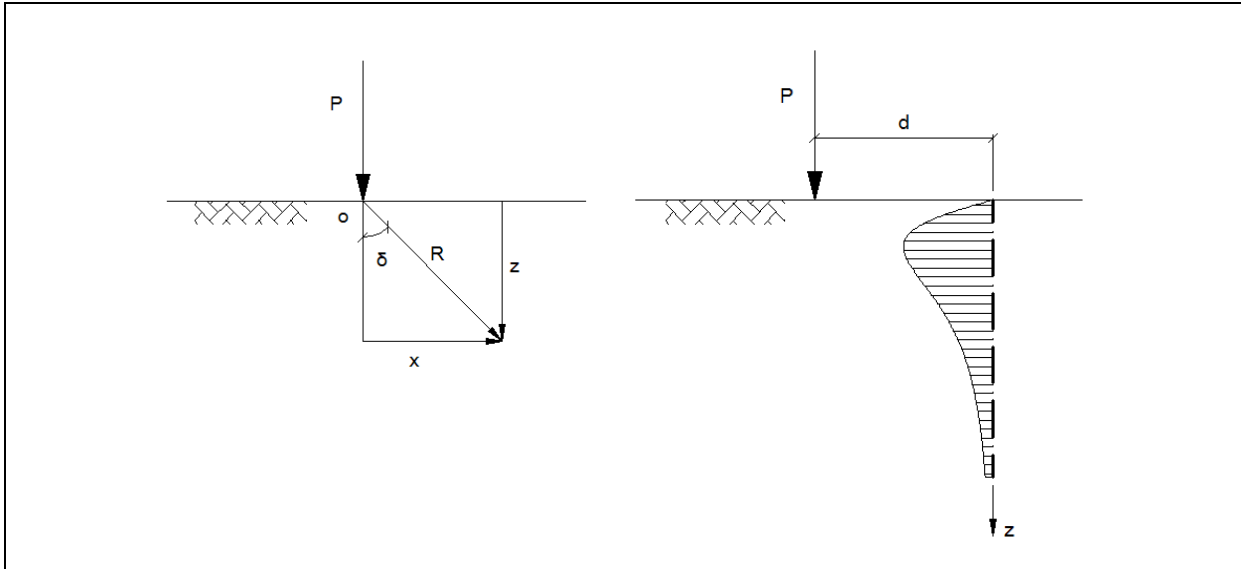


Figura 3.6 – Carga linear

As tensões horizontais induzidas por uma carga linear P num ponto, a uma distância x e a uma profundidade z em relação ao ponto de aplicação, são dadas pela expressão:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi} \frac{x^2 z}{R^4} \quad (3.7)$$

A expressão (3.7) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\sigma_x = \frac{2P \cdot d^2 \cdot z}{\pi \cdot (d^2 + z^2)^2} \quad (3.8)$$

O impulso produzido num determinado intervalo é dado pelo integral da expressão anterior, cujo cálculo não oferece dificuldades.

Carga uniformemente distribuída numa faixa de desenvolvimento infinito

As cargas uniformemente distribuídas numa faixa de comprimento infinito ficam totalmente definidas pelo seu valor P , largura B , distância x e pela profundidade a que são aplicadas, como se pode ver na Figura 3.7.

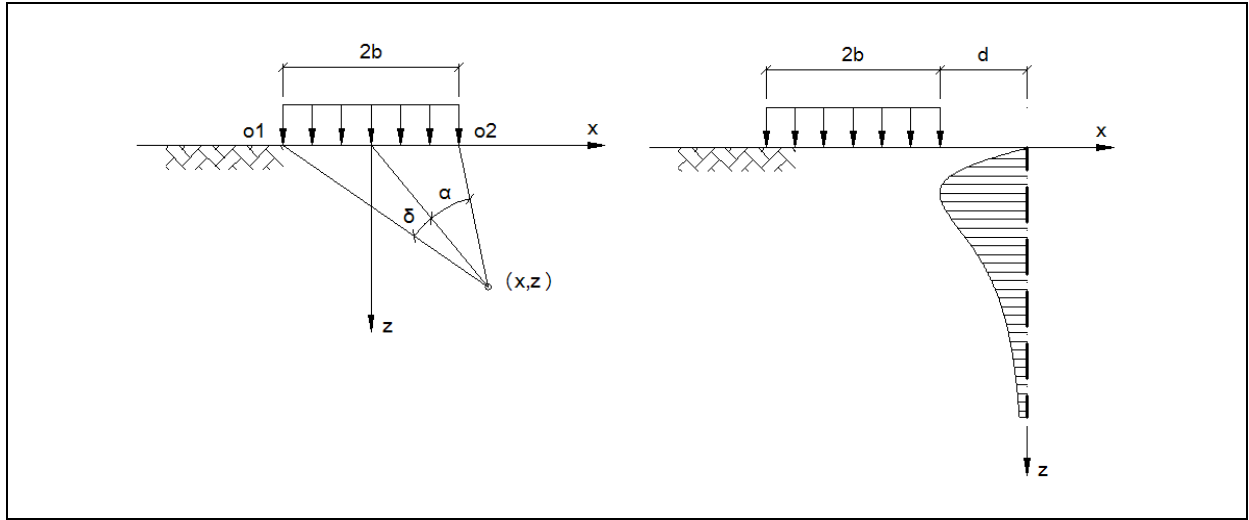


Figura 3.7 – Carga distribuída sobre uma faixa de terreno de desenvolvimento infinito

$$\sigma_x = \frac{P}{\pi} [\alpha - \sin(\alpha) \cos(\alpha + 2\delta)] \quad (3.9)$$

Na expressão (3.9):

$$\delta = \text{atan}\left(\frac{d}{z}\right) \quad (3.10)$$

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{2b + d}{z}\right) - \delta \quad (3.11)$$

O impulso total num determinado intervalo produzido por uma carga distribuída por uma faixa de terreno de desenvolvimento infinito é dada pelo integral da expressão (3.9), substituído α e δ pela expressão (3.10) e (3.11), respectivamente. Contudo, a resolução analítica desse integral não é possível, adoptando-se no programa o algoritmo de Romberg para o cálculo numérico de integrais.

3.4. INTERFACE DO PROGRAMA

3.4.1. INTRODUÇÃO DE DADOS

Na folha inicial tem-se acesso a todos os valores que definem a secção em estudo, como sejam, a profundidade do apoio, a profundidade do nível freático (caso exista), o número de horizontes envolvidos, respectivas espessuras e parâmetros geotécnicos (valores característicos), sobrecargas e cargas permanentes distribuídas por toda a superfície, a relação entre o ângulo de atrito do solo e o ângulo de atrito solo-cortina, como se mostra na Figura 3.8.

Cálculo de Cortinas Mono-Apoiadas (v3.6)

Free Earth Support Method

Dados Geométricos

Profundidade da Base de Escavação m

Profundidade do apoio m

Nível Freático Profund. m

Número de Horizontes un

Propriedades dos Solos

	espessura (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Horizonte 1	4.36	19	5	28
Horizonte 2	0.73	21	20	28
Horizonte 3	20	21	50	35

Projecto

Secção

Dados Relativos ao Carregamento

Sobrecarga à superfície kN/m²

Cargas Permanentes à superfície kN/m²

Outras Cargas Aplicadas à Cortina Definir

Outros Dados

Coefs Impulso delta/fi

Peso Volumico da Água kN/m³

Cálculos

☒ EC7 - Abordagem 1

☒ EC7 - Abordagem 2

☒ Tchibotarioff

☒ Tradicional (Fp=2)

Calcular

Figura 3.8 – Folha de introdução de dados (Folha “Dados”)

O botão “Calcular” inicia o cálculo da cortina segundo os métodos seleccionados.

É ainda possível definir outras cargas para simular, por exemplo, edifícios nas proximidades da cortina. Essa definição é feita na folha “DadosCargas” que se mostra na Figura 3.9.

Definição de Outras Cargas aplicadas à cortina

Volta à Folha de Dados

Cargas Lineares

Número de cargas Lineares aplicadas

	Carga kN/m	Dist. m	Prof. m	Tipo	Aplic
Plin 1	100	10	2	Perm.	Antes
Plin 2	100	15	2	Perm.	Antes

Cargas Distribuídas numa Faixa de Desenvolvimento Infinito

Número de Cargas Distribuídas Aplicadas

	Carga kN/m ²	Largura m	Dist. m	Prof. m	Tipo	Aplic
Pdist 1	30	2	2	0	Variavel	Depois
Pdist 2	150	2	5	0	Perm.	Antes
Pdist 3	150	2	8	0	Perm.	Antes

Figura 3.9 – Folha para definição de cargas lineares e cargas distribuídas por uma faixa de terreno

3.4.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para cada um dos métodos de considerar a segurança, existe uma folha em que são apresentados os resultados detalhados dos impulsos resultantes. São também apresentados os valores de cálculo de todos os parâmetros utilizados e os diagramas de esforços. Na Figura 3.10 é mostrado um exemplo da folha de resultados. Note-se ainda que há a possibilidade de alterar manualmente qualquer um dos parâmetros de cálculo e recalcular.

Tchebotarioff															Recalcular		
Propriedades dos Solos - Valores de Cálculo							Outros Val. Calc.		Outros Coefs		Outras Cargas' (Valores de Cálculo)						
							gama ág										
							9.81										
gama fi delta kah kph c'									FSglobal 1.35		Cargas Lineares Cargas Distrib.						
Camada 1 19 28 18.66667 0.313735 4.434561							5 Cargas Distrib. Sup.		FSficha 1.7								
Camada 2 21 28 18.66667 0.313735 4.434561							20 Sob. 10										
Camada 3 21 35 23.33333 0.227525 7.205708							50 Perm. 12.73		Fp 1								
Impulsos Acima da Base de Escavação																	
Superior Inferior		lah1 lah2		lw1 lw2		lcargas lahc.tec		lph1 lph2		lphc.tec b1 b2		bcargas		Momento Força H			
0 2		11.92194 14.2624		0 0		0 -12.9068		0 0		0 0.783333 0.45		0 0.45		9.948889 13.27758			
2 4.36		8.02921 44.96541		27.31889 0		0 -15.23		0 0		0 3.023333 2.63		0 2.63		185.0733 65.08353			
4.36 5.09		0.935425 18.87601		2.613875 16.90067		0 -18.8439		0 0		0 4.296667 4.175		0 4.175		85.94463 20.48211			
5.09 9.51		24.86984 91.09973		95.82604 133.983		0 -115.97		0 0		0 7.486667 6.75		0 6.907979		1621.803 229.8091			
														Total Acumulado		1902.77 328.6523	
Determinação da Ficha																	
Iteração 1																	
9.51 10.03768		0.354457 16.81395		0 38.87557		0 -17.1684		11.22567 0		233.8311 9.311784		9.223838 0		9.225654 -1902.77 -206.181			
														Total Acumulado		-5.9E-07 122.471	
Dados DadosCargas Resultado EC7 - 1.1 EC7 - 1.2 EC7 - 2 Tchebotarioff Fp=5 Dados Prog																	

Figura 3.10 – Folha de apresentação dos resultados detalhados

Na folha “Resumo” (Figura 3.11) são apresentados os resultados: a altura enterrada (ficha), a força na escora, o momento flector máximo e a profundidade a que ocorre. São ainda apresentadas informações relativas ao cálculo onde serão mencionados erros que eventualmente ocorram no cálculo, nomeadamente no caso de a altura enterrada ultrapassar a profundidade máxima dos horizontes previamente definidos, sendo neste caso apresentado o momento flector por equilibrar.

Resumo dos Valores Calculados mais Relevantes									
EC7 - Abordagem 1.1									
Ficha	0.731 m	Prof (Mmax)	5.752 m	Observações	Calculado com sucesso!				
F escora	182.26 kN/m	Mmax	574.02 kN.m/m	M restante	0.00	F restante	0.00		
EC7 - Abordagem 1.2									
Ficha	0.936 m	Prof (Mmax)	5.679 m	Observações	Calculado com sucesso!				
F escora	153.22 kN/m	Mmax	458.94 kN.m/m	M restante	0.00	F restante	0.00		
EC7 - Abordagem 2									
Ficha	1.064 m	Prof (Mmax)	5.858 m	Observações	Calculado com sucesso!				
F escora	187.62 kN/m	Mmax	602.21 kN.m/m	M restante	0.00	F restante	0.00		
Tradicional (Factor de Segurança Global)									
Ficha	0.897 m	Prof (Mmax)	5.790 m	Observações	Calculado com sucesso!				
F escora	165.34 kN/m	Mmax	535.67 kN.m/m	M restante	0.00	F restante	0.00		
Minoração dos Impulsos Passivos (Fp=2)									
Ficha	1.161 m	Prof (Mmax)	5.981 m	Observações	Calculado com sucesso!				
F escora	129.76 kN/m	Mmax	435.70 kN.m/m	M restante	0.00	F restante	0.00		

Figura 3.11 – Folha de resumo dos resultados

3.5. REQUISITOS PARA O USO DO PROGRAMA

Como foi referido o programa foi concebido com base no Microsoft Excel 2007 sendo este software essencial ao seu uso. Apesar de ser expectável que funcione em versões anteriores em que seja instalado um pacote de compatibilidade fornecido pela Microsoft recomenda-se, o uso da versão mais recente.

Algumas rotinas do programa de cálculo requerem que o suplemento *Solver Add-in* esteja carregado no Excel.

A interface foi optimizada para uma resolução de 1280x800 pixéis. Em resoluções diferentes sugere-se o ajuste do zoom.

3.6. DESCRIÇÃO DAS SUBROTINAS PRINCIPAIS

O programa é constituído por 26 subrotinas e por 7 funções. Todas as subrotinas são comandadas directa ou indirectamente pelo programa principal – subrotina “Calcular” que é executada quando se pressiona o botão “Calcular” na folha de dados – que as vai executando à medida que é necessário.

No Quadro 3.2 apresenta-se a sequência e uma breve descrição das subrotinas principais que são chamadas directamente pela subrotina “Calcular”. A subrotina “Recalc” que é executada ao pressionar o respectivo botão na folha de resultados de cada um dos métodos é semelhante à “Calcular”, com a excepção de utilizar os valores de cálculo presentes na folha de resultados ao invés de os calcular, ou seja, segue a sequência apresentada no Quadro 3.2 não executando a subrotina “ValCalc”.

As restantes subrotinas e funções são utilizadas indirectamente e realizam operações que podem ser tão simples como determinar o estrato presente a determinada profundidade (função Solo), ou tão complexas como calcular o integral das pressões de terras provocadas por uma carga aplicada numa faixa de terreno num determinado intervalo recorrendo a métodos de integração numérica (função IntFdist)

Quadro 3.2 – Subrotinas principais do programa de cálculo

Subrotina "Calcular"	
Vallniciais	- Lê as folhas de dados e armazena todos os valores em variáveis
Notáveis	- A partir posição dos limites inferiores de cada estrato, da posição do nível freático e da profundidade da base da escavação cria listas com os pontos notáveis:
	- pnot1(i1) - Acima da base da escavação e acima do nível freático
	- pnot2(i2) - Acima da base da escavação e abaixo do nível freático
	- pnot3(i3) - Abaixo da base da escavação e acima do nível freático
	- pnot4(i4) - Abaixo da base da escavação e abaixo do nível freático
Nota: As listas que não têm nenhum ponto notável apresentam o valor -1	
ValCalc (Método)	- Lê os dados armazenados pela subrotina Vallniciais
	- Calcula os valores de cálculo de acordo com os coeficientes na folha "DadosProg"
	- Coloca todos os valores de cálculo na folha de resultados correspondente ao Método
	- Coloca os valores dos coeficientes de segurança que são aplicados durante ou após o cálculo (FSglobal, FSficha e Fp) na folha correspondente Método
Impulsos (Método)	- Coloca na folha de resultados correspondente ao Método as expressões para:
	- Cálculo dos Impulsos em todas as camadas
	- Cálculo dos braços dos impulsos em relação à escora
	- Somatório dos momentos flectores em relação à escora de cada camada e acumulados
	- Somatório dos impulsos para cada camada e acumulados
	- Determina a que profundidade se obtém o equilíbrio de momentos
CalcMmax (Método)	- Coloca na folha "Resumo" o valor da altura enterrada (ficha) e da força na escora
	- Calcula o momento máximo e a profundidade a que ocorre e coloca os resultados na folha "Resumo"
Diagramas (Método)	- Calcula os diagramas de momentos flectores e de esforços transversos
	- Gera os gráficos de momentos e esforços transversos

3.7. EXEMPLO DE APLICAÇÃO. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

3.7.1. CONSIDERAÇÕES

Durante a elaboração do programa de cálculo, cada passo do cálculo foi exaustivamente testado. Contudo, dadas as inúmeras particularidades que podem surgir, apenas uma utilização recorrente permite a eliminação de eventuais erros que possam permanecer. Assim, ao longo da elaboração deste trabalho e com o prosseguir dos cálculos efectuados com o recurso ao programa de cálculo (apresentados no Capítulo 4) foi feita uma análise crítica dos resultados o que permitiu a correcção de alguns erros.

Com os cálculos apresentados neste ponto pretende-se usar o programa no cálculo da secção fictícia apresentada na Figura 3.12 em que foram incluídas várias particularidades. A carga de 30 kN/m² é uma carga variável e considera-se que só é aplicada após a execução da cortina.

Os resultados obtidos pelo programa de cálculo são posteriormente confrontados com alguns cálculos manuais de forma a validá-los.

As propriedades de resistência consideradas para os solos são as apresentadas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Propriedades dos solos que constituem os horizontes considerados para a secção fictícia

Horizonte	Espessura (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
A	7	20	0	25
B	8	20	10	25
C	-	22	50	35

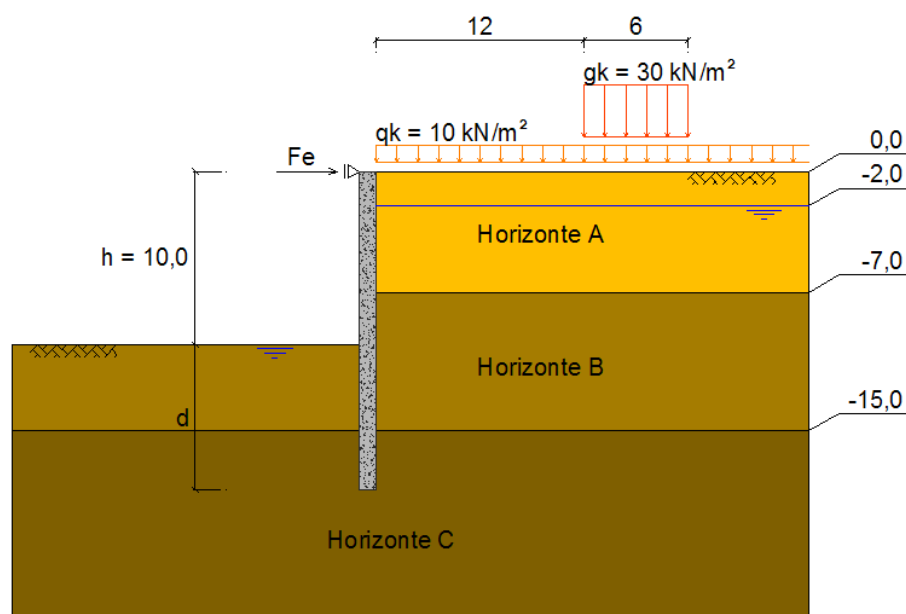


Figura 3.12 – Esquema da secção

Em relação ao método de considerar a segurança, dado que em todos os que o programa admite o algoritmo é o mesmo variando apenas os coeficientes de segurança, apenas se apresentam os resultados relativos aos cálculos efectuados segundo a Abordagem 1.2. Saliente-se que foi verificada a correcta aplicação dos coeficientes de segurança nos restantes métodos.

O estudo de todas as situações particulares que possam eventualmente surgir não é aqui apresentado dado que envolveria o cálculo de inúmeras secções.

O procedimento utilizado para validar os resultados foi baseado no cálculo efectuado pelo próprio programa.

3.7.2. INSERÇÃO DOS DADOS DA SECÇÃO

Como referido em 3.4.1, os dados gerais da secção são definidos na folha “Dados” e os dados relativos à carga distribuída por uma faixa de terreno são inseridos na folha “DadosCargas”.

A introdução dos dados geométricos da secção e das propriedades dos horizontes é feita como se apresenta na Figura 3.13. Note-se que se admitiu uma espessura de 10 m para o último horizonte. Caso a altura enterrada calculada ultrapassasse esta profundidade o programa geraria um erro e não seriam obtidos resultados.

Os dados relativos ao carregamento são introduzidos conforme se apresenta na Figura 3.14 sendo completados pelos introduzidos na folha “DadosCargas” como se mostra na Figura 3.15.

Dados Geométricos				
Profundidade da Base de Escavação				10 m
Profundidade do apoio				0 m
Nível Freático	Existente (indicar profundidade)	v	Profund.	2 m
Número de Horizontes				3 un

Propriedades dos Solos				
	espessura (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (o)
Horizonte 1	7	20	0	25
Horizonte 2	8	20	10	25
Horizonte 3	10	22	50	35

Figura 3.13 – Introdução dos dados geométricos e das propriedades dos horizontes

Dados Relativos ao Carregamento	
Sobrecarga à superfície	10 kN/m ²
Cargas Permanentes à superfície	0 kN/m ²
Outras Cargas Aplicadas à Cortina	☐ Sim <input checked="" type="button" value="Definir"/>
Outros Dados	
Coefs Impulso	Caquot-Kérisel delta/fi 0.666667
Peso Volumico da Água	9.81 kN/m ³

Figura 3.14 – Introdução dos dados relativos ao carregamento

Cargas Distribuídas numa Faixa de Desenvolvimento Infinito						
Número de Cargas Distribuídas Aplicadas						1
	Carga kN/m ²	Largura m	Dist. m	Prof. m	Tipo	Aplic
Pdist 1	30	6	12	0	Variavel	Depois

Figura 3.15 – Introdução dos dados relativos à carga distribuída por uma faixa de terreno

3.7.3. RESULTADOS

Como se pode observar pela análise da Figura 3.16, o equilíbrio de momentos é atingido para uma profundidade de 15,9 m, o que corresponde a uma altura enterrada de 5,9 m e a uma força na escora de 440,3 kN.m/m.

Verifica-se que os coeficientes de segurança são correctamente aplicados às propriedades resistentes dos solos e às sobrecargas. Note-se ainda que em relação à carga distribuída por uma faixa de terreno de 30 kN/m², identificada no programa como *Pdist1*, além do coeficiente de segurança de 1,3 que é aplicado por ser uma carga variável, é aplicado um factor de 2,0 por ser aplicada após a execução da cortina, o que explica o valor de cálculo de 78 kN/m² apresentado na folha de resultados.

Na Figura 3.17 apresentam-se as pressões de terras e água decompostas pelas suas componentes calculadas manualmente e na Figura 3.18 apresentam-se os impulsos e os respectivos pontos de aplicação.

EC7 - 1.2																	Recalcular	
Propriedades dos Solos - Valores de Cálculo																	Outras Cargas' (Valores de Cálculo)	
	gama	fi	delta	kah	kph	c'	Outros Val. Calc.		Outros Coefs		Cargas Lineares		Cargas Distrib.					
							gama ág	9.81										
Camada 1	20	20.458	13.639	0.433	2.695	0	Cargas Distrib. Sup.		Fsglobal	1			Cargas Distrib.		Pdist 1	78		
Camada 2	20	20.458	13.639	0.433	2.695	8 Sob.	13		Fsficha	1								
Camada 3	22	29.256	19.504	0.297	4.824	40 Perm.	0		Fp	1								
Impulsos Acima da Base de Escavação																		
Superior	Inferior		lah1	lah2	lw1	lw2	lcargas	lahc.tec	lph1	lph2	lphc.tec	b1	b2	bcargas	M	Fh		
0.000	2.000		17.329	11.264	0.000	0.000	2.706	0.000	0.000	0.000	0.000	1.333	1.000	1.407	38.2	31.3		
2.000	7.000		55.183	114.807	122.625	0.000	24.612	0.000	0.000	0.000	0.000	5.333	4.500	4.934	1586.4	317.2		
7.000	10.000		19.866	135.104	44.145	147.150	19.270	-36.463	0.000	0.000	0.000	9.000	8.500	8.499	2829.1	329.1		
Determininção da Ficha																	Total Acumulado	
Iteração 1	10.000	15.000	55.183	291.393	0.000	392.400	28.388	-60.772	343.272	0.000	181.744	13.333	12.500	12.339	2025.1	181.6		
Total Acumulado																	6478.7 859.2	
Iteração 2	15.000	15.918	1.524	50.514	0.000	72.067	4.360	-46.124	24.791	225.680	250.723	15.612	15.459	15.452	15.459	-418.9		
Total Acumulado																	0.0 440.3	

Figura 3.16 – Resultados detalhados obtidos pelo programa de cálculo

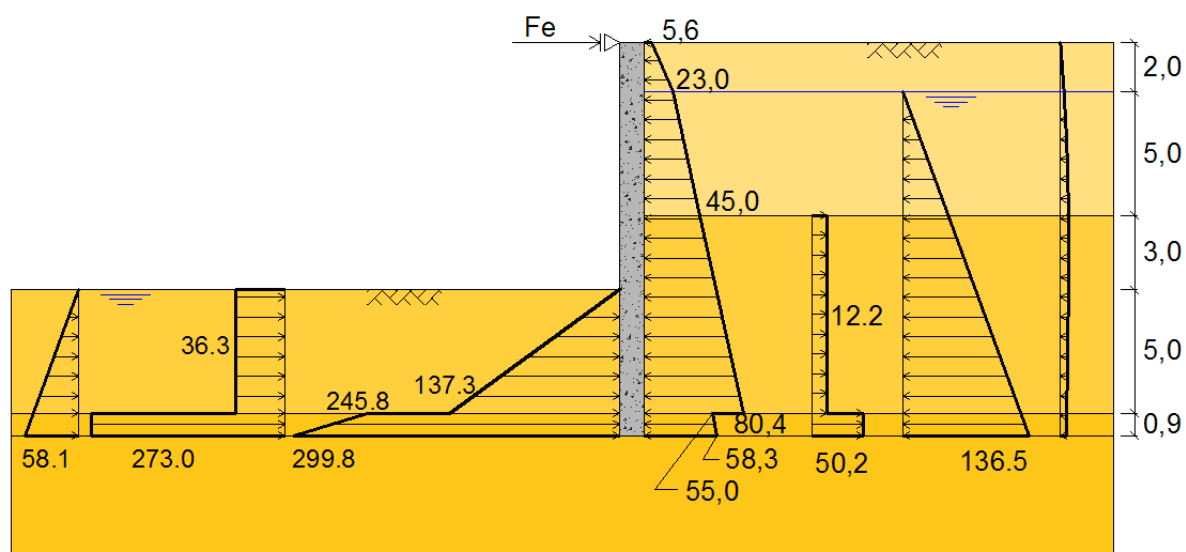


Figura 3.17 – Diagramas pressões calculados manualmente

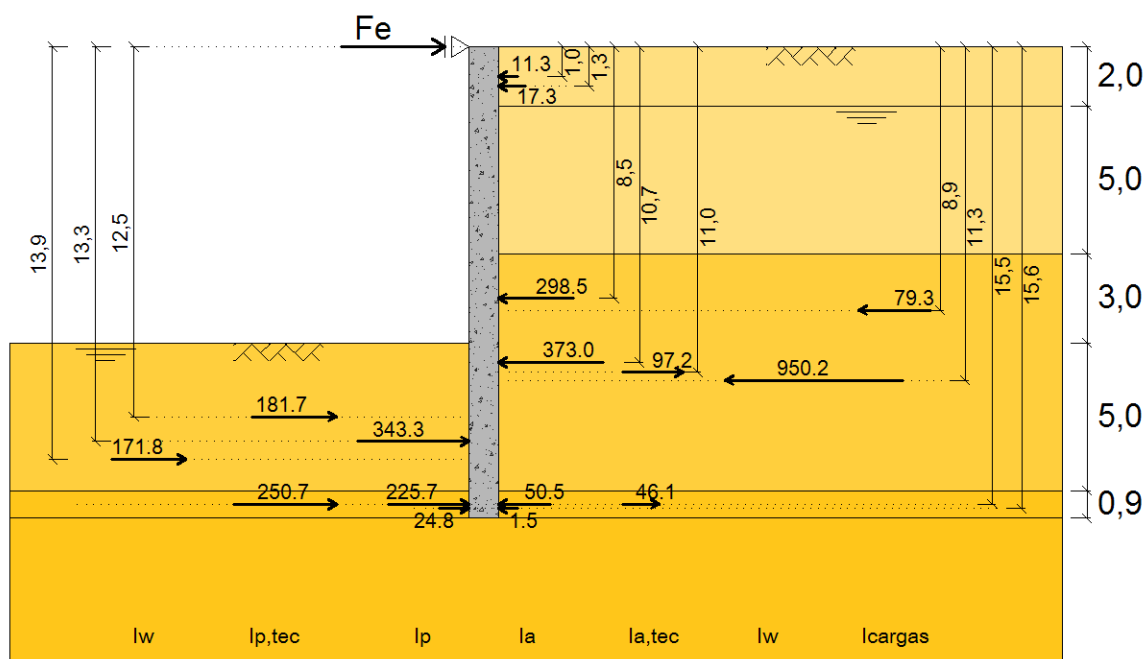


Figura 3.18 – Impulsos actuantes sobre a cortina

Como se observa nos resultados apresentados no Quadro 3.4, quando calculado manualmente obteve-se o mesmo valor para a força na escora, ou seja, 440,3 kN/m. O somatório dos momentos em relação à escora obtido não é nulo mas tal facto é facilmente explicável pelos arredondamentos efectuados no cálculo manual.

Quadro 3.4 – Cálculo do somatório de impulsos e momentos flectores

	Força (kN/m)	Braço (kN)	Momento (kN.m/m)
Activo			
Ia	11.3	1.0	11.3
	17.3	1.3	22.5
	298.5	8.5	2537.2
	373.0	10.7	3991.5
	50.5	15.5	783.0
	1.5	15.6	23.8
Ia,tec	-97.2	11.0	-1069.6
	-46.1	15.5	-714.9
Iw	950.2	11.3	10737.2
Icargas	79.3	8.9	706.1
Passivo			
Ip	-343.3	13.3	-4565.5
	-225.7	15.5	-3498.0
	-24.8	15.6	-386.7
Ia,tec	-181.7	12.5	-2271.8
	-250.7	15.5	-3886.2
Iw	-171.8	13.9	-2388.1
Total	440.3		31.6

4

CÁLCULOS PELO MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE. PRÉ-DIMENSIONAMENTO.

4.1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de estruturas de suporte monoapoiadas é frequentemente baseado em cálculos aproximados de equilíbrio limite, sendo aplicados coeficientes de segurança para assegurar a estabilidade e para reduzir os movimentos do solo e os deslocamentos da estrutura a níveis aceitáveis.

Com o desenvolvimento actual dos métodos de cálculo numéricos, e em especial em escavações em que é essencial prever os assentamentos resultantes da sua execução, os cálculos de equilíbrio limite são sobretudo utilizados como forma de pré-dimensionamento fornecendo resultados que permitem uma posterior análise recorrendo a métodos numéricos de elementos finitos.

O presente capítulo incide sobre as análises efectuadas pelo método de equilíbrio limite recorrendo para tal ao programa de cálculo apresentado no Capítulo 3.

4.2. BASES DE CÁLCULO

4.2.1. CÁLCULO DE CORTINAS MONOAPOIADAS

As cortinas de estacas monoapoiadas foram pré-dimensionadas recorrendo ao método “Free Earth Support”, que admite um apoio simples no pé da cortina.

Os coeficientes de impulsos passivos e activos foram definidos de acordo com as tabelas de Caquot-Kérisel por ser este um método que fornece resultados do lado da segurança. Para os valores do ângulo de atrito solo-cortina (δ) admitiu-se o valor de $2/3$ do ângulo de atrito do respectivo solo (ϕ').

Como os solos envolvidos são coesivos, e em algumas zonas apresentam valores para a coesão consideravelmente elevados, nos cálculos em que se considera o contributo da coesão as pressões transmitidas pelos solos à cortina foram obtidas recorrendo ao teorema dos estados correspondentes.

Nas secções em que o nível freático se situa acima da base de escavação as pressões da água foram calculadas admitindo que não ocorre percolação, ou seja, para a situação hidrostática. Esta

simplificação, que corresponde a admitir que a cortina penetra num estrato impermeável facilita o cálculo e, apesar de se sobrestimar os impulsos de água do lado do terreno e subestimar os do lado da escavação, isso implica que as tensões efectivas se alterem de forma oposta. Estes dois efeitos compensam-se parcialmente sendo o erro cometido, conforme se comprovará adiante, pouco significativo.

4.2.2. CONSIDERAÇÃO DA SEGURANÇA

A consideração da segurança foi feita de acordo com a Abordagem de Cálculo 1 prevista no Eurocódigo 7 (EN 1997-1:2004), que é a forma adoptada por esta norma para Portugal. Contudo, de forma a comprovar a adequação desta forma de considerar a segurança, adicionalmente foram estudadas outras que servirão como meio de comparação, as quais se passa a citar: Abordagem de Cálculo 2 do Eurocódigo 7; Tschebotarioff (Coeficientes Globais de Segurança); Tradicional (minoração dos impulsos passivos, $F_p=2$).

Os coeficientes de segurança preconizados por cada um dos métodos são os apresentados em 3.2.

4.2.3. DEFINIÇÃO DAS SECÇÕES DE REFERÊNCIA

Para as várias zonas em estudo, foram escolhidas as secções mais representativas tendo o cuidado de incluir as mais desfavoráveis (para que o dimensionamento seja seguro) e, nas zonas em que se justifique, outras não tão desfavoráveis de forma a prevenir o sobredimensionamento. Para tal, seguiram-se critérios básicos em relação aos seguintes parâmetros:

- profundidade da escavação;
- posição do nível freático;
- presença e proximidade de edifícios;
- propriedades resistentes dos maciços interessados;
- inclinação da superfície do terreno.

Convém ainda salientar que certas secções com características particulares que ocorrem pontualmente ao longo da obra, como sejam zonas com saídas de emergência ou abrigos, não foram incluídas neste trabalho. Com base nestes critérios foram escolhidas 11 secções a analisar.

Em todas as secções se considerou uma sobrecarga distribuída à superfície de 10 kN/m^2 e, nas secções em que a cota da superfície do terreno é superior à cota do topo da cortina de estacas, considerou-se uma sobrecarga uniforme distribuída à superfície equivalente à altura de solo adicional acima do topo da cortina.

Nas secções em que existem edifícios nas proximidades estes foram simulados considerando uma carga distribuída por uma faixa de terreno com a largura do edifício equivalente a $10 \text{ kN/m}^2/\text{pisso}$.

Nas Figuras 4.1 à 4.11 esquematiza-se a geometria simplificada para fins de cálculo recorrendo ao programa de equilíbrio limite e as sobrecargas a que estão sujeitas todas as secções estudadas.

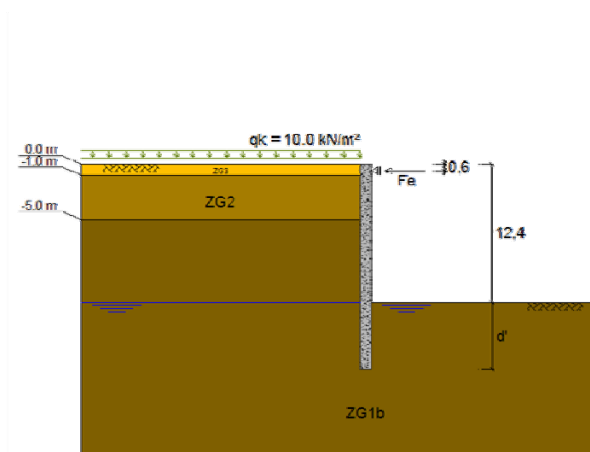


Figura 4.1 – Secção 1A (km 0+678) – do km 0+650 ao 0+694.

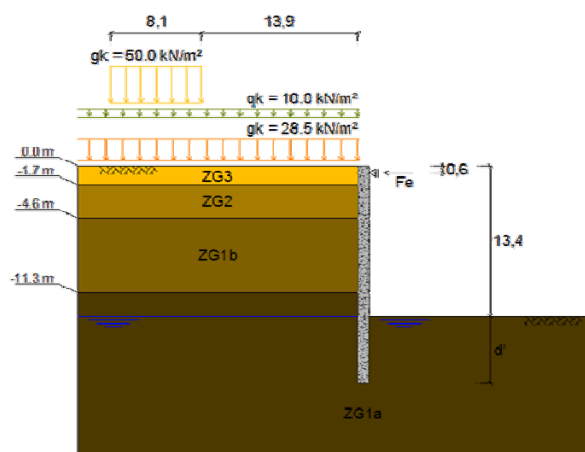


Figura 4.2 – Secção 1C (km 0+878) – do km 0+850 ao km 0+925

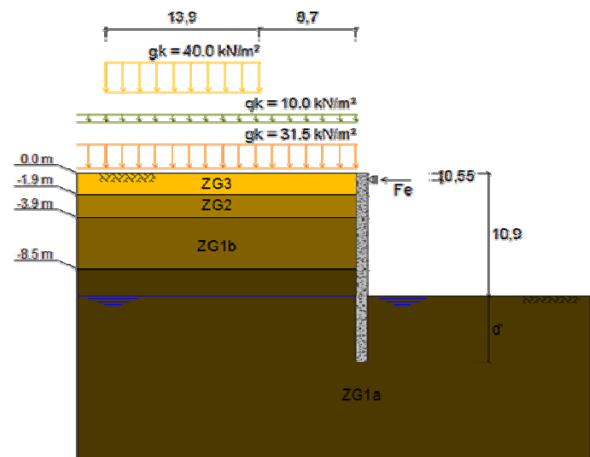


Figura 4.3 – Secção 1D (km 0+975) – do km 0+925 ao km 1+000

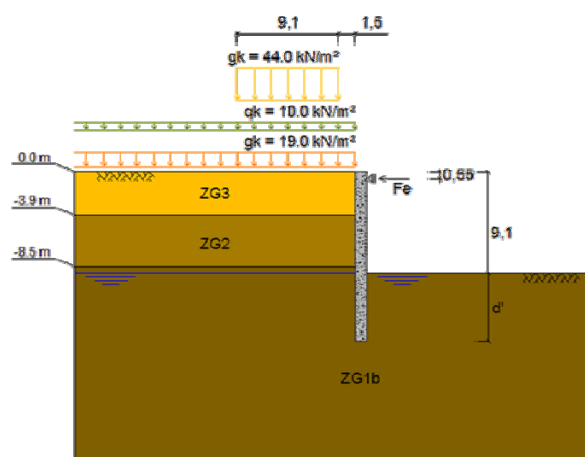


Figura 4.4 – Secção 2A (km 1+170) – do km 1+100 ao km 1+190

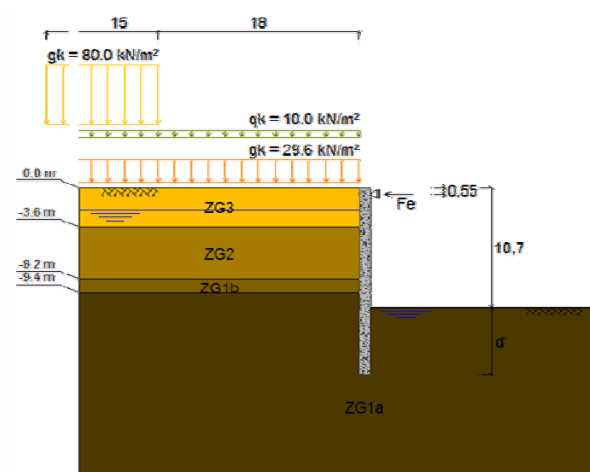


Figura 4.5 – Secção 2B1 (km 1+250) – do km 1+190 ao km 1+280

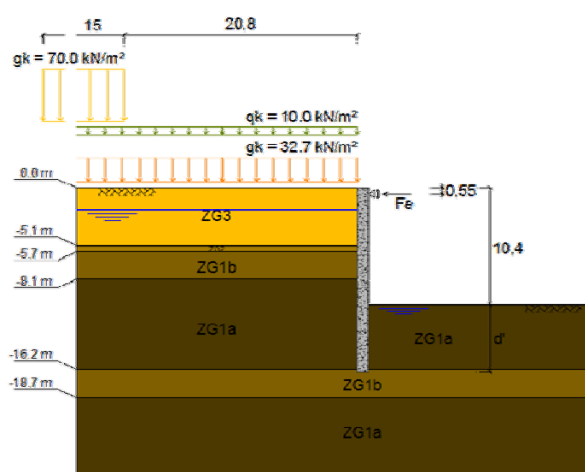


Figura 4.6 – Secção 2B2 (km 1+350) – do km 1+280 ao km 1+360

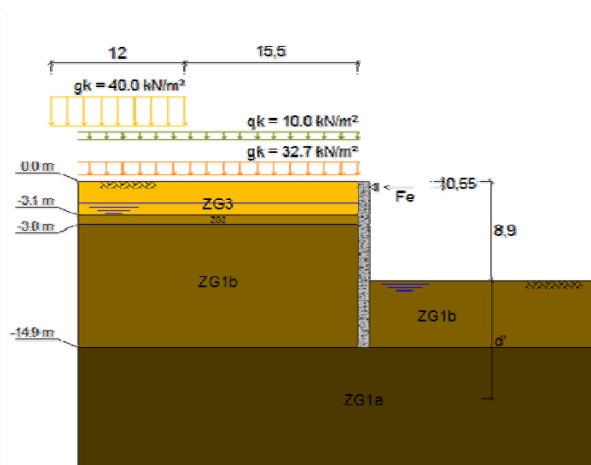


Figura 4.7 – Secção 2B3 (km 1+387) – do km 1+360 ao km 1+425

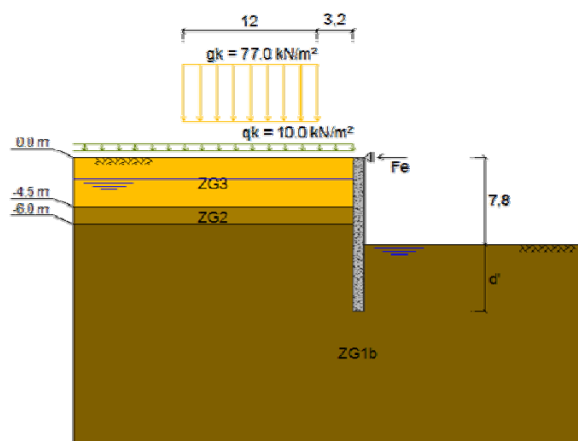


Figura 4.8 – Secção 2B4 (km 1+450) – do km 1+425 ao km 1+500

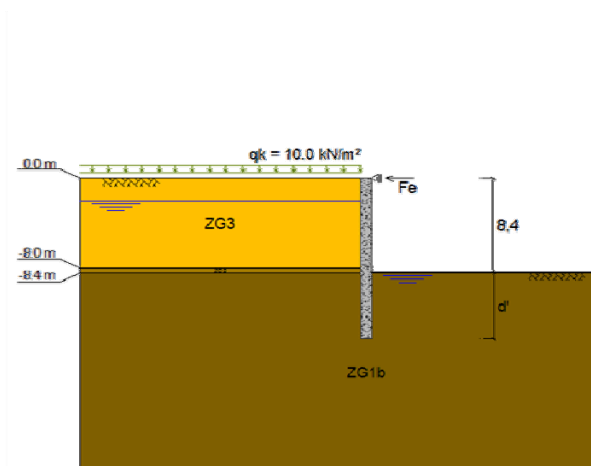


Figura 4.9 – Secção 2C (km 1+528) – do km 1+500 ao km 1+550

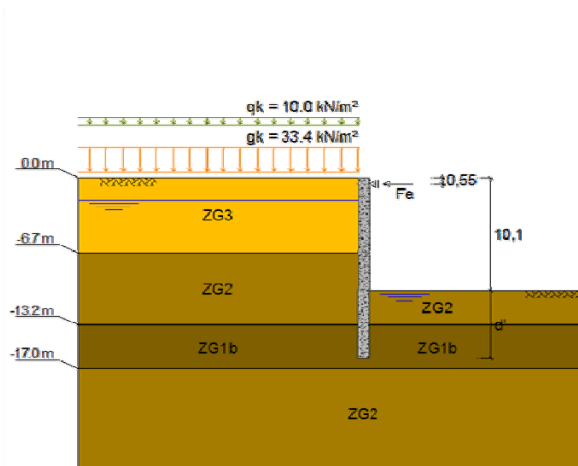


Figura 4.10 – Secção 4.1 (km 1+928) – do km 1+900 ao km 1+990 e do km 2+030 ao km 2+096

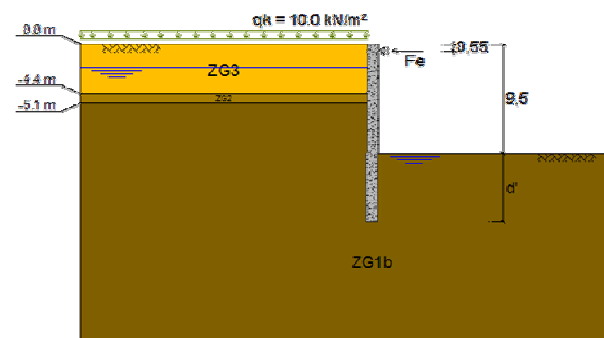


Figura 4.11 – Secção 4.2 (km 2+000) – do km 1+990 ao km 2+030

4.2.4. PARÂMETROS DE CÁLCULO

Os estudos efectuados neste capítulo centram-se essencialmente na forma como vários factores interferem no pré-dimensionamento das cortinas, mais particularmente nos esforços máximos produzidos e na altura enterrada da cortina.

Para os parâmetros geotécnicos utilizaram-se valores característicos apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Parâmetros geotécnicos considerados nos cálculos por equilíbrio limite

Zona Geotécnica	Parâmetro Geotécnicos		
	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
ZG 3	19	5	28
ZG 2	21	20	28
ZG 1b	21	50	35
ZG 1a	23	90	35

4.2.5. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

Todas as secções de referência foram calculadas de acordo com os esquemas apresentados em 4.2.3.

Como os maciços interessados pelas escavações apresentam em geral valores elevados para a coesão efectiva, decidiu-se analisar as secções de duas formas. Numa fase inicial, calcularam-se as secções pelo método de equilíbrio limite desprezando a coesão. Posteriormente foram recalculadas considerando a coesão.

Com estes dois cálculos pretende-se balizar os valores a utilizar para o dimensionamento além de dar uma ideia da influência da coesão nos resultados obtidos.

Cada uma das secções foi calculada introduzindo a segurança das quatro formas distintas de considerar a segurança, referidas em 4.2.2, permitindo assim uma comparação dos resultados obtidos.

De forma a quantificar a influência na dimensão da ficha e nos esforços da cortina, da presença de edifícios nas secções em que estes se encontram próximos, nessas secções foram efectuados dois cálculos: num deles admitiu-se que não existiam, considerando-se apenas uma sobrecarga à superfície de 10 kN/m²; no outro, a presença dos edifícios foi simulada considerando um carregamento uniforme numa faixa de largura idêntica à do edifício e de valor igual a 10 kN/m²/pisos. A introdução dos edifícios no cálculo foi efectuada recorrendo às expressões da teoria da elasticidade.

4.3. CÁLCULO DAS SECÇÕES DE REFERÊNCIA. RESULTADOS

4.3.1. CÁLCULOS DESPREZANDO A COESÃO

Altura enterrada

Na Figura 4.12 apresenta-se de forma gráfica os valores da altura enterrada para as secções de referência, calculados segundo os cinco métodos de considerar a segurança, desprezando a coesão dos solos.

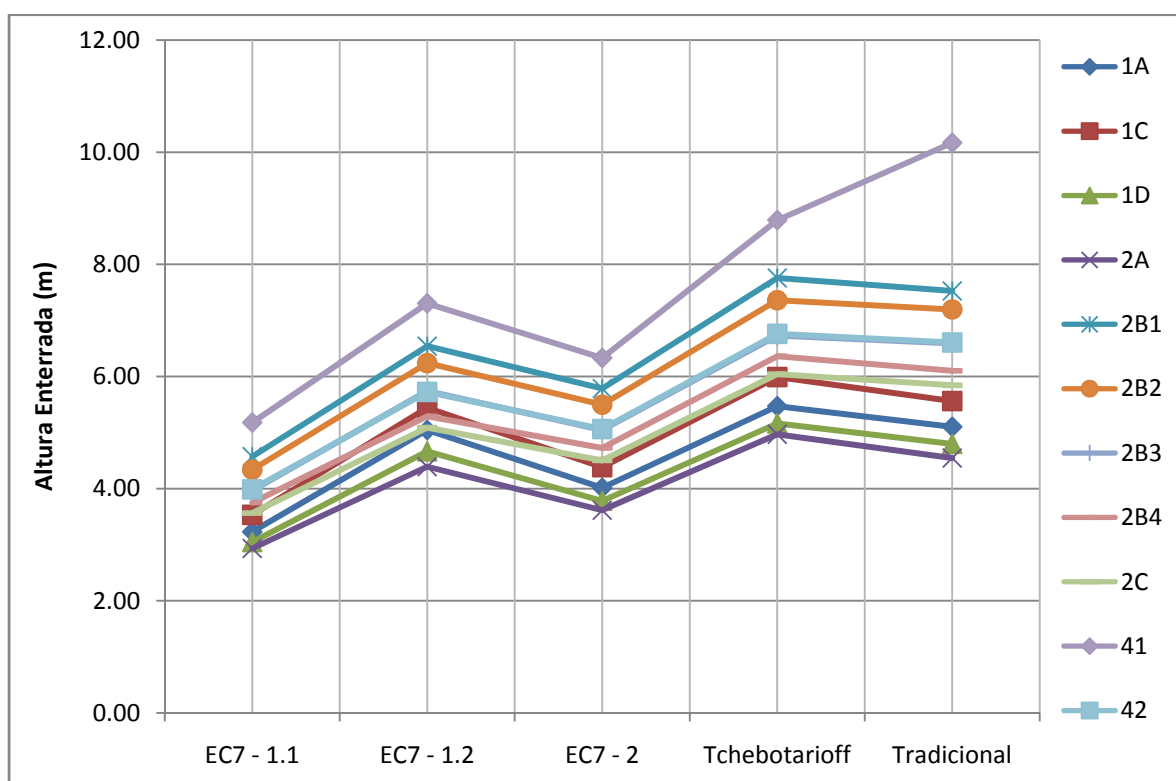


Figura 4.12 – Altura enterrada calculada para as secções de referência, desprezando a coesão, pelos cinco métodos de considerar a segurança.

É de salientar desde já que, nos métodos previstos no EC7, em todas as secções o valor da ficha é maior na Abordagem de Cálculo 1, sendo o seu valor máximo obtido para a Combinação 2.

Em geral, nas secções estudadas, em termos de condicionamento para a altura enterrada, os métodos estudados ficam ordenados da seguinte forma (por ordem decrescente dos resultados): Tchebotarioff, Tradicional, EC7-1.2, EC7-2, EC7-1.1.

A única secção em que o método de Tchebotarioff não é o mais condicionante é a 4.1 ao km 1+928, sendo neste caso o Tradicional o método mais condicionante. Tal discrepância em relação a todas as outras secções pode ser explicada pelo facto de os horizontes com piores características de resistência (ZG1 e ZG2) serem nesta secção mais espessos do que em todas as outras, sendo apenas atingida uma zona com melhores características de resistência (ZG1b) cerca de 3 m abaixo da base de escavação.

Estes factos, combinados com a minoração dos impulsos passivos por um factor de 2, tornam método Tradicional o mais condicionante para esta secção.

Momento flector máximo

Na Figura 4.13 apresenta-se de forma gráfica os valores do momento flector máximo, para as secções de referência, calculados segundo os cinco métodos de considerar a segurança, desprezando a coesão dos solos.

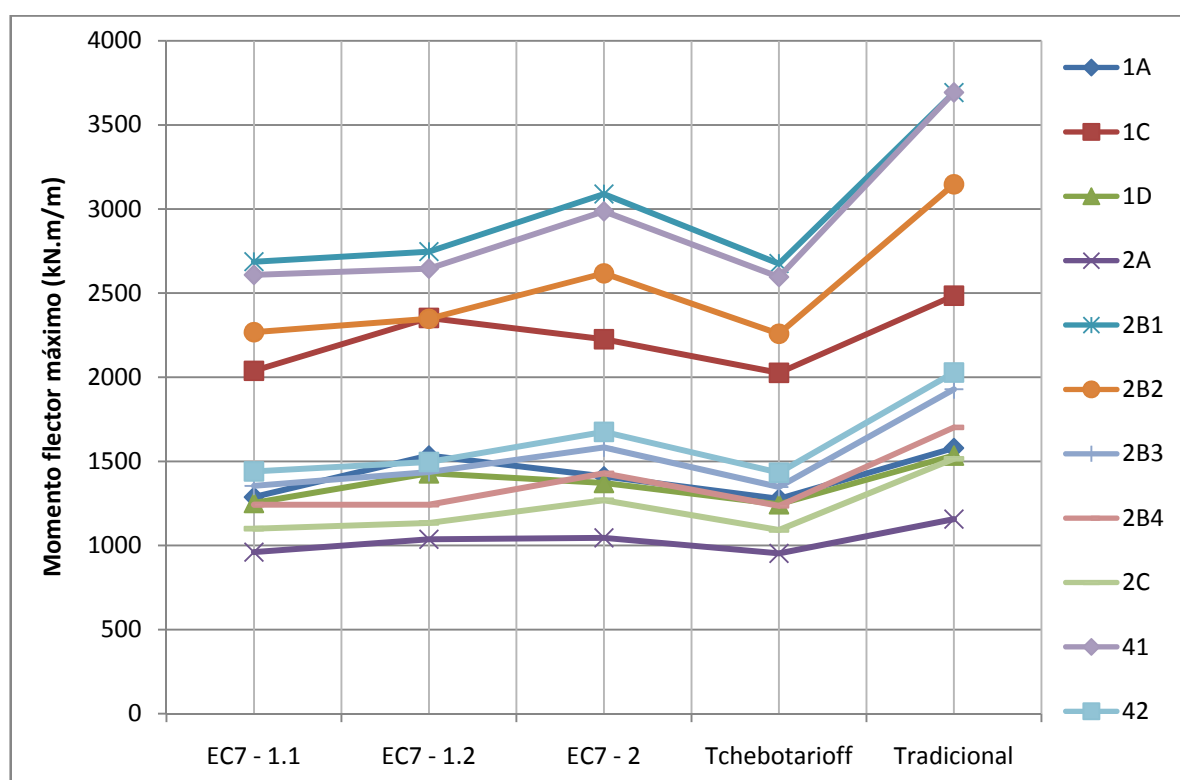


Figura 4.13 – Momento flector máximo calculado para as secções de referência, desprezando a coesão, pelos cinco métodos de considerar a segurança.

Relativamente ao momento flector máximo, verifica-se que para as duas combinações da Abordagem de Cálculo 1 do EC7 os valores são sempre muito próximos, com os obtidos pela Combinação 2 sempre ligeiramente superiores.

Contrariamente com o que acontece com a altura enterrada, as diferentes formas de considerar a segurança não influenciam de forma tão significativa o momento flector máximo obtido sendo, o método Tradicional o mais condicionante.

Profundidade do momento máximo

Na Figura 4.14 apresenta-se de forma gráfica a profundidade em que ocorre o momento flector máximo para as secções de referência, calculada segundo os cinco métodos de considerar a segurança, desprezando a coesão dos solos.

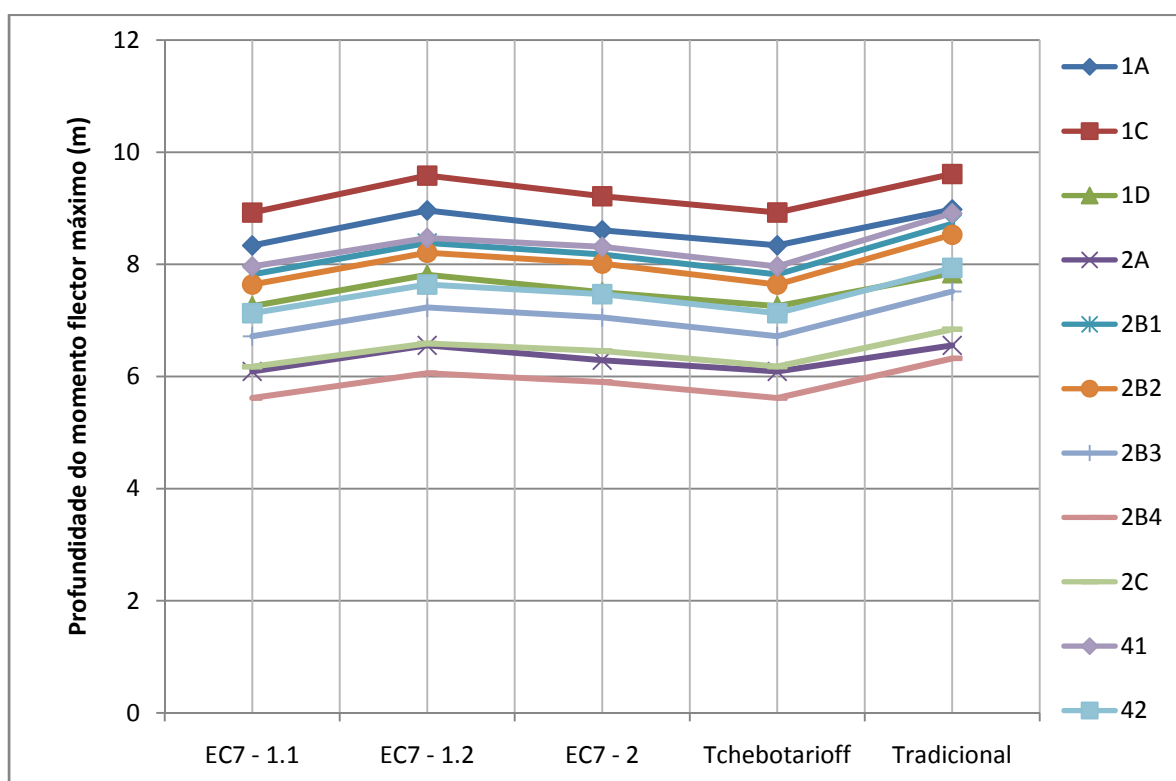


Figura 4.14 – Profundidade do momento flector máximo calculada para as secções de referência, desprezando a coesão, pelos cinco métodos de considerar a segurança.

No que diz respeito à Abordagem de Cálculo 1 do EC7 observa-se que na Combinação 2 o momento máximo ocorre a uma profundidade maior. Em conjunto com o facto de nas duas combinações se obterem momentos máximos próximos, como se constatou na análise da Figura 4.13, pode-se desde já antever que as duas combinações poderão ser condicionantes no que diz respeito aos diagramas de esforços para dimensionamento.

Pela observação da Figura 4.14 pode constatar-se que os vários métodos não introduzem alterações significativas no local onde ocorre o momento máximo.

Força na escora

Na Figura 4.15 apresenta-se de forma gráfica a força transmitida à escora, para as secções de referência, calculada segundo os cinco métodos de considerar a segurança.

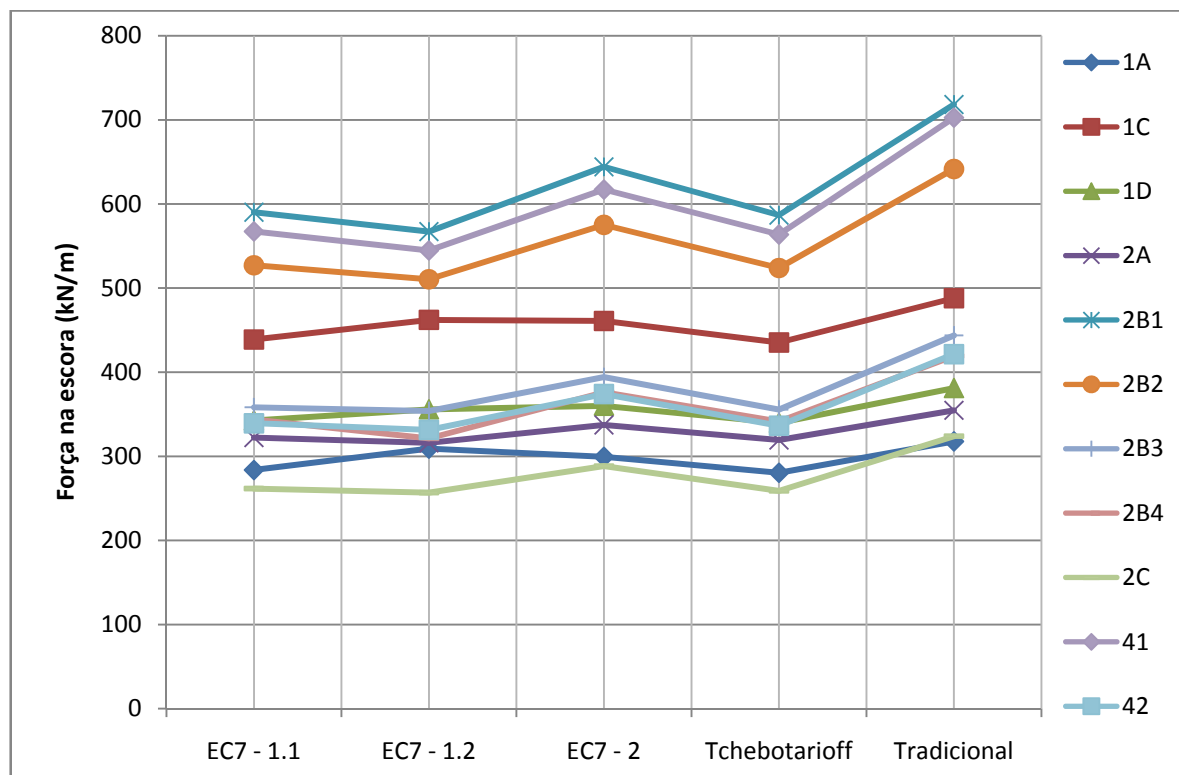


Figura 4.15 – Força na escora calculada para as secções de referência, desprezando a coesão, pelos cinco métodos de considerar a segurança.

Em relação à força transmitida à escora, a Abordagem de Cálculo 1 do EC7, na maior parte das secções, é limitada pela Combinação 1. As secções em que isso não acontece, são as implantadas em terrenos com piores propriedades de resistência.

De uma forma geral, os métodos que implicam uma altura enterrada maior são os que conduzem a esforços menores na escora.

4.3.2. CÁLCULOS CONSIDERANDO A COESÃO

Altura enterrada

Na Figura 4.16 apresenta-se de forma gráfica os valores da altura enterrada para as secções de referência, calculados segundo os cinco métodos de considerar a segurança.

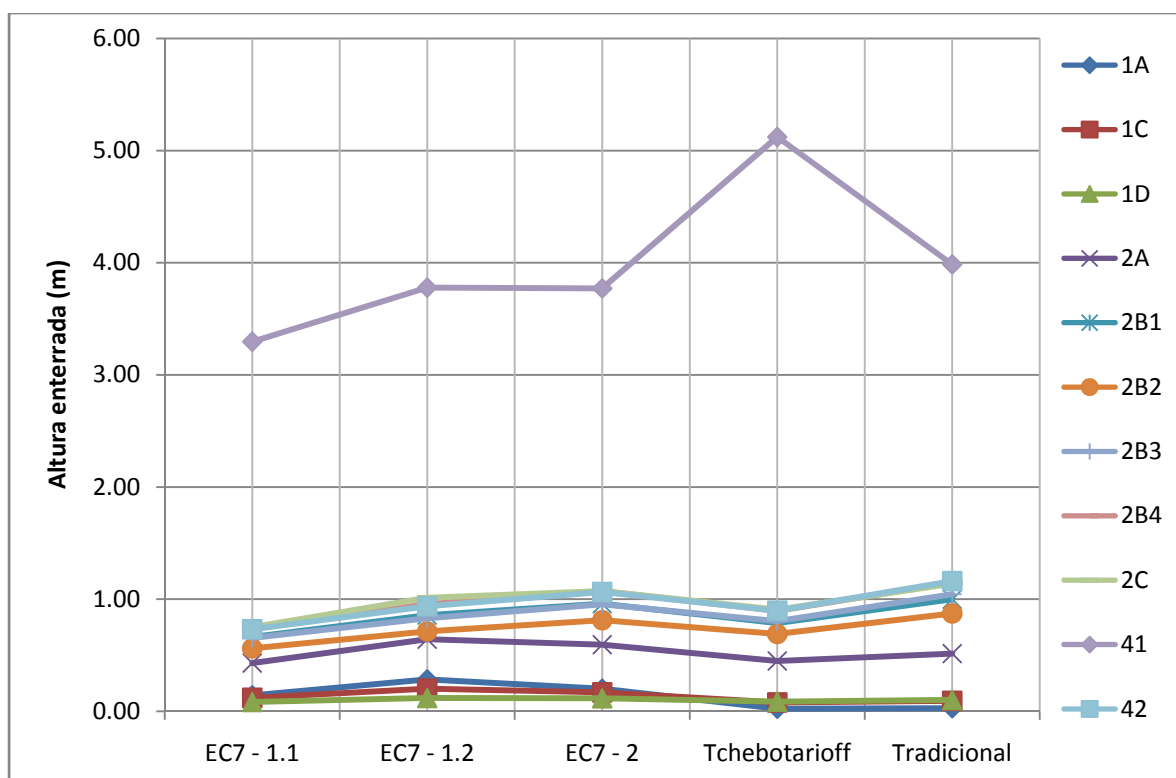


Figura 4.16 – Altura enterrada calculada para as secções de referência, pelos cinco métodos de considerar a segurança.

Tal como acontece para o caso em que se considerou a coesão nula, dos métodos previstos na Abordagem de Cálculo 1 do EC7, a Abordagem 1.2 é a mais condicionante no que diz respeito à altura enterrada.

A altura enterrada calculada pela Abordagem 2, ao contrário do que acontece quando se despreza a coesão, é em geral ligeiramente superior à obtida na Abordagem 1.2, o que é explicado pelo facto de o impulso passivo ser muito superior e pela minoração que a Abordagem 2 impõe. Da mesma forma a tendência nos métodos de Tchegotarioff e Tradicional também se inverte, sendo agora o Tradicional o mais condicionante, com a excepção da secção 4.2.

Como se pode ver na Figura 4.16, as alturas enterradas agora calculadas são muito inferiores. Apesar de se terem introduzido coeficientes de segurança no cálculo e de os valores calculados serem teoricamente correctos, não é de todo aceitável a consideração, no dimensionamento, de alturas enterradas tão pequenas.

O perigo de considerar alturas enterradas muito pequenas é evidenciado pelos resultados relativos à secção 4.2, onde devido a uma maior persistência dos horizontes pertencentes às zonas geotécnicas ZG1 e ZG2, com piores características de resistência, se elevam em grande medida os valores da altura enterrada.

Momento flector máximo

Na Figura 4.17 apresenta-se de forma gráfica os valores do momento flector máximo, para as secções de referência, calculados segundo os cinco métodos de considerar a segurança.

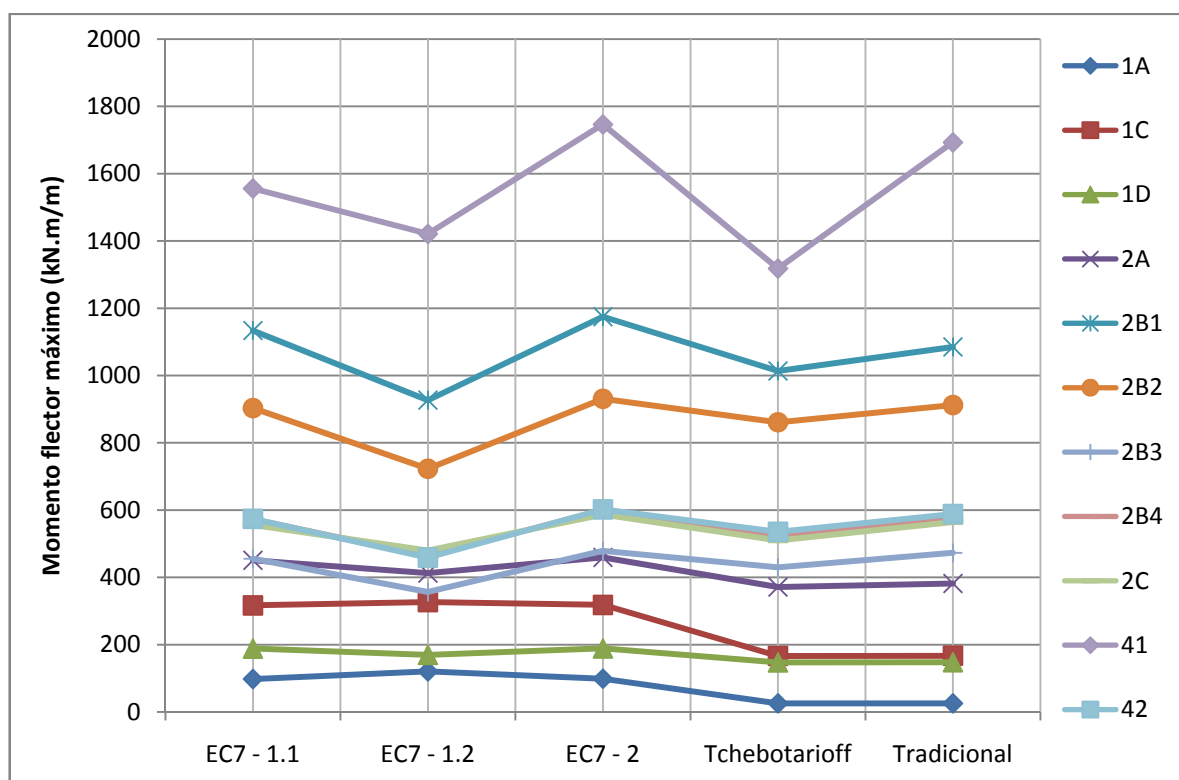


Figura 4.17 – Momento flector máximo calculado para as secções de referência, pelos cinco métodos de considerar a segurança.

No que diz respeito ao momento flector máximo a tendência, que se constatou nos cálculos sem coesão, de a Combinação 2 ser a mais condicionante da Abordagem de Cálculo 1 do EC7, já não ocorre quando se considera a coesão, verificando-se que, na maior parte das secções, passa a ser a Combinação 1 a condicionante. De todos os métodos estudados, no que diz respeito ao momento flector máximo, o mais conservativo é a Abordagem de Cálculo 2 do EC7.

Profundidade do momento máximo

Na Figura 4.18 apresenta-se de forma gráfica a profundidade a que ocorre o momento flector máximo, para as secções de referência, calculada segundo os cinco métodos de considerar a segurança.

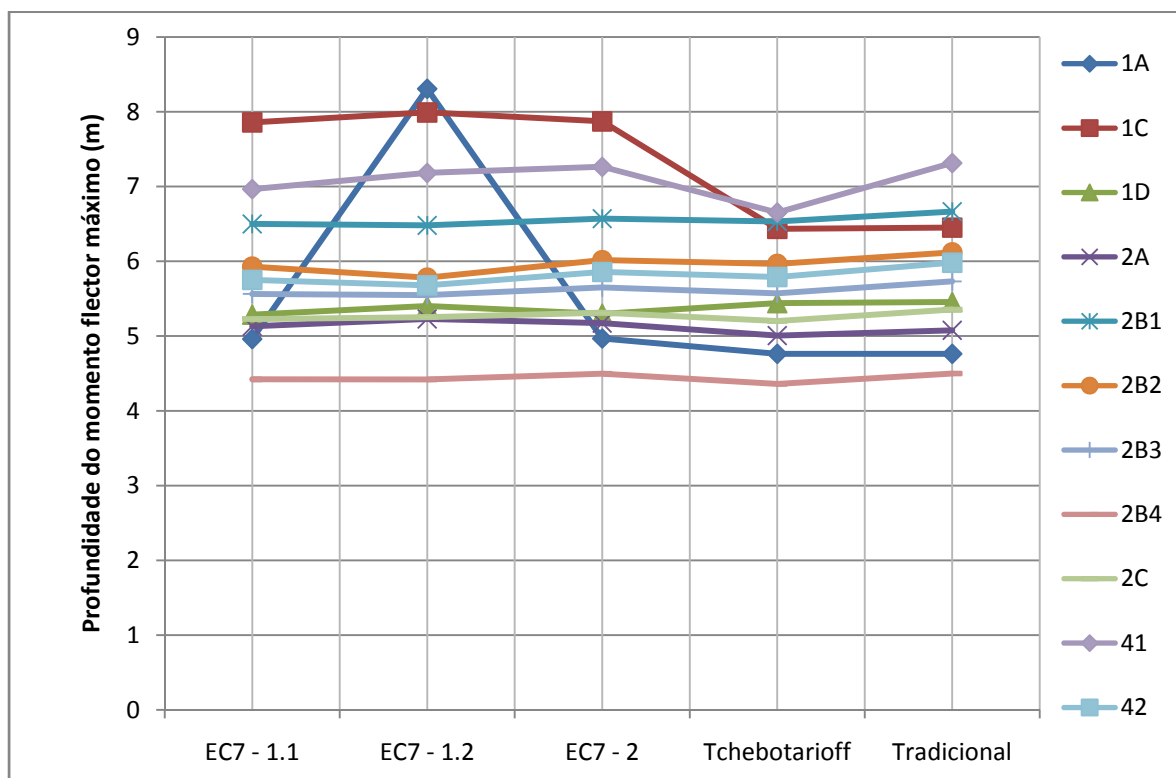


Figura 4.18 – Profundidade do momento flector máximo calculada para as secções de referência, pelos cinco métodos de considerar a segurança.

Como se pode observar na Figura 4.18, em geral a profundidade a que ocorre o momento flector máximo não varia muito nos diferentes métodos. Contudo, em certas secções, em especial para a secção 1A, ocorre uma diferença muito significativa na Abordagem 1.2. Essa diferença deve-se ao facto de ocorrer numa zona onde, devido às boas propriedades de resistência dos solos, praticamente não existem pressões transmitidas à cortina o que faz com que pequenas diferenças impostas pelos diferentes métodos podem fazer com que o momento flector máximo ocorra antes ou depois da zona onde não há pressões.

Força na escora

Na Figura 4.19 apresenta-se de forma gráfica a força transmitida à escora, para as secções de referência, calculada segundo os cinco métodos de considerar a segurança.

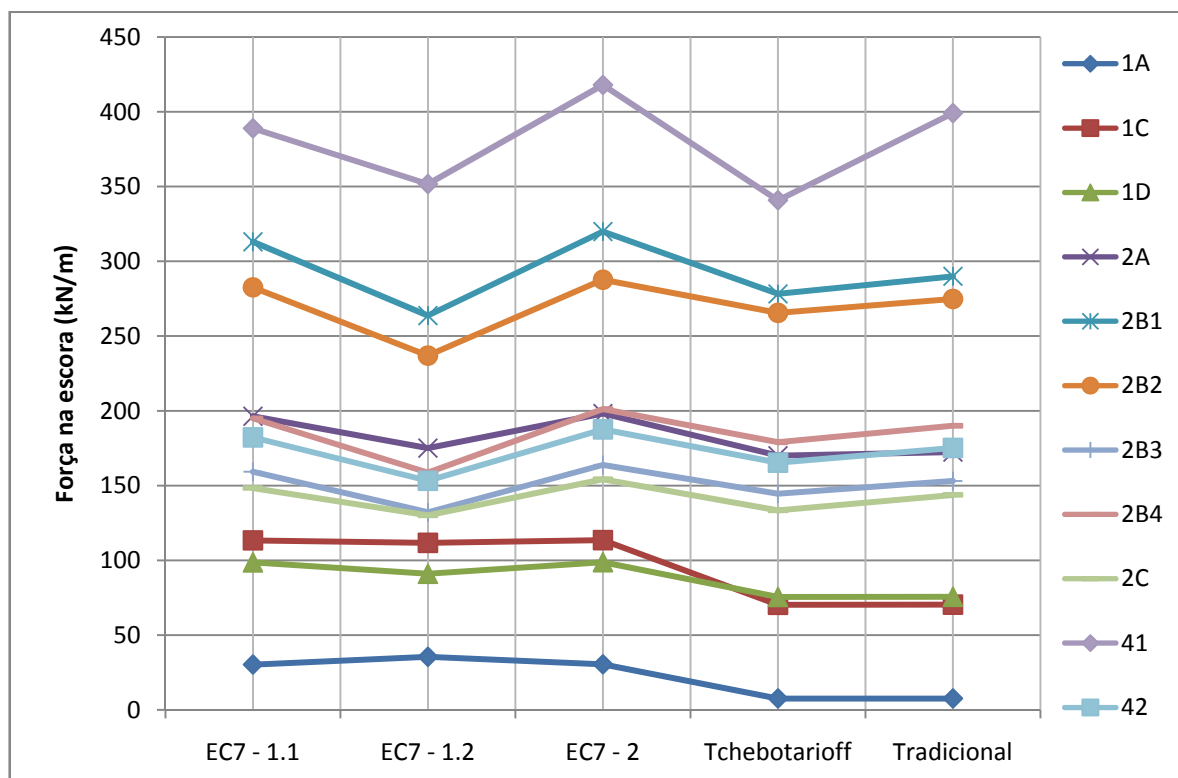


Figura 4.19 – Força na escora calculada para as secções de referência, pelos cinco métodos de considerar a segurança.

Analisando a Figura 4.19 observa-se que os métodos menos condicionantes no que diz respeito à força transmitida à escora são em geral a Abordagem 1.2 e o método de Tchebotarioff. Os valores mais elevados, na maior parte das secções são obtidos pela Abordagem 1.1 e pela Abordagem 2 do EC7. Como seria de esperar a força na escora é mais elevada nos métodos em que o momento flector máximo é também mais elevado.

4.3.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA COESÃO NAS SECÇÕES DE REFERÊNCIA

Neste ponto é analisada a influência da coesão efectiva dos solos nos resultados obtidos.

As comparações aqui efectuadas referem-se apenas aos cálculos efectuados segundo a Abordagem de Cálculo 1 do Eurocódigo 7.

Altura enterrada

Na Figura 4.20 apresenta-se a redução da altura enterrada que se obtém considerando a coesão, segundo a Abordagem de Cálculo 1 do EC7.

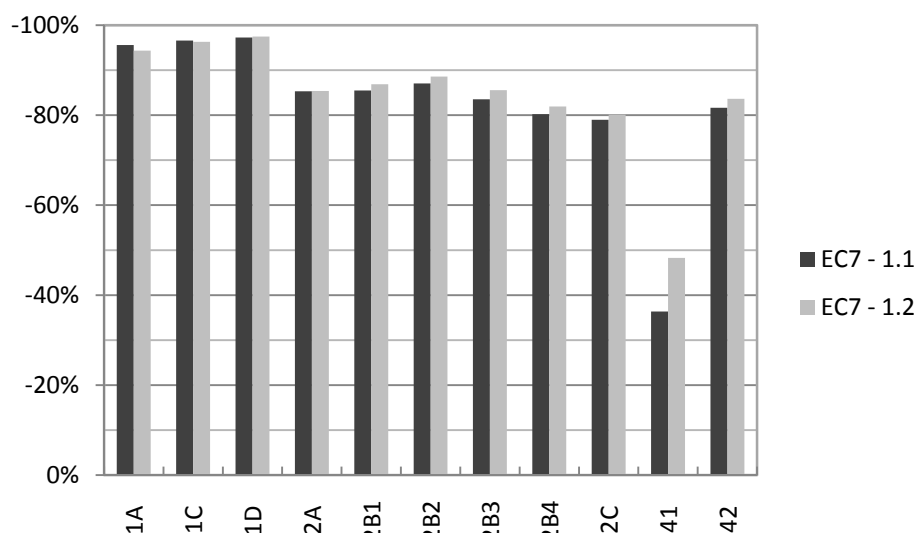


Figura 4.20 – Redução da altura enterrada devido à consideração da coesão (Abordagem de Cálculo 1 do EC7)

Como seria previsível, dado que os solos envolvidos possuem valores elevados para a coesão efectiva, quando se considera nos cálculos o seu efeito obtém-se alturas enterradas muito inferiores. Na maioria das secções obtém-se uma redução da ordem dos 80% a 90%, sendo os resultados mais influenciados na Combinação 2.

A secção 4.1 mostra novamente um comportamento atípico em relação às restantes secções analisadas. A explicação reside no facto de os horizontes com melhores características de resistência em que a coesão efectiva é elevada (ZG1b e ZG1a com coesão efectiva de 50 kPa e 90 kPa, respectivamente), só ocorrerem cerca de 3 m abaixo da base de escavação.

Momento flector máximo

A Figura 4.21 mostra a redução do momento flector máximo que se obtém considerando a coesão.

Mais uma vez fica evidente o contributo da coesão. Na maioria das secções os momentos flectores máximos que se obtém considerando a coesão são, 50% a 70% menores que os obtidos desprezando a coesão. Contudo, a influência da coesão nos momentos flectores não é tão acentuada como na altura enterrada. Isso deve-se ao facto de o aumento dos impulsos passivos ser muito mais significativo do que a redução que ocorre no impulso activo.

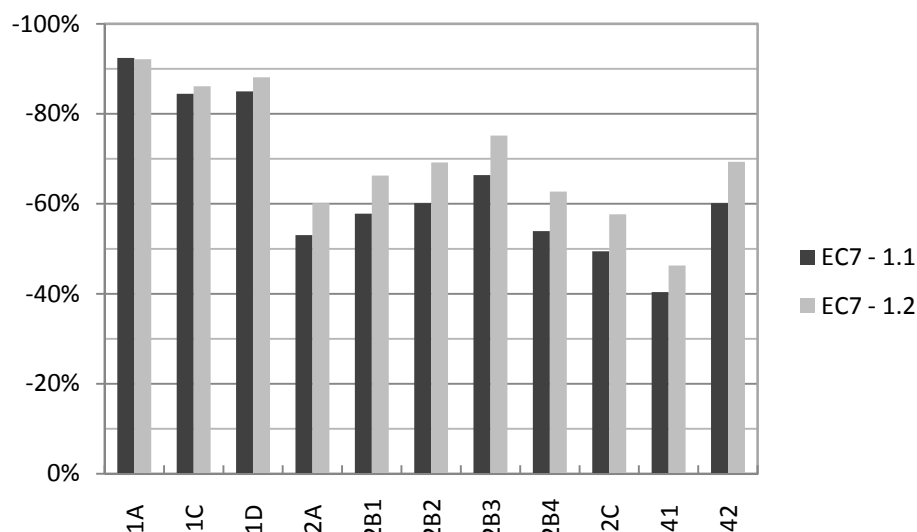


Figura 4.21 – Redução do momento flector máximo na cortina devido à consideração da coesão (Abordagem de Cálculo 1 do EC7)

4.3.4. INFLUÊNCIA DAS SOBRECARGAS DOS EDIFÍCIOS

A Figura 4.22 mostra a influência das sobrecargas dos edifícios na altura enterrada mínima, calculada segundo a Abordagem de Cálculo 1 do EC7, e considerando o contributo da coesão efectiva dos solos.

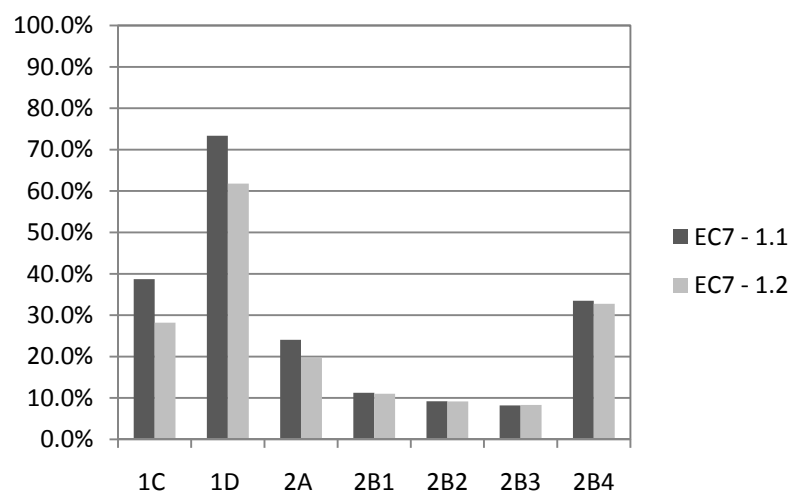


Figura 4.22 – Aumentos da altura enterrada devido à influência dos edifícios (Abordagem de Cálculo 1 do EC7)

Os edifícios têm maior influência na Combinação 1, tal como seria de esperar. A explicação reside no facto de nesta combinação as cargas serem majoradas.

A influência que o edifício da secção 1D tem na ficha, que para a Combinação 1 (EC7 - 1.1) é superior a 70%, apesar de nem ser o edifício mais alto nem o mais próximo, deve-se essencialmente às excelentes características de resistência que o maciço tem nessa zona e, consequentemente, às reduzidas pressões que este exerce sobre a cortina.

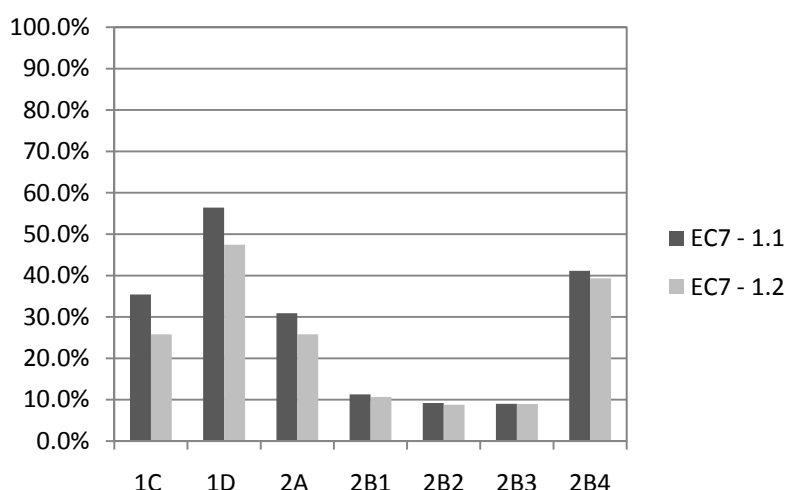


Figura 4.23 – Aumento do momento flector máximo devido à influência dos edifícios (Abordagem de Cálculo 1 do EC7)

Em relação à influência dos edifícios sobre o momento flector máximo podem-se tirar as mesmas conclusões, tal como se pode ver na Figura 4.23. O aumento percentual de esforços resultante da presença de edifícios depende muito da proximidade e altura (caso esse que é evidente na secção 2B4) mas também das características de resistência dos maciços envolvidos (como evidenciam os resultados na secção 1D).

4.4. ANÁLISE PARAMÉTRICA DA INFLUÊNCIA DA COESÃO

4.4.1. INTRODUÇÃO

Como se pode constatar nos cálculos por equilíbrio limite apresentados, a coesão do solo tem uma influência muito considerável.

Dado que existe uma certa relutância em explorar na totalidade os efeitos da coesão de maciços com elevados valores para a coesão efectiva, como os que se encontram no local da obra, especialmente ao nível da altura enterrada da cortina, torna-se importante compreender de que forma os resultados são afectados por valores elevados para a coesão.

Considere-se uma cortina de estacas monoapoiada, representada na Figura 4.24, com as seguintes características, realizada num maciço homogéneo: i) superfície do terreno e base de escavação horizontais; ii) escora à cota da superfície do terreno; iii) ausência de sobrecargas e sem presença de água.

Os impulsos de terras sobre a estrutura, resultantes de tal escavação serão função apenas das propriedades do solo e da profundidade de escavação (h). Consequentemente, os esforços na estrutura e a altura enterrada mínima necessária para o equilíbrio também o serão.

Assim, e dado que se pretende analisar a influência da coesão na altura enterrada da cortina e nos esforços a que esta estará sujeita, calculou-se a secção admitindo para as propriedades do solo várias combinações do ângulo de atrito e da coesão efectiva.

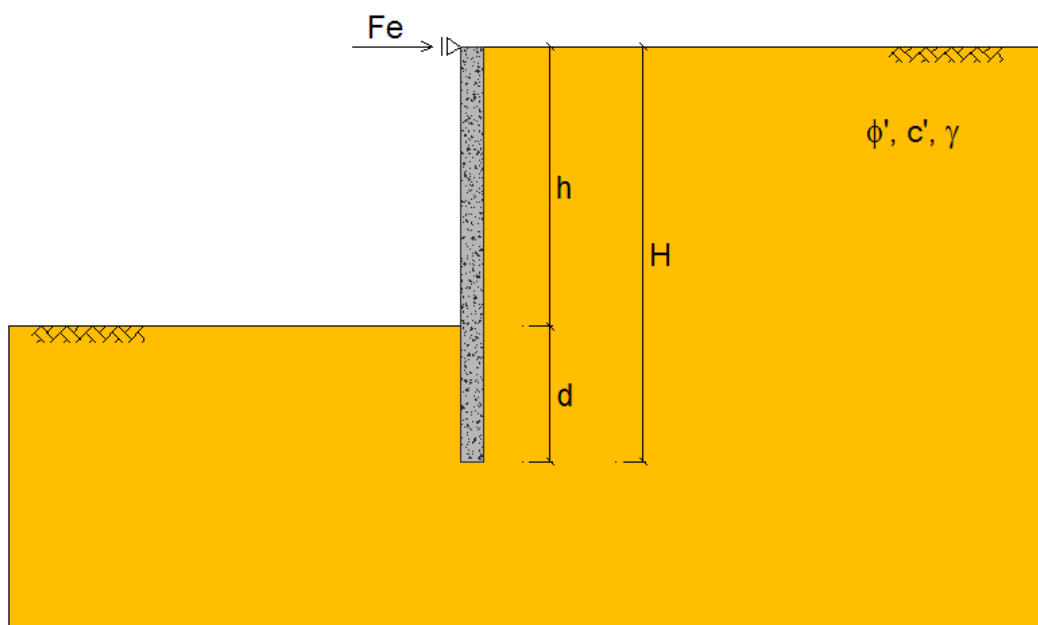


Figura 4.24 – Escavação genérica utilizada na análise paramétrica da influência da coesão

A profundidade da escavação e o peso volúmico do solo afectam naturalmente a ordem de grandeza dos esforços. Como esta influência não é o que se pretende analisar aqui, há todo o interesse em apresentar os resultados de forma adimensional em função destas características: i) para a coesão considera-se a relação $c'/(\gamma \cdot h)$; ii) para o momento flector máximo $M_{\max}/(\gamma \cdot h^3)$; iii) para a altura enterrada d/h .

Dito isto, os resultados apresentados são aplicáveis para uma escavação com qualquer profundidade (h) realizada num solo com qualquer peso volúmico, desde que cumpra as características básicas anteriormente referidas.

A secção foi calculada para um solo com o ângulo de atrito variando de 20° a 45° (com intervalos de 5°), e valores de $c'/(\gamma \cdot h)$ de 0, 0,025, 0,05, 0,1, 0,2 e 0,4.

Todos os cálculos foram feitos pelos quatro métodos de considerar a segurança apresentados em 4.2.2.

4.4.2. RESULTADOS

Como foi referido, neste estudo os cálculos foram feitos para os quatro métodos de considerar a segurança abordados no ponto 4.2.2. Contudo, apenas serão feitas considerações acerca da dos resultados obtidos segundo a Abordagem de Cálculo 1 do EC7 (EC7 – 1.1 e EC7 – 1.2) por ser este o método a utilizar no dimensionamento e porque apesar de os valores serem diferentes, as conclusões que se podem tirar relativamente aos outros métodos são semelhantes.

Nas Figuras 4.25 e 4.26 apresentam-se os valores da altura enterrada mínima para vários valores da coesão efectiva numa escavação genérica de altura h .

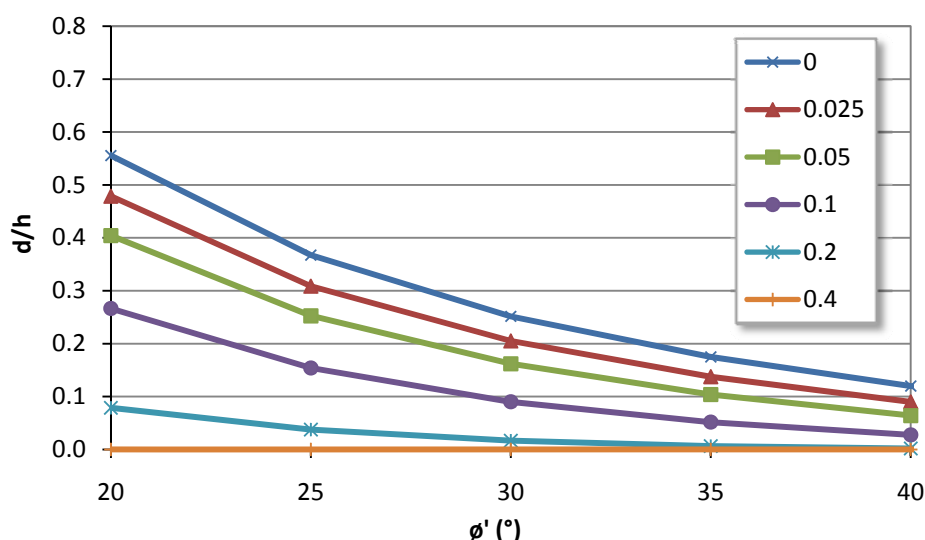


Figura 4.25 – Variação da altura enterrada para vários valores da coesão efectiva $c'/(\gamma \cdot h)$ – EC7 - 1.1

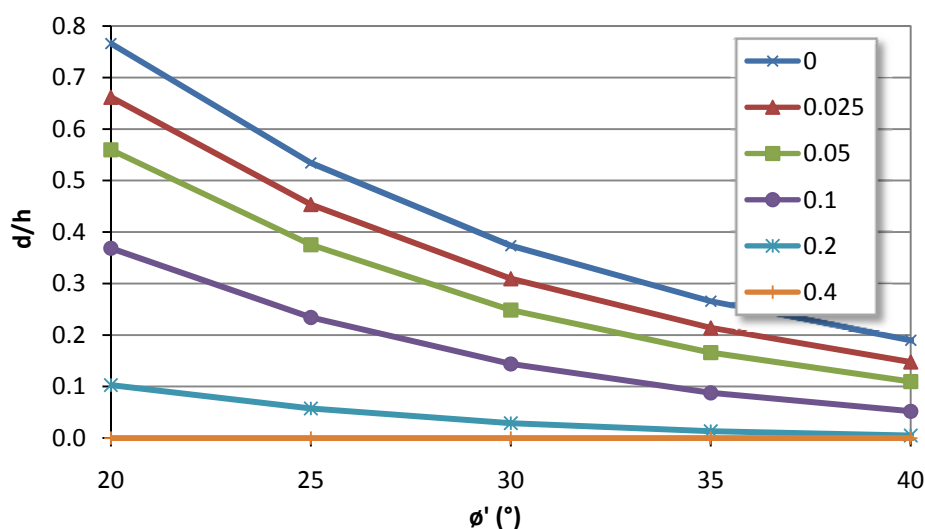


Figura 4.26 – Variação da altura enterrada para vários valores da coesão efectiva $c'/(\gamma \cdot h)$ – EC7 - 1.2

Nas Figuras 4.27 e 4.28 apresentam-se os momentos flectores máximos para vários valores da coesão efectiva numa escavação genérica de altura h .

Da análise das Figuras 4.25 à 4.28, constata-se desde já que, valores de $c'/(γ \cdot h) = 0,4$ e para o intervalo de ângulos de atrito estudados, os valores de $M_{\max}/(γ \cdot h^3)$ e d/h são sempre nulos o que permite concluir que numa escavação com estas características não se produzem quaisquer impulsos ou seja, teoricamente seria autosustentada. Tal facto seria expectável uma vez nessas condições a profundidade de escavação seria inferior à profundidade crítica. Todavia, quando se atinge uma altura próxima da crítica isso implica a existência de tensões de tracção no maciço. A resistência dos solos à tracção é muito baixa e esvanece muito rapidamente com o tempo (Matos Fernandes, 1995) o que implica a adopção de contenções, mesmo em alguns casos em que as pressões sobre a cortina calculadas por equilíbrio limite sejam nulas.

Comparando os resultados nas duas combinações observa-se que a Combinação 2 é sempre condicionante no que diz respeito à altura enterrada e aos momentos flectores máximos.

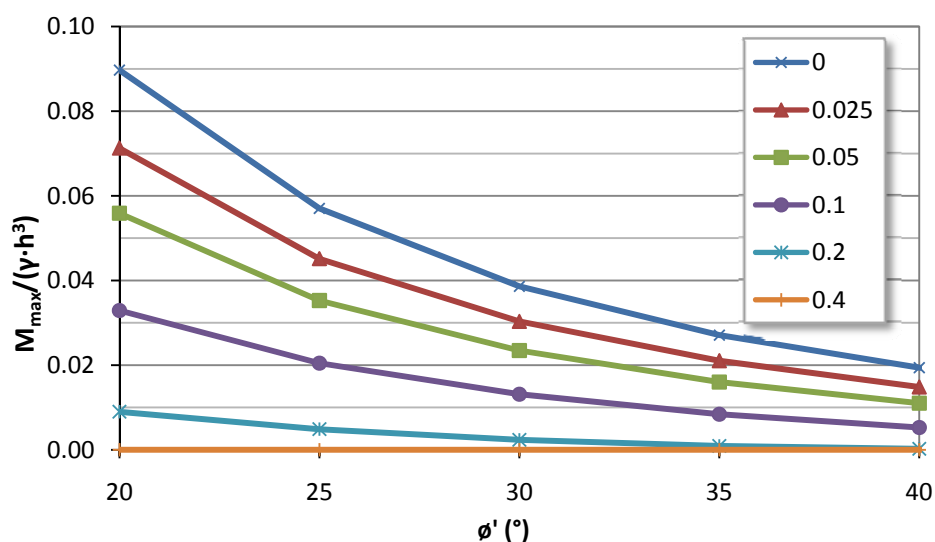


Figura 4.27 – Variação do momento máximo para vários valores da coesão efectiva $c'/(γ \cdot h)$ – EC7 - 1.1

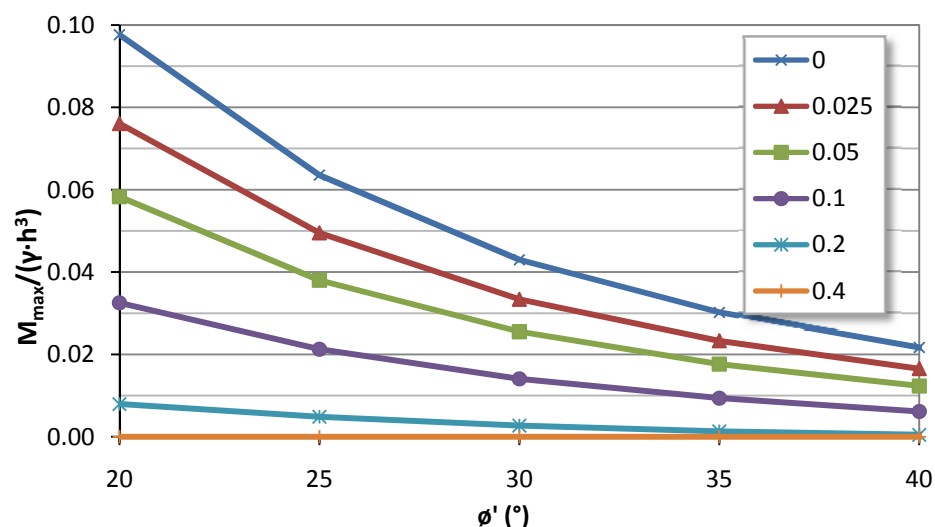


Figura 4.28 – Variação do momento máximo para vários valores da coesão efectiva $c'/(γ \cdot h)$ – EC7 - 1.2

4.5. PRÉ-DIMENSIONAMENTO

4.5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste ponto é feito um pré-dimensionamento dos vários elementos estruturais com base no qual são posteriormente realizadas modelações recorrendo ao método de elementos finitos.

O pré-dimensionamento das cortinas de estacas assenta nas análises recorrendo ao método de equilíbrio limite efectuadas no presente capítulo.

Como ficou demonstrado, existem vários factores que afectam de forma muito significativa os esforços obtidos nas cortinas de estacas. Todavia, até este ponto apenas foram estudadas os esforços resultantes dos impulsos de terras, de água, das sobrecargas à superfície e da presença de edifícios.

No dimensionamento da solução estrutural a adoptar existem outros factores cuja relevância pode ser muito significativa na distribuição dos esforços, incluindo a própria solução estrutural. Nos cálculos em equilíbrio limite admite-se que a escora apenas transmite esforços axiais, o que só é aceite no caso de a ligação ser articulada ou de os momentos transmitidos pela escora serem relativamente baixos. No caso de se pretender uma solução em que a cortina de estacas é ligada rigidamente à laje, os pressupostos em que assenta o método de equilíbrio limite já não se verificam.

Como o pré-dimensionamento de todas as secções estudadas é um processo repetitivo e sem grande interesse no âmbito deste trabalho, apenas são aqui pré-dimensionadas as secções que se pretende estudar recorrendo ao método dos elementos finitos.

4.5.2. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA LAJE

O modelo estrutural adoptado para o pré-dimensionamento da laje é o que se apresenta na Figura 4.29.

Ao longo do Túnel de Benfica, ao nível do dimensionamento da laje, podem fazer-se três divisões em que os vãos são distintos. Essas divisões correspondem às zonas totalmente em túnel com vãos de 18,7 m (Zona 1) e com vãos de 17,7 m (Zonas 2A, 2C e 4) e a zona 2B semi-coberta com vãos de 17,7 m (não será aqui pré-dimensionada).

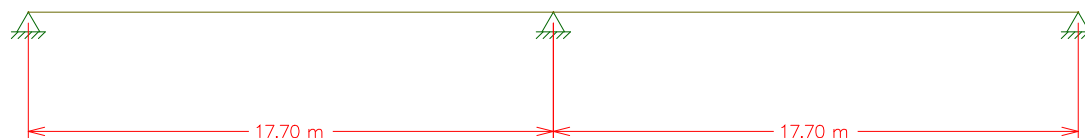


Figura 4.29 – Modelo estrutural da laje de cobertura (para uma secção com vãos de 17,7 m)

O momento flector máximo é obtido no apoio central com o carregamento máximo nos dois vãos. Conhecendo o carregamento a que a laje vai estar sujeita, o pré-dimensionamento da sua altura para obter um momento reduzido próximo de 0,15 é um processo iterativo.

O momento reduzido é obtido através da expressão

$$\mu = \frac{M_{sd}}{h^2 \cdot f_{cd}} \quad (4.1)$$

tomando para o f_{cd} o valor de 20E3 MPa (betão da classe C30/37).

Este processo iterativo é apresentado no Quadro 4.2. A combinação de acção condicionante é a Combinação 1 da Abordagem de Cálculo 1 do EC7.

Quadro 4.2 – Pré-dimensionamento da laje de cobertura

Zonas	Altura da laje (m)	Carregamento (kN/m)				Vão (m)	Momento no apoio central (kN.m/m)	μ
		Peso Próprio	Recobrimento com terras	Sobrecarga	Total (valor de cálculo)			
Zona 1	0,8	20,0	20	10	69,0	18,7	3016,1	0,236
	1,1	27,5	20	10	79,1	18,7	3458,7	0,143
	1,2	30,0	20	10	82,5	18,7	3606,2	0,125
Zonas 2A, 2C e 4	0,8	20,0	20	10	69,0	17,7	2702,1	0,211
	1	25,0	20	10	75,8	17,7	2966,5	0,148
	1,1	27,5	20	10	79,1	17,7	3098,6	0,128

Tendo em conta os valores obtidos e a incerteza acerca do comportamento dos apoios da laje, para a Zona 1 tomou-se uma espessura de 1,2 m e, para as Zonas 2A, 2C e 4, uma altura de 1,1 m.

4.5.3. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS CORTINAS DE ESTACAS

A solução estudada é de cortinas de estacas espaçadas. Contudo, em determinadas zonas prevê-se a execução de estacas plásticas com o objectivo de impermeabilizar a cortina mas cujo contributo para a resistência não será considerado.

O dimensionamento óptimo consegue-se para um momento reduzido de 0,15.

A partir da expressão

$$\mu = \frac{M_{sd}}{\pi r^2 f_{cd}} \quad (4.2)$$

sabendo que o betão a utilizar é da classe C30/37 ($f_{cd} = 20$ MPa) e, conhecidos os momentos flectores máximos, a obtenção do diâmetro e afastamento não oferece qualquer dificuldade.

Caso na solução a adoptar se considere uma ligação laje-cortina articulada, sem transmissão de esforços de flexão, o pré-dimensionamento das cortinas de estacas é feito considerando os momentos máximos calculados pelo método de equilíbrio limite.

No Quadro 4.3 apresentam-se os espaçamentos máximos para vários diâmetros das cortinas de estacas a adoptar no caso de a ligação laje-cortina ser articulada. O esforço axial a que as estacas estão sujeitas foi conservativamente desprezado.

Quadro 4.3 – Afastamentos e diâmetros mínimos para garantir um momento reduzido de 0,15

Secção	Mmax (kN.m/m)			Af (m)		
	EC7 - 1.1	EC7 - 1.2	Máximo	ø 1,00	ø 0,80	ø 0,60
1A - 0678	97,7	120,5	120,5	9,1	4,7	2,0
1C - 0878	316,8	326,4	326,4	4,4	2,3	1,0
1D - 0950	188,4	169,7	188,4	9,0	4,6	2,0
2A - 1170	450,8	412,8	450,8	5,0	2,6	1,1
2B1 - 1250	1133,4	926,6	1133,4	2,1	1,1	0,4
2B2 - 1350	903,1	722,9	903,1	2,6	1,3	0,6
2B3 - 1400	455,3	356,4	455,3	5,2	2,6	1,1
2B4 - 1450	572,5	462,9	572,5	4,1	2,1	0,9
2C - 1528	555,9	479,8	555,9	4,2	2,2	0,9
41 - 1928	1555,9	1420,9	1555,9	1,5	0,8	0,3
42 - 2000	574,0	458,9	574,0	4,3	2,2	0,9

Como se pode observar na generalidade das secções, para fazer face aos esforços, sem ter em consideração outros aspectos apenas seriam necessárias estacas com diâmetros muito pequenos e(ou) espaçamentos muito elevados. Em termos de esforços qualquer opção do Quadro 4.3 serviria. Todavia, tais soluções seriam impraticáveis, quer pelos diâmetros serem muito pequenos, quer pelos espaçamentos serem muito elevados, o que deixaria grandes zonas do maciço nos intervalos das estacas completamente desconfinadas.

Assim, a solução a adoptar para a cortina de estacas, do ponto de vista dos esforços, teria que ser sobredimensionada para que a estabilidade dos maciços não fosse comprometida.

No caso de se adoptar uma solução em que a laje está rigidamente ligada às cortinas, o esforço que condiciona o dimensionamento das estacas é o momento flector na ligação, transmitido da laje para a cortina. Aparentemente, esta solução trará vantagens pois por um lado aproveita a totalidade da resistência da cortina de estacas e, adicionalmente, permitirá reduzir os momentos flectores positivos na laje.

Neste caso, o pré-dimensionamento das estacas foi efectuado com base no momento flector que a laje transmite à cortina. Na Figura 4.30 apresenta-se o diagrama de momentos da laje da Zona 1 e na Figura 4.31 o diagrama correspondente à laje das Zonas 2A, 2C e 4.

Dado que a cortina de estacas não constitui um encastramento perfeito para a laje e tendo em conta que os solos adjacentes às cortinas possuem boas características de resistência, admitiu-se uma redução de 25% dos momentos flectores calculados considerando encastramento. É importante referir que a laje apoia na cortina de estacas através de uma viga de coroamento, sendo esta dimensionada de forma a ser capaz de receber os momentos flectores da ligação e tendo uma altura tal que os esforços na ligação desta com as estacas sejam mais baixos.

Assim, na Zona 1, para um momento flector na ligação de 1800 kN.m/m, a solução considerada para a cortina consiste em estacas com 1 m de diâmetro afastadas de 1,4 m.

Nas Zonas 2A, 2C e 4, considerando um momento flector de 1550 kN.m/m na ligação, a solução adoptada para a cortina consiste em estacas com 1 m de diâmetro afastadas de 1,5 m.

A validade dos momentos flectores adoptados para o pré-dimensionamento é comprovada pelos estudos efectuados por elementos finitos apresentados no Capítulo 5.

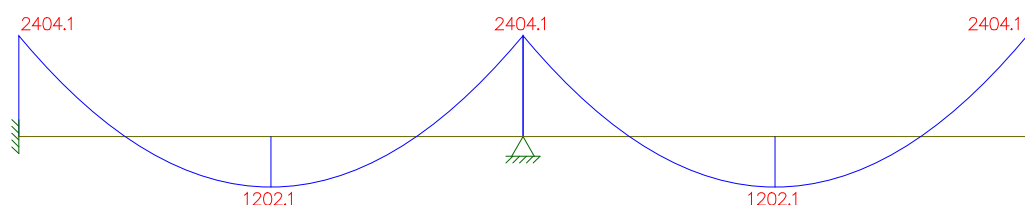


Figura 4.30 - Momentos flectores na laje admitindo a laje encastrada nas extremidades (Zona 1)

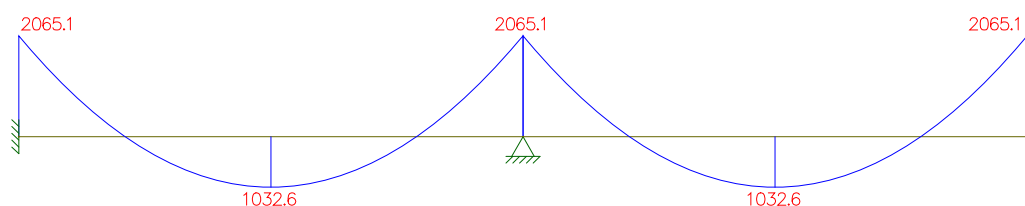


Figura 4.31 – Momentos flectores na laje admitindo a laje encastrada nas extremidades (Zonas 2A, 2C e 4)

Dado que os valores para a altura enterrada calculados por equilíbrio limite considerando a coesão são muito baixos, e não têm em conta a capacidade de carga em relação aos esforços verticais transmitidos pela laje de cobertura, torna-se necessário adoptar um valor mínimo aceitável.

Assim, com base nos valores da altura enterrada calculados por equilíbrio limite apresentados no Quadro 4.4, e tendo em conta que a altura da cortina de estacas além de garantir o equilíbrio face às pressões horizontais a que está sujeita também tem que garantir o apoio à laje de cobertura, admitiu-se uma altura enterrada mínima de 5 m.

Quadro 4.4 – Altura enterrada mínima calculada por equilíbrio limite segundo a Abordagem de Cálculo 1, desprezando e considerando a coesão dos solos

Secção	Desprezando a Coesão		Considerando a Coesão	
	EC7 - 1.1	EC7 - 1.2	EC7 - 1.1	EC7 - 1.2
1A	3,2	5,0	0,1	0,3
1C	3,5	5,4	0,1	0,2
1D	3,0	4,7	0,1	0,1
2A	2,9	4,4	0,4	0,6
2B1	4,6	6,5	0,7	0,9
2B2	4,3	6,2	0,6	0,7
2B3	4,0	5,7	0,7	0,8
2B4	3,7	5,3	0,7	1,0
2C	3,6	5,1	0,7	1,0
41	5,2	7,3	3,3	3,8
42	4,0	5,7	0,7	0,9

4.5.4. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO ALINHAMENTO DE PILARES-ESTACA CENTRAIS

Em relação ao alinhamento de pilares-estaca centrais, o pré-dimensionamento aqui apresentado refere-se apenas ao cálculo da altura enterrada a considerar, considerando os diâmetros e afastamentos sugeridos no estudo prévio (Coba, 2006b).

Sabendo que nos ensaios pressiométricos relativos às zonas geotécnicas ZG1a e ZG1b em que se admite que sejam fundados os pilares-estaca, se obtiveram valores para a pressão limite efectiva superiores a 2500 kPa, foi calculada a altura enterrada mínima pelo método de Bustamante e Gianeselli expresso na norma francesa DTU (1999), considerando um coeficiente de capacidade de carga de 1,3.

Os esforços axiais foram obtidos para a Combinação 1 da Abordagem de Cálculo 1 do EC7.

Os resultados são os apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Cálculo da altura enterrada mínima dos alinhamentos de pilares centrais

Zonas	D (m)	af (m)	Esforços Axiais		Capacidade de Carga		Altura Enterrada Mínima (m)
			(kN/m)	(kN/estaca)	Resistência de ponta - q_{pu} (kPa)	Resistência lateral - q_{su} (kPa)	
Zona 1	0.8	1.8	1542.8	2777.0	3250	160	7.3
Zonas 2A, 2C e 4	0.8	2.2	1400.5	3081.1	3250	160	8.0

Tendo em conta os resultados obtidos, a altura enterrada dos pilares-estaca centrais adoptada foi de 8,0 m em todas as zonas.

4.6. CONCLUSÕES

Em relação aos estudos realizados neste capítulo constatou-se que dos métodos de considerar a segurança estudados, o que fornece resultados que em relação aos obtidos pelos restantes não são demasiado conservativos nem anti-conservativos é o previsto na Abordagem de Cálculo 1 do Eurocódigo 7. A qualidade dos resultados assim calculados é devida, por um lado, à consideração de duas combinações em que a segurança é introduzida de maneira diferente e, por outro, pelo facto de na Combinação 2, que é a condicionante no que diz respeito à altura enterrada da cortina, os coeficientes parciais de segurança serem aplicados às propriedades dos solos, o que afecta não só os impulsos passivos mas também os activos.

Demonstrou-se ainda o que nos casos em que os solos envolvidos nas escavações têm coesão efectiva elevada, a influência que esta tem nos resultados obtidos é muito considerável.

O dimensionamento de estruturas de suporte flexíveis exclusivamente por equilíbrio limite, além da limitação de não permitir estimar deslocamentos, é muito limitado ao nível do estudo das opções estruturais. Assim, apesar de fornecer resultados essenciais em qualquer tipo de problema de estruturas de suporte flexíveis, o seu uso como único método para o dimensionamento fica restringido aos casos em que os deslocamentos das estruturas e do terreno não sejam relevantes, e aos casos em que as soluções estruturais a adoptar não comprometam os pressupostos em que assentam os métodos de equilíbrio limite.

5

ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ESTRUTURAIS RECORRENDO AO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são feitas modelações recorrendo ao programa de cálculo por elementos finitos PLAXIS tendo como objectivo a compreensão do funcionamento das estruturas envolvidas e a interacção destas com os solos para uma opção fundamentada das soluções estruturais.

São apresentados estudos relativos às próprias modelações em que se pretende comprovar a validade de simplificações adoptadas nos cálculos até aqui apresentados. Apresenta-se ainda uma comparação com os resultados previamente obtidos pelo método de equilíbrio limite de forma a validar os cálculos efectuados com o programa de cálculo de cortinas monoapoiadas.

São estudadas algumas das secções definidas e calculadas pelo método de equilíbrio limite no capítulo anterior de modo a avaliar aspectos como a ligação das lajes às cortinas de estacas, a influência da inclinação do terreno e os efeitos das escavações sobre os edifícios vizinhos.

5.2. BASES DE CÁLCULO

5.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Além dos parâmetros de resistência e de deformabilidade dos maciços interessados, é necessário definir previamente a geometria das cortinas para o cálculo por elementos finitos. Assim, apesar de também se pretender uma comparação com o método de equilíbrio limite, tem que se recorrer a este para fazer um pré dimensionamento, obtendo a altura enterrada da cortina (ficha), o diâmetro e o espaçamento das estacas.

Os valores característicos adoptados para os parâmetros geotécnicos dos solos são os indicados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Valores característicos dos parâmetros geotécnicos dos materiais considerados nas modelações

Zona Geotécnica	Parâmetro Geotécnicos						
	γ (kN/m ³)	k (m/s)	E (MPa)	ν	c' (kPa)	ϕ (°)	K0
ZG 3	19,00	5,00E-06	15,0	0,4	5	28,0	0,5
ZG 2	21,00	5,00E-07	60,0	0,4	20	28,0	0,5
ZG 1b	21,00	1,00E-07	75,0	0,4	50	35,0	0,5
ZG 1a	23,00	1,00E-07	200,0	0,4	90	35,0	0,5
Água	9,81	-	-	-	-	-	-

Os estudos aqui efectuados em que se usam os valores característicos das propriedades de resistência e deformabilidade resumem-se às previsões de assentamentos que decorrem das escavações.

Para obtenção dos esforços para dimensionamento torna-se necessário introduzir a segurança. Isso foi feito de acordo com o EC7 segundo a Abordagem de Cálculo 1 (combinações 1 e 2).

Segundo o EC7, o dimensionamento para a Abordagem de Cálculo 1 é feito considerando as envolventes das duas combinações. Como se constatou no Capítulo 3, os valores máximos da ficha são condicionados pela Combinação 2, pelo que será esta a altura enterrada a considerar. Assim, cada cálculo foi feito das duas formas distintas que foram sugestivamente nomeadas de Análise 1.2-1 e Análise 1.2-2.

5.2.2. ANÁLISE 1.2-2

Na Análise 1.2-2 a segurança foi introduzida considerando os valores característicos para as cargas permanentes e os valores de cálculo para os parâmetros de resistência dos solos e para as acções variáveis (de acordo com o sugerido no EC7 para a Combinação 2 da Abordagem de Cálculo 1). Os parâmetros para estas análises são os apresentados no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Valores de cálculo dos parâmetros geotécnicos dos materiais, considerados nas Análises 1.2-2

Zona Geotécnica	Parâmetro Geotécnicos						
	γ (kN/m ³)	k (m/s)	E (MPa)	ν	c' (kPa)	ϕ (°)	K0
ZG 3	19,00	5,00E-06	15,0	0,4	4	23,0	0,5
ZG 2	21,00	5,00E-07	60,0	0,4	16	23,0	0,5
ZG 1b	21,00	1,00E-07	75,0	0,4	40	29,3	0,5
ZG 1a	23,00	1,00E-07	200,0	0,4	72	29,3	0,5
Água	9,81	-	-	-	-	-	-

Nota: As acções variáveis desfavoráveis são majoradas por 1,3

5.2.3. ANÁLISE 1.2-1

Pretende-se nesta análise que a segurança seja inserida de forma a reflectir o preconizado na Combinação 1 da Abordagem de Cálculo 1 do EC7. Dado que a distinção entre os efeitos das acções variáveis e permanentes pode ser ambígua, optou-se por estudar duas interpretações do que é previsto no EC7. Em ambas, a geometria foi obtida, como já referido, a partir dos cálculos em equilíbrio limite segundo a Combinação 2.

Análise 1.2-1a

Nesta análise a segurança foi introduzida de uma forma mais próxima ao imposto no EC7, ou seja, utilizaram-se os valores característicos dos parâmetros de resistência dos solos e majoraram-se as acções permanentes por 1,35 (incluindo o peso volumico dos solos e da água) e as variáveis por 1,50. Os parâmetros assim obtidos são os apresentados no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Valores de cálculo dos parâmetros geotécnicos dos materiais, considerados nas Análises 1.2-1a

Zona Geotécnica	Parâmetro Geotécnicos						
	γ (kN/m ³)	k (m/s)	E (MPa)	ν	c' (kPa)	ϕ (°)	K0
ZG 3	25,7	5,00E-06	15,0	0,4	5	28,0	0,5
ZG 2	28,4	5,00E-07	60,0	0,4	20	28,0	0,5
ZG 1b	28,4	1,00E-07	75,0	0,4	50	35,0	0,5
ZG 1a	31,1	1,00E-07	200,0	0,4	90	35,0	0,5
Água	13,2	-	-	-	-	-	-

Nota 1: As acções permanentes desfavoráveis são majoradas por 1,35

Nota 2: As acções variáveis desfavoráveis são majoradas por 1,5

Análise 1.2-1b

Esta análise baseia-se numa outra aproximação ao que é sugerido no EC7. Assenta no conceito de que as acções são os esforços transmitidos aos elementos estruturais o que desde já apresenta o problema de quantificar qual a parte desses esforços que resulta das acções permanentes e qual a que resulta das acções variáveis.

Assim, utilizaram-se os valores característicos dos parâmetros de resistência dos solos, as acções variáveis foram afectadas de um coeficiente de segurança e os esforços obtidos foram majorados por 1,35 (tal como previsto na Abordagem 1.1 para as cargas permanentes). De forma a majorar correctamente as acções variáveis, o coeficiente de segurança relativo a estas foi de 1,10 que, em conjunto com a majoração que se faz nos esforços calculados, corresponde ao factor de 1,50 imposto pelo EC7 para a Abordagem 1.1 ($1,10 \times 1,35 = 1,50$).

Resumindo, os valores de cálculo dos esforços são obtidos da seguinte forma:

- os parâmetros geotécnicos dos materiais são os valores característicos;
- as acções variáveis são majoradas por 1,1 ($=1,5/1,35$);
- os esforços assim calculados são majorados por 1,35.

5.2.4. PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Do Quadro 5.4 ao 5.7 apresentam-se as propriedades de todos os elementos estruturais que são de betão da classe C30/37 (Eurocódigo 2).

Todos os elementos estruturais, salvo indicação em contrário, foram modelados utilizando o elemento de barra (no PLAXIS denominado “plate”), atribuindo-se um comportamento elástico linear.

Quadro 5.4 – Propriedades das cortinas de estacas consideradas nos estudos efectuados

Designação	ϕ (m)	// (m)	A (m ² /m)	I (m ⁴ /m)	E (GPa)	EA (kN/m)	EI (kN.m ² /m)	w (kN/m/m)	v -
$\phi 1,0//1,4$	1,0	1,4	0,561	0,0351	33,0	18,51E+6	1,157E+6	14,02	0,2
$\phi 1,0//1,5$	1,0	1,5	0,524	0,0327	33,0	17,28E+6	1,080E+6	13,09	0,2

Quadro 5.5 – Propriedades dos alinhamentos de pilares centrais considerados nos estudos efectuados

Designação	ϕ (m)	// (m)	A (m ² /m)	I (m ⁴ /m)	E (GPa)	EA (kN/m)	EI (kN.m ² /m)	w (kN/m/m)	v -
$\phi 0,8//2,2$	0,8	2,2	0,228	0,0091	33,0	7,54E+6	301,6E+3	5,71	0,2
$\phi 0,8//3,0$	0,8	3,0	0,168	0,0067	33,0	5,53E+6	221,2E+3	4,19	0,2

Quadro 5.6 – Propriedades das lajes considerados nos estudos efectuados

Designação	h (m)	A (m ² /m)	I (m ⁴ /m)	E (GPa)	EA (kN/m)	EI (kN.m ² /m)	w (kN/m/m)	v -
Laje h=1,1	1,1	1,10	0,1109	33,0	36,30E+6	3,660E+6	27,50	0,2
Laje h=1,2	1,2	1,20	0,1440	33,0	39,60E+6	4,752E+6	30,00	0,2

Quadro 5.7 – Propriedades das vigas de contraventamento considerados nos estudos das zonas semi-cobertas

Designação	b (m)	h (m)	// (m)	A (m ² /m)	I (m ⁴ /m)	E (GPa)	EA (kN/m)	EI (kN.m ² /m)	w (kN/m/m)	v -
0,8x1,1//9,0	0,80	1,10	9,0	0,098	0,0099	33,0	3,23E+6	325,4E+3	2,44	0,2

5.3. COMPARAÇÃO COM O MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE

5.3.1. INTRODUÇÃO

Este estudo tem como objectivo verificar os resultados obtidos pelo método de equilíbrio limite.

A secção em que foi efectuada a comparação dos resultados obtidos foi a secção 4.2 (ao km 2+000), cuja escolha foi feita essencialmente por esta ser uma secção simétrica e não existirem nenhuma particularidades, como seja a presença de edifícios, cuja influência é estudada posteriormente.

Como se pretende obter uma comparação com o método de equilíbrio limite, a modelação foi simplificada utilizando-se a malha de elementos finitos apresentada na Figura 5.1. Foram feitas duas análises, tal como nos cálculos por equilíbrio limite, uma desprezando a coesão e outra considerando todas as propriedades de resistências dos maciços envolvidos.

Para a modelação desprezando a coesão a cortina é constituída por estacas de betão armado com 1 m de diâmetro afastadas de 1,4 m. Na modelação considerando a coesão as estacas têm 0,8 m de diâmetro e estão igualmente afastadas de 1,4 m. A laje de betão armada foi considerada nas duas análises como um elemento “*fixed end anchor*” com as características de deformabilidade de uma laje de betão armado com 1,1 m de altura e 17,7 m de comprimento.

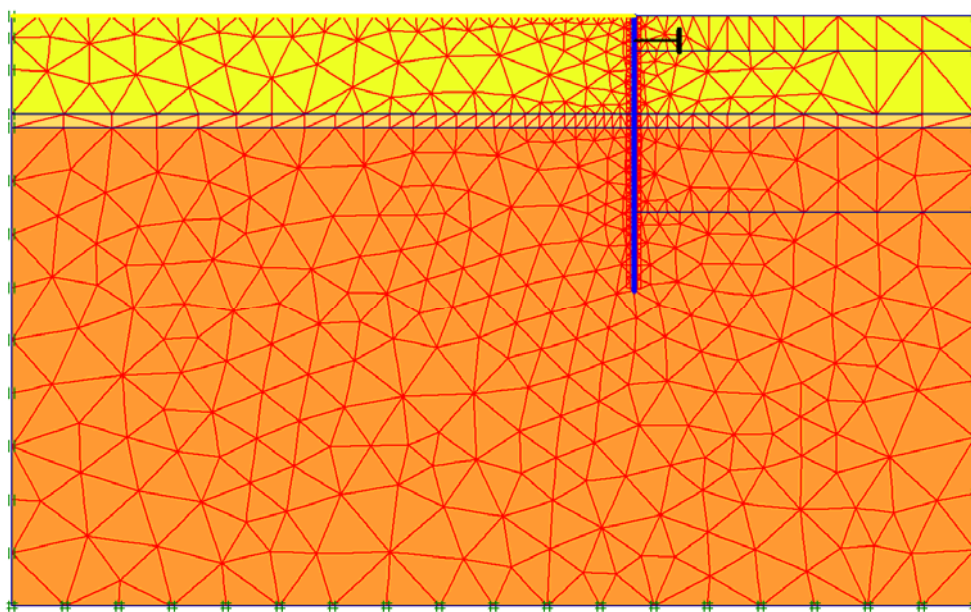


Figura 5.1 – Malha de elementos finitos utilizada nas análises para comparar com o método de equilíbrio limite
(elementos triangulares de 15 nós)

5.3.2. RESULTADOS

5.3.2.1. Análises desprezando a coesão

Tensões efectivas horizontais na cortina de estacas

A Figura 5.2 mostra as tensões efectivas horizontais na interface com a cortina calculadas pelo método de equilíbrio limite e por elementos finitos.

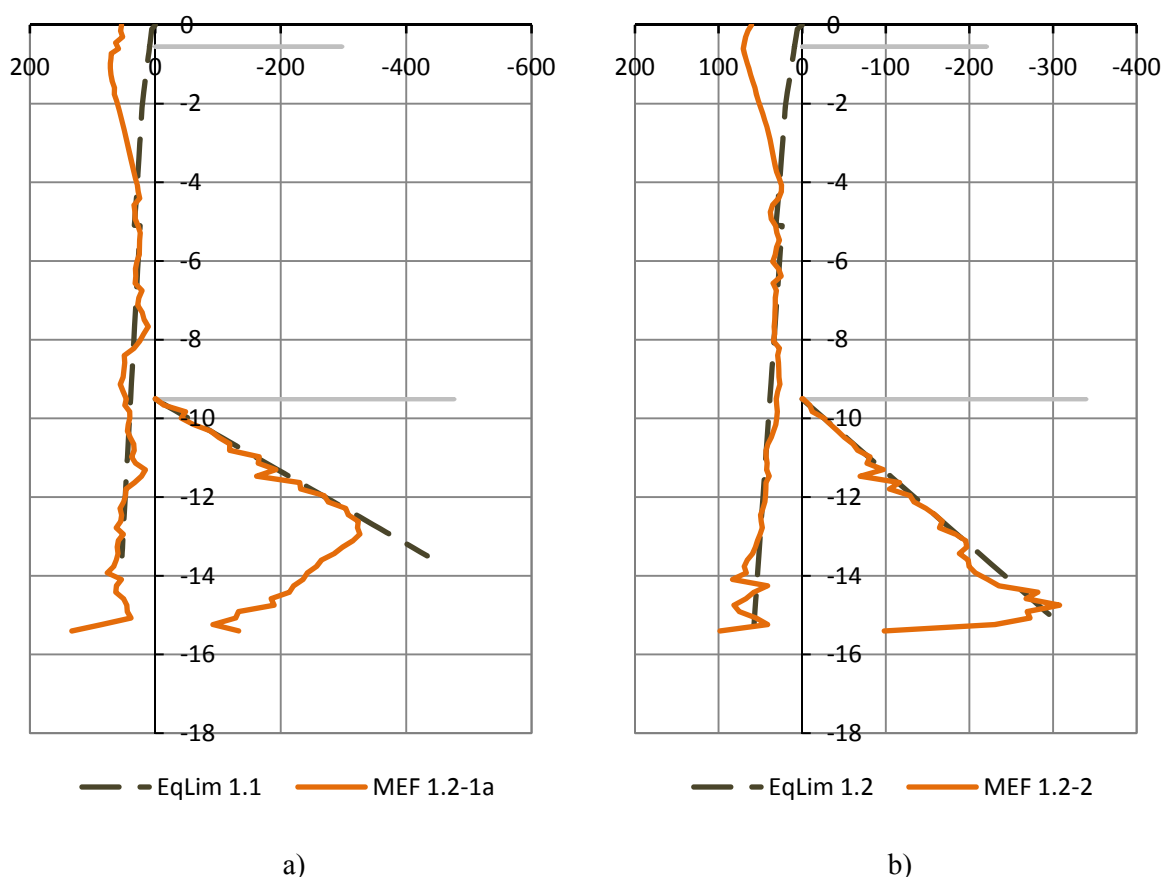


Figura 5.2 – Tensões horizontais efectivas na interface com a cortina calculadas pelo método de equilíbrio limite e pelo método de elementos finitos, desprezando a coesão: a) segundo a Abordagem 1.1 do EC7; b) segundo a Abordagem 1.2 do EC7.

Como se pode observar, no geral as tensões calculadas pelos métodos de equilíbrio limite e pelo método dos elementos finitos são muito próximas. Contudo, na zona da escora pode observar-se um certo aumento da tensão efectiva horizontal que se obtém na modelação por elementos finitos. Esse acréscimo resulta do próprio processo construtivo, ou seja, como a escora (laje) é colocada antes de qualquer escavação significativa, não se chega a instalar o estado limite activo junto da escora, existindo ainda um acréscimo provocado pela rotação que a cortina sofre em torno do eixo da escora.

A redução das tensões efectivas horizontais do lado passivo e o aumento do lado activo que se obteve nas proximidades do pé da cortina, na modelação por elementos finitos na Análise 1.2-1a, é explicada

pelo facto de a altura enterrada considerada nesta análise ser a obtida na Abordagem 1.2, que é superior à obtida na Abordagem 1.1.

Esforços na cortina de estacas

Na Figura 5.3 apresentam-se os diagramas de momentos flectores e de esforços transversos calculados por equilíbrio limite e por elementos finitos.

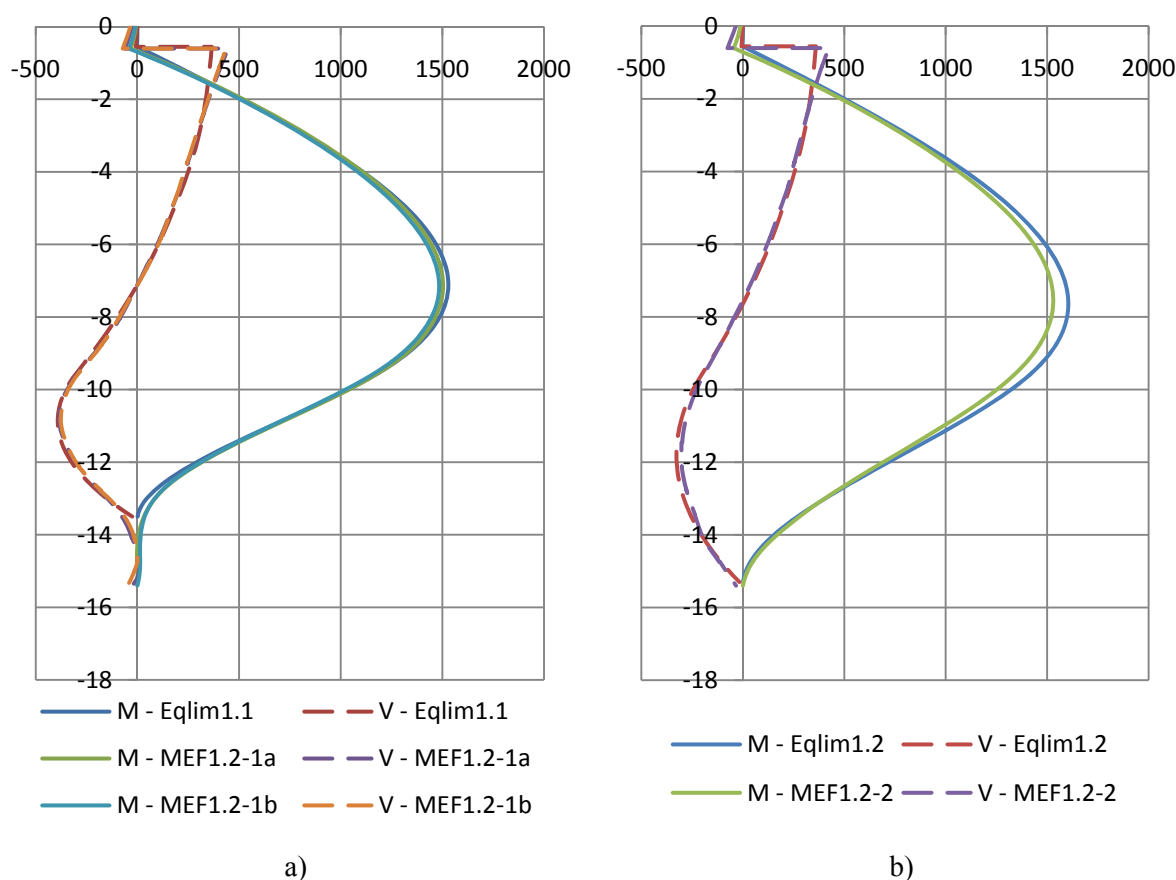


Figura 5.3 – Diagramas de momentos flectores (kN.m/m) e de esforços transversos (kN/m) obtidos pelos métodos de equilíbrio limite e pelo método de elementos finitos, desprezando a coesão: a) segundo a Abordagem 1.1 do EC7; b) segundo a Abordagem 1.2 do EC7

Como se observa, os valores obtidos pelo método de equilíbrio limite e pelo MEF são muito próximos, sendo os últimos, como seria de esperar, ligeiramente inferiores. Uma outra constatação refere-se ao facto de os dois métodos para introduzir a segurança segundo a Abordagem 1.1 produzirem resultados praticamente iguais. Tais factos ficam ainda mais evidentes observando a Figura 5.4, onde se mostra uma comparação dos momentos máximos na cortina de estacas obtidos para os cálculos efectuados como descrito anteriormente.

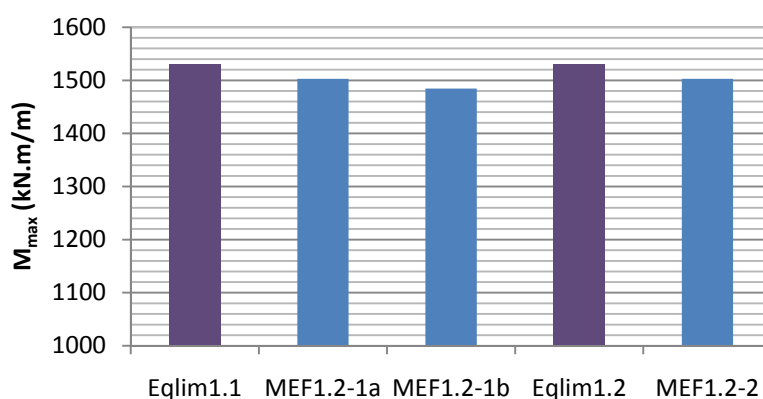


Figura 5.4 – Momentos flectores máximos obtidos pelos diferentes métodos, desprezando a coesão.

5.3.2.2. Análises considerando o contributo da coesão

Impulsos produzidos sobre a cortina de estacas

Na Figura 5.5 apresentam-se as tensões efectivas horizontais na interface com a cortina calculadas pelo método de equilíbrio limite e por elementos finitos.

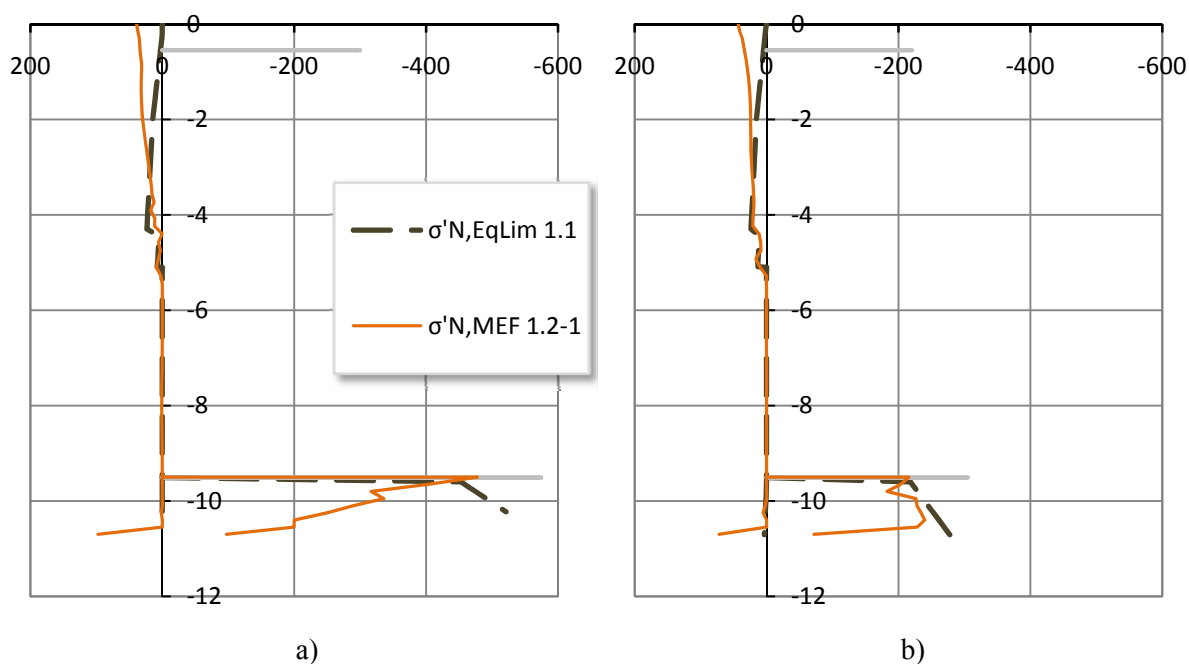


Figura 5.5 – Impulsos sobre a cortina (kN/m^2) calculado pelos métodos de equilíbrio limite e pelo método de elementos finitos: a) segundo a abordagem 1.1 do EC7; b) segundo a abordagem 1.2 do EC7.

As tensões efectivas horizontais obtidas pelo método de elementos finitos considerando a coesão são muito próximas das calculadas por equilíbrio limite. Refira-se que, do lado do terreno, mesmo nas zonas em que se atingem estratos com coesão efectiva mais elevada e ocorre uma redução brusca das

tensões efectivas horizontais chegando mesmo a ser nulas a partir dos 5 m de profundidade, os resultados obtidos por equilíbrio limite e por elementos finitos são praticamente iguais.

Mais uma vez, tal como acontece com a análise em que se desprezou a coesão, nas análises 1.2-1a e 1.2-1b os impulsos diferem devido à maior altura enterrada.

Na Figura 5.6 apresentam-se os diagramas de momentos flectores e de esforços transversos calculados por equilíbrio limite e os calculados por elementos finitos.

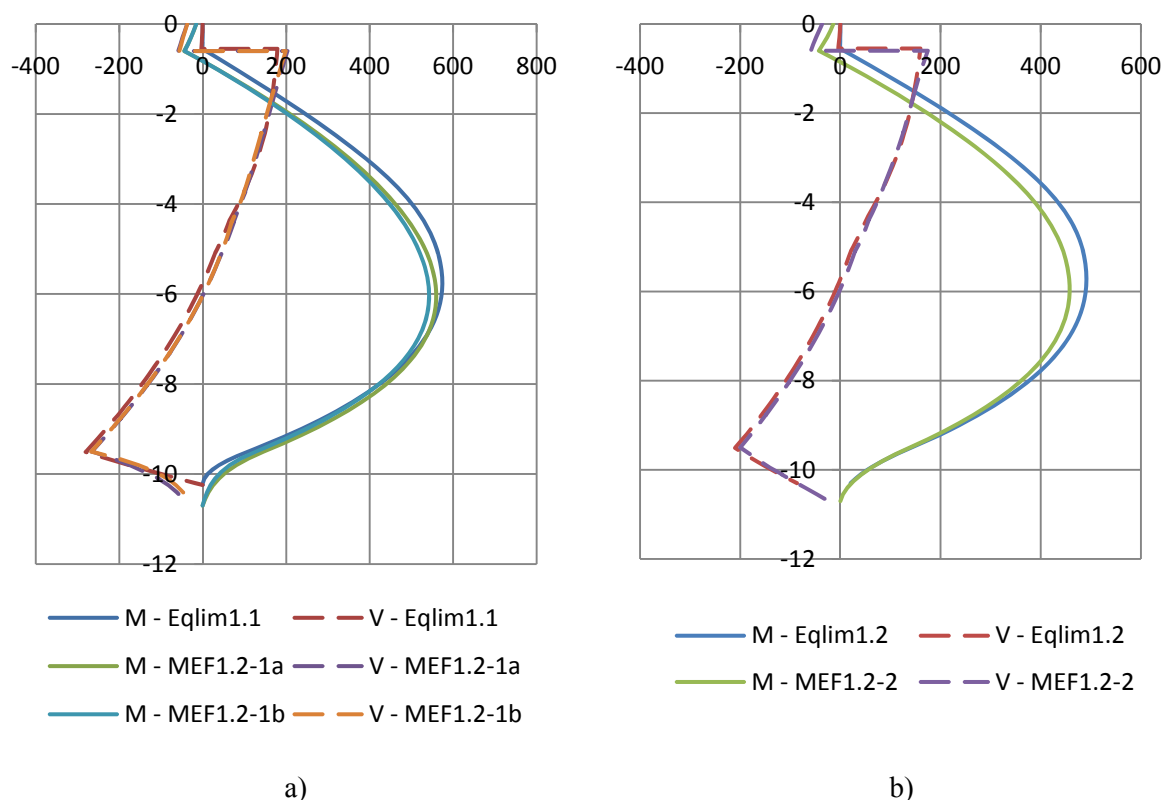


Figura 5.6 – Diagramas de momentos flectores (kN.m/m) e esforços transversos (kN/m) obtidos pelos métodos de equilíbrio limite e pelo método de elementos finitos: a) Abordagem 1.1 do EC7; b) Abordagem 1.2 do EC7

A Figura 5.7 mostra uma comparação dos momentos máximos na cortina de estacas obtidos para os cálculos efectuados por equilíbrio limite e por elementos finitos considerando a coesão. Como é evidenciado, os resultados são muito próximos, sendo ligeiramente inferiores os obtidos por elementos finitos.

Como é evidente a semelhança nos resultados obtidos pelas análises 1.2-1a e 1.2-1b, nos pontos seguintes optou-se por usar apenas a Análise 1.2-1a que se passará a designar de 1.2-1.

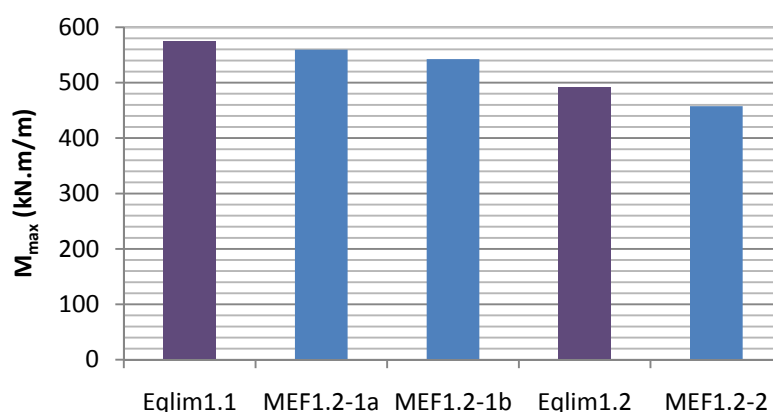


Figura 5.7 – Momentos flectores máximos obtidos pelos diferentes métodos

5.4. AVALIAÇÃO DO ERRO COMETIDO AO ADMITIR QUE NÃO OCORRE PERCOLAÇÃO

5.4.1. INTRODUÇÃO

Como foi referido, nos casos em que o nível freático está acima da base de escavação, a consideração ou a não consideração da percolação, altera de forma muito significativa a distribuição das pressões da água.

Considerar a pressões hidrostáticas onde na realidade existe percolação produz, ao nível das pressões da água e do solo, diferenças muito significativas. Todavia, como os efeitos que a percolação exerce naquelas duas pressões são de natureza oposta, os diagramas de pressões totais sobre a estrutura para as condições hidrostáticas e hidrodinâmicas em geral não diferem de forma tão importante como cada uma das componentes referidas.

Dado que ao utilizar um cálculo aproximado se está a cometer um erro que pode ser mais ou menos importante, interessa compreender em que medida este erro possa, ou não, comprometer a confiança nos valores calculados.

Assim, recorrendo ao método dos elementos finitos, analisou-se a mesma secção referida no ponto anterior das duas formas. As mesmas análises foram feitas desprezando o contributo da coesão e considerando-o, tal como resume o Quadro 5.8.

A obtenção das pressões neutras com percolação foi feita igualmente com o recurso ao programa de elementos finitos PLAXIS que usa para tal a mesma malha de elementos finitos.

O nível freático foi considerado a 2 m de profundidade tal como o esquematizado na Figura 4.11.

Quadro 5.8 – Análises para avaliar o erro cometido ao admitir que não ocorre percolação

Análise	Contributo da Coesão	Pressões da Água
AP	Não	Com percolação
AH	Não	Sem percolação (Hidrostático)
CP	Sim	Com percolação
CH	Sim	Sem percolação (Hidrostático)

5.4.2. RESULTADOS

Análises desprezando a coesão (modelações AP e AH)

Nas Figuras 5.8 e 5.9 apresentam-se os diagramas de pressões da água, de terras e totais, calculados desprezando a coesão dos solos para a situação em que se admite que não existe percolação e admitindo a percolação para as Análises 1.2-1 e 1.2-2, respectivamente.

Observando as Figuras 5.8 e 5.9, verifica-se que devido à existência de percolação (modelação AP) ocorre um aumento das pressões do lado passivo e uma diminuição no lado activo, tomando como referência a situação hidrostática (modelação AH). Contudo, no que diz respeito às pressões de terras os efeitos são contrários, resultando, no final, que as pressões totais são muito semelhantes nas duas situações.

Assim, em solos não coesivos, o cálculo sem consideração da percolação produz resultados cujo erro é desprezável e além disso está do lado da segurança.

Análises considerando a coesão (modelações CP e CH)

Nas Figuras 5.10 e 5.11 apresentam-se os diagramas de pressões da água, de terras e totais, calculados para a situação em que se admite que não existe percolação e admitindo a percolação para as Análises 1.2-1 e 1.2-2, respectivamente.

No geral a influência da percolação quando se considera a coesão efectiva dos solos é, em termos qualitativos, semelhante ao que acontece quando se despreza.

As maiores diferenças obtidas nas modelações CP e CH, em termos de pressões totais, ocorrem nos locais onde a elevada coesão dos solos envolvidos é suficiente para que não se produzam pressões de terras.

Por fim, pode concluir-se que os resultados obtidos admitindo que não ocorre percolação são suficientemente próximos para que as análises partindo deste princípio sejam válidas. Além disso, as diferenças que ocorrem estão do lado da segurança.

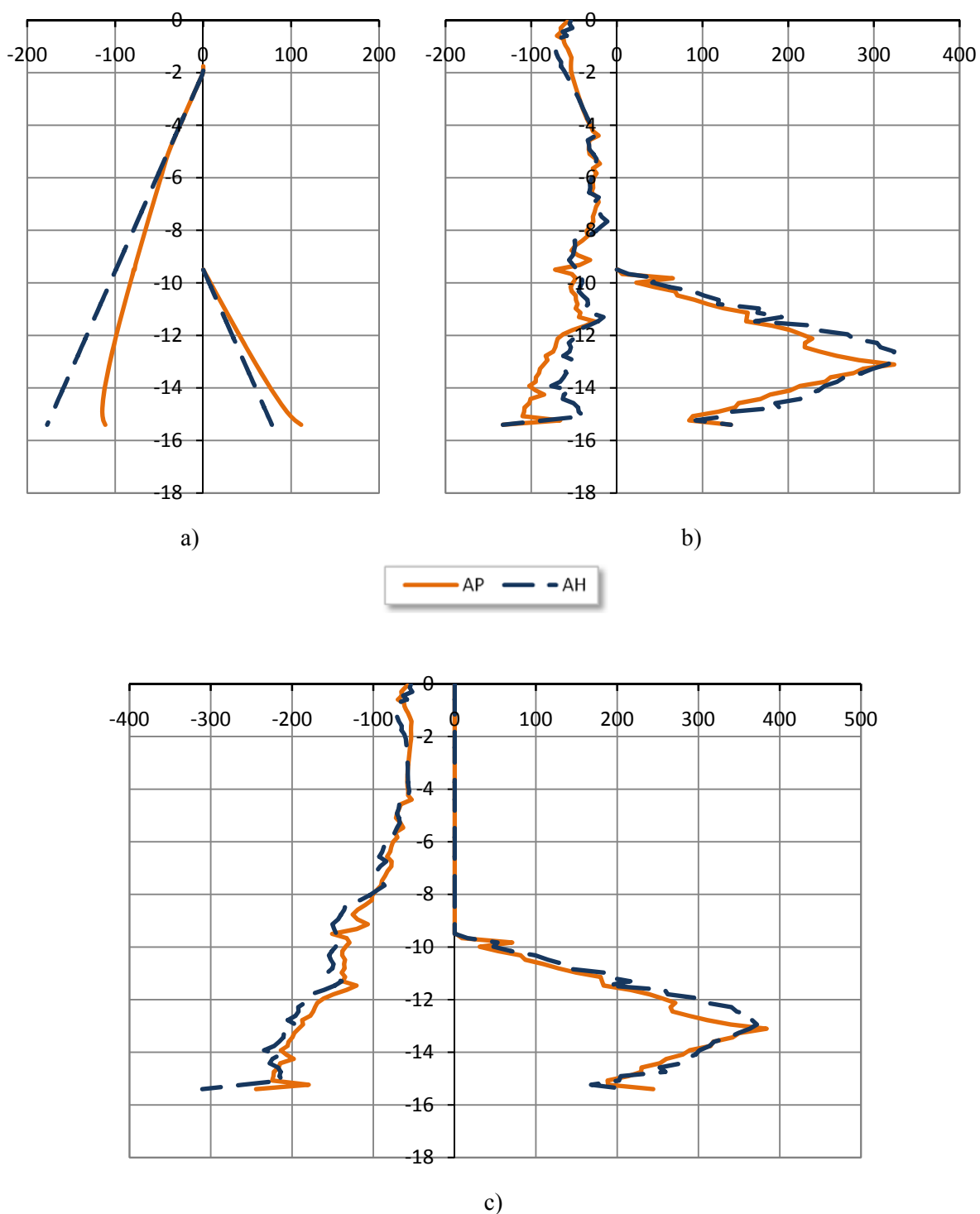


Figura 5.8 – Pressões sobre a cortina em nas modelações AP e AH segundo a Análise 1.2-1: a) pressões da água; b) pressões de terras; c) pressões totais

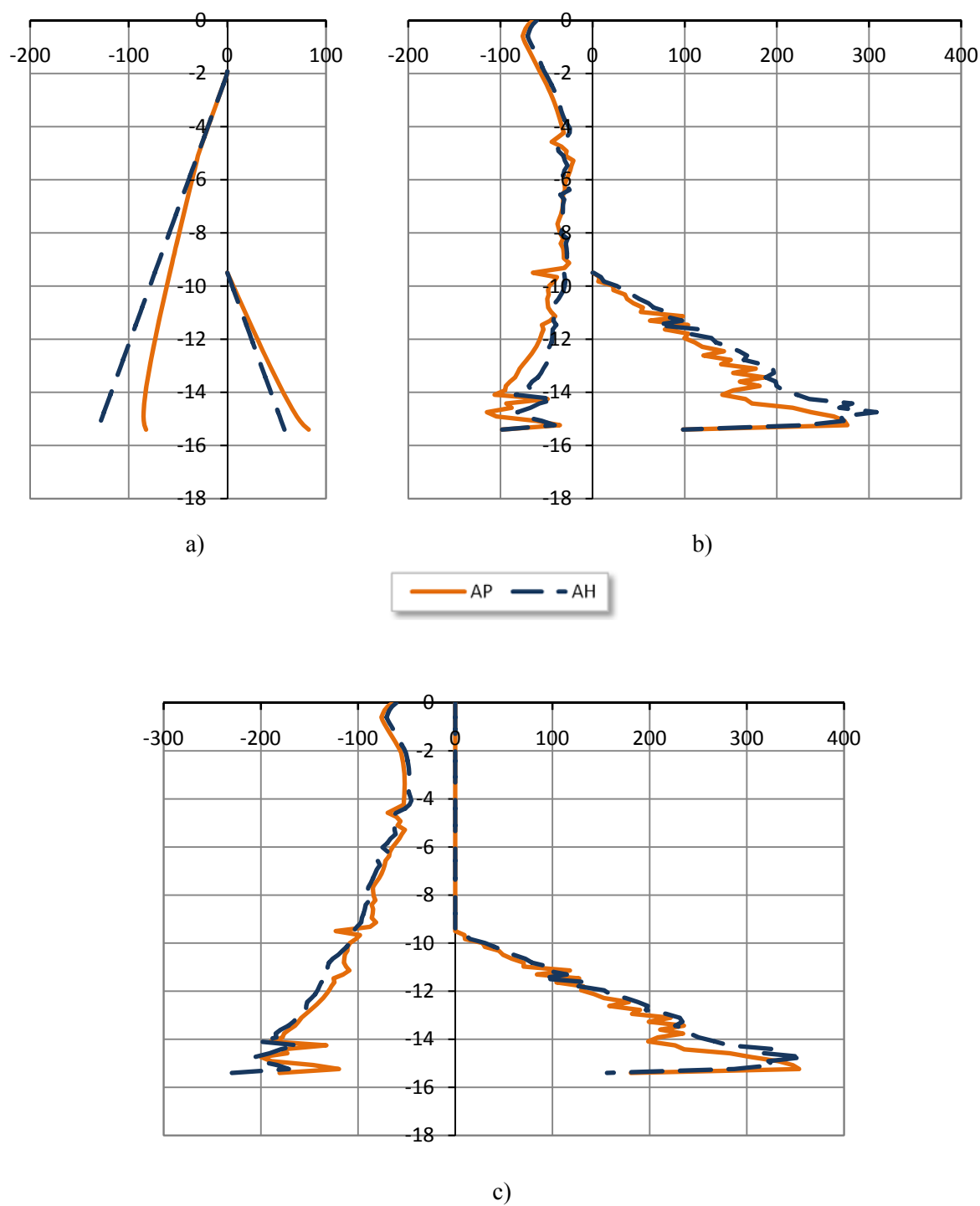


Figura 5.9 – Pressões sobre a cortina em nas modelações AP e AH segundo a Análise 1.2-2: a) pressões da água; b) pressões de terras; c) pressões totais

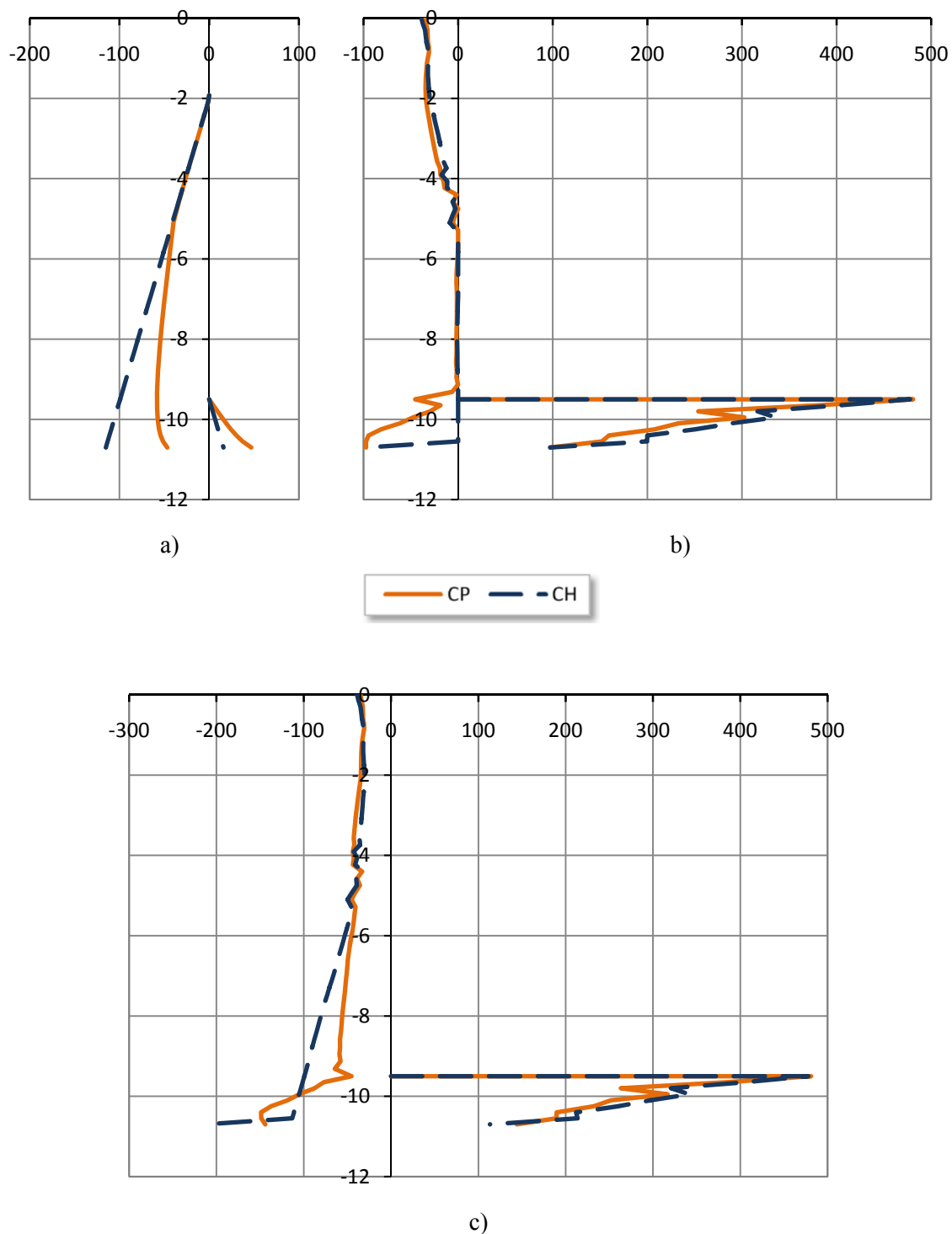


Figura 5.10 – Pressões sobre a cortina em nas modelações CP e CH segundo a Análise 1.2-1: a) pressões da água; b) pressões de terras; c) pressões totais

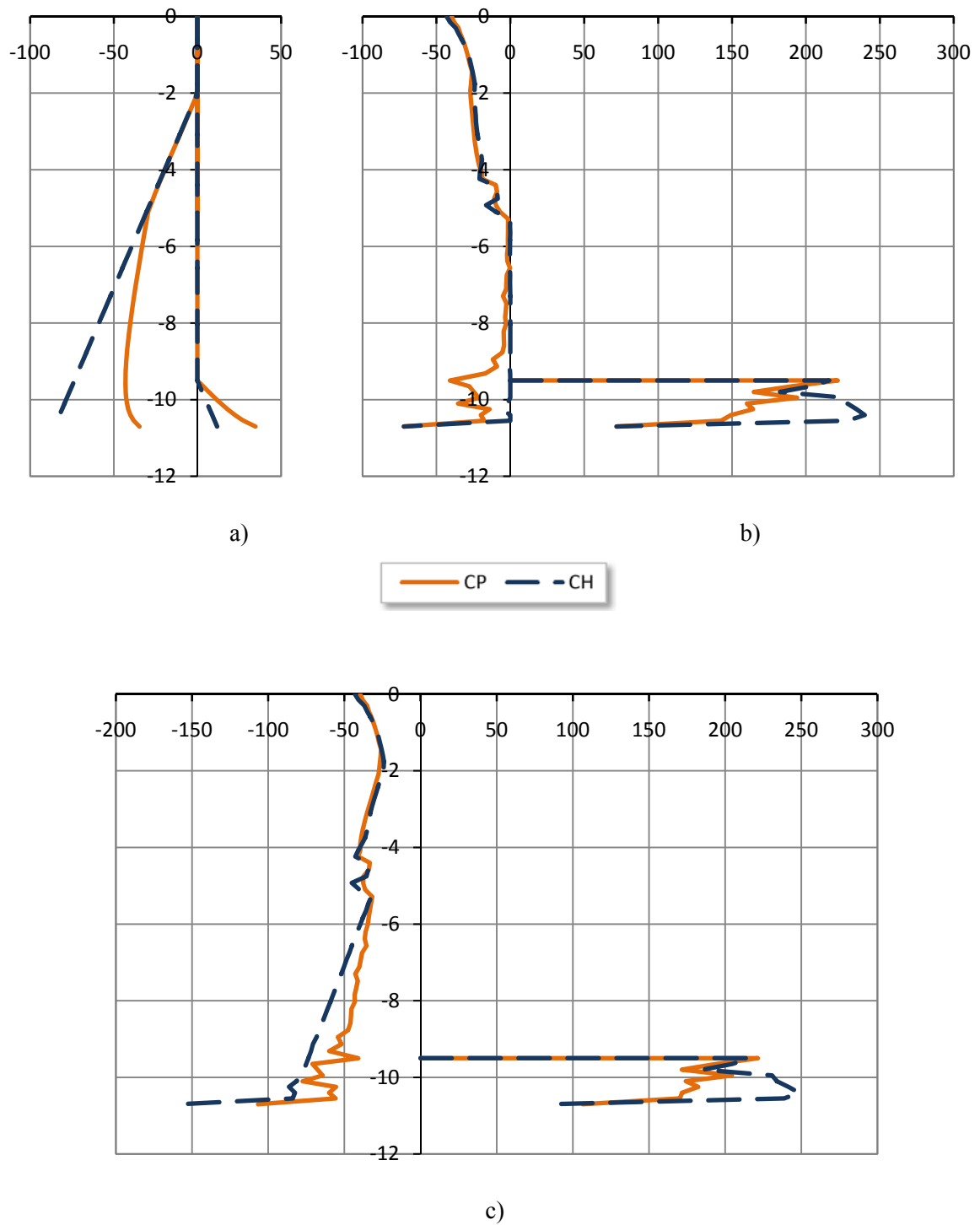


Figura 5.11 – Pressões sobre a cortina em nas modelações CP e CH segundo a Análise 1.2-1: a) pressões da água; b) pressões de terras; c) pressões totais

5.5. INFLUÊNCIA DA LIGAÇÃO LAJE-CORTINA

5.5.1. INTRODUÇÃO

Como se observou no pré-dimensionamento, a opção de ligar a laje de forma rígida à cortina de estacas será uma opção aparentemente conveniente. No caso de se considerar uma ligação rígida, os cálculos pelos métodos clássicos não são capazes de fornecer os dados necessários ao dimensionamento uma vez que os pressupostos em que assentam não são válidos.

Na obra em estudo os vãos a vencer pelas lajes de cobertura são consideráveis, pelo que o modo de funcionamento da estrutura será completamente diferente. Uma correcta avaliação do impacto que as opções estruturais têm nos esforços e movimentos que os elementos estruturais vão sofrer e provocar nas estruturas vizinhas, como sejam edifícios nas proximidades, é essencial na escolha de uma solução técnica e economicamente otimizada.

Assim, considerou-se essencial analisar a melhor forma de ligar a cortina de estacas à laje de cobertura.

Recorrendo à malha de elementos finitos apresentada na Figura 5.12, que corresponde à secção 2C (km 1+528) simplificada considerada como simétrica, foram feitas as modelações resumidas no Quadro 5.9, considerando a segurança de acordo com os métodos 1.2-1 e 1.2-2.

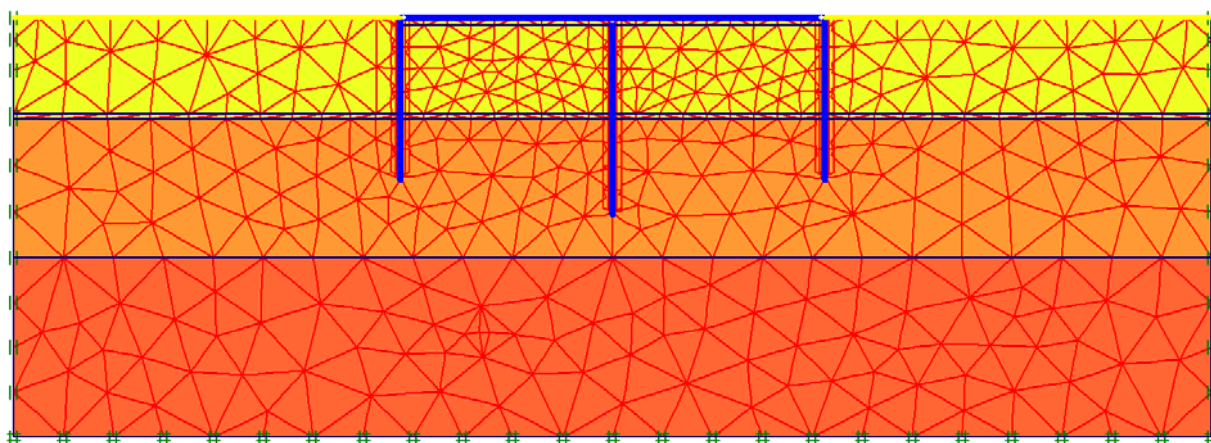


Figura 5.12 – Malha de elementos finitos utilizada na modelação admitindo a secção simétrica (elementos triangulares de 15 nós)

Quadro 5.9 – Designação e características das modelações para avaliar a influência da ligação laje-cortina

Análise	Secção	Ligação Laje-Cortina
SA	Simétrica	Articulada
SR	Simétrica	Rígida

Refira-se que o carregamento devido aos restabelecimentos foi simulado através de uma sobrecarga sobre a laje de cobertura.

5.5.2. RESULTADOS

Esforços resultantes nas estruturas

A Figura 5.13 representa os diagramas de momentos flectores na cortina obtidos segundo a Abordagem de Cálculo 1 do EC7 (Análises 1.2-1 e 1.2-2) admitindo uma ligação laje-cortina rígida e articulada.

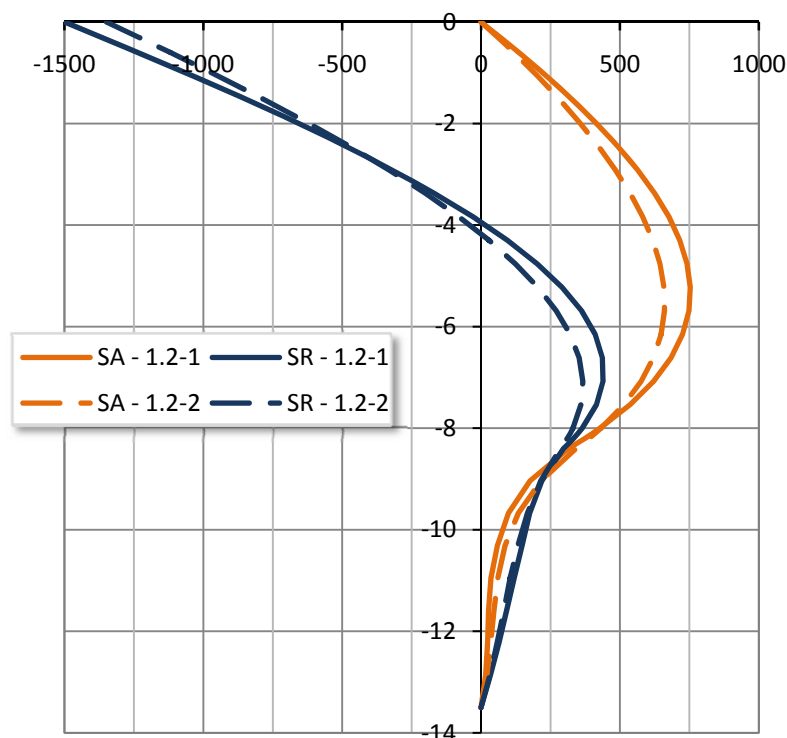


Figura 5.13 – Diagrama de momentos flectores (kN.m/m) na cortina com ligação à laje rígida e articulada.

Da análise Figura 5.13 constata-se que ligando rigidamente a laje à cortina de estacas, o momento flector que é transmitido pela laje é muito superior ao momento máximo que se obtém considerando a ligação articulada. Contudo, dado que as tensões efectivas horizontais do lado do terreno são maiores, como se pode observar na Figura 5.14, devido às menores deformações que a cortina sofre junto ao topo, a cerca de 2 m de profundidade o momento flector negativo já é inferior ao momento máximo positivo que ocorre considerando a ligação articulada.

Assim, no que diz unicamente respeito ao momento flector máximo na cortina, tal opção seria de evitar. Contudo essa opção trará vantagens ao nível dos esforços na laje, como se mostra na Figura 5.15.

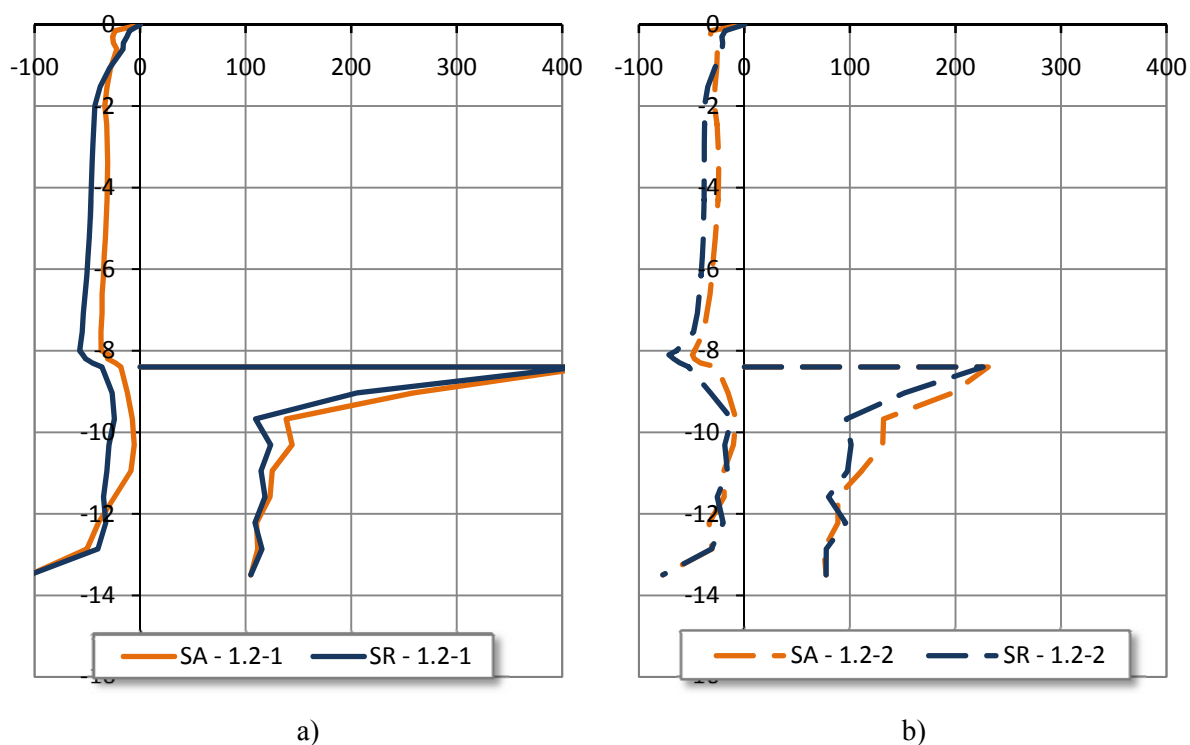


Figura 5.14 – Tensões horizontais efectivas na cortina (kPa) com ligação à laje rígida (SR) e articulada (SA): a) Análise 1.2-1; b) Análise 1.2-2

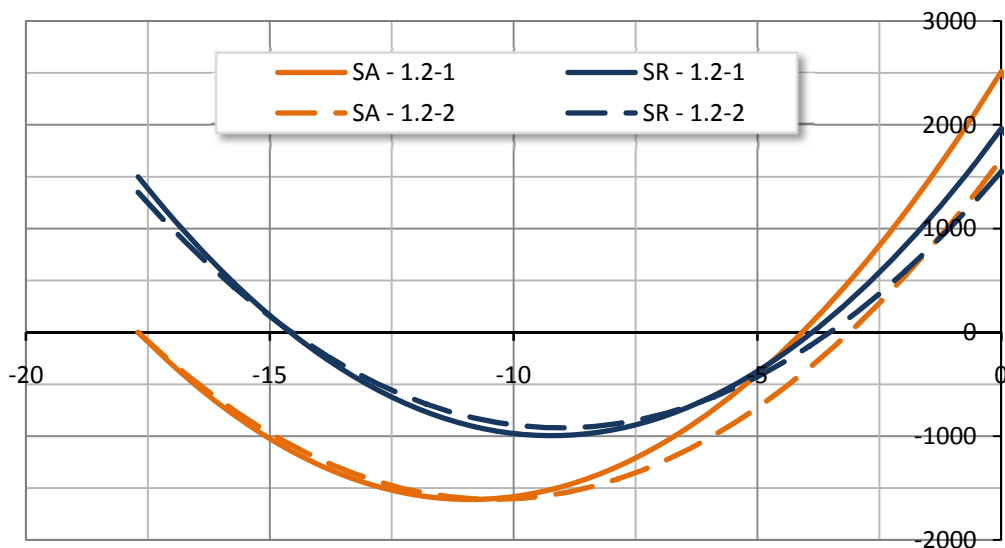


Figura 5.15 – Momentos flectores (kN.m/m) na laje de cobertura com ligação à cortina rígida e articulada.

Os momentos flectores na laje de cobertura são fortemente atenuados quando se liga rigidamente à cortina de estacas, principalmente ao nível dos momentos positivos. Dado que os vãos a vencer são bastante elevados assim como a grandeza dos carregamentos a que a laje está sujeita, ao nível do dimensionamento da laje seria benéfico optar por liga-la rigidamente à cortina de estacas.

Deslocamentos horizontais da cortina e assentamentos à superfície

Nas Figuras 5.16 e 5.17 apresentam-se, respectivamente, os deslocamentos horizontais da cortina de estacas e os assentamentos da superfície do terreno na última fase de escavação, antes de aplicar as sobrecargas relativas à cobertura dos túneis, considerando a ligação laje-cortina articulada e rígida.

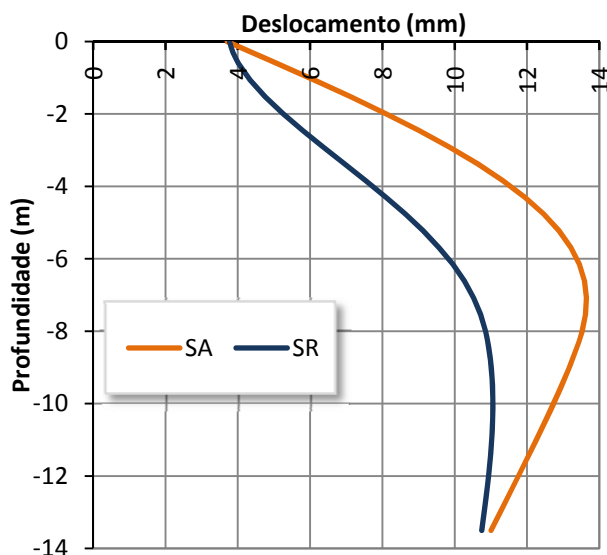


Figura 5.16 – Deslocamentos horizontais da cortina de estacas no final da escavação

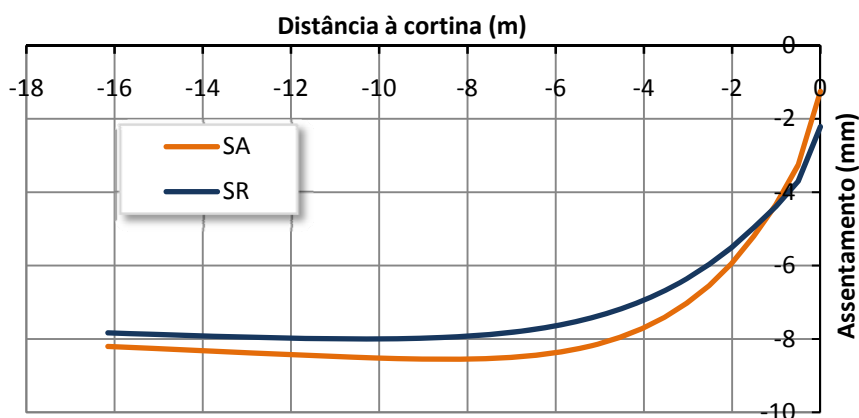


Figura 5.17 – Assentamentos verticais previstos à superfície do terreno no final da escavação

Analisando a Figura 5.16, verifica-se que ao considerar uma ligação rígida os movimentos da cortina são reduzidos. Contudo, esse efeito reduz-se fortemente em profundidade até que no pé da cortina os deslocamentos em ambas as condições são sensivelmente iguais.

No que diz respeito aos assentamentos à superfície, contrariamente ao que seria de esperar, não se produzem diferenças significativas nem na distribuição nem na grandeza dos mesmos.

Assim, do ponto de vista dos assentamentos que decorrem da escavação, no caso de a secção ser simétrica, a adopção de uma ligação rígida não traria benefícios significativos.

5.6. INFLUÊNCIA DAS ASSIMETRIAS DEVIDAS AO DECLIVE DO TERRENO

5.6.1. INTRODUÇÃO

O cálculo efectuado pelo método de equilíbrio limite só faz sentido admitindo que as secções são aproximadamente simétricas. Tal facto decorre de o esforço a que a escora está sujeita ser transmitido de uma parede para a outra sendo o mesmo de ambos os lados. Caso não haja simetria, os esforços a que cada uma das cortinas vai estar sujeita vão ser diferentes e consequentemente é impossível que se atinja o estado limite activo nos solos adjacentes às duas contenções.

Dado que na maioria das secções em estudo tal simetria não se verifica, torna-se necessário averiguar o que ocorre na cortina oposta à calculada. Em todas as secções pré-dimensionadas os esforços foram calculados para o lado mais desfavorável (que em todos os casos é a cortina esquerda por ser deste lado que o terreno é mais elevado) e admitiu-se a mesma solução estrutural na cortina oposta.

Como forma de verificar as implicações destas considerações recorreu-se ao cálculo por elementos finitos. Como se está a falar de esforços de dimensionamento (em estado limite último) esta análise foi feita considerando a segurança de acordo com os métodos 1.2-1 e 1.2-2, descritos em 5.2

Na Figura 5.18, apresenta-se a malha de elementos finitos considerando o desnível do terreno e no Quadro 5.10 resume-se as características de cada análise efectuada.

Quadro 5.10 – Designação e características das análises efectuadas para avaliar a influência do declive do terreno

Análise	Secção	Ligação Laje-Cortina	Contributo dos pilares centrais para os esforços horizontais
S1	Simétrica	Articulada	-
R1	Real	Articulada	Não
R1p	Real	Articulada	Sim
S2	Simétrica	Rígida	-
R2	Real	Rígida	Não
R2p	Real	Rígida	Sim

A secção estudada foi a secção 2C (km 1+528), por ser a que apresenta um maior declive do terreno. Pelo facto da cortina mais desfavorável ser a do lado esquerdo, o edifício nas proximidades da cortina direita foi desprezado. A malha de elementos finitos utilizada na modelação considerando a secção real é a apresentada na Figura 5.18, e para a modelação admitindo a secção simétrica a malha de elementos finitos é a mesma das análises descritas em 5.5 e apresentada na Figura 5.12.

Para simular o estado de tensão inicial para as modelações com secção real são introduzidas 2 fases adicionais. Inicialmente calcula-se o estado de tensão admitindo a superfície do terreno horizontal com base no K_0 , considerando todos os elementos da malha da Figura 5.18. Na segunda fase remove-se o terreno até à superfície real e coloca-se o nível freático a 2 m de profundidade.

Antes da simulação da construção o campo de deslocamentos gerado por estas fases iniciais foi anulado.

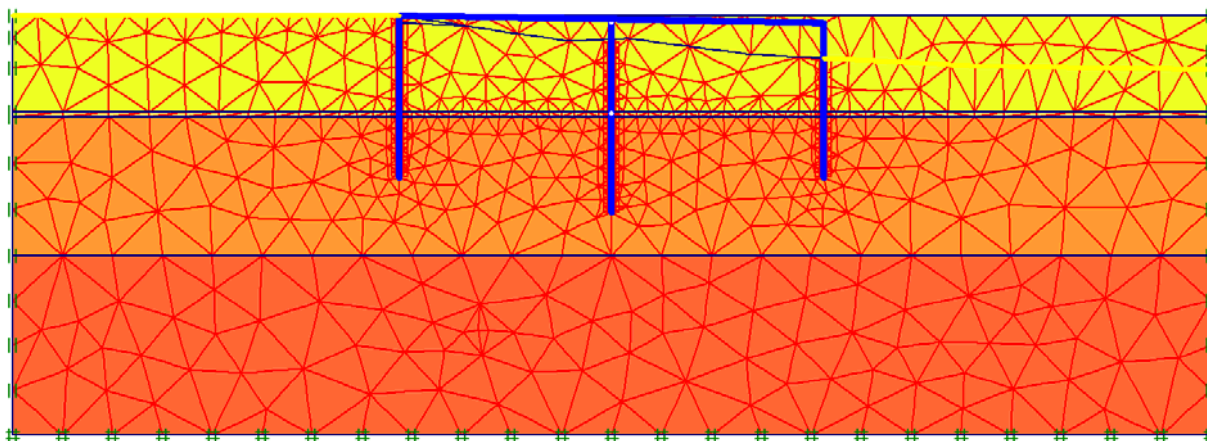


Figura 5.18 - Malha de elementos finitos utilizada na modelação admitindo a secção real, com o declive do terreno (elementos triangulares de 15 nós)

5.6.2. RESULTADOS

Esforços nos elementos estruturais

Nas Figuras 5.19 e 5.20 apresentam-se os diagramas de momentos flectores obtidos nas cortinas esquerda e direita, respectivamente, para as seis modelações efectuadas.

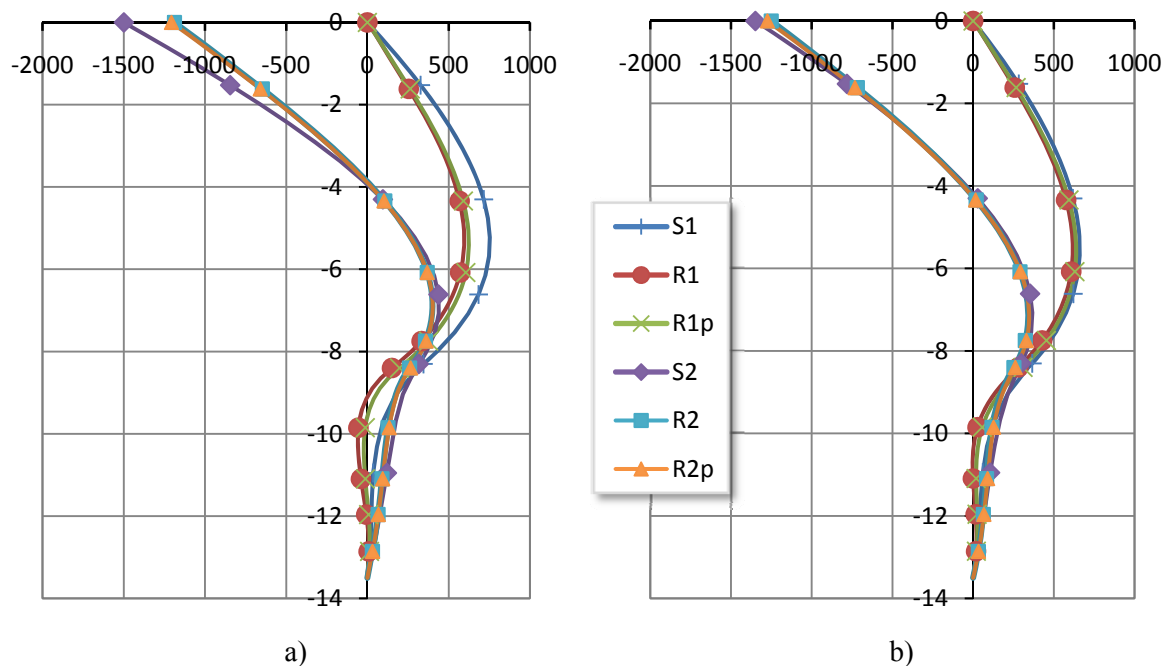


Figura 5.19 – Momentos flectores na cortina esquerda (kN.m/m): a) Análise 1.2-1; b) Análise 1.2-2

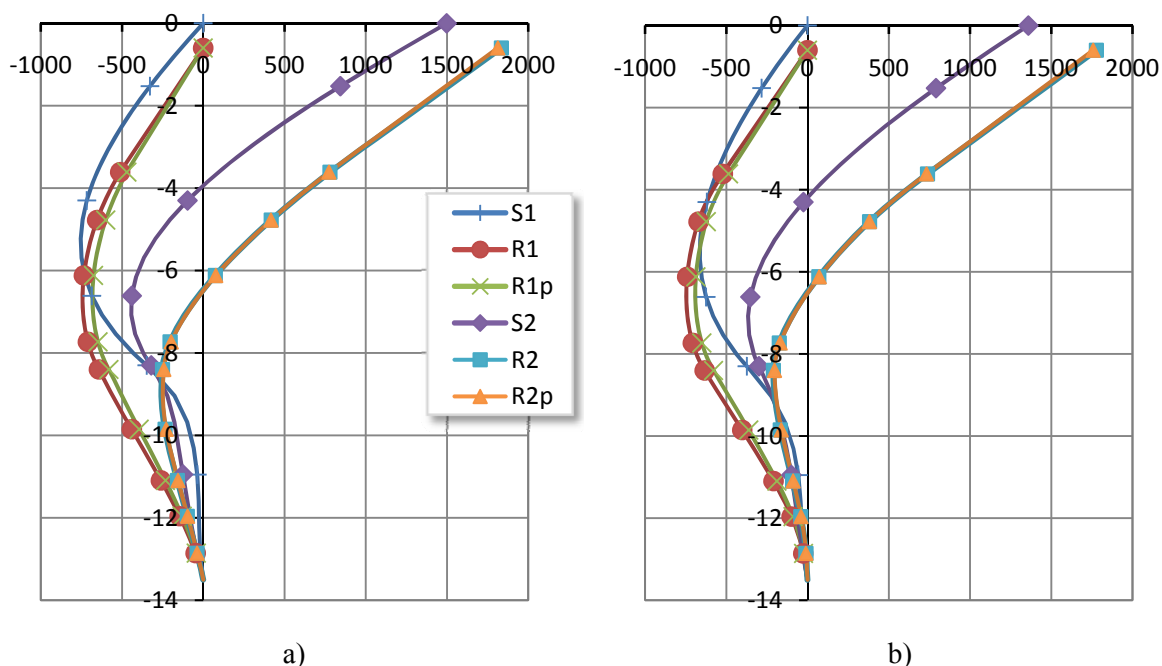


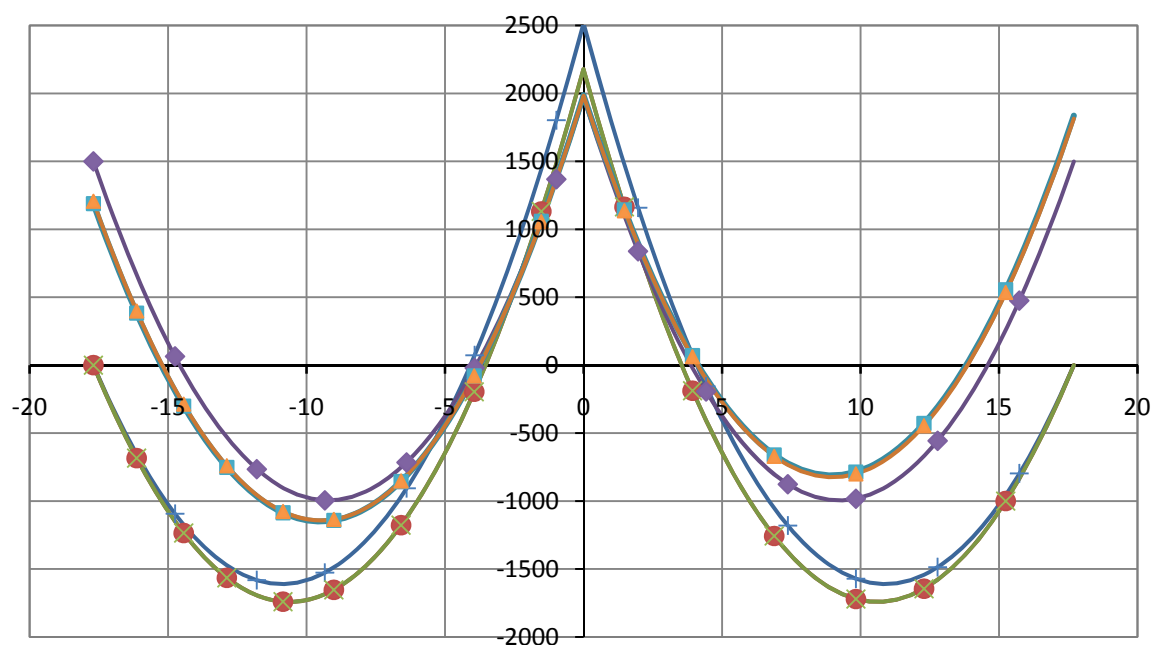
Figura 5.20 – Momentos flectores na cortina direita (kN.m/m): a) Análise 1.2-1; b) Análise 1.2-2

Da análise das figuras, constata-se que ao considerar a secção com o declive do terreno, no caso de a ligação laje-cortina ser articulada, há uma ligeira diminuição dos momentos flectores na cortina esquerda. Por outro lado, na cortina da direita os momentos flectores, apesar de apresentarem uma distribuição diferente e de aumentarem na análise 1.2-2, apresentam um valor máximo semelhante ao que se obtém considerando a secção simétrica.

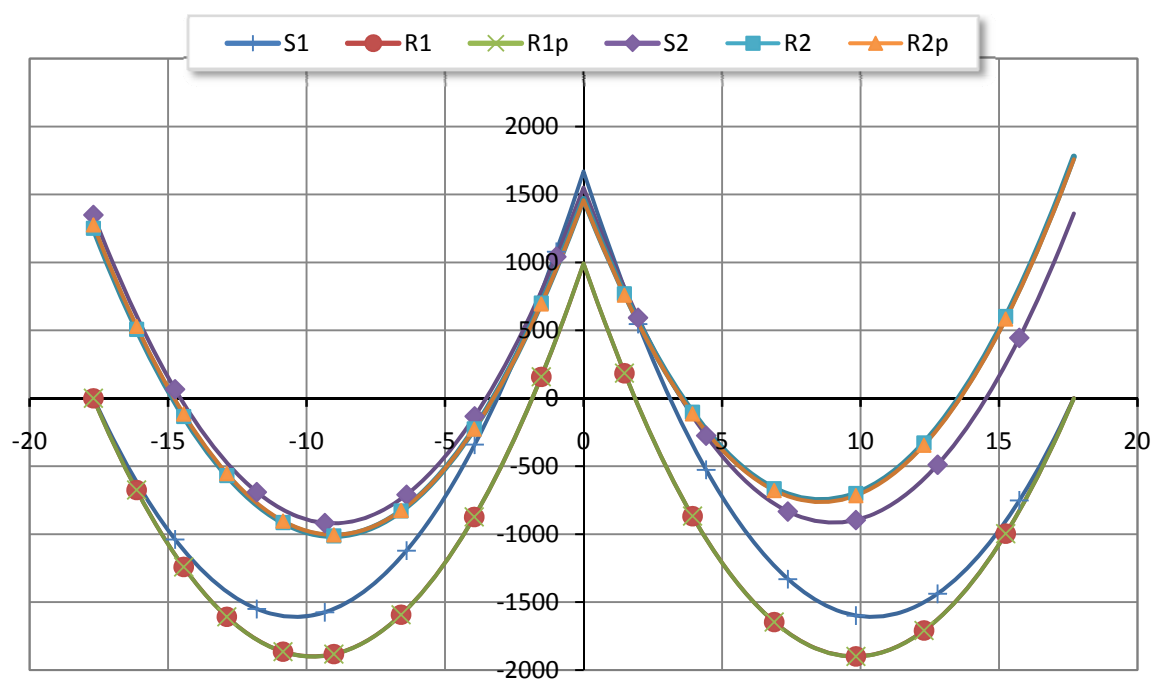
No caso de a ligação ser rígida, o momento flector máximo, que ocorre na ligação com a laje, também é ligeiramente reduzido na cortina da esquerda comparativamente com o que ocorre na modelação com secção simétrica.

Refira-se que o contributo dos pilares centrais é quase nulo, o que seria previsível uma vez que a sua rigidez é muito inferior e o braço até à base de escavação é elevado.

Na laje de cobertura a influência da inclinação do terreno nos momentos flectores calculados, como se observa na Figura 5.21, não é muito significativa, tendo o tipo de ligação às cortinas de estacas influência semelhante à que tem na secção simétrica.



a)



b)

Figura 5.21 – Momentos flectores na laje de cobertura (kN.m/m): a) Análise 1.2-1; b) Análise 1.2-2

A influência da inclinação do terreno e do tipo de ligação da laje às cortinas nos deslocamentos destas é ilustrada pela Figura 5.22.

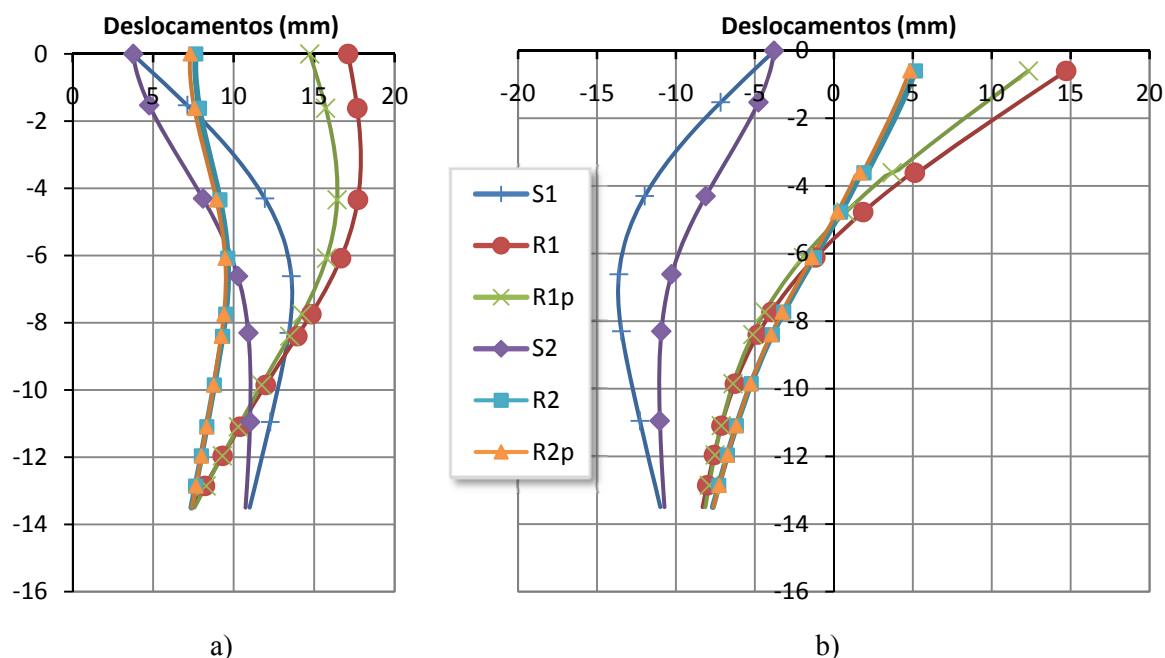


Figura 5.22 – Deslocamentos horizontais nas cortinas de estacas: a) cortina esquerda; b) cortina direita.

Como seria de prever, as deformadas nas análises com secção simétrica são muito distintas das obtidas para a secção real.

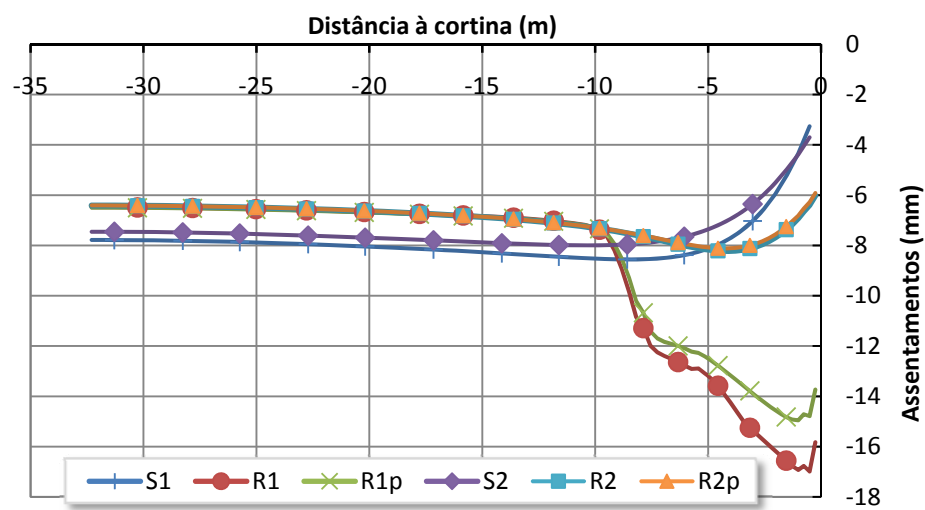
A influência da ligação à laje é muito evidente permitindo uma redução para cerca de metade os movimentos horizontais no topo das cortinas quando se considera uma ligação rígida

Os pilares centrais têm influência apenas mensurável quando se admite uma ligação articulada entre a laje e a cortina, pois neste caso os movimentos são suficientemente grandes para mobilizar alguma resistência naqueles apoios.

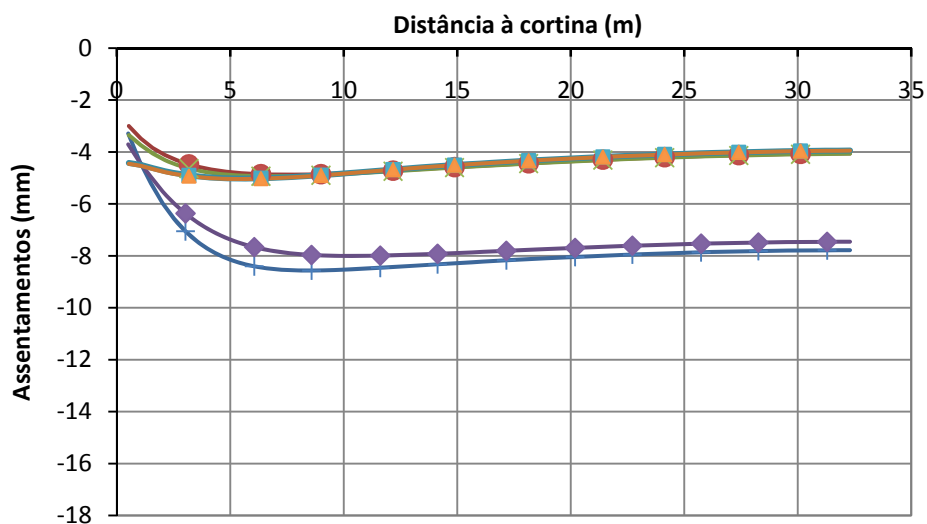
Os assentamentos que ocorrem à superfície mostram-se na Figura 5.23.

Como consequência dos movimentos elevados da cortina esquerda para o lado da escavação, no caso de a ligação ser articulada (modelações R1 e R1p), ocorrem assentamentos elevados nos 10 m adjacentes. Esses assentamentos, aparentemente estranhos, resultam da entrada em cedência do maciço como se observa na Figura 5.24. Apesar de em relação aos esforços a escolha do tipo de ligação laje-cortina mais conveniente a adoptar ser discutível, em termos de assentamentos é evidente que a melhor solução será optar por uma ligação rígida, especialmente em secções em que o desnível da superfície do terreno entre as duas contenções seja elevado.

Refira-se ainda que em escavações deste género, com declive do terreno, a adopção das soluções obtidas pelos métodos clássicos para a contenção mais desfavorável (em termos de altura da escavação) exige cautela pois pode conduzir a esforços superiores ou mesmo à rotura na contenção oposta.



a)



b)

Figura 5.23 – Assentamentos à superfície do terreno junto às contenções: a) esquerda; b) direita

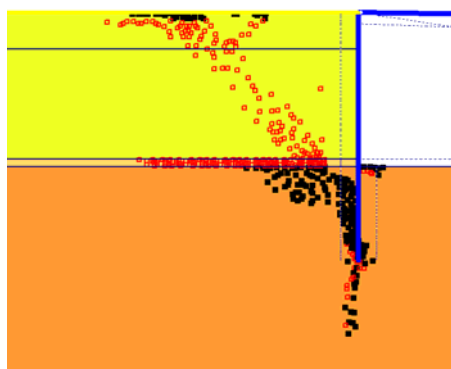


Figura 5.24 – Pontos em cedência junto à cortina esquerda para a análise R1p com os valores característicos das propriedades dos solos e das sobrecargas.

5.7. INFLUÊNCIA DA FORMA COMO OS EDIFÍCIOS SÃO CONSIDERADOS

5.7.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A avaliação do impacto que as escavações possam ter nos edifícios localizados nas imediações é um assunto de extrema importância pois as soluções a adoptar são em muitos casos condicionadas pelos danos que eventualmente poderiam causar nas construções.

Esta avaliação é feita com base nas deformações previstas à superfície durante a fase construtiva e durante a exploração da obra.

No caso de uma cortina de estacas vertical o cálculo das cargas horizontais que esta recebe devido à presença de edifícios nas imediações não oferece grandes dificuldades. Contudo, quando se fala em termos de assentamentos que ocorrerão nos edifícios o cálculo torna-se mais complexo.

Factores como a rigidez do edifício, o tipo de fundações e a distribuição das cargas que este transmite ao terreno influenciam em grande medida as deformações que vai sofrer para compensar as alterações no estado de tensão do maciço que decorrem das escavações.

Assim, ao simular um edifício através de uma simples carga distribuída a toda a largura ou de várias cargas distribuídas simulando um conjunto de sapatas, o bolbo de tensões originado a determinada distância vai ser muito semelhante e, consequentemente, as tensões horizontais transmitidas a uma cortina a construir nas imediações também o serão. Todavia, os assentamentos e distorções que ocorrem no edifício serão distintos nas duas situações. Da mesma forma, a rigidez do edifício também vai influenciar a grandeza e a distribuição dos assentamentos, uma vez que as zonas onde os assentamentos seriam tendencialmente menores recebem mais tensões sendo estas reduzidas nos locais com maiores assentamentos, o que poderá influenciar as pressões transmitidas à cortina.

Os movimentos horizontais também podem ser fortemente afectados pela forma como são modelados os edifícios. Em especial os movimentos horizontais diferenciais sob o edifício podem ser extremamente nefastos no que diz respeito aos danos provocados pelas escavações. O deslocamento horizontal de um apoio do edifício em relação a outro, mesmo que reduzido, pode conduzir a danos consideráveis.

Para averiguar o impacto que a forma de considerar os edifícios tem nos resultados obtidos analisou-se a secção 2B4 (km 1+450) considerando o edifício de várias formas distintas. Dado que a consideração da rigidez do edifício é de elevada complexidade que por si só poderia ser tema de uma tese, apenas se analisaram as situações extremas, ou seja, sem rigidez e infinitamente rígido.

5.7.2. DESCRIÇÃO DAS ANÁLISE EFECTUADAS

A secção 2B4 insere-se num troço semi-coberto em que a parte coberta (vão esquerdo) é materializada por uma laje de betão armado maciça com a espessura de 1,1 m e na zona descoberta são consideradas vigas de contraventamento 0,8x1,1 m² afastadas de 9 m. Os vão são de 17,7 m. As estacas de betão armado têm 1,0 m de diâmetro e são afastadas de 1,5 m.

A secção em estudo apresenta um edifício junto à contenção esquerda de cerca de 21 m de altura que corresponde a um edifício com 7 pisos, com 12 m de largura ao nível do solo e afastado de 3,2 m da cortina de estacas.

As modelações foram feitas simulando o edifício por meio das formas definidas no Quadro 5.11 e esquematizadas na Figura 5.25. A malha de elementos finitos utilizada nas modelações é a apresentada na Figura 5.26.

Quadro 5.11 – Designação das modelações efectuadas para avaliar a influência da forma como os edifícios são considerados

Análise	Tipo de Fundações Admitidas	Simulação do Carregamento do Edifício	Rigidez do Edifício	Ligação Laje-Cortina
EDF	Ensoleiramento geral	Carga distribuída numa faixa a toda a largura	Sem rigidez	Rígida
EDR	Ensoleiramento geral	Carga distribuída numa faixa a toda a largura	Rígido	Rígida
EFF	Sapatas	Cargas distribuídas por faixas curtas	Sem rigidez	Rígida
EFR	Sapatas	Cargas distribuídas por faixas curtas	Rígido	Rígida

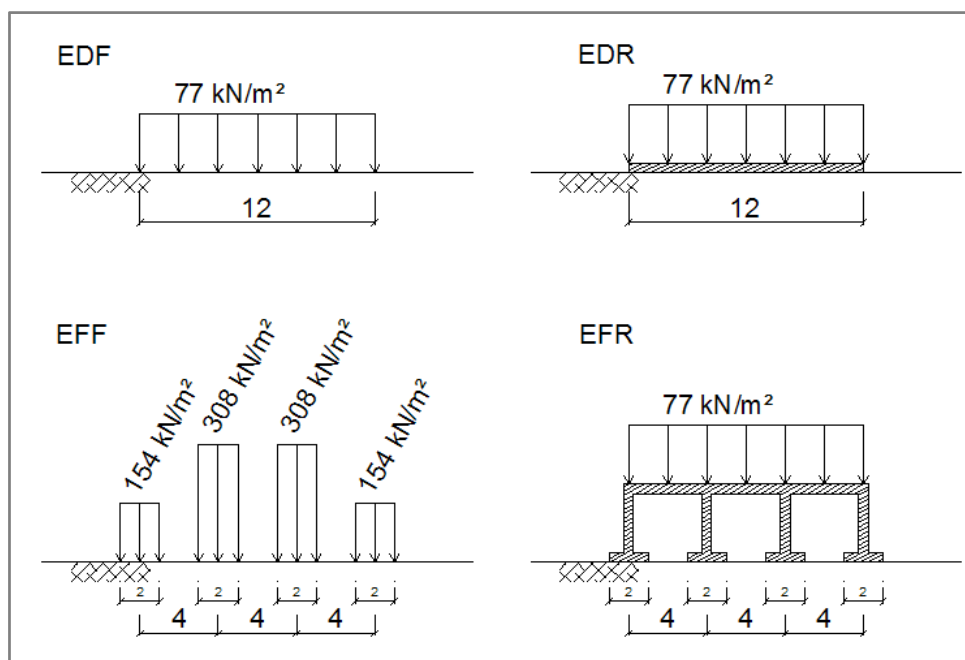


Figura 5.25 – Formas estudadas para considerar os edifícios: EDF - carga distribuída a toda a largura do edifício; EDR - carga distribuída a toda a largura do edifício aplicada sobre um elemento rígido; EFF - cargas distribuídas aplicadas em faixas reduzidas; EFR - cargas distribuídas aplicadas em faixas reduzidas ligadas rigidamente

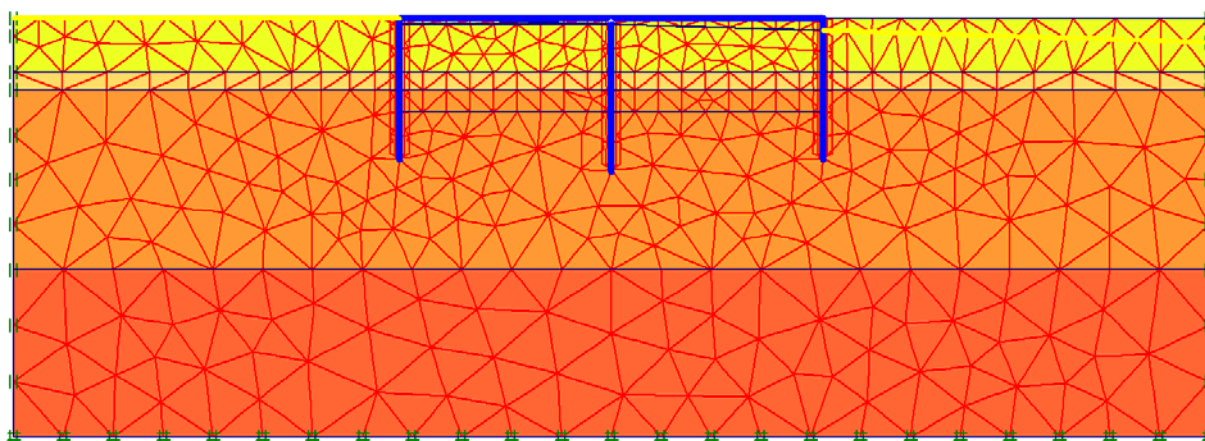


Figura 5.26 – Malha de elementos finitos utilizada nas modelações para avaliar a influência da forma como são considerados os edifícios (elementos triangulares de 15 nós)

Para simular o estado de tensão inicial são introduzidas na modelação 3 fases adicionais. Inicialmente calcula-se o estado de tensão admitindo a superfície do terreno horizontal com base no K_0 , considerando todos os elementos da malha da Figura 5.26. Na segunda fase remove-se o terreno até à superfície real e coloca-se o nível freático a 2 m de profundidade. Finalmente, são aplicadas as sobrecargas relativas ao edifício.

Antes da simulação da construção o campo de deslocamentos gerado por estas fases iniciais foi anulado.

5.7.3. RESULTADOS

A Figura 5.27 representa as tensões efectivas horizontais que se obtêm para as várias formas de considerar o edifício.

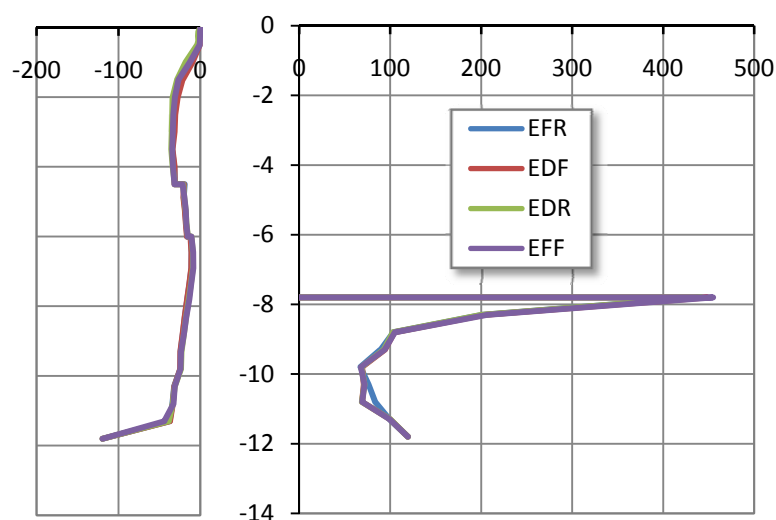


Figura 5.27 – Tensões efectivas horizontais (kPa) para as várias formas de considerar o edifício calculadas com os valores característicos das propriedades dos solos e sobrecargas

A Figura 5.28 mostra os assentamentos à superfície que ocorrem para cada forma de considerar o edifício.

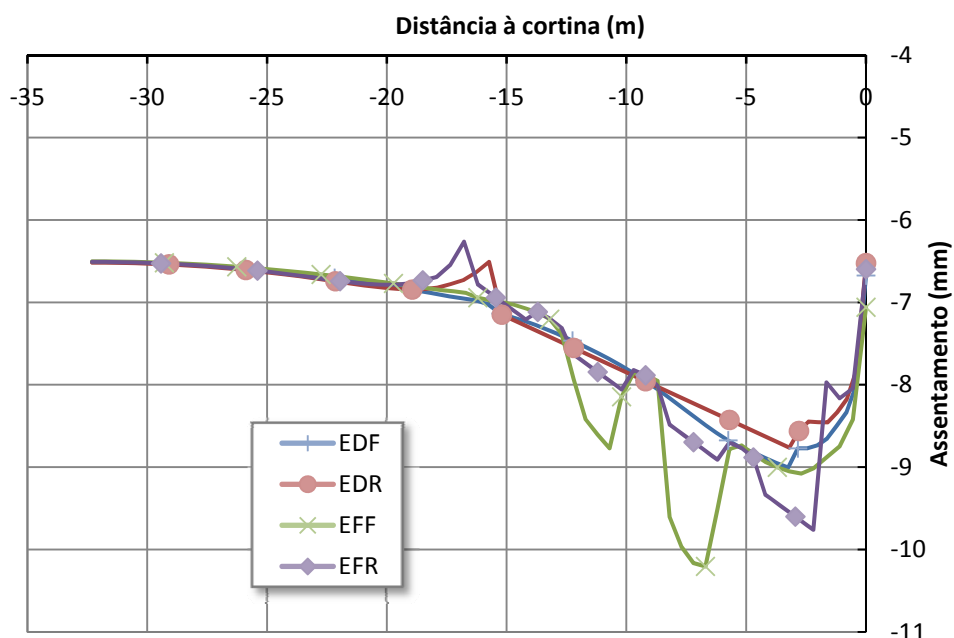


Figura 5.28 – Assentamentos à superfície do terreno nas diferentes formas de considerar o edifício

Tal como se previa, as diferentes formas de considerar o edifício praticamente não influenciam as pressões a que a cortina está sujeita. Esse facto fica evidente nos diagramas de pressões de terras apresentados na Figura 5.27.

Em relação aos assentamentos à superfície estes são muito influenciados quer pela rigidez do edifício, quer pela forma com este transmite as cargas ao terreno.

O efeito da rigidez do edifício é particularmente evidente nas modelações em que é simulado considerando cargas distribuídas em várias faixas estreitas (modelações EFF e EFR). A explicação reside no facto de ao considerar o edifício sem rigidez, a sobrecarga nas faixas centrais é o dobro da que é aplicada nos extremos, enquanto que considerando o edifício rígido as cargas transmitidas em cada uma das faixas é, antes do início das escavações, igual em todas elas.

Em relação às distorções angulares que ocorrem nas duas modelações em que não se considera a rigidez do edifício, na modelação EDF a distorção angular máxima sob o edifício é de $0,013\text{E-}3$ rad, que é cerca de dez vezes inferior à calculada na modelação EFF no centro da segunda carga mais próxima da escavação, onde as distorções angulares que ocorrem são de cerca de $1,504\text{E-}3$ rad.

Constata-se também que os assentamentos da superfície do terreno nas várias situações só diferem nas imediações do edifício, sendo as diferenças diluídas numa distância muito curta.

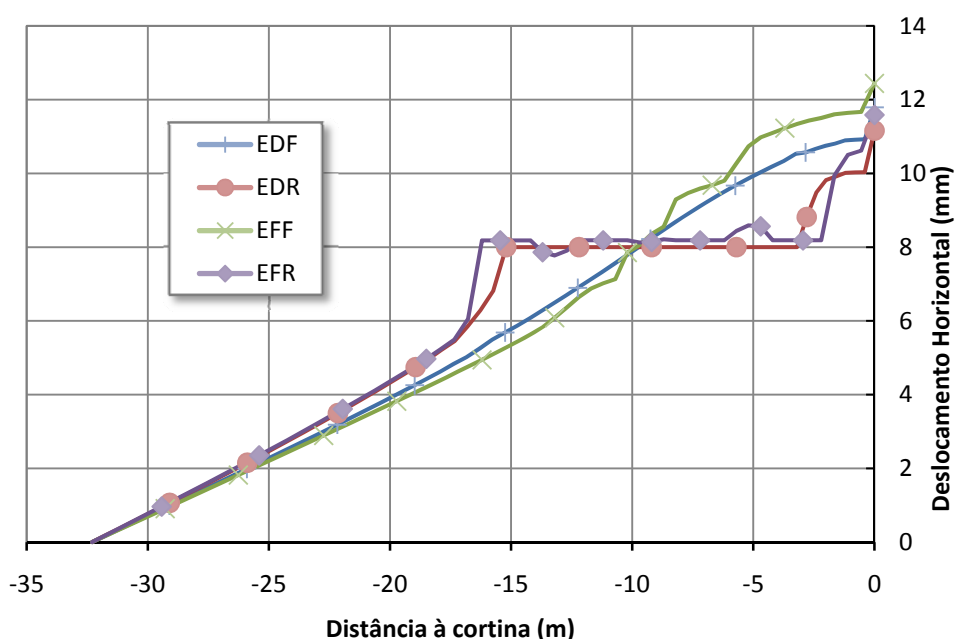


Figura 5.29 – Deslocamentos horizontais à superfície para as diferentes formas de considerar o edifício

No que diz respeito aos movimentos horizontais, tal como acontece para os assentamentos, obtêm-se resultados distintos nas modelações EDF e EFF. Como se pode constatar a partir da análise da Figura 5.29, na modelação EDF a extensão média que ocorre sob o edifício é de 0,40‰ enquanto, ao modelar o edifício considerando cargas distribuídas aplicadas em faixas reduzidas (modelação EFF) a extensão média passa para 0,51‰, que apesar de ser uma diferença significativa não é preocupante. Contudo, analisando em termos de extensões máximas, na modelação EDF obtém-se uma extensão de 0,46‰, que é pouco superior à média, enquanto na modelação EFF a extensão máxima é de 1,48‰, ocorrendo entre as duas sapatas mais próximas da contenção.

No Quadro 5.12 apresentam-se os valores máximos das extensões e das distorções angulares obtidos nas modelações em que se considerou os edifícios sem rigidez.

Quadro 5.12 – Extensões e distorções angulares máximas nas modelações EDF e EFF

Modelação	Extensão máxima ϵ ($\times 10^{-3}$)	Distorção angular β ($\times 10^{-3}$)
EDF	0.46	0.013
EFF	1.48	1.504

Nota: Na modelação EFF foram considerados nos cálculos apenas os pontos centrais de cada carga

Combinando os valores referentes à modelação EDF apresentados no Quadro 5.12 com a Figura 5.30, pode prever-se que a escavação produza danos muito leves, facilmente reparáveis no edifício

adjacente. Como seria de prever tendo em conta os resultados obtidos na modelação EFF, os danos previsíveis são de leves a moderados.

Convém salientar que os resultados aqui apresentados foram obtidos na situação extrema de se considera o edifício sem rigidez. Assim, apesar das diferenças muito significativas decorrentes do tipo de fundações do edifício, não são previsíveis danos consideráveis.

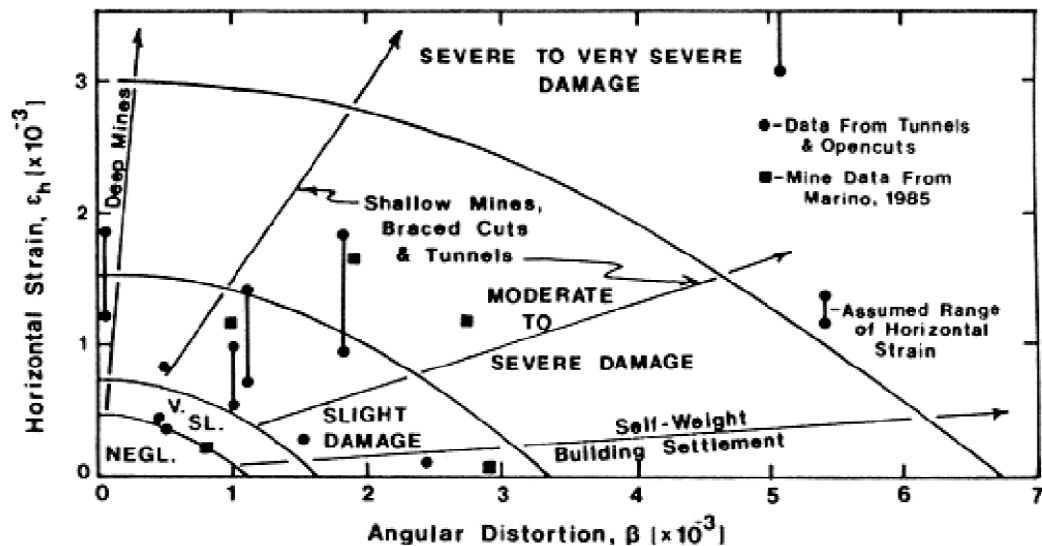


Figura 5.30 – Relação dos danos em edifícios com a distorção angular e extensão horizontal (Boscardin and Cording, 1989)

5.8. CONCLUSÕES

Com os estudos realizados neste capítulo demonstrou-se que o recurso aos métodos dos elementos finitos é muito útil para o dimensionamento de estruturas de suporte flexíveis. Além de permitir estimar assentamentos e as suas consequências decorrentes da execução de escavações, a sua importância é especialmente acentuada quando se pretende implementar soluções estruturais mais complexas em que pressupostos dos métodos clássicos por equilíbrio limite não são válidos.

Assim, nas escavações estudadas, em secções simples e com soluções estruturais que não impossibilitam o recurso aos métodos de equilíbrio limite, estes forneceram resultados que, ao nível dos esforços, se assemelham aos obtidos por elementos finitos. Contudo, quando se introduzem todas as particularidades das secções estudadas combinadas com certas opções estruturais, só os cálculos por elementos finitos são capazes de fornecer resultados precisos.

Em relação às opções estruturais estudadas pode-se concluir que, no caso da obra em estudo, e tendo em conta as suas particularidades, uma solução estrutural que preconize uma ligação contínua entre a cortina de estacas e a laje de cobertura parece ser mais vantajosa ao nível dos assentamentos induzidos nos edifícios vizinhos e ao nível da estabilidade da própria estrutura de suporte.

Refira-se também que certas simplificações efectuadas nos cálculos, como a não consideração da percolação, não comprometem a fiabilidade dos resultados obtidos.

6

DIMENSIONAMENTO

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o dimensionamento dos elementos que constituem a estrutura de suporte às escavações.

Dado que o dimensionamento para todas as zonas tornar-se-ia num processo repetitivo e sem interesse no âmbito deste trabalho, apresenta-se o dimensionamento de uma solução estrutural referente à Zona 2A, entre o km 1+105 e o km 1+190, calculada com base na secção de referência 2A, ao km 1+170 que é apresentada na Figura 6.1.

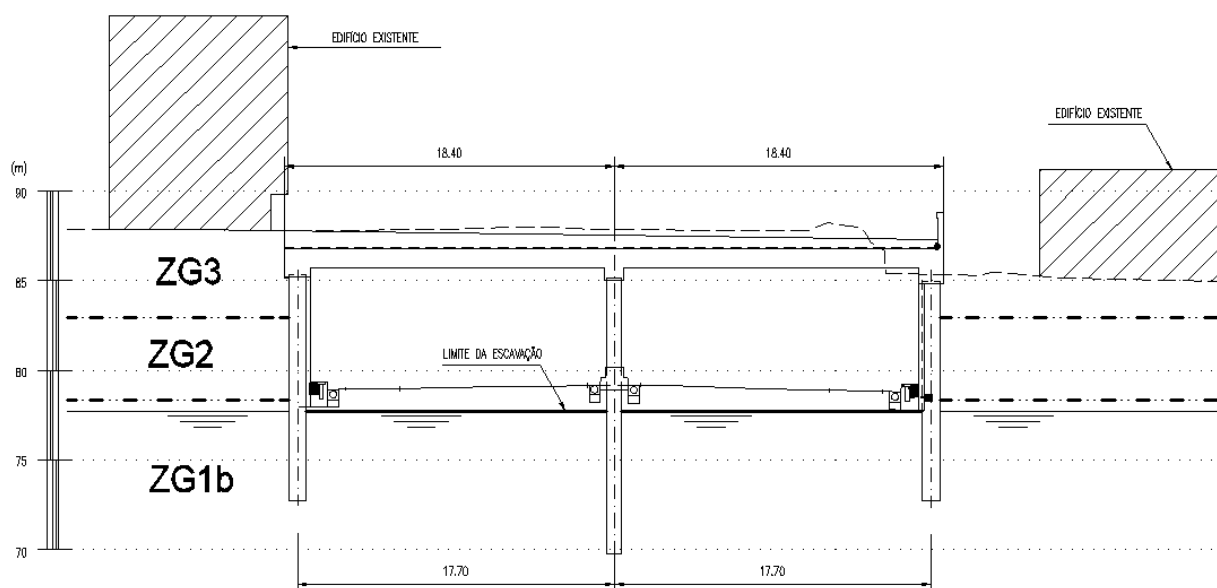


Figura 6.1 – Secção 2A ao km 1+170

As opções estruturais tomadas no dimensionamento foram baseadas nos estudos efectuados nos capítulos anteriores. Assim, considerou-se a ligação contínua entre a laje de cobertura e as cortinas de estacas.

O pré-dimensionamento dos elementos estruturais é o apresentado no Capítulo 4. A laje de cobertura tem 1,1 m de altura, as cortinas de estacas são constituídas por estacas de 1,0 m de diâmetro espaçadas de 1,4 m e o alinhamento de pilares-estaca centrais têm 0,8 m de diâmetro espaçados de 2,2 m. A altura enterrada das cortinas de estacas é de 5,0 m e a dos pilares-estaca centrais é de 8,0 m.

O betão utilizado é da classe C30/37 e o aço é A500 em todos os elementos estruturais.

A pormenorização da solução calculada neste capítulo é apresentada no Anexo C.

6.2. ENVOLVENTE DE ESFORÇOS

6.2.1. COMBINAÇÕES

Para a obtenção da envolvente de esforços consideraram-se 7 combinações de acções, sendo os esforços calculados segundo a Abordagem de Cálculo 1 do EC7, o que no final se traduz em 14 combinações.

As combinações calculadas segundo a Abordagem 1.1 foram nomeadas de A1 a G1, e as calculadas segundo a Abordagem 1.2, de A2 a G2 e a forma como foram consideradas as sobrecargas em cada uma delas é apresentada no Quadro 6.1.

O cálculo dos esforços foi feito por meio de análises de elementos finitos recorrendo à malha apresentada na Figura 6.2.

Quadro 6.1 – Combinações de acções consideradas

Combinações	Sobrecargas variáveis à superfície do terreno		Sobrecargas permanentes sobre a laje (restituições)	Sobrecargas variáveis sobre a laje	
	Esquerda	Direita		Vão esquerdo	Vão direito
A1 e A2					
B1 e B2	X		X		
C1 e C2		X	X		
D1 e D2	X	X	X		
E1 e E2	X	X	X	X	
F1 e F2	X	X	X		X
G1 e G2	X	X	X	X	X

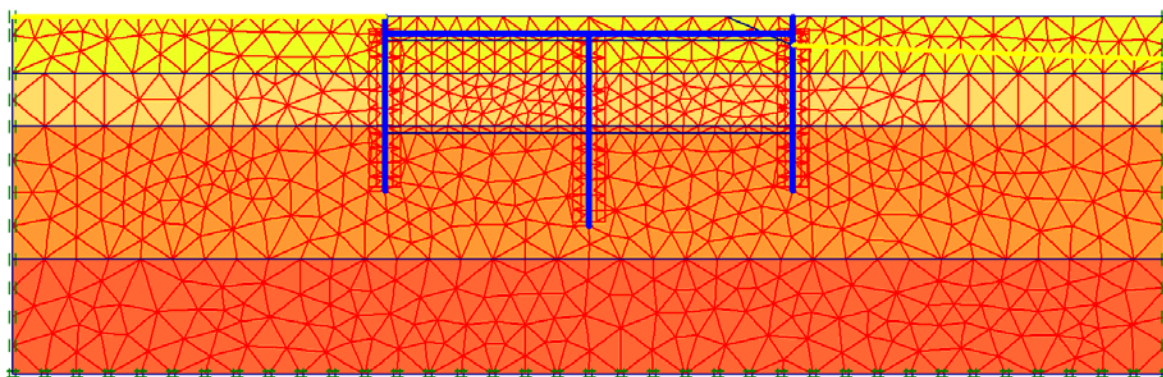


Figura 6.2 – Malha de elementos finitos para o cálculo da secção 2A (elementos triangulares de 15 nós)

6.2.2. DIAGRAMA DE ESFORÇOS

Laje de cobertura

Na Figura 6.3 apresentam-se os diagramas de momentos flectores e na Figura 6.4 os diagramas de esforços transversos na laje de cobertura, calculados para as combinações consideradas.

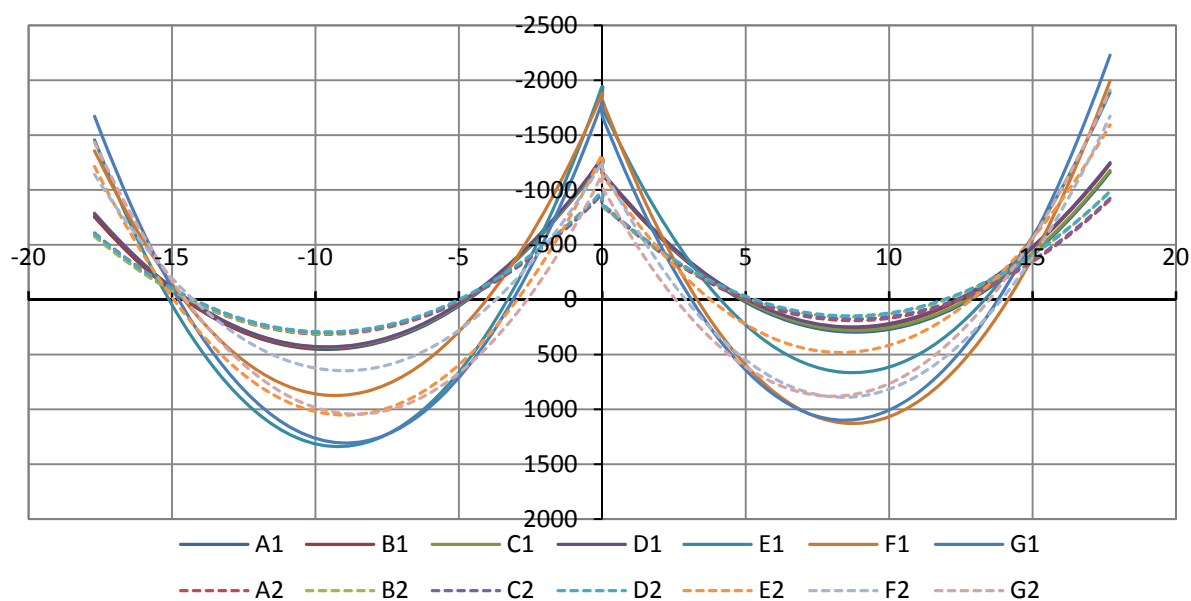


Figura 6.3 – Diagramas de momentos flectores na laje de cobertura (kN.m/m)

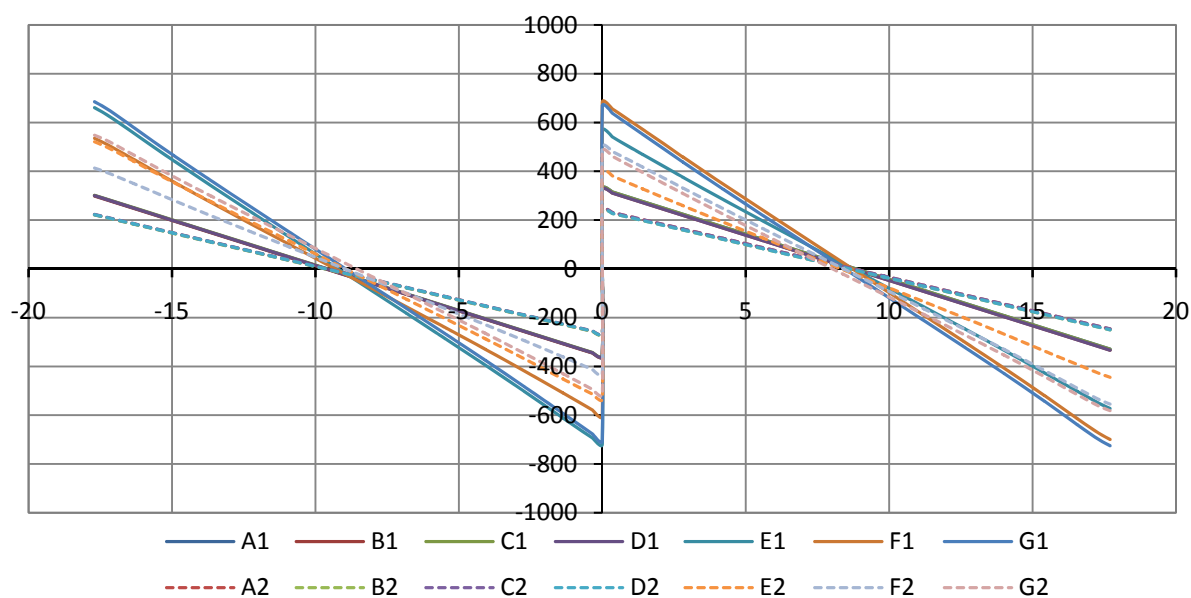


Figura 6.4 – Diagramas de esforços transversos na laje de cobertura (kN/m)

Cortina esquerda

Na Figura 6.5 apresentam-se os diagramas de momentos flectores e na Figura 6.6 os diagramas de esforços transversos na cortina de estacas esquerda, calculados para as combinações consideradas.

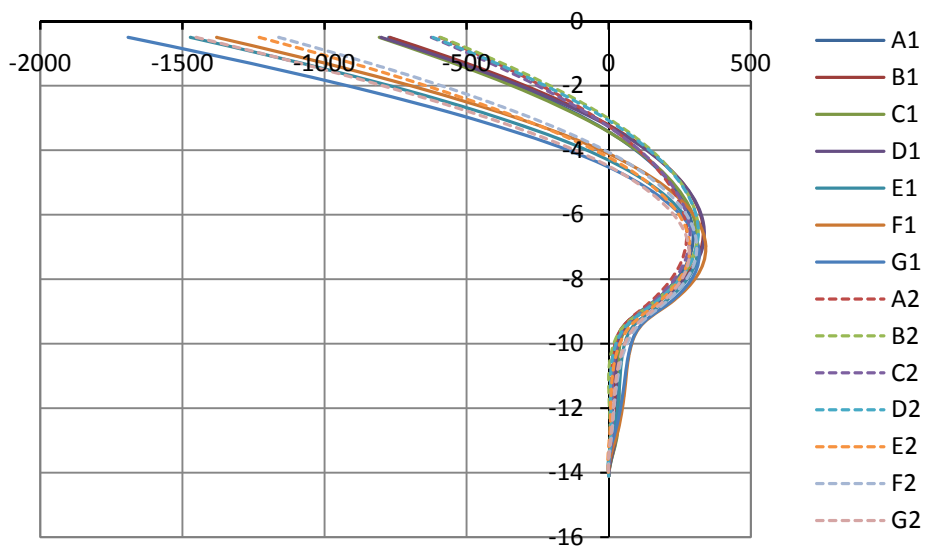


Figura 6.5 – Diagramas de momentos flectores na cortina esquerda (kN.m/m)

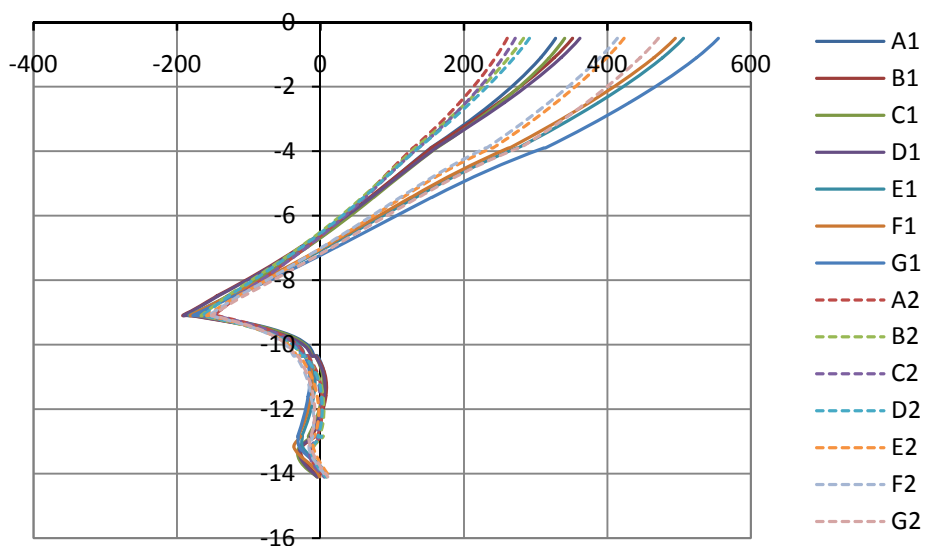


Figura 6.6 – Diagramas de esforços transversos na cortina esquerda (kN/m)

Cortina direita

Na Figura 6.7 apresentam-se os diagramas de momentos flectores e na Figura 6.8 os diagramas de esforços transversos na cortina de estacas direita, calculados para as combinações consideradas.

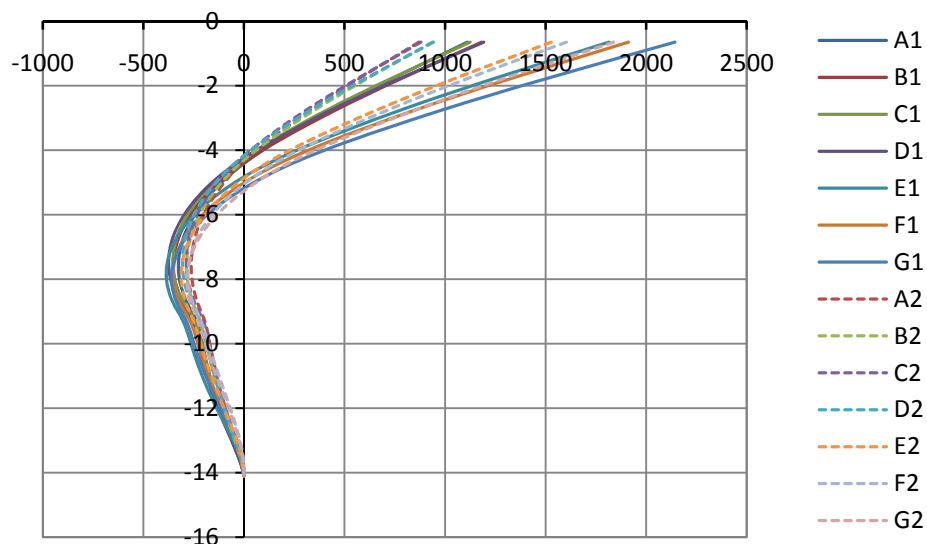


Figura 6.7 – Diagramas de momentos flectores na cortina direita (kN.m/m)

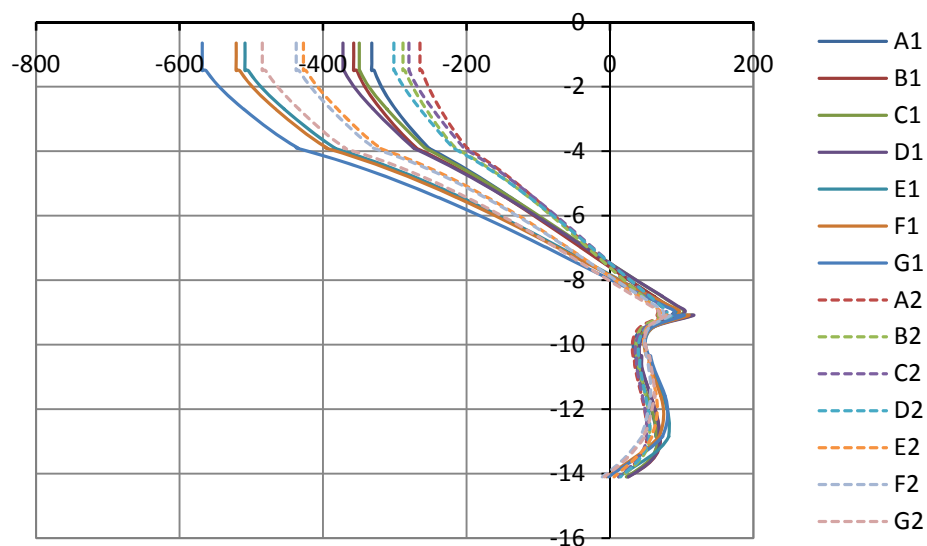


Figura 6.8 – Diagramas de esforços transversos na cortina direita (kN/m)

6.3. LAJE DE COBERTURA

Armadura de flexão

Os momentos flectores máximos negativos da laje são condicionados pela combinação G1 nos apoios direito (1671,50 kN.m/m) e esquerdo (2228,70 kN.m/m) e pela combinação E1 no apoio central (1942,10 kN.m/m).

No vão esquerdo o momento flector máximo positivo é condicionado pela combinação E1 (1339,5 kN.m/m) e no vão direito pela combinação F1 (1129,2 kN.m/m).

No Quadro 6.2 apresenta-se o cálculo da armadura de flexão para os momentos negativos nos apoios e no Quadro 6.3 para os momentos positivos nos vãos.

Quadro 6.2 – Cálculo da armadura de flexão da laje para os momentos nos apoios (armadura superior)

Apoio	M_{Ed} (kN.m/m)	d (m)	μ	ω	$A_{s,min}$ (cm ² /m)	Espaçamento (m)			Adoptado
						$\phi 25$	$\phi 32$	$\phi 25$ + $\phi 32$	
Esquerdo	1671,5	1,05	0,076	0,081	39,10	0,13	0,21	0,17	$\phi 25//0,10$
Central	1942,1	1,05	0,088	0,094	45,38	0,11	0,18	0,14	$\phi 25//0,10$
Direito	2228,7	1,05	0,101	0,109	52,62	0,09	0,15	0,12	$\phi 32//0,20$ + $\phi 25//0,20$

Quadro 6.3 – Cálculos da armadura de flexão da laje para os momentos nos vãos (armadura inferior)

Vão	M_{Ed} (kN.m/m)	d (m)	μ	ω	$A_{s,min}$ (cm ² /m)	Espaçamento (m)			Adoptado
						$\phi 20$	$\phi 25$	$\phi 32$	
Esquerdo	1339,5	1,05	0,061	0,064	30,90	0,10	0,16	0,26	$\phi 20//0,10$
Direito	1129,2	1,05	0,051	0,054	26,07	0,12	0,19	0,31	$\phi 20//0,10$

Dispensas de armadura

Os momentos flectores resistentes para as distribuições de armadura de flexão consideradas na laje de cobertura são os apresentados no Quadro 6.4. Na Figura 6.9 apresenta-se o esquema da dispensa de armaduras tendo em conta as disposições construtivas do EC2.

Quadro 6.4 – Momento flector resistente para as distribuições de armadura consideradas na laje

Armadura	A_s (cm ² /m)	ω	μ	d (m)	Mrd (kN.m)
$\phi 32//0,20 + \phi 25//0,20$	64,8	0,141	0,128	1,05	2822,4
$\phi 25//0,10$	49,09	0,107	0,098	1,05	2160,9
$\phi 25//0,20$	24,54	0,053	0,051	1,05	1124,6
$\phi 20//0,10$	31,42	0,068	0,065	1,05	1433,3
$\phi 20//0,20$	15,71	0,034	0,033	1,05	727,7

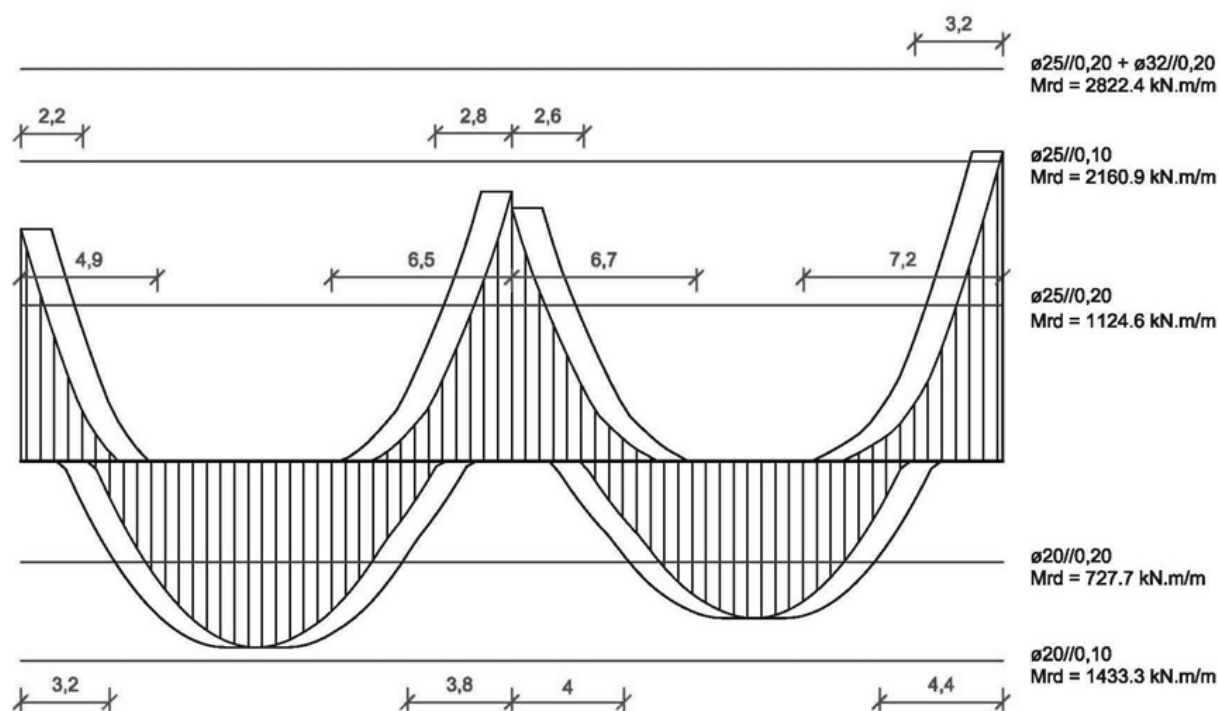


Figura 6.9 – Determinação dos locais de dispensa de armadura na laje

Armadura de distribuição

A área armadura mínima para limitar a fendilhação por retracção do betão na laje de cobertura é a apresentada no Quadro 6.5.

Quadro 6.5 – Armadura transversal mínima de retracção na laje de cobertura

h (m)	A_{ct} (m ²)	σ_s (MPa)	k	$A_{s,min}$ (cm ² /m)
1,10	1,10	360	0,65	57,60

Tal como seria de esperar uma vez que a laje de cobertura tem uma espessura considerável, é necessária uma grande quantidade de armadura para limitar a fendilhação. Para reduzir a quantidade de armadura necessária optou-se por aplicar a armadura mínima de distribuição prevendo interrupções na laje de 12 em 12 metros.

Assim, a área de armadura de distribuição considerada corresponde a 20% da área de armadura principal correspondente. A armadura de distribuição considerada é apresentada no Quadro 6.6.

Quadro 6.6 – Armadura de distribuição na laje

Armadura principal		$A_{l,min}$ (cm ² /m)	Espaçamento (m)			Adoptado
Designação	A_s (cm ² /m)		Ø10	Ø12	Ø16	
Ø32//0,20 + Ø25//0,20	64,8	13,0	0,06	0,09	0,16	Ø16//0,15
Ø25//0,10	49,1	9,8	0,08	0,12	0,20	Ø16//0,20
Ø25//0,20	24,5	4,9	0,16	0,23	0,41	Ø12//0,20
Ø20//0,10	31,4	6,3	0,13	0,18	0,32	Ø12//0,15
Ø20//0,20	15,7	3,1	0,25	0,36	0,64	Ø10//0,25

Nota: Para limitar a fendilhação por retracção do betão será necessário betonar por troços com comprimento não superior a 12 m

Armadura de esforço transverso

O esforço transverso máximo na laje ocorre no apoio direito para a combinação G1 e tem o valor de 725,2 kN.m/m.

Como se pode observar no Quadro 6.7, é necessário introduzir armadura de esforço transverso para fazer face aos esforços actuantes na laje. Segundo o EC2, como o esforço transverso de cálculo é

inferior a 1/3 do máximo (Quadro 6.8), a armadura de esforço transversal pode ser materializada exclusivamente por varões inclinados ou por cintas, estribos ou ganchos.

Optou-se por considerar estribos verticais de 4 ramos com varões $\varnothing 8$ espaçados de 20 cm por metro de desenvolvimento da laje conforme o calculado no Quadro 6.9. Na Figura 6.1 apresenta-se sobre o diagrama da envolvente de esforço transversal as zonas em que é necessária a armadura de esforço transversal.

Quadro 6.7 – Valor de cálculo do esforço transversal resistente sem armadura para esse fim ($V_{rd,c}$)

$C_{rd,c}$	k	ρ_l	f_{ck} (MPa)	$V_{rd,c}$ (kN/m)
0,12	1,44	0,006	30	448,98

Quadro 6.8 – Esforço transversal resistente máximo

α_{cw}	b (m)	z (m)	v	f_{cd} (MPa)	$\cot(\theta)$	$V_{rd,max}$
1	1	0,95	0,528	20	2,00	3991,68

Quadro 6.9 – Cálculo armadura de esforço transversal na laje de cobertura

V_{Ed} (kN/m)	z (m)	f_{ywd} (kPa)	$\cot(\theta)$	A_{sw}/s (cm ² /m/m)	Espaçamento (m)			Adoptado
					4R $\varnothing 8$	4 $\varnothing 10$	4 $\varnothing 12$	
725,20	0,95	435000	2	8,82	0,23	0,36	0,51	4R $\varnothing 8$ // 0,20

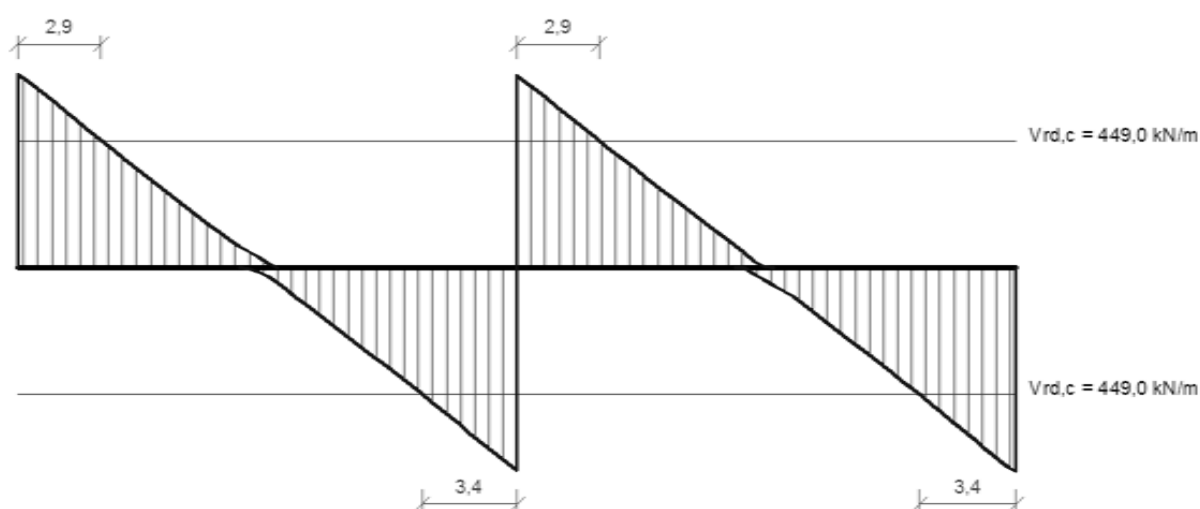


Figura 6.10 – Zonas em que é necessária armadura de esforço transversal na laje de cobertura

6.4. CORTINA DE ESTACAS

Armadura longitudinal

O dimensionamento das cortinas de estacas foi feito para o momento flector máximo que ocorre na base da viga de repartição, que tem uma altura de 1,6 m e de 2,0 m nas cortinas esquerda e direita, respectivamente.

Assim, na cortina esquerda considera-se um momento de 1113,0 kN.m/m e na cortina direita um momento de 1383,2 kN.m/m, ambos condicionados pela combinação G1. Estes momentos flectores assim como os dos diagramas de esforços apresentados em 6.2.2 são por metro linear. Os momentos flectores por estaca obtêm-se multiplicando por 1,4 m que é o afastamento entre eixos das estacas. A armadura calculada para estes momentos máximos é a apresentada no Quadro 6.10.

Quadro 6.10 – Armadura de longitudinal nas cortinas de estacas

Cortina	M_{Ed} (kN.m/m)	M_{Ed} /estaca (kN.m)	ϕ (m)	μ	ω	A_s (cm ²)	Número de Varões			Adoptado
							$\phi 25$	$\phi 32$	$\phi 25 + \phi 32$	
Esquerda	1113,0	1558,2	1,0	0,099	0,29	104,72	21,3	13,0	16,2	22 $\phi 25$
Direita	1383,2	1936,5	1,0	0,123	0,35	126,39	25,7	15,7	19,5	10 $\phi 25 + 10 \phi 32$

Dispensas de armadura

Os momentos flectores resistentes para as combinações de número e diâmetro de varões consideradas para as armaduras de flexão nas cortinas de estacas são as apresentadas no Quadro 6.11. Na Figura 6.11 apresenta-se o esquema da dispensa de armaduras tendo em conta as disposições construtivas do EC2.

Quadro 6.11 – Momento flector resistente para a armadura longitudinal considerada nas cortinas de estacas

Armadura	A_s (cm ²)	ω	μ	M_{rd} (kN.m)
22 $\phi 25$	107,99	0,299	0,110	1727,9
11 $\phi 25$	54,00	0,150	0,060	942,5
10 $\phi 25 + 10 \phi 32$	129,51	0,359	0,130	2042,0
10 $\phi 25$	49,09	0,136	0,050	785,4

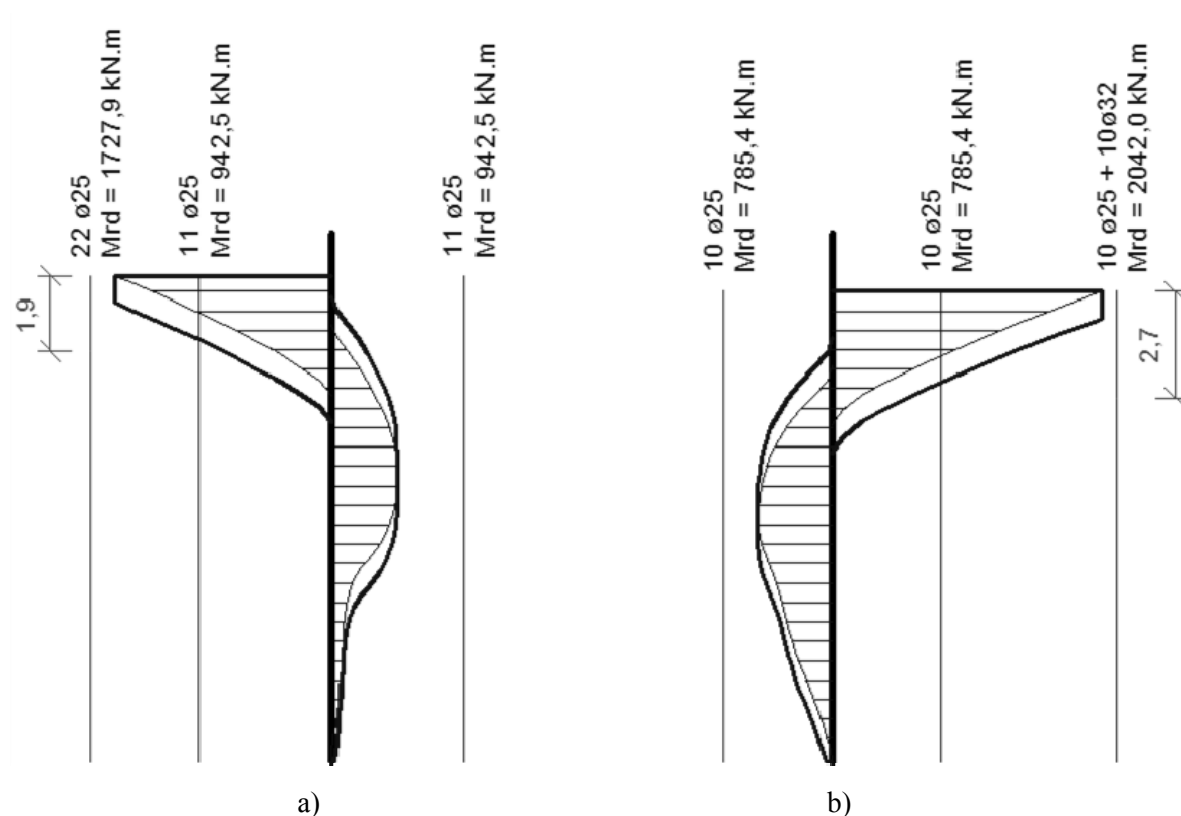


Figura 6.11 - Determinação dos locais de dispensa de armadura nas cortinas de estacas: a) cortina esquerda; b) cortina direita.

Armadura transversal

Em relação à armadura transversal, a cortina esquerda foi dimensionada para o esforço transversal de 494 kN/m e a cortina direita para o esforço transversal de 544 kN /m condicionado em ambas pela combinação G1.

O cálculo da armadura de esforço transversal foi feito com base numa secção rectangular equivalente como se apresenta no Quadro 6.12.

O cálculo da secção rectangular equivalente é feito de acordo com a Figura 6.12. A altura equivalente obtém-se pela expressão (6.1) e a largura equivalente pela expressão (6.2)

(6.1)

(6.2)

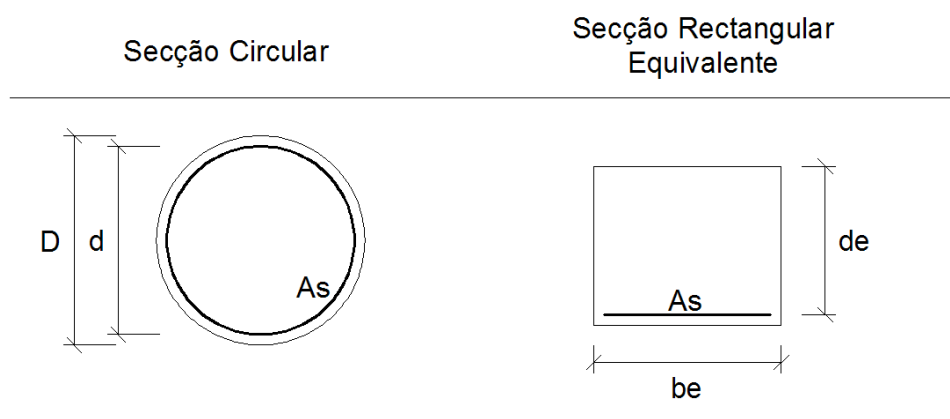


Figura 6.12 – Secção rectangular equivalente

Considerando varões $\phi 12$, o esforço transversal resistente para a armadura mínima é apresentado no Quadro 6.13. Note-se que o espaçamento máximo para uma secção com 0,7 m de altura é de 0,50 m.

A Figura 6.13 esquematiza sobre o diagrama da envolvente de esforço transversal as zonas onde se adoptou a armadura mínima de esforço transversal.

Quadro 6.12 – Armadura transversal nas cortinas de estacas

Cortina	V_{Ed} (kN/m)	V_{Ed} /estaca (kN)	Secção rectangular equivalente (m)		A_{sw}/s (cm ² /m)	Espaçamento (m)			Adoptado
			be	de		$\phi 10$	$\phi 12$	$\phi 16$	
Esquerda	494	691,6	0,9	0,7	12,62	0,12	0,18	0,32	$\phi 12//0,18$
Direita	544	761,6	0,9	0,7	13,90	0,11	0,16	0,29	$\phi 12//0,16$

Quadro 6.13 – Esforço transversal resistente considerando o espaçamento máximo entre estribos

Armadura	$A_{sw,min}/s$ (cm ² /m)	b_e (m)	d_e (m)	d (m)	V_{rd} (kN/m)
$\phi 12//0,35$	6,46	0,9	0,7	1,05	354,2

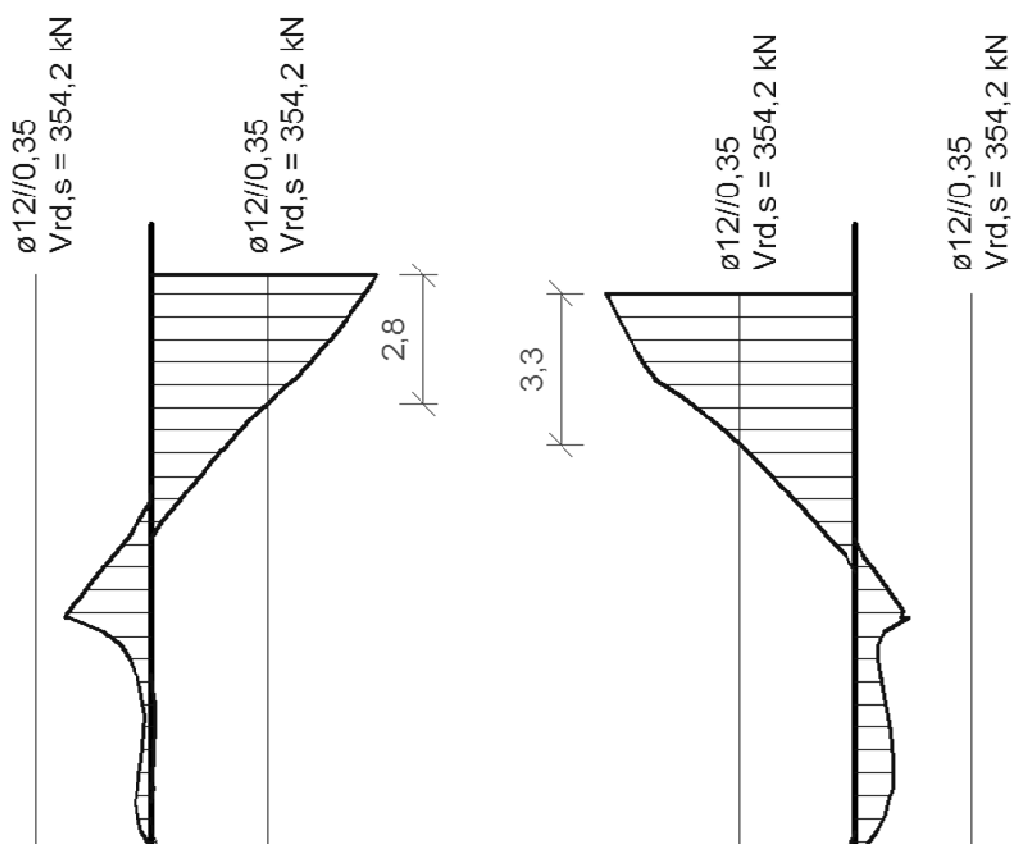


Figura 6.13 – Zonas em que se considerou a armadura transversal mínima nas cortinas de estacas

6.5. ALINHAMENTO DE PILARES-ESTACA CENTRAL

No dimensionamento dos pilares expostos em obras rodoviárias como é o caso da obra em estudo a combinação de acções condicionante é geralmente a accidental o que corresponderia ao choque de um veículo no pilar. No dimensionamento aqui apresentado não foi considerada essa combinação pelo que teriam de ser tomadas medidas como o dimensionamento de paredes de forro que sejam capazes de suportar os esforços para a combinação accidental.

Assim, tendo em conta as combinações de acções definidas em 6.2.1, os momentos flectores e esforços transversos mobilizados no alinhamento de pilares-estaca central são muito reduzidos não condicionando o seu dimensionamento.

Para a armadura longitudinal considerou-se a armadura mínima, como se apresenta no Quadro 6.14. Refira-se que segundo o EC2 o diâmetro mínimo dos varões longitudinais em estacas moldadas não deve ser inferior a 16 mm e o seu espaçamento máximo não deve ser superior a 20 cm. São estas duas condições que acabam por condicionar a solução a adoptar.

Para as cintas consideraram-se varões Ø6 espaçados de 0,20 m.

Quadro 6.14 – Armadura longitudinal no alinhamento de pilares-estaca central

N_{Ed} (kN)	ϕ (m)	A_c (m ²)	$A_{s,min}$ (cm ²)	Número de Varões			Adoptado
				$\phi 10$	$\phi 12$	$\phi 16$	
3166,9	0,8	0,503	10,05	12,8	8,9	5,0	12 ϕ 16

6.6. VIGAS DE COROAMENTO

6.6.1. VIGAS DE COROAMENTO DAS CORTINAS DE ESTACAS

As dimensões das vigas de coroamento foram definidas tendo em conta a geometria da superfície do terreno, as dimensões das cortinas de estacas e a necessidade de sanear o betão contaminado numa altura de pelo menos 0,5 m. Assim, considerou-se para viga de coroamento esquerda uma secção de 1,2x1,6 m² e para a viga de coroamento esquerda 1,2x2,0 m².

Como foi referido, a ligação entre a laje de cobertura e as cortinas de estacas foi considerada contínua e, consequentemente, com transmissão de momentos entre a laje de cobertura e a cortina de estacas. Essa transmissão é feita por intermédio da viga de coroamento tendo esta que resistir aos esforços de flexão provenientes da laje.

Assim, a armadura superior da laje de cobertura foi prolongada até ao limite inferior da viga de coroamento. Além disso a viga de coroamento tem que ser capaz de suportar os esforços de torção gerados pelo facto de a cortina de estacas não ser um elemento contínuo.

Considerou-se conservativamente para o momento torçor o valor correspondente ao momento flector transmitido pela laje de cobertura numa faixa de metade da distância entre as estacas ou seja, uma faixa de 0,2 m, como se pode ver na Figura 6.14.

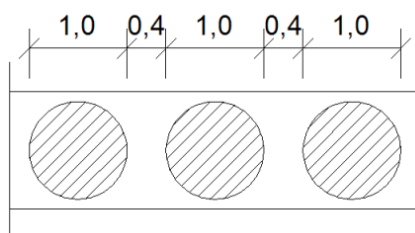


Figura 6.14 – Esquema do espaçamento das estacas

Como se pode observar no Quadro 6.15, a área de armadura necessária para resistir ao momento torçor é inferior ao mínimo necessário para limitar a fendilhação por retracção do betão (Quadro 6.16) sendo esta última a adoptada. Em relação à armadura transversal, considerou-se a taxa de armadura mínima prevista no EC2 que corresponde a estribos de dois ramos $\phi 20$ espaçados de 0,19 m.

Quadro 6.15 – Armadura longitudinal de torção na viga de coroamento

Apoio	M_{Ed} (kN.m/m)	T_{Ed} (kN.m/m)	b (m)	h (m)	u (m)	t_{ef} (m)	A_k (m ²)	u_k (m ²)	A_{sl} (cm ²)
Esquerdo	1671,50	334,3	1,20	1,60	5,6	0,34	0,84	9,8	89,66
Direito	2228,70	445,74	1,20	2,00	6,4	0,38	1,06	11,3	109,30

Quadro 6.16 – Armadura longitudinal mínima de retracção na viga de coroamento

Viga	b (m)	h (m)	A_{ct} (m ²)	σ_s (MPa)	k	$A_{s,min}$ (cm ²)	Adoptado
Esquerda	1,20	1,60	1,92	360	0,65	100,53	12ø25 + 14ø20
Direita	1,20	2,00	2,40	360	0,65	125,67	14ø25 + 18ø20

6.6.2. VIGA DE COROAMENTO DO ALINHAMENTO DE PILARES-ESTACA CENTRAL

A viga de coroamento do alinhamento de pilares-estaca central foi dimensionada para os momentos flectores gerados ao longo dos 2,2 m de afastamento entre os pilares-estaca.

Assim, obteve-se o momento flector máximo negativo de 565 kN.m e o positivo de 350 kN.m. No que diz respeito ao esforço transversal o valor máximo calculado foi de 1540 kN.m.

Como se pode ver nos Quadros 6.17 e 6.18, para fazer face aos esforços a área de armadura é muito baixa pelo que se considerou a armadura mínima de retracção. Assim, a armadura longitudinal calculada é a apresentada no Quadro 6.19 e a transversal é constituída por estribos verticais de dois ramos ø20 espaçados de 0,19 m.

Quadro 6.17 – Armadura de flexão na viga de coroamento central

Armadura	M_{Ed} (kN.m)	b (m)	d (m)	μ	ω	A_s (cm ² /m)
Superior	565	1,00	1,65	0,010	0,010	7,87
Inferior	350	1,00	1,65	0,006	0,006	4,88

Quadro 6.18 – Armadura de esforço transversal na viga de coroamento central

$V_{rd,s}$ (kN/m)	z (m)	f_{ywd} (kPa)	$\cot(\theta)$	A_{sw}/s (cm ² /m)
1540	1,49	435000	2	11,92

Quadro 6.19 – Armadura mínima considerada na viga de coroamento central

b (m)	h (m)	A_{ct} (m ²)	σ_s (MPa)	k	$A_{s,min}$ (cm ²)	Adoptado
1,10	1,70	1,87	360	0,65	97,92	12ø25 + 12ø20

6.7. VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITE DE UTILIZAÇÃO

As verificações aqui apresentadas referem-se apenas à laje de cobertura e incidem apenas sobre o estado de tensão do betão e das armaduras. Verificações semelhantes em relação aos restantes elementos estruturais não foram aqui incluídas tal coma a verificação dos estados limites de deformação.

Na Figura 6.15 apresenta-se o diagrama de momentos flectores em serviço na laje de cobertura.

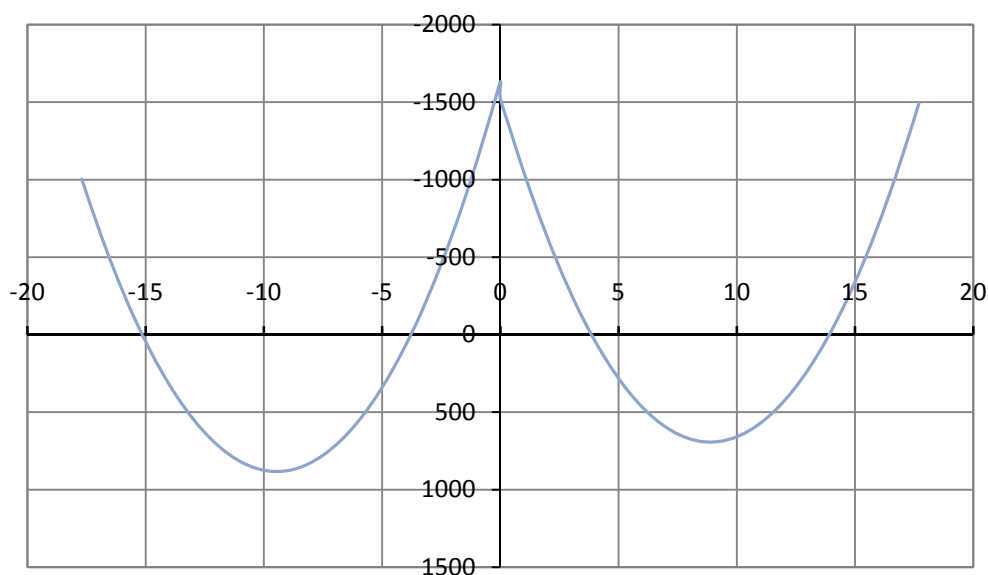


Figura 6.15 – Diagrama de momentos flectores (kN.m/m) em serviço na laje de cobertura

Verificação do estado de tensão na armadura e no betão

No Quadro 6.20 é apresentado o cálculo da posição do eixo neutro em serviço a meio vão e nos apoios. O cálculo do estado de tensão em serviço no betão e na armadura é apresentado no Quadro 6.21 para os vãos e no Quadro 6.22 para os apoios.

Quadro 6.20 – Cálculo da posição do eixo neutro

Secção	A_s (cm ²)	A'_s (cm ²)	A_c (m ²)	α	ρ	ρ'	d (m)	d' (m)	ξ
Vãos	31.42	0	1.1	6.061	0.00286	0.00000	1.05	0.05	0.170
Apoios Esq. e Central	49.09	15.71	1.1	6.061	0.00446	0.00143	1.05	0.05	0.201
Apoio Direito	64.76	15.71	1.1	6.061	0.00589	0.00143	1.05	0.05	0.228

Quadro 6.21 – Tensão em serviço no betão e na armadura para os momentos máximos nos vãos

Vão	$M_{\max}$ (kN/m)	ξ	ρ'	b (m)	d (m)	d' (m)	α	C_c	C_s	σ_c (MPa)	σ_s (MPa)
Esquerdo	883	0.170	0	1	1.05	0.05	6	12.5	371.1	10.01	297.19
Direito	693	0.170	0	2	1.05	0.05	6	12.5	371.1	3.93	116.61

Quadro 6.22 – Tensão em serviço no betão e na armadura para os momentos máximos nos apoios

Apoio	$M_{\max}$ (kN/m)	ξ	ρ'	b (m)	d (m)	d' (m)	α	C_c	C_s	C'_s	σ_c (MPa)	σ_s (MPa)	σ'_s (MPa)
Central	1631	0.201	0.00143	1	1.05	0.05	6.1	10.0	239.9	46.2	14.76	354.85	68.30
Direito	1491	0.228	0.00143	2	1.05	0.05	6.1	8.9	183.5	42.9	6.05	124.12	29.00

Como se observa o estado de tensão calculado na armadura e no betão cumpre os limites estipulados no EC2.

Controlo de fendilhação

Tendo em conta o estado de tensão na armadura de tracção é possível calcular o diâmetro máximo a adoptar para os varões de forma a controlar a fendilhação.

Como se pode observar no Quadro 6.23, o diâmetro máximo dos varões para limitar a abertura de fendas a 0,2 mm é superior ao máximo diâmetro dos varões adoptados no dimensionamento. Assim, no que diz respeito à abertura de fendas o dimensionamento efectuado cumpre o que é exigido no EC2.

Quadro 6.23 – Cálculo do diâmetro máximo dos varões para controlo de fendilhação

Secção	σ'_s (MPa)	ϕ^*_s (mm)	$f_{ct,eff}$ (MPa)	k_c	h_{cr} (m)	h (m)	d (m)	ϕ_s (mm)	ϕ_{max} adoptado
Vão Esquerdo	297.2	7.1	2.9	1	0.55	1.1	1.05	39.3	$\phi 20$
Apoio Central	354.9	5.1	2.9	1	0.55	1.1	1.05	28.2	$\phi 25$

6.8. ALTERNATIVAS À SOLUÇÃO APRESENTADA

Na solução apresentada a laje de cobertura tem uma espessura relativamente elevada o que conduz a um elevado peso próprio.

Uma solução para reduzir o peso próprio passaria por aligeirar a laje considerando, por exemplo, a introdução de vazamentos circulares. Contudo, dados os elevados carregamentos a que a laje está sujeita além do seu peso próprio (sobrecarga permanente de 20 kN/m² resultante da restituição de 1 m de solo e sobrecarga variável de 10 kN/m²), uma redução do peso próprio da laje da ordem dos 20% apenas reduziria os momentos flectores máximos em cerca de 10%.

Uma outra solução consistiria em considerar uma laje pré-esforçada. Em relação a uma eventual solução pré-esforçada convém salientar que a definição do nível de pré-esforço a adoptar teria que ter em consideração a incerteza em relação aos esforços axiais transmitidos pela cortina de estacas a que a laje está sujeita.

7

CONCLUSÕES

As análises efectuadas no âmbito deste trabalho permitiram uma melhor compreensão do funcionamento das cortinas monoapoiadas em geral e particularmente da estrutura de suporte das escavações da obra em estudo. Tal compreensão é fundamental para a escolha das soluções estruturais a adoptar em projecto.

Apresentam-se, de seguida, as principais conclusões retiradas de cada um dos capítulos.

Em relação aos cálculos por equilíbrio limite efectuados no Capítulo 4, verificou-se que a introdução da segurança segundo a Abordagem de Cálculo 1 do Eurocódigo 7 fornece resultados que, em relação aos obtidos pelos restantes métodos estudados, não são demasiado conservativos nem anti-conservativos, quer ao nível dos esforços estruturais quer ao nível da altura enterrada da cortina.

Constatou-se que a coesão efectiva dos solos tem um impacto muito significativo na geometria e nos esforços calculados. No caso da obra em estudo a coesão efectiva dos solos é responsável pela redução da altura enterrada superior a 80% e pela redução do momento flector máximo superior a 70% comparando com os valores que se obteriam desprezando a coesão efectiva. Dessa forma, em solos com elevada coesão efectiva as soluções a adoptar devem ser ponderadas e não baseadas exclusivamente nos resultados obtidos por equilíbrio limite.

Saliente-se ainda que os inúmeros cálculos efectuados por equilíbrio limite não seriam exequíveis em tempo útil sem o recurso ao programa de cálculo de cortinas monoapoiadas elaborado para o efeito.

No que diz respeito às análises efectuadas por elementos finitos no Capítulo 5, os resultados das análises em iguais circunstâncias das admitidas nos cálculos por equilíbrio limite comprovam a validade dos cálculos efectuados por equilíbrio limite com o programa desenvolvido no âmbito deste trabalho.

Em escavações em que o nível freático é superior à base de escavação constatou-se que, considerando simplificadaamente as pressões de água hidrostáticas, as diferenças nos resultados calculados comparativamente à situação em que se considera a percolação são muito pouco significativas, quer em maciços puramente friccionais quer em maciços com coesão efectiva. Uma outra conclusão relativamente a este aspecto é o facto de o erro cometido nos cálculos em que simplificadaamente não se considerou a percolação estar do lado da segurança ou seja, conduz a resultados ligeiramente conservativos.

Quanto à forma de considerar os edifícios vizinhos, refira-se que as várias formas estudadas produzem esforços idênticos nas estruturas a dimensionar. Contudo, convém salientar que os assentamentos dos

edifícios provocados pelas escavações são muito condicionados pelo tipo de fundações e pela rigidez do próprio edifício.

A adopção de uma solução estrutural em que a ligação entre a laje de cobertura e a cortina de estacas seja contínua, apesar de aumentar consideravelmente os momentos flectores na cortina, é uma solução vantajosa pois além de permitir uma redução significativa dos momentos flectores positivos na laje de cobertura, provoca menores assentamentos à superfície e menores deslocamentos da cortina. Constatou-se ainda que na obra em estudo, nos casos em que a superfície do terreno é inclinada, sendo a profundidade de escavação maior de um lado, pode não ser aceitável adoptar nas duas contenções a solução calculada para a contenção com maior profundidade pois a contenção oposta pode não ser capaz de suportar os esforços horizontais que lhe são transmitidos por intermédio da laje de cobertura. Nestas situações considerar a ligação laje-cortina contínua é especialmente vantajoso.

A solução estrutural apresentada no Capítulo 6 resulta de todos os estudos efectuados. Constatou-se que, apesar de a Abordagem de Cálculo 1.2 do EC7 condicionar a altura enterrada mínima, os esforços máximos nos elementos estruturais são sempre condicionados pelas combinações calculadas segundo a Abordagem 1.1 do EC7.

O dimensionamento foi efectuado para o estado limite último, tendo sido efectuadas algumas verificações em serviço onde a verificação da fendilhação assume especial importância pelo facto de se tratar de uma estrutura subterrânea e por isso sujeita a um ambiente agressivo.

Por fim, convém salientar que, dado que a obra se situa numa zona de elevado risco sísmico, a solução teria que ser verificada por meio de análises dinâmicas.

BIBLIOGRAFIA

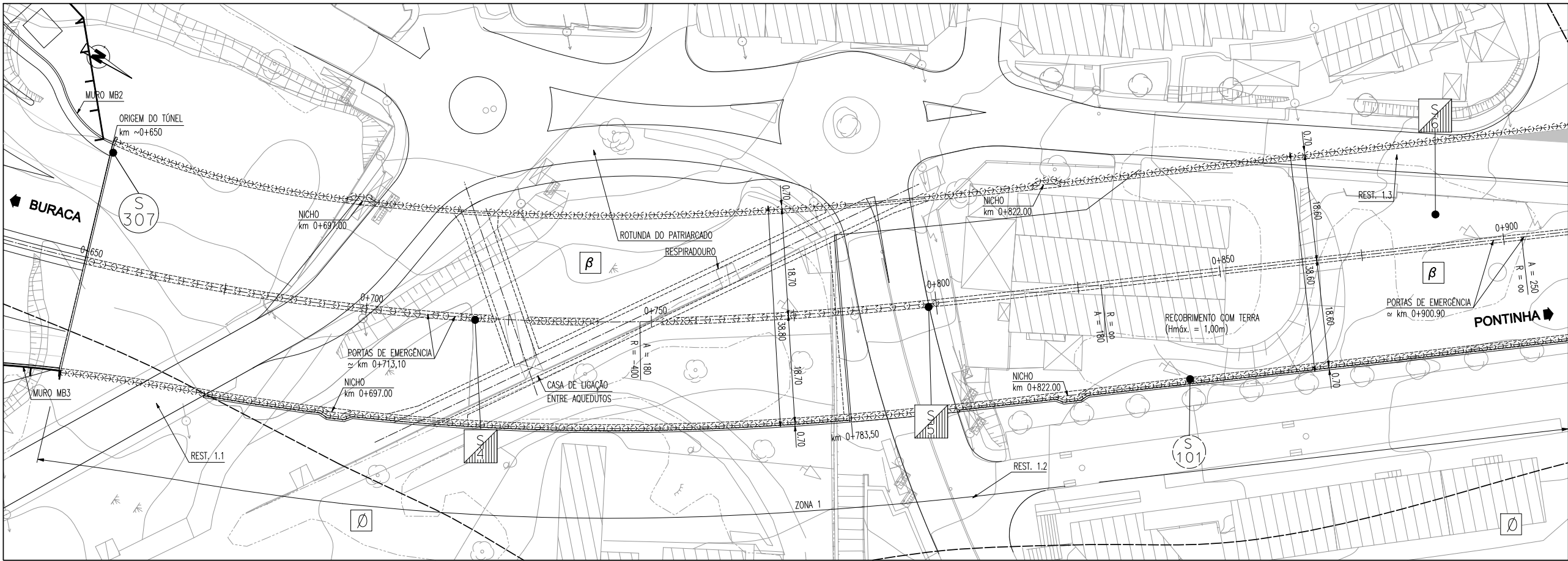
- BOSCARDIN, M., D. and CORDING, E. J., (1989). *Building Response to Excavation-Inducted Settlement*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115(1), pp. 1-21.
- CAQUOT, A. E KERISEL, J. (1948). *Tables for the calculation of passive pressure. active pressure, active and bearing capacity foundations*. Gauthier - Villars, Paris.
- COBA (2003). *IC17 - Circular Regional Interior De Lisboa. Sublanço Buraca – Pontinha Incluindo Ligações. Projecto de Execução. Estudo de Impacte Ambiental. Resumo não Técnico*. COBA, Lisboa.
- COBA (2006a). *IC17 - Circular Regional Interior De Lisboa. Sublanço Buraca – Pontinha. Anexo I – Especificações Técnicas. Tomo 4 - Elementos De Projecto. Volume 1 – Estudo Rodoviário. Parte 1.2 – Estudo Geológico-Geotécnico*. COBA, Lisboa.
- COBA (2006b). *IC17 - Circular Regional Interior De Lisboa. Sublanço Buraca – Pontinha. Anexo I – Especificações Técnicas. Tomo 4 - Elementos De Projecto. Volume 3 – Estudos Prévios de Túneis e Obras de Arte. Parte 3.1 – Túnel de Benfica*. COBA, Lisboa.
- EUROCÓDIGO 2 (2004). *Projecto de estruturas de betão*. EN 1992-1-1. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.
- EUROCÓDIGO 7 (1994). *Projecto Geotécnico – Parte 1. Regras Gerais*. Pré-norma europeia, ENV 1997-1:1999 PT. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.
- EUROCODE 7 (2004). *Geotechnical design – Part 1. General rules*. Final Draft, prEN 1997-1. European Committee For Standardization, Brussels.
- FARIA, R., VILA POUCA, N., (1997). *Esforço Transverso. Torção. Punçoamento*. FEUP, Porto.
- FIGUEIRAS, J. A., (2003). *Lajes Maciças*. Textos de Apoio de Estruturas de Betão 2. FEUP, Porto.
- GREEN, JOHN, et al. (2007). *Excel® 2007 VBA - Programmer's Reference*. Wiley Publishing, Inc., Indianapolis.
- LOUREIRO, H., (2005). *Excel Macros & VBA*. FCA, Lisboa.
- MATOS FERNANDES, M. (1981). *Paredes moldadas e outras estruturas flexíveis para suporte de terras. Estado de conhecimentos acerca do seu dimensionamento*. Relatório, Proc. 55/13/6187, LNEC, Lisboa.
- MATOS FERNANDES, M. (1983). *Estruturas Flexíveis para Suporte de Terras. Novos Métodos de Dimensionamento*. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil - Estruturas, FEUP, Porto.
- MATOS FERNANDES, M. (1990). *Estruturas de Suporte de Terras*, Textos de apoio, FEUP, Porto.

MATOS FERNANDES, M. (1995). *Mecânica dos Solos*, Vol. II, FEUP, Porto.

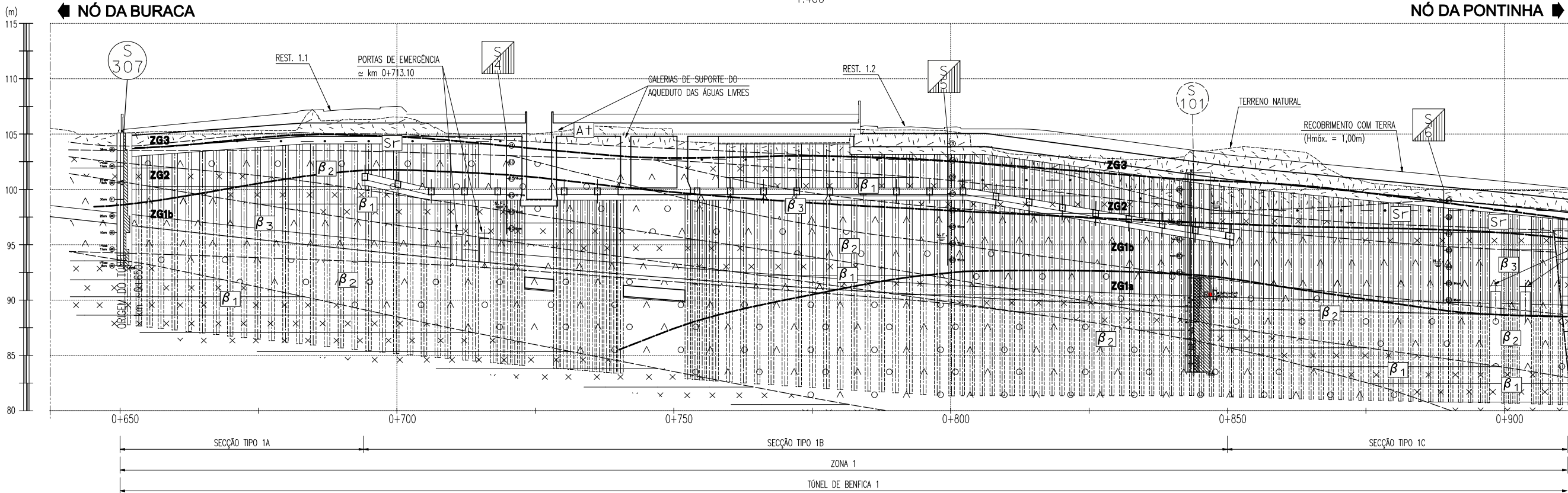
MATOS FERNANDES, M., VIEIRA, C. S. and SOUSA, J. A. (2002). *Flexible cantilever retaining walls: design according to Eurocode 7 and classical methods*. IWS Kamakura 2002, Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance, A. A. Balkema, Lisse, pp. 117-125.

Anexo A. Corte Geológico-Geotécnico

Nas páginas seguintes, apresenta-se o corte Geológico-Geotécnico do Túnel de Benfica (COBA 2006b).



PLANTA
1:400



CORTE LONGITUDINAL PELO EIXO DO TÚNEL

H: 1:400
V: 1:200

F:\V8\Platdrv\pdf\pdf-plot-fnc.plt
10/01/2007 14:35:09 / Paulo Santos
E:\PB\MS\Geo\Arte\Tunel Benfica\1177-EP-42-0311-024.dgn



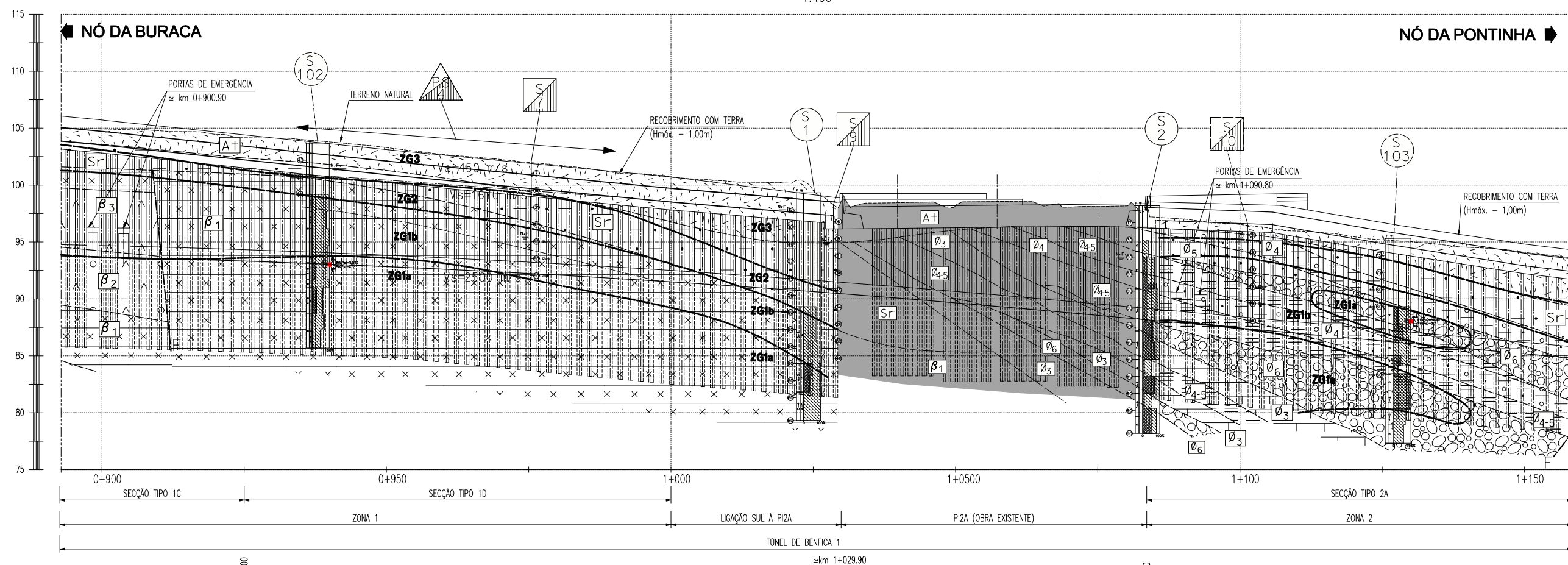
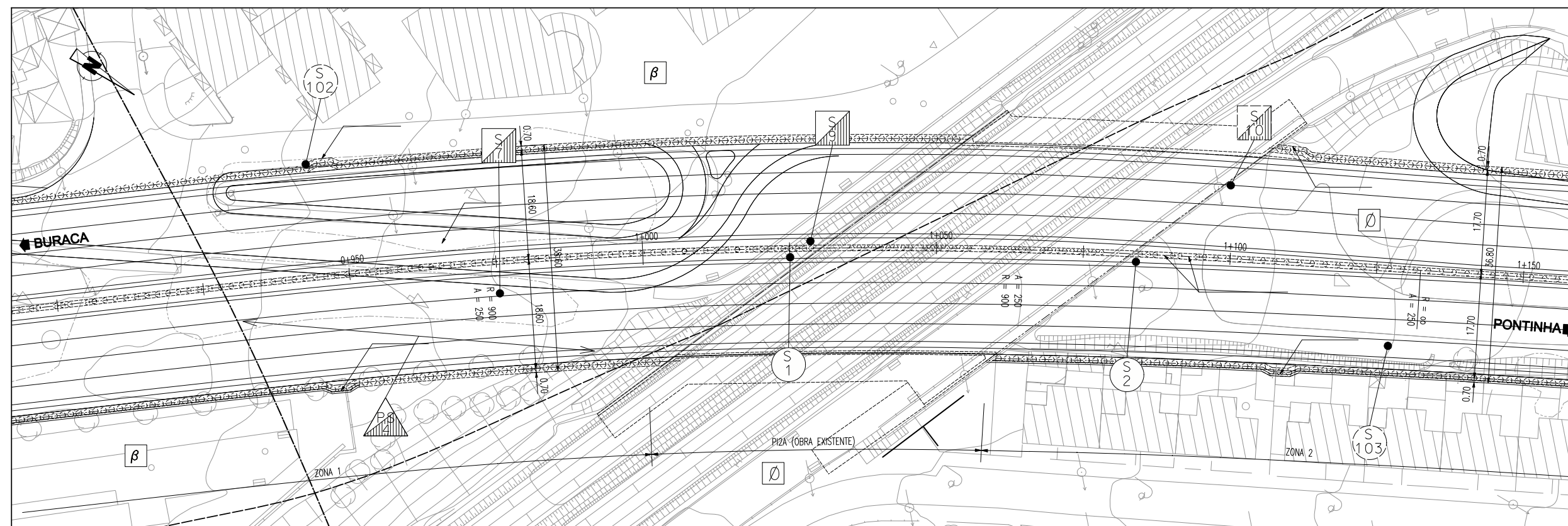
Elab.	RF
Verif.	RF, MCSC
Aprov.	AT

**I.C. 17 - CIRCULAR REGIONAL INTERIOR DE LISBOA
SUBLANÇO BURACA - PONTINHA**

Escalas
1:400
1:200

Subst.
Subst. por

Rev.	Data	Descrição	Elab.	Verif.	Aprov.
ESTUDO PRÉVIO TÚNEL DE BENFICA GEOLOGIA E GEOTECNIA PLANTA E CORTE LONGITUDINAL (1/6)			Número 1177-EP-42-0311-024		
			Data	Folha	
			DEZ. 06		



CORTE LONGITUDINAL PELO EIXO DO TÚNEL

H: 1:400
V: 1:200

EM CÓPIAS DESTES DESENHOS COM FORMATO
DIFERENTE DO A1 ATENDER À ESCALA GRÁFICA

Rev.	Data	Descrição					Elab.	Verif.	Aprov.			
ESTUDO PREVIÓ TÚNEL DE BENFICA GEOLOGIA E GEOTECNIA PLANTA E CORTE LONGITUDINAL (2/6)							Número	1177-EP-42-0311-025				
							Data	DEZ. 06		Folha		

Anexo B. Código do Programa de Cálculo de Cortinas Monoapoiadas

B.1. MÓDULO 1 – PROGRAMA PRINCIPAL

B.1.1. DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS GLOBAIS

```
Option Explicit
Option Base 0

Dim H As Double           'Profundidade da base de escavação
Dim Apoio As Double       'Profundidade do apoio
Dim NF As Double          'Nível Freático
Dim NFexiste As Boolean    'True se existir nível freático
Dim Ncamadas As Integer   'Numero de camadas
Dim Hcamada(), gama(), fi(), c() As Double 'Propriedades das camadas
Dim CargasLin(), CargasDist() As Double 'Definição de "outras cargas"
Dim NcargasLin, NcargasDist As Integer 'Número de "Outrças Cargas"
Dim ExistOutrasCarg As Boolean 'True se existirem outras cargas
Dim sob, cdistPerm As Double 'Cargas distribuidas por toda a superfície
Dim delta_rel As Double   'relação entre delta e angulo de atrito
Dim gAgua As Double       'peso volúmico da água
Dim profinf() As Double   'profundidade inferior de cada camada
Dim pnot1() As Double     'Pontos notáveis acima do nível freático e acima da base
Dim pnot2() As Double     'Pontos notáveis abaixo do nível freático e acima da base
Dim pnot3() As Double     'Pontos notáveis abaixo da base e acima do nível freático
Dim pnot4() As Double     'Pontos notáveis abaixo da base e abaixo do nível freático
Dim Fp, FSglobal, FSficha As Double 'Outros coeficientes de segurança
Dim ParaCalcular(1 To 4) As Boolean 'Métodos a calcular
Dim MetodoK As Integer    'Método de cálculo dos coeficientes de impulso
```

B.1.2. SUBROTINA CALCULAR

```
Sub Calcular()
    Worksheets("Dados").Activate
    Worksheets("Resumo").Range("D:D").ClearContents
    Worksheets("Resumo").Range("H:H").ClearContents
    Worksheets("Resumo").Range("L:L").ClearContents
    Worksheets("Resumo").Range("N:N").ClearContents
    Worksheets("Resumo").Range("Q:Q").ClearContents

    ValIniciais      'Lê os valores da folha "Dados" e guarda-os em variaveis
    Notaveis         'Calcula os pontos notáveis - são os mesmos para os dois casos

    If ParaCalcular(1) Then
        ValCalc ("EC7 - 1.1")
        Impulsos ("EC7 - 1.1")
        BotaoRecalc
        If Worksheets("Resumo").Range("L6") = "Calculado com sucesso!" Then
            CalcMmax ("EC7 - 1.1")
            Diagramas ("EC7 - 1.1")
        End If
    Else
        Worksheets("EC7 - 1.1").Range("A:AS").Delete
    End If

    If ParaCalcular(1) Then
        ValCalc ("EC7 - 1.2")
        Impulsos ("EC7 - 1.2")
        BotaoRecalc
        If Worksheets("Resumo").Range("L10") = "Calculado com sucesso!" Then
            CalcMmax ("EC7 - 1.2")
            Diagramas ("EC7 - 1.2")
        End If
    Else
        Worksheets("EC7 - 1.2").Range("A:AS").Delete
    End If
End Sub
```

```
If ParaCalcular(2) Then
    ValCalc ("EC7 - 2")
    Impulsos ("EC7 - 2")
    BotaoRecalc
    If Worksheets("Resumo").Range("L14") = "Calculado com sucesso!" Then
        CalcMmax ("EC7 - 2")
        Diagramas ("EC7 - 2")
    End If
Else
    Worksheets("EC7 - 2").Range("A:AS").Delete
End If

If ParaCalcular(3) Then
    ValCalc ("Tchebotarioff")
    Impulsos ("Tchebotarioff")
    BotaoRecalc
    If Worksheets("Resumo").Range("L18") = "Calculado com sucesso!" Then
        CalcMmax ("Tchebotarioff")
        Diagramas ("Tchebotarioff")
    End If
Else
    Worksheets("Tchebotarioff").Range("A:AS").Delete
End If

If ParaCalcular(4) Then
    ValCalc ("Fp=2")
    Impulsos ("Fp=2")
    BotaoRecalc
    If Worksheets("Resumo").Range("L22") = "Calculado com sucesso!" Then
        CalcMmax ("Fp=2")
        Diagramas ("Fp=2")
    End If
Else
    Worksheets("Fp=2").Range("A:AS").Delete
End If

Worksheets("Resumo").Activate
End Sub
```

B.1.3. SUBROTINA RECALC

```
Sub Recalc()
    Dim FolhaAct As String
    Dim linhaRes As Integer

    FolhaAct = ActiveSheet.Name
    ApagarGraf (FolhaAct)
    Range("AC:AS").Delete

    Select Case FolhaAct
        Case "EC7 - 1.1"
            linhaRes = 6
        Case "EC7 - 1.2"
            linhaRes = 10
        Case "EC7 - 2"
            linhaRes = 14
        Case "Tchebotarioff"
            linhaRes = 18
        Case "Fp=2"
            linhaRes = 22
        Case "Fnp=2"
            linhaRes = 26
    End Select

    ValIniciais      'Lê os valores da folha "Dados" e guarda-os em variaveis
    Notaveis         'Calcula os pontos notáveis - são os mesmos para os dois casos

    'Guarda os valores de FSglobal, FSficha, e Fp que estão na folha a recalculiar
    Worksheets(FolhaAct).Activate
    FSglobal = Range("M6").Value
    FSficha = Range("M7").Value
    Fp = Range("M9").Value
    Impulsos (FolhaAct)
```

B.2

```
If Worksheets("Resumo").Range("L" & linhaRes) = "Calculado com sucesso!" Then
    CalcMmax (FolhaAct)
    Diagramas (FolhaAct)
End If
End Sub
```

B.1.4. SUBROTINA VALINICIAIS

```
Private Sub ValIniciais()

    'Ler os valores da folha "Dados" e guardar em variaveis

    Dim i, linha As Integer

    Worksheets("Dados").Activate

    'Métodos a calcular
    ParaCalcular(1) = Range("Y22").Value
    ParaCalcular(2) = Range("Y23").Value
    ParaCalcular(3) = Range("Y24").Value
    ParaCalcular(4) = Range("Y25").Value

    H = Range("I8").Value
    Apoio = Range("I10").Value
    NF = Range("I12").Value
    If Range("Y6").Value = 2 Then
        NFexiste = True
    Else
        NFexiste = False
    End If

    Ncamadas = Range("I14").Value
    'Propriedades das Camadas
    ReDim Hcamada(1 To Ncamadas), gama(1 To Ncamadas), fi(1 To Ncamadas), _
        c(1 To Ncamadas), profinf(1 To Ncamadas)

    For i = 1 To Ncamadas
        ' i corresponde à camada
        ' Nota: profinf é calculado no ciclo para cada camada

        'O início da tabela é "E18" que corresponde a cell(18,5)
        linha = 18 + (i - 1)

        'atribuição dos valores
        Hcamada(i) = Cells(linha, 5).Value
        gama(i) = Cells(linha, 7).Value
        fi(i) = Cells(linha, 9).Value
        c(i) = Cells(linha, 8).Value

        'cálculo de profinf
        If i = 1 Then
            profinf(i) = Hcamada(i)
        Else
            profinf(i) = profinf(i - 1) + Hcamada(i)
        End If
    Next

    'Outros dados
    MetodoK = Range("Y14").Value
    delta_rel = Range("Q15").Value
    gAgua = Range("Q17").Value

    'Carregamentos
    sob = Range("Q8").Value
    cdistPerm = Range("Q10").Value

    'Outras Cargas
    If Range("Y10").Value = 2 Then
        ExistOutrasCarg = True
    Else
        ExistOutrasCarg = False
    End If
    'Ler os valores da folha "DadosCargas" e guardar em variáveis
```

```

If ExistOutrasCarg Then
    Worksheets("DadosCargas").Activate
    NcargasLin = Range("H7").Value
    NcargasDist = Range("Q7").Value

    If NcargasLin <> 0 Then
        ReDim CargasLin(1 To NcargasLin, 1 To 5)
        For i = 1 To NcargasLin ' i corresponde à carga Lin
            'O início da tabela é "D11" que corresponde a cell(11,4)
            linha = 11 + (i - 1)
            'atribuição dos valores
            CargasLin(i, 1) = Cells(linha, 4).Value 'carga
            CargasLin(i, 2) = Cells(linha, 5).Value 'Distancia
            CargasLin(i, 3) = Cells(linha, 6).Value 'profundidade
            If Cells(linha, 7).Value = "Perm." Then
                CargasLin(i, 4) = 1
            Else
                CargasLin(i, 4) = 2
            End If
            If Cells(linha, 8).Value = "Antes" Then
                CargasLin(i, 5) = 1
            Else
                CargasLin(i, 5) = 2
            End If
        Next
    End If

    If NcargasDist <> 0 Then
        ReDim CargasDist(1 To NcargasDist, 1 To 6)
        For i = 1 To NcargasDist ' i corresponde à carga Dist
            'O início da tabela é "L11" que corresponde a cell(11,12)
            linha = 11 + (i - 1)
            'atribuição dos valores
            CargasDist(i, 1) = Cells(linha, 12).Value 'carga
            CargasDist(i, 2) = Cells(linha, 13).Value 'largura
            CargasDist(i, 3) = Cells(linha, 14).Value 'distancia
            CargasDist(i, 4) = Cells(linha, 15).Value 'profundidade
            If Cells(linha, 16).Value = "Perm." Then
                CargasDist(i, 5) = 1
            Else
                CargasDist(i, 5) = 2
            End If
            If Cells(linha, 17).Value = "Antes" Then
                CargasDist(i, 6) = 1
            Else
                CargasDist(i, 6) = 2
            End If
        Next
    End If

    If NcargasLin = 0 And NcargasDist = 0 Then
        ExistOutrasCarg = False
        MsgBox "Não foram defenidas as Outras Cargas!!!" & Chr(13) & Chr(13) & _
            "Os cálculos serão feitos admitindo que NÃO existem."
    End If
End If

End Sub

```

B.1.5. SUBROTINA NOTAVEIS

```

Private Sub Notaveis()
    Dim i, inot As Integer

    '=====
    'Criar Lista de Pontos Notáveis acima da base de escavação =====
    '=====

    'Nível freático à superfície -----
    If NFexiste And NF = 0 Then

        ' Secos
        ReDim pnot1(0 To 0)
        pnot1(0) = -1
    End If

```

B.4

```
' Molhados
i = 1
inot = 1

ReDim Preserve pnot2(0 To inot)
pnot2(0) = 0

Do Until H <= profinf(i)
    pnot2(inot) = profinf(i)
    inot = inot + 1
    ReDim Preserve pnot2(0 To inot)
    i = i + 1
Loop
pnot2(inot) = H      'O ponto H é sempre notável e o último de pnot2

'Nível freático acima da base de escavação -----
ElseIf NFexiste And NF < H Then

' Secos
i = 1
inot = 1

ReDim pnot1(0 To inot)
pnot1(0) = 0

Do Until NF <= profinf(i)
    pnot1(inot) = profinf(i)
    inot = inot + 1
    ReDim Preserve pnot1(0 To inot)
    i = i + 1
Loop
pnot1(inot) = NF      'O ponto NF é sempre notável e o último de pnot1

' Molhados
inot = 1

ReDim Preserve pnot2(0 To inot)
pnot2(0) = NF

If profinf(i) = NF Then i = i + 1      'Para não duplicar o ponto NF

Do Until H <= profinf(i)
    pnot2(inot) = profinf(i)
    inot = inot + 1
    ReDim Preserve pnot2(0 To inot)
    i = i + 1
Loop
pnot2(inot) = H      'O ponto H é sempre notável e o último de pnot2

'Nível freático inexistente, coincidente ou abaixo da base de escavação -----
Else

' Secos
i = 1
inot = 1

ReDim Preserve pnot1(0 To inot)
pnot1(0) = 0

Do Until H <= profinf(i)
    pnot1(inot) = profinf(i)
    inot = inot + 1
    ReDim Preserve pnot1(0 To inot)
    i = i + 1
Loop
pnot1(inot) = H      'O ponto de cota H é sempre notável e o último de pnot2

' Molhados
ReDim pnot2(0 To 0)
pnot2(0) = -1
End If
```

```

=====
'Criar lista de pontos notáveis desde a base de escavação até ao limite inferior =====
=====

'Nível freático coincidente ou acima da base de escavação -----
If NFexiste And NF <= H Then

    If profinf(i) = H Then i = i + 1 'Para não duplicar o ponto de cota H

    ' Secos
    ReDim pnot3(0 To 0)
    pnot3(0) = -1

    inot = 0

    ' Molhados
    ReDim pnot4(0 To 0)
    pnot4(0) = H
    For i = i To Ncamadas
        inot = inot + 1
        ReDim Preserve pnot4(0 To inot)
        pnot4(inot) = profinf(i)
    Next

'Nível freático abaixo da base de escavação -----
ElseIf NFexiste And NF > H Then

    If profinf(i) = H Then i = i + 1 'Para não duplicar o ponto H

    ' Secos
    inot = 1
    ReDim pnot3(0 To inot)
    pnot3(0) = H

    Do Until NF <= profinf(i)
        pnot3(inot) = profinf(i)
        inot = inot + 1
        ReDim Preserve pnot3(0 To inot)
        i = i + 1
    Loop
    pnot3(inot) = NF 'O ponto NF é sempre notável e o último de pnot3

    If profinf(i) = NF Then i = i + 1 'Para não duplicar o ponto NF

    inot = 0

    ' Molhados
    ReDim pnot4(0 To 0)
    pnot4(0) = NF

    For i = i To Ncamadas
        inot = inot + 1
        ReDim Preserve pnot4(0 To inot)
        pnot4(inot) = profinf(i)
    Next

'Não há nível freático -----
Else

    If profinf(i) = H Then i = i + 1 'Para não duplicar o ponto de cota H

    inot = 0

    ' Secos
    ReDim pnot3(0 To 0)
    pnot3(0) = H
    For i = i To Ncamadas
        inot = inot + 1
        ReDim Preserve pnot3(0 To inot)
        pnot3(inot) = profinf(i)
    Next

```

```
' Molhados

ReDim pnot4(0 To 0)
pnot4(0) = -1

End If

End Sub
```

B.1.6. SUBROTINA VALCALC

```
Private Sub ValCalc(caso As String) 'Vai à folha "Dados Prog" Buscar Coefs parciais, determina os
                                     'valores de cálculo e coloca-os na folha do respectivo caso

Dim camadaN, linha As Integer
Dim fi_calc, c_calc As Double
Dim CargasLin_calc(), CargasDist_calc() As Double
Dim cargaN As Integer
Dim delta_calc As Double

Dim mt_a, mw_a, v_a, fi_a, delta_a As Double
Dim ca0, ca1, ca2, ca3 As Double
Dim kah As Double

Dim mt_p, mw_p, v_p, fi_p, delta_p As Double
Dim cp0, cp1, cp2, cp3, cp4, cp5 As Double
Dim kph As Double

Worksheets(caso).Activate
Range("A:AS").Delete
Range("B2") = caso
DestacarTexto1 ("B2")

Range("B4") = "Propriedades dos Solos - Valores de Cálculo"
LinhaEspessaBaixo ("B4:G4")
Range("C6") = "gama"
Range("D6") = "fi"
Range("E6") = "delta"
Range("F6") = "kah"
Range("G6") = "kph"
Range("H6") = "c'"
LinhaEspessaBaixo ("B6:H6")

Range("I4") = "Outros Val. Calc."
LinhaEspessaBaixo ("I4:J4")
Range("I5") = "gama ág"
Range("I7") = "Cargas Distrib. Sup."
LinhaEspessaBaixo ("I8:J8")
Range("I8") = "Sob."
Range("I9") = "Perm."

Range("L4") = "Outros Coefs"
LinhaEspessaBaixo ("L4:M4")
Range("L6") = "FSglobal"
Range("L7") = "FSficha"
Range("L9") = "Fp"

Range("O4") = "'Outras Cargas' (Valores de Cálculo)"
LinhaEspessaBaixo ("O4:S4")
Range("O6") = "Cargas Lineares"
LinhaEspessaBaixo ("O6:P6")
Range("R6") = "Cargas Distrib."
LinhaEspessaBaixo ("R6:S6")

Select Case caso      'linha em que estão os coeficiente na folha "Dados Prog"
Case "EC7 - 1.1"
    linha = 7
Case "EC7 - 1.2"
    linha = 8
Case "EC7 - 2"
    linha = 9
Case "Tchebotarioff"
    linha = 10
Case "Fp=2"
    linha = 11
```

```

Case "Fnp=2"
    linha = 12
End Select

For camadaN = 1 To Ncamadas
    Range("B" & 6 + camadaN).Value = "Camada " & camadaN

    'gama -----
    Range("C" & 6 + camadaN).Value = gama(camadaN) * Worksheets("Dados Prog").Range("C" & _
                                                linha).Value

    'Ângulo de atrito -----
    fi_calc = Atn(Tan(fi(camadaN) * WorksheetFunction.Pi / 180) / _
        Worksheets("Dados Prog").Range("F" & linha).Value) * 180 / WorksheetFunction.Pi

    Range("D" & 6 + camadaN).Value = fi_calc

    'Coesão -----
    c_calc = c(camadaN) / Worksheets("Dados Prog").Range("G" & linha).Value
    Range("H" & 6 + camadaN).Value = c_calc

    'delta -----
    delta_calc = fi_calc * delta_rel
    Range("E" & 6 + camadaN).Value = fi_calc * delta_rel

    'Cálculo dos K -----
    If MetodoK = 1 And delta_rel <> 0 Then 'Valores de K calculados por Caquot-Kerisel
        If delta_rel <= 0.34 Then 'delta=1/3fi
            ca3 = -0.00000268572
            ca2 = 0.000491975
            ca1 = -0.034910814
            ca0 = 0.981695088
            cp5 = 0
            cp4 = 0.00000187302
            cp3 = 0.0000372384
            cp2 = -0.003023196
            cp1 = 0.121103071
            cp0 = 0.583367797
        ElseIf delta_rel <= 0.67 Then 'delta=2/3fi
            ca3 = -0.00000131119
            ca2 = 0.000335789
            ca1 = -0.029144877
            ca0 = 0.912736307
            cp5 = 0.00000942377
            cp4 = -0.000100114
            cp3 = 0.004268119
            cp2 = -0.082134891
            cp1 = 0.786786141
            cp0 = -1.332203453
        Else 'delta=fi
            ca3 = -0.0000036802
            ca2 = 0.000546291
            ca1 = -0.034488928
            ca0 = 0.943403162
            cp5 = 0.00000183155
            cp4 = -0.000173533
            cp3 = 0.006517092
            cp2 = -0.11154622
            cp1 = 0.954084192
            cp0 = -1.602152278
        End If

        kah = (ca0 + ca1 * fi_calc ^ 1 + ca2 * fi_calc ^ 2 + ca3 * fi_calc ^ 3) * _
            Cos(delta_calc * WorksheetFunction.Pi() / 180)

        kph = (cp0 + cp1 * fi_calc ^ 1 + cp2 * fi_calc ^ 2 + cp3 * fi_calc ^ 3 + cp4 * _
            fi_calc ^ 4 + cp5 * fi_calc ^ 5) * Cos(delta_calc * WorksheetFunction.Pi() / 180)

    ElseIf MetodoK = 2 Or delta_rel = 0 Then 'Valores de k pelo método do anexo do EC7 (2004)
        'kah
        fi_a = -fi_calc * WorksheetFunction.Pi / 180
        delta_a = -delta_calc * WorksheetFunction.Pi / 180
        mt_a = 1 / 2 * ((WorksheetFunction.Pi / 2) - fi_a)
        mw_a = 1 / 2 * (WorksheetFunction.acos(Sin(delta_a) / Sin(fi_a)) - delta_a - fi_a)
        v_a = mt_a - mw_a
        kah = (1 + Sin(fi_a) * Sin(2 * mw_a + fi_a)) / (1 - Sin(fi_a) * Sin(2 * mt_a + fi_a)) _
            * Exp(2 * v_a * Tan(fi_a))
    End If

```

```

'kph
fi_p = fi_calc * WorksheetFunction.Pi / 180
delta_p = delta_calc * WorksheetFunction.Pi / 180
mt_p = 1 / 2 * ((WorksheetFunction.Pi / 2) - fi_p)
mw_p = 1 / 2 * (WorksheetFunction.acos(Sin(delta_p) / Sin(fi_p)) - delta_p - fi_p)
v_p = mt_p - mw_p
kph = (1 + Sin(fi_p) * Sin(2 * mw_p + fi_p)) / (1 - Sin(fi_p) * Sin(2 * mt_p + fi_p)) _
      * Exp(2 * v_p * Tan(fi_p))

End If

Range("F" & 6 + camadaN).Value = kah
Range("G" & 6 + camadaN).Value = kph
'-----
Next

'sobrecarga à superfície -----
Range("J8").Value = sob * Worksheets("Dados Prog").Range("E" & linha).Value

'Carga permanente distribuida por toda a superfície -----
Range("J9").Value = cdistPerm * Worksheets("Dados Prog").Range("C" & linha).Value

'gama água -----
Range("J5").Value = gAgua * Worksheets("Dados Prog").Range("C" & linha).Value

'Cargas lineares -----
For cargaN = 1 To NcargasLin
    If CargasLin(cargaN, 4) = 1 Then 'Se for permanente (coluna C dos coefs)
        Range("O" & 7 + (cargaN - 1)).Value = "Plin " & cargaN
        Range("P" & 7 + (cargaN - 1)).Value = CargasLin(cargaN, 1) * CargasLin(cargaN, 5) _
            * Worksheets("Dados Prog").Range("C" & linha).Value
    Else 'Se for variavel (coluna E dos coefs)
        Range("O" & 7 + (cargaN - 1)).Value = "Plin " & cargaN
        Range("P" & 7 + (cargaN - 1)).Value = CargasLin(cargaN, 1) * CargasLin(cargaN, 5) _
            * Worksheets("Dados Prog").Range("E" & linha).Value
    End If
Next

'Cargas distribuidas -----
For cargaN = 1 To NcargasDist
    If CargasDist(cargaN, 5) = 1 Then 'Se for permanente (coluna C dos coefs)
        Range("R" & 7 + (cargaN - 1)).Value = "Pdist " & cargaN
        Range("S" & 7 + (cargaN - 1)).Value = CargasDist(cargaN, 1) * CargasDist(cargaN, 6) _
            * Worksheets("Dados Prog").Range("C" & linha).Value
    Else 'Se for variavel (coluna E dos coefs)
        Range("R" & 7 + (cargaN - 1)).Value = "Pdist " & cargaN
        Range("S" & 7 + (cargaN - 1)).Value = CargasDist(cargaN, 1) * CargasDist(cargaN, 6) _
            * Worksheets("Dados Prog").Range("E" & linha).Value
    End If
Next

'Falta o Factor de Segurança para o impulso passivo "Líquido" (Fnp)

'Factor de Redução do Impulso passivo -----
Fp = Worksheets("Dados Prog").Range("I" & linha).Value
Range("M9").Value = Fp

'Factor de segurança Global -----
FSglobal = Worksheets("Dados Prog").Range("J" & linha).Value
Range("M6").Value = FSglobal

'Factor de segurança para a ficha -----
FSficha = Worksheets("Dados Prog").Range("K" & linha).Value
Range("M7").Value = FSficha

End Sub
'=====

```

B.1.7. SUBROTINA IMPULSOS

```
Private Sub Impulsos(caso As String)
    'Coloca as expressões para calcular os Impulsos, com base nos
    'valores de cálculo presentes na respectiva folha

    Dim i1, i2, linhaProp, linhaAct, LinhaInicioNF, linhaSuperficie, linhaH As Integer
    Dim SigVsuperiorA, SigVsuperiorP, RetiraGamaAg As String
    Dim FormulaIw1, FormulaIw2, FormulaIph1, FormulaIph2 As String
    Dim SomaAcumM, SomaAcumF As String
    Dim pnotAct() As Double
    Dim Iter As Integer
    Dim Atingido As Boolean
    Dim Ficha, ForcaEscora As Double
    Dim linhaRes As Integer
    Dim SomaIntF As String
    Dim i3 As Integer

    Iter = 1
    Atingido = False

    Worksheets(caso).Activate

    'linha do início
    linhaAct = WorksheetFunction.Max(Ncamadas + 9, 12, NcargasLin + 9, NcargasDist + 9)

    Range("B" & linhaAct).Value = "Impulsos Acima da Base de Escavação"
    LinhaEspessaBaixo ("B" & linhaAct & ":S" & linhaAct)

    SigVsuperiorA = "$J$8+$J$9"
    SigVsuperiorP = "0"

    linhaAct = linhaAct + 2
    Range("B" & linhaAct).Value = "Superior"
    Range("C" & linhaAct).Value = "Inferior"
    Range("E" & linhaAct).Value = "Iah1"
    Range("F" & linhaAct).Value = "Iah2"
    Range("G" & linhaAct).Value = "Iw1"
    Range("H" & linhaAct).Value = "Iw2"
    Range("I" & linhaAct).Value = "Icargas"
    Range("J" & linhaAct).Value = "Iahc.tec"
    Range("K" & linhaAct).Value = "Iph1"
    Range("L" & linhaAct).Value = "Iph2"
    Range("M" & linhaAct).Value = "Iphc.tec"
    Range("N" & linhaAct).Value = "b1"
    Range("O" & linhaAct).Value = "b2"
    Range("P" & linhaAct).Value = "bcargas"
    Range("R" & linhaAct).Value = "Momento"
    Range("S" & linhaAct).Value = "Força H"

    linhaSuperficie = Ncamadas + 12

    For i1 = 1 To 4
        Select Case i1
            Case 1
                ReDim pnotAct(0 To UBound(pnot1))
                pnotAct = pnot1
                RetiraGamaAg = ")"
                FormulaIw1 = 0
                FormulaIw2 = 0
                FormulaIph1 = 0
                FormulaIph2 = 0

            Case 2
                ReDim pnotAct(0 To UBound(pnot2))
                pnotAct = pnot2
                RetiraGamaAg = "-$J$5)"

                LinhaInicioNF = linhaAct + 1 'Se o NF for abaixo da base
                'LinhaInicioNF é redefinida

                'FormulaIw1 = É definida no local
                'FormulaIw2 = É definida no local
                FormulaIph1 = 0
                FormulaIph2 = 0
        End Select
    Next i1
End Sub
```

Case 3

```
ReDim pnotAct(0 To UBound(pnot3))
pnotAct = pnot3

'Calcula o total de momentos e forças gerados acima da base de escavação
linhaAct = linhaAct + 2
Range("R" & linhaAct).Formula = "=SUM(R" & linhaSuperficie & ":R" & linhaAct - 2 & ")"
```

$$\text{Range}(\text{"R" \& linhaAct}).\text{Formula} = \text{"=SUM(R" \& linhaSuperficie \& ":R" \& linhaAct - 2 \& ")"}$$

```
SomaAcumM = "R" & linhaAct
Range("S" & linhaAct).Formula = "=SUM(S" & linhaSuperficie & ":S" & linhaAct - 2 & ")"
```

$$\text{Range}(\text{"S" \& linhaAct}).\text{Formula} = \text{"=SUM(S" \& linhaSuperficie \& ":S" \& linhaAct - 2 \& ")"}$$

```
SomaAcumF = "S" & linhaAct
Range("P" & linhaAct).Value = "Total Acumulado"
```

```
linhaAct = linhaAct + 1
Range("B" & linhaAct).Value = "Determinação da Ficha"
LinhaEspessaBaixo ("B" & linhaAct & ":S" & linhaAct)
```

```
linhaAct = linhaAct + 1

RetiraGamaAg = ")"
linhaH = linhaAct + 1

FormulaIw1 = 0
FormulaIw2 = 0
FormulaIph1 = "999"
FormulaIph2 = "999"
```

Case 4

```
ReDim pnotAct(0 To UBound(pnot4))
pnotAct = pnot4
RetiraGamaAg = "-$J$5)"

If UBound(pnot2) = 0 Then
    LinhaInicioNF = linhaAct + 1
End If
FormulaIw1 = 0

If UBound(pnot2) = 0 Then FormulaIw2 = 0 'caso caontrário, é definida no local

FormulaIph1 = "999"
FormulaIph2 = "999"
```

End Select

```
If UBound(pnotAct) > 0 Then
For i2 = 1 To UBound(pnotAct)

    linhaProp = Solo(pnotAct(i2)) + 6
    linhaAct = linhaAct + 1

    'Coloca as profundidade inicial e final da camada nas colunas B e C, Respectivamente
    Range("B" & linhaAct).Value = pnotAct(i2 - 1)
    Range("C" & linhaAct).Value = pnotAct(i2)

    'Coloca formula para Iah1 na coluna E
    Range("E" & linhaAct).Formula = "=1/2*$F$" & linhaProp & "*(C" & linhaAct & "-B" & linhaAct & ")^2"
```

$$\text{Range}(\text{"E" \& linhaAct}).\text{Formula} = \text{"=1/2*\$F\$" \& linhaProp \& "*(C" \& linhaAct \& "-B" \& linhaAct \& ")^2"}$$

```
    'Coloca formula para Iah2 na coluna F
    Range("F" & linhaAct).Formula = "=$F$" & linhaProp & "*(C" & linhaAct & "-B" & linhaAct & ")^2"
```

$$\text{Range}(\text{"F" \& linhaAct}).\text{Formula} = \text{"=$F\$" \& linhaProp \& "*(C" \& linhaAct \& "-B" \& linhaAct \& ")^2"}$$

```
    'Coloca o valor dos impulsos da água (Iw1 e Iw2) nas coluna G e H
    If i1 = 2 Then
        FormulaIw1 = "=1/2*$J$5*(C" & linhaAct & "-B" & linhaAct & ")^2"
```

$$\text{FormulaIw1} = \text{"=1/2*\$J\$5*(C" \& linhaAct \& "-B" \& linhaAct \& ")^2"}$$

```
        FormulaIw2 = "(B" & linhaAct & "-B$" & LinhaInicioNF & ")*$J$5*(C" & linhaAct & "-B" & linhaAct & ")^2"
```

$$\text{FormulaIw2} = \text{"(B" \& linhaAct \& "-B\$" \& LinhaInicioNF \& ")*\$J\$5*(C" \& linhaAct \& "-B" \& linhaAct \& ")^2"}$$

```
    ElseIf i1 = 4 And UBound(pnot2) > 0 Then
        FormulaIw2 = "=(B$" & linhaH & "-B$" & LinhaInicioNF & ")*$J$5*(C" & linhaAct & "-B" & linhaAct & ")^2"
```

$$\text{FormulaIw2} = \text{"=(B\$" \& linhaH \& "-B\$" \& LinhaInicioNF \& ")*\$J\$5*(C" \& linhaAct \& "-B" \& linhaAct \& ")^2"}$$

```
    End If
    Range("G" & linhaAct).Value = FormulaIw1
    Range("H" & linhaAct).Value = FormulaIw2
```

```

'-----
If ExistOutrasCarg Then

    'Coloca os impulsos devidos aos "outros carregamentos" na coluna I
    SomaIntF = ""
    For i3 = 1 To NcargasLin
        SomaIntF = SomaIntF & "+IntFlin(B" & linhaAct & ";C" & linhaAct & ";$P$" & i3 + 6 _
            & ";" & CargasLin(i3, 2) & ";" & CargasLin(i3, 3) & ")"

    Next

    For i3 = 1 To NcargasDist
        SomaIntF = SomaIntF & "+IntFdist(B" & linhaAct & ";C" & linhaAct & ";$S$" & i3 + 6 _
            & ";" & CargasDist(i3, 2) & ";" & CargasDist(i3, 3) & ";" & CargasDist(i3, 4) & ")"
    Next

    Range("I" & linhaAct).FormulaLocal = SomaIntF

    'Coloca os centros de gravidade dos impulsos devidos a "outros carregamentos"
    SomaIntF = ""
    For i3 = 1 To NcargasLin
        SomaIntF = SomaIntF & "+(CGFlin(B" & linhaAct & ";C" & linhaAct & ";$P$" & i3 + 6 _
            & ";" & CargasLin(i3, 2) & ";" & CargasLin(i3, 3) & ")*IntFlin(B" & linhaAct _
            & ";C" & linhaAct & ";$P$" & i3 + 6 & ";" & CargasLin(i3, 2) & ";" & _
            CargasLin(i3, 3) & ")))"

    Next

    For i3 = 1 To NcargasDist
        SomaIntF = SomaIntF & "+(CGFdist(B" & linhaAct & ";C" & linhaAct & ";$S$" & i3 + _
            6 & ";" & CargasDist(i3, 2) & ";" & CargasDist(i3, 3) & ";" & CargasDist(i3, 4) & _
            ")*IntFdist(B" & linhaAct & ";C" & linhaAct & ";$S$" & i3 + 6 & ";" & _
            CargasDist(i3, 2) & ";" & CargasDist(i3, 3) & ";" & CargasDist(i3, 4) & ")))"
    Next

    If Range("I" & linhaAct).Value <> 0 Then ' Cells(linhaAct, 8).Value <> 0 Then
        SomaIntF = SomaIntF & ")/I" & linhaAct & "-" & Apoio
    Else
        SomaIntF = "0"
    End If

    Range("P" & linhaAct).FormulaLocal = SomaIntF

    Else
        Range("I" & linhaAct).Value = 0
        Range("P" & linhaAct).Value = 0
    End If
'-----
'-----

'Coloca o Valores dos impulsos devido à coesão (activo - TEC) na coluna J
Range("J" & linhaAct).FormulaLocal = "=IahcTEC(B" & linhaAct & ";C" & linhaAct & _
    ";$D$" & linhaProp & ";$H$" & linhaProp & ";$F$" & linhaProp & ";E" & linhaAct & _
    ";$F" & linhaAct & ")))"

'Coloca o braço dos impulsos devido à coesão (activo - TEC) na coluna Q
Range("Q" & linhaAct).FormulaLocal = "=B" & linhaAct & "+CGIahcTEC(B" & linhaAct & _
    ";$D$" & linhaProp & ";$H$" & linhaProp & ";$F$" & linhaProp & _
    ";$E" & linhaAct & ";$F" & linhaAct & "))-B" & linhaAct & ")))"

'Coloca o Valores dos impulsos devido à coesão (passivo - TEC) na coluna M
If i1 = 3 Or i1 = 4 Then
    Range("M" & linhaAct).Formula = "(C" & linhaAct & "-B" & linhaAct & ")*($G$" _
        & linhaProp & "-1)*$H$" & linhaProp & "1/TAN(RADIANS($D$" & linhaProp & "))/M$9"
    Else
        Range("M" & linhaAct).Value = 0
    End If

'-----
'-----

'Coloca os Valores dos impulsos passivos (Iph1 e Iph2) nas colunas K e L
If i1 = 3 Or i1 = 4 Then
    FormulaIph1 = "=1/2*$G$" & linhaProp & "*(C" & linhaProp & RetiraGamaAg & "*(C" & _
        linhaAct & "-B" & linhaAct & ")/M$9"
    FormulaIph2 = "=G$" & linhaProp & "*(C" & linhaAct & "-B" &

```

```

& linhaAct & ")/$M$9"

End If
Range("K" & linhaAct).Value = FormulaIph1
Range("L" & linhaAct).Value = FormulaIph2

'Coloca as Formulas para cálculo dos braços b1 e b2 nas colunas O e P, respectivamente
Range("N" & linhaAct).Formula = "=B" & linhaAct & "+(C" & linhaAct & _
    "-B" & linhaAct & ")*2/3-" & Apoio
Range("O" & linhaAct).Formula = "=B" & linhaAct & "+(C" & linhaAct & "-B" & linhaAct & _
    & ")/2-" & Apoio

'Coloca as formulas do Momento e da Força provocado pelos impulsos da camada (coluna R)
Range("R" & linhaAct).Formula = "=(E" & linhaAct & "+G" & linhaAct & "-K" & linhaAct & _
    & ")*N" & linhaAct & "+(F" & linhaAct & "+H" & linhaAct & "-L" & linhaAct & "-M" & _
    linhaAct & ")*O" & linhaAct & "+J" & linhaAct & "*Q" & linhaAct & "+I" & linhaAct & _
    "*P" & linhaAct

Range("S" & linhaAct).Formula = "=SUM(E" & linhaAct & ":J" & linhaAct & ")-SUM(K" & _
    linhaAct & ":M" & linhaAct & ")"

'Adiciona valor do peso de cada camada a SigVsuperiorA
SigVsuperiorA = SigVsuperiorA & "+($C$" & linhaProp & RetiraGamaAg & "*(C$" & _
    linhaAct & "-B$" & linhaAct & ")"

'Só se executa qd abaixo da base de escavação
'-----
If i1 = 3 Or i1 = 4 Then
    'Adiciona valor do peso de cada camada a SigVsuperiorP
    SigVsuperiorP = SigVsuperiorP & "+($C$" & linhaProp & RetiraGamaAg & "*(C$" & _
        linhaAct & "-B$" & linhaAct & ")"

    'Coloca o número da iteração
    Range("B" & linhaAct - 1).Value = "Iteração " & Iter
    Iter = Iter + 1

    linhaAct = linhaAct + 2      'Linha do Total Acumulado
    Range("P" & linhaAct).Value = "Total Acumulado"
    Range("R" & linhaAct).Formula = SomaAcumM & "+R" & linhaAct - 2
    Range("S" & linhaAct).Formula = SomaAcumF & "+S" & linhaAct - 2

    'Determina a prof. em que o Momento Total se anula e Determina a Ficha e Fe
    'Nota1: isto faz-se apenas para a primeira camada em que no final o somatório de
    'momentos dá negativo
    If Range("R" & linhaAct).Value < 0 And Not Atingido Then
        Range("B" & linhaAct - 2).Activate
        ActiveCell.Offset(2, 16).Range("A1").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:= _
            ActiveCell.Offset(0, 1).Range("A1")

        Atingido = True
        Ficha = Range("C" & linhaAct - 2).Value - H
        ForcaEscora = Range("S" & linhaAct).Value
    ElseIf Atingido Then      'Colocas os resultados seguintes a cinzento
        TextoCinza ("B" & linhaAct - 3 & ":S" & linhaAct + 1)
    End If

    'Actualizar o total acumulado dos momentos e das forças
    SomaAcumM = SomaAcumM & "+R" & linhaAct - 2
    SomaAcumF = SomaAcumF & "+S" & linhaAct - 2

    linhaAct = linhaAct + 1
    LinhaFinaBaixo ("B" & linhaAct & ":S" & linhaAct)

    linhaAct = linhaAct + 1
End If

Next
End If
Next

LinhaEspessaBaixo ("A" & linhaAct & ":S" & linhaAct)
linhaAct = linhaAct + 1
Range("S" & linhaAct) = "Fim"
LinhaEspessaBaixo ("A" & linhaAct & ":S" & linhaAct)

```

```
'Colocar valores calculados no Resumo
Select Case caso
    Case "EC7 - 1.1"
        linhaRes = 6
    Case "EC7 - 1.2"
        linhaRes = 10
    Case "EC7 - 2"
        linhaRes = 14
    Case "Tchebotarioff"
        linhaRes = 18
    Case "Fp=2"
        linhaRes = 22
    Case "Fnp=2"
        linhaRes = 26
End Select

Worksheets("Resumo").Activate

If Atingido Then
    Range("L" & linhaRes) = "Calculado com sucesso!"
    Range("D" & linhaRes).Formula = "=" & FSficha & "*" & Ficha
    Range("D" & linhaRes + 1).Formula = "=" & FSglobal & "*" & ForcaEscora
    Range("N" & linhaRes + 1) = 0
    Range("Q" & linhaRes + 1) = 0
Else
    Range("L" & linhaRes) = "Não foi possível atingir Momento nulo nas camadas definidas!"
    Range("N" & linhaRes + 1) = Worksheets(caso).Range("R" & linhaAct - 3).Value
    Range("Q" & linhaRes + 1) = Worksheets(caso).Range("S" & linhaAct - 3).Value
End If

Worksheets(caso).Activate

End Sub
'=====
```

B.1.8. SUBROTINA CALCMAX

```
Private Sub CalcMmax(caso As String) 'Admite que M é max abaixo da escora
    Dim linhaRes As Integer
    Dim linhaAct, linhaAnt, IV As Integer
    Dim Fescora, Inicio, Fim As Double
    Dim determinadoOK As Boolean

    Dim Mmax, profMmax As Double

    determinadoOK = False

    Worksheets(caso).Activate

    'Buscar valores calculados no Resumo
    Select Case caso
        Case "EC7 - 1.1"
            linhaRes = 6
        Case "EC7 - 1.2"
            linhaRes = 10
        Case "EC7 - 2"
            linhaRes = 14
        Case "Tchebotarioff"
            linhaRes = 18
        Case "Fp=2"
            linhaRes = 22
        Case "Fnp=2"
            linhaRes = 26
    End Select
    Fescora = Worksheets("Resumo").Range("D" & linhaRes + 1).Value / FSglobal

    'Expressão do Momento e do Esforço Transverso
    ' Nota: A primeira linha do esforço tansverso inclui a força na escora,não é real mas o M máx
    ' é sempre abaixo da escora, logo não tem implicações no resultado.

    linhaAct = Ncamadas + 9
    linhaAct = WorksheetFunction.Max(Ncamadas + 9, 12, NcargasLin + 9, NcargasDist + 9) + 3
```

```

'Momento
Range("U" & linhaAct).Formula = "(E" & linhaAct & "+G" & linhaAct & "-K" & linhaAct & _
    & ")*N" & linhaAct & "+(F" & linhaAct & "+H" & linhaAct & "-L" & linhaAct & "-M" & _
    & ")*O" & linhaAct & "+J" & linhaAct & "*Q" & linhaAct & "+I" & linhaAct & _
    & "*P" & linhaAct
'Range("U" & linhaAct).Formula = "(E" & linhaAct & "+G" & linhaAct & "-K" & linhaAct & ")*N" & _
    & linhaAct & "+(F" & linhaAct & "+H" & linhaAct & "-L" & linhaAct & ")*O" & _
    & linhaAct & "+(I" & linhaAct & ")*P" & linhaAct

'Esforço Transverso
Range("V" & linhaAct).Activate
ActiveCell.Formula = "=SUM(E" & linhaAct & ":J" & linhaAct & ")-SUM(K" & linhaAct & ":M" & _
    & linhaAct & ")-" & Fescora
'ActiveCell.Formula = "(E" & linhaAct & "+G" & linhaAct & "-K" & linhaAct & _
    & ")+(F" & linhaAct & "+H" & linhaAct & "-L" & linhaAct & ")+(I" & linhaAct & ")-" & Fescora

linhaAnt = linhaAct 'A linhaAnt serve para referência para as próximas expressões incluírem o
    'total do momento e do esforço transversal

For IV = 1 To UBound(pnot1) + UBound(pnot2) + UBound(pnot3) + UBound(pnot4)

    'Bucar valores do início e do final da camada
    Inicio = Range("B" & linhaAct).Value
    Fim = Range("C" & linhaAct).Value

    'Atingir o objectivo (zero) na coluna V por alteração da coluna D
    'Valor inicial no limite inferior da camada
    Range("C" & linhaAct).Value = Inicio
    Range("V" & linhaAct).Activate
    ActiveCell.GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=ActiveCell.Offset(0, -19).Range("A1")

    'No caso de ter encontrado uma solução (erradamente para cima)
    If Range("C" & linhaAct).Value < Inicio Then
        'Atingir o objectivo (zero) na coluna V por alteração da coluna D
        'Valor inicial no limite superior da camada
        Range("C" & linhaAct).Value = Fim
        Range("V" & linhaAct).Activate
        ActiveCell.GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=ActiveCell.Offset(0, -19).Range("A1")
    End If

    'Se o valor da coluna D calculado ficar dentro dos limites
    If Range("C" & linhaAct).Value < Fim And Range("C" & linhaAct).Value > Inicio And _
        Range("V" & linhaAct).Value < 0.01 And Range("V" & linhaAct).Value > -0.01 Then

        'OK!!!! - Guardar os valores em variáveis para depois colocar na folha "Resumo"
        Mmax = Range("U" & linhaAct).Value
        profMmax = Range("C" & linhaAct).Value

        'Repor os valores originais
        Range("C" & linhaAct).Value = Fim

        'Eliminar cálculos para mmax
        Range("U" & Ncamadas + 12 & ":V" & linhaAct).Clear

        '- Terminar a execução do Ciclo
        determinadoOK = True
        Exit For

    'Se não
    Else
        'KO!!!! - Repor os valores do final da camada
        Range("C" & linhaAct).Value = Fim
        '- Continuar o ciclo
    End If

    linhaAnt = linhaAct

    'Determinar a linha da próxima camada
    'If linhaAct < Ncamadas + 12 + UBound(pnot1) + UBound(pnot2) - 1 Then

    If linhaAct < WorksheetFunction.Max(Ncamadas + 9, 12, NcargasLin + 9, NcargasDist + 9) + 3 _
        + UBound(pnot1) + UBound(pnot2) - 1 Then
        linhaAct = linhaAct + 1
    End If

```

```

Else
    linhaAct = linhaAct + 5
End If

'Definição das expressões para a proxima camada
If IV < UBound(pnot1) + UBound(pnot2) + UBound(pnot3) + UBound(pnot4) Then
    'Momento
    Range("U" & linhaAct).Formula = "=U" & linhaAnt & "+(E" & linhaAct & "+G" & linhaAct & _
    & "-K" & linhaAct & ")*N" & linhaAct & "+(F" & linhaAct & "+H" & linhaAct & "-L" & _
    & linhaAct & "-M" & linhaAct & ")*O" & linhaAct & "+J" & linhaAct & "+Q" & linhaAct & _
    & "+I" & linhaAct & "+P" & linhaAct
    'Range("U" & linhaAct).Formula = "=U" & linhaAnt & "+(E" & linhaAct & "+G" & linhaAct & _
    & "-K" & linhaAct & ")*N" & linhaAct & "+(F" & linhaAct & "+H" & linhaAct & "-L" & _
    & linhaAct & ")*O" & linhaAct & "+(I" & linhaAct & "+P" & linhaAct

    'Esforço Transverso
    Range("V" & linhaAct).Formula = "=V" & linhaAnt & "+SUM(E" & linhaAct & ":J" & _
    & linhaAct & ")-SUM(K" & linhaAct & ":M" & linhaAct & ")"
    'Range("V" & linhaAct).Formula = "=V" & linhaAnt & "+(E" & linhaAct & "+G" & linhaAct & _
    & "-K" & linhaAct & ")+(F" & linhaAct & "+H" & linhaAct & "-L" & linhaAct & ")+I" & _
    & linhaAct
End If

Next

'Guardar valores na folha "Resumo"
If determinadoOK Then
    Worksheets("Resumo").Cells(linhaRes, 8).Value = profMmax
    Worksheets("Resumo").Cells(linhaRes + 1, 8).Formula = "=" & FSglobal & "*" & Mmax
Else
    Worksheets("Resumo").Cells(linhaRes, 12).Value = "Não foi possível determinar Mmax!"
End If
End Sub

```

B.1.9. SUBROTINA DIAGRAMAS

```

Sub Diagramas(caso As String)
Attribute Diagramas.VB_ProcData.VB_Invoke_Func = "q\n14"

Dim linhaAct, linhaOrig, linhaInicio, linhaRes As Integer
Dim pnotAct() As Double
Dim i1, i2 As Integer
Dim profAct, profAnt As Double
Dim ApoioInserido As Boolean
Dim Fescora, Ficha As Double

'Buscar valores calculados no Resumo
Select Case caso
    Case "EC7 - 1.1"
        linhaRes = 6
    Case "EC7 - 1.2"
        linhaRes = 10
    Case "EC7 - 2"
        linhaRes = 14
    Case "Tchebotarioff"
        linhaRes = 18
    Case "Fp=2"
        linhaRes = 22
    Case "Fnp=2"
        linhaRes = 26
End Select
Fescora = Worksheets("Resumo").Range("D" & linhaRes + 1).Value / FSglobal
Ficha = Worksheets("Resumo").Range("D" & linhaRes).Value / FSficha

ApoioInserido = False

'linhaOrig = Ncamadas + 12
linhaOrig = WorksheetFunction.Max(Ncamadas + 9, 12, NcargasLin + 9, NcargasDist + 9) + 3

```

```
profAnt = 0
profAct = 0.1
linhaAct = 2

Range("AR1") = "V[kN/m]"
Range("AS1") = "M[kN.m/m]"

'Copiar a primeira linha
Range("AD" & linhaAct) = 0
Range("AE" & linhaAct) = 0
Range("AG" & linhaAct) = 0
Range("AH" & linhaAct) = 0
Range("AI" & linhaAct) = 0
Range("AJ" & linhaAct) = 0
Range("AK" & linhaAct) = 0
Range("AL" & linhaAct) = 0
Range("AM" & linhaAct) = 0
Range("AN" & linhaAct) = 0
Range("AO" & linhaAct) = 0
Range("AQ" & linhaAct) = 0
If Apoio = 0 Then
    Range("AR" & linhaAct).Formula = "=" & Apoio & "*" & FSglobal
Else
    Range("AR" & linhaAct) = 0
End If
Range("AS" & linhaAct) = 0

linhaAct = linhaAct + 1
linhaInicio = linhaAct

For i1 = 1 To 4
    Select Case i1
        Case 1
            ReDim pnotAct(0 To UBound(pnot1))
            pnotAct = pnot1
        Case 2
            ReDim pnotAct(0 To UBound(pnot2))
            pnotAct = pnot2
        Case 3
            ReDim pnotAct(0 To UBound(pnot3))
            pnotAct = pnot3
        Case 4
            ReDim pnotAct(0 To UBound(pnot4))
            pnotAct = pnot4
    End Select

    If UBound(pnotAct) > 0 Then
        For i2 = 1 To UBound(pnotAct)

            'copiar range(E13:M13) para (AG1:A01)
            Range("E" & linhaOrig & ":M" & linhaOrig).Copy _
                Destination:=Range("AG" & linhaAct)

            'fixar células do início da camada e adicionar as camadas anteriores
            FixarAD ("AG" & linhaAct)
            Adicionar ("AG$" & linhaAct - 1)

            FixarAD ("AH" & linhaAct)
            Adicionar ("AH$" & linhaAct - 1)

            FixarAD ("AI" & linhaAct)
            Adicionar ("AI$" & linhaAct - 1)

            FixarAD ("AJ" & linhaAct)
            Adicionar ("AJ$" & linhaAct - 1)

            FixarAD ("AK" & linhaAct)
            Adicionar ("AK$" & linhaAct - 1)

            FixarAD ("AL" & linhaAct)
            Adicionar ("AL$" & linhaAct - 1)
            DefArgITEC

            FixarAD ("AM" & linhaAct)
            Adicionar ("AM$" & linhaAct - 1)
```

```

FixarAD ("AN" & linhaAct)
Adicionar ("AN$" & linhaAct - 1)

FixarAD ("AO" & linhaAct)
Adicionar ("AO$" & linhaAct - 1)

'Na expressão dos Iahc.tec tenho que retirar e fixar os os impulsos Iah1 e Iah2) no
'final da camada anterior - &º e 7º argumentos da função

'no caso de o apoio ficar na camada em estudo -----
If Not ApoioInserido And pnotAct(i2) > Apoio - 0.000001 Then
    Do While profAct < Apoio + 0.000001
        Range("AD" & linhaAct).Value = profAnt
        Range("AE" & linhaAct).Value = profAct
        Range("AC" & linhaAct).Value = linhaOrig

        'Profundidade
        Range("AQ" & linhaAct).Value = profAct
        'Expressão do esforço transverso
        Range("AR" & linhaAct).Formula = "(SUM(AG" & linhaAct & ":AL" & linhaAct & _
            ") - SUM(AM" & linhaAct & ":AO" & linhaAct & "))" & FSglobal
        'Expressão do Momento (é sempre igual)
        Range("AS" & linhaAct).Formula = "=AS" & linhaAct - 1 & "+(AR" & linhaAct & _
            "+AR" & linhaAct - 1 & ")/2*(AQ" & linhaAct & "-AQ" & linhaAct - 1 & ")"

        profAnt = profAct
        profAct = profAct + 0.1
        linhaAct = linhaAct + 1
        Range("AD" & linhaAct).Activate
    Loop
    'No caso de o apoio não ser coincidente com o valor de profAct quando sai do ciclo
    If Apoio > profAct - 0.1 + 0.000001 Then
        Range("AD" & linhaAct).Value = profAnt
        Range("AE" & linhaAct).Value = Apoio
        Range("AC" & linhaAct).Value = linhaOrig

        'Profundidade
        Range("AQ" & linhaAct).Value = Apoio
        'Expressão do esforço transverso
        Range("AR" & linhaAct).Formula = "(SUM(AG" & linhaAct & ":AL" & linhaAct & _
            ") - SUM(AM" & linhaAct & ":AO" & linhaAct & "))" & FSglobal
        'Expressão do Momento (é sempre igual)
        Range("AS" & linhaAct).Formula = "=AS" & linhaAct - 1 & "+(AR" & linhaAct & _
            "+AR" & linhaAct - 1 & ")/2*(AQ" & linhaAct & "-AQ" & linhaAct - 1 & ")"

        profAnt = Apoio
        linhaAct = linhaAct + 1
    End If

    'Mesma Profundidade mas o esforço transverso já inclui a força do apoio
    Range("AD" & linhaAct).Value = profAnt
    Range("AE" & linhaAct).Value = Apoio
    Range("AC" & linhaAct).Value = linhaOrig

    'Profundidade
    Range("AQ" & linhaAct).Value = Apoio
    'Expressão do esforço transverso
    Range("AR" & linhaAct).Formula = "(SUM(AG" & linhaAct & ":AL" & linhaAct & _
        ") - SUM(AM" & linhaAct & ":AO" & linhaAct & ")-" & Fescora & _
        ")" & FSglobal

    'Expressão do Momento (é sempre igual)
    Range("AS" & linhaAct).Formula = "=AS" & linhaAct - 1 & "+(AR" & linhaAct & _
        "+AR" & linhaAct - 1 & ")/2*(AQ" & linhaAct & "-AQ" & linhaAct - 1 & ")"

    profAnt = Apoio
    linhaAct = linhaAct + 1
    ApoioInserido = True
End If '-----

```

```

'No caso geral vai-se aumentando a profundidade até ao fim da camada -----
Do While profAct < pnotAct(i2) + 0.000001 And profAct < H + Ficha + 0.000001
    Range("AD" & linhaAct).Value = profAnt
    Range("AE" & linhaAct).Value = profAct
    Range("AC" & linhaAct).Value = linhaOrig

    'Profundidade
    Range("AQ" & linhaAct).Value = profAct
    'Expressão do esforço transverso
    If Not ApoioInserido Then
        Range("AR" & linhaAct).Formula = "(SUM(AG" & linhaAct & ":AL" & linhaAct & _
            ") - SUM(AM" & linhaAct & ":AO" & linhaAct & "))" & FSglobal
    Else
        Range("AR" & linhaAct).Formula = "(SUM(AG" & linhaAct & ":AL" & linhaAct & _
            ") - SUM(AM" & linhaAct & ":AO" & linhaAct & ")) - " & Fescora & ")" & FSglobal
    End If
    'Expressão do Momento (é sempre igual)
    Range("AS" & linhaAct).Formula = "=AS" & linhaAct - 1 & "(+AR" & linhaAct & _
        "+AR" & linhaAct - 1 & ")/2*(AQ" & linhaAct & "-AQ" & linhaAct - 1 & ")"

    profAnt = profAct
    profAct = profAct + 0.1
    linhaAct = linhaAct + 1
    Range("AD" & linhaAct).Activate
Loop

' Caso o fim da camada não seja coincidente com o valor de profAct quando sai do ciclo
If pnotAct(i2) > profAct - 0.1 + 0.000001 And profAct < H + Ficha + 0.000001 Then
    Range("AD" & linhaAct).Value = profAnt
    Range("AE" & linhaAct).Value = pnotAct(i2)
    Range("AC" & linhaAct).Value = linhaOrig

    'Profundidade
    Range("AQ" & linhaAct).Value = pnotAct(i2)
    'Expressão do esforço transverso
    If Not ApoioInserido Then
        Range("AR" & linhaAct).Formula = "(SUM(AG" & linhaAct & ":AL" & linhaAct & _
            ") - SUM(AM" & linhaAct & ":AO" & linhaAct & "))" & FSglobal
    Else
        Range("AR" & linhaAct).Formula = "(SUM(AG" & linhaAct & ":AL" & linhaAct & _
            ") - SUM(AM" & linhaAct & ":AO" & linhaAct & ")) - " & Fescora & ")" & FSglobal
    End If
    'Expressão do Momento (é sempre igual)
    Range("AS" & linhaAct).Formula = "=AS" & linhaAct - 1 & "(+AR" & linhaAct & _
        "+AR" & linhaAct - 1 & ")/2*(AQ" & linhaAct & "-AQ" & linhaAct - 1 & ")"

    profAnt = pnotAct(i2)
    linhaAct = linhaAct + 1

' Caso a prof da ficha não coincida com a valor de profAct quando sai do ciclo
ElseIf H + Ficha > profAct - 0.1 + 0.000001 And Not profAct < H + Ficha + 0.000001 Then
    Range("AD" & linhaAct).Value = profAnt
    Range("AE" & linhaAct).Value = H + Ficha
    Range("AC" & linhaAct).Value = linhaOrig

    'Profundidade
    Range("AQ" & linhaAct).Value = H + Ficha
    'Expressão do esforço transverso
    If Not ApoioInserido Then
        Range("AR" & linhaAct).Formula = "(SUM(AG" & linhaAct & ":AL" & linhaAct & _
            ") - SUM(AM" & linhaAct & ":AO" & linhaAct & "))" & FSglobal
    Else
        Range("AR" & linhaAct).Formula = "(SUM(AG" & linhaAct & ":AL" & linhaAct & _
            ") - SUM(AM" & linhaAct & ":AO" & linhaAct & ")) - " & Fescora & ")" & FSglobal
    End If
    'Expressão do Momento (é sempre igual)
    Range("AS" & linhaAct).Formula = "=AS" & linhaAct - 1 & "(+AR" & linhaAct & _
        "+AR" & linhaAct - 1 & ")/2*(AQ" & linhaAct & "-AQ" & linhaAct - 1 & ")"
    linhaAct = linhaAct + 1
End If
'-----

'Preencher com as formulas da primeira linha do respectivo intervalo
If linhaInicio <> linhaAct - 1 Then
    Range("AG" & linhaInicio & ":AO" & linhaAct - 1).FillDown
End If

```

```

        'Próxima linha de início
        linhaInicio = linhaAct
        'Próxima linha de origem
        If linhaOrig < WorksheetFunction.Max(Ncamadas + 9, 12, NcargasLin + 9, NcargasDist + _
9) + 3 + UBound(pnot1) + UBound(pnot2) - 1 Then
            linhaOrig = linhaOrig + 1
        Else
            linhaOrig = linhaOrig + 5
        End If
    Next 'i2 = 1 To UBound(pnotAct)
End If 'UBound(pnotAct) > 0
Next 'i1 = 1 To 4

```

```

'Criar Gráfico
Range("A1").Select
ActiveSheet.Shapes.AddChart.Select
ActiveChart.SetSourceData Source:=Range("$AQ$1:$AS$" & linhaAct - 1)
ActiveChart.ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
ActiveChart.Axes(xlValue).HasMajorGridlines = True
ActiveChart.Axes(xlCategory).HasMajorGridlines = True
ActiveChart.Axes(xlValue).HasMinorGridlines = True
ActiveChart.Axes(xlCategory).HasMinorGridlines = True
ActiveChart.Legend.Position = xlBottom

Range("A1").Select
End Sub

```

B.1.10. FUNÇÃO SOLO

```

Private Function Solo(prof As Double) As Integer
    Solo = 0
    Do
        Solo = Solo + 1
    Loop While profinf(Solo) < prof
End Function

```

B.1.11. OUTRAS FUNÇÕES E SUBROTINAS

```

Sub BotaoRecalc()
    ActiveSheet.Buttons.Add(816, 15, 96, 18.75).Select
    Selection.OnAction = "Recalc"
    Selection.Characters.Text = "Recalcular"
    With Selection.Characters(Start:=1, Length:=10).Font
        .Name = "Calibri"
        .FontStyle = "Bold"
        .Size = 12
        .Strikethrough = False
        .Superscript = False
        .Subscript = False
        .OutlineFont = False
        .Shadow = False
        .Underline = xlUnderlineStyleNone
    End With
    ActiveCell.Select
End Sub

Private Sub TextoCinza(alvo As String)
    Dim celulas As Range
    Set celulas = Range(alvo)
    With celulas.Font
        .ThemeColor = xlThemeColorDark1
        .TintAndShade = -0.249977111117893
    End With
End Sub

Private Sub LinhaEspessaBaixo(alvo As String)
    Dim celulas As Range

```

B.20

```
Set celulas = Range(alvo)
With celulas.Borders(xlEdgeBottom)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlMedium
End With
End Sub

Private Sub LinhaFinaBaixo(alvo As String)
    Dim celulas As Range
    Set celulas = Range(alvo)
    With celulas.Borders(xlEdgeBottom)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlThin
    End With
End Sub

Private Sub DestacarText01(alvo As String)
    Dim celulas As Range
    Set celulas = Range(alvo)
    celulas.Font.Bold = True
    celulas.Font.Size = 14
End Sub

Sub ApagarGraf(folha As String)
    On Error Resume Next
    Worksheets(folha).ChartObjects(1).Delete
    Resume Next
End Sub
```

B.2. MÓDULO 2 – CÁLCULO DO IMPULSO DEVIDO A UMA CARGA LINEAR

B.2.1. FUNÇÃO INTFLIN

```
Option Explicit

'IntFlin(a, b, carga, distancia, profAplic)
Function IntFlin(A As Double, B As Double, carga As Double, distancia As Double, _
    profAplic As Double) As Double

    Dim P, d As Double

    P = carga
    d = distancia

    If A >= profAplic Then
        A = A - profAplic
        B = B - profAplic
    ElseIf A < profAplic And profAplic < B Then
        A = 0
        B = B - profAplic
    Else
        IntFlin = 0
        Exit Function
    End If

    IntFlin = (1 / (A ^ 2 + d ^ 2) - 1 / (B ^ 2 + d ^ 2)) * d ^ 2 * P / WorksheetFunction.Pi()

End Function
```

B.2.2. FUNÇÃO CGFLIN

```
Function CGFlin(A As Double, B As Double, carga As Double, distancia As Double, _
    profAplic As Double) As Double

    Dim objectivo, passo As Double
    Dim erro As Double
```

```

erro = 0.0005

If A >= profAplic Then
    A = A - profAplic
    B = B - profAplic
ElseIf A < profAplic And profAplic < B Then
    A = 0
    B = B - profAplic
Else
    CGFlin = 0
    Exit Function
End If

objectivo = IntFlin(A, B, carga, distancia, 0) / 2
passo = (B - A) / 2
CGFlin = A + passo
Do Until IntFlin(A, CGFlin, carga, distancia, 0) > objectivo - erro And _
    IntFlin(A, CGFlin, carga, distancia, 0) < objectivo + erro

    If IntFlin(A, CGFlin, carga, distancia, 0) < objectivo Then
        Do While IntFlin(A, CGFlin, carga, distancia, 0) < objectivo
            CGFlin = CGFlin + passo
        Loop
    Else
        Do Until IntFlin(A, CGFlin, carga, distancia, 0) < objectivo
            CGFlin = CGFlin - passo
        Loop
    End If
    passo = passo / 2
Loop

CGFlin = CGFlin + profAplic

End Function

```

B.3. MÓDULO 3 – CÁLCULO DO IMPULSO DEVIDO A UMA CARGA DISTRIBUÍDA POR UMA FAIXA DE TERRENO

B.3.1. FUNÇÃO INTFDIST

```

Option Explicit
Option Base 0

Function IntFdist(A As Double, B As Double, carga As Double, largura As Double, _
    distancia As Double, profAplic As Double) As Double
    'Calcula o integral das tensões horizontais através do algoritmo de Romberg

    Dim R() As Double
    Dim H, suma As Double
    Dim n As Integer
    Dim OK As Boolean
    Dim i, j, k As Integer

    If A >= profAplic Then
        A = A - profAplic
        B = B - profAplic
    ElseIf A < profAplic And profAplic < B Then
        A = 0
        B = B - profAplic
    Else
        IntFdist = 0
        Exit Function
    End If

    n = 3
    ReDim R(2, n)
    H = B - A

    R(1, 1) = H / 2 * (CargaDist(A, carga, largura, distancia) + CargaDist(B, carga, largura, _
        distancia))

```

```
'passo3 do algoritmo de Romberg
For i = 1 To n
    'passo 4
    suma = 0
    For k = 1 To 2 ^ (i - 1)
        suma = suma + CargaDist(A + H * (k - 0.5), carga, largura, distancia)
    Next k
    R(2, 1) = 0.5 * (R(1, 1) + H * suma)

    'passo 5
    For j = 2 To i
        R(2, j) = R(2, j - 1) + (R(2, j - 1) - R(1, j - 1)) / (4 ^ (j - 1) - 1)
    Next j
    'passo 7
    H = H / 2
    'passo 8
    For j = 1 To i
        R(1, j) = R(2, j)
    Next j
Next i

'Saída do Resultado
IntFdistr = R(2, n)

End Function
```

B.3.2. FUNÇÃO CGFDIST

```
Function CGFdistr(A As Double, B As Double, carga As Double, largura As Double, _
    distancia As Double, profAplic As Double) As Double
    Dim objectivo, passo As Double
    Dim erro As Double
    erro = 0.0005

    If A >= profAplic Then
        A = A - profAplic
        B = B - profAplic
    ElseIf A < profAplic And profAplic < B Then
        A = 0
        B = B - profAplic
    Else
        CGFdistr = 0
        Exit Function
    End If

    objectivo = IntFdistr(A, B, carga, largura, distancia, 0) / 2

    passo = (B - A) / 2
    CGFdistr = A + passo
    Do Until IntFdistr(A, CGFdistr, carga, largura, distancia, 0) > objectivo - erro And _
        IntFdistr(A, CGFdistr, carga, largura, distancia, 0) < objectivo + erro
        If IntFdistr(A, CGFdistr, carga, largura, distancia, 0) < objectivo Then
            Do While IntFdistr(A, CGFdistr, carga, largura, distancia, 0) < objectivo
                CGFdistr = CGFdistr + passo
            Loop
        Else
            Do Until IntFdistr(A, CGFdistr, carga, largura, distancia, 0) < objectivo
                CGFdistr = CGFdistr - passo
            Loop
        End If
        passo = passo / 2
    Loop

    CGFdistr = CGFdistr + profAplic

End Function
```

B.3.3. FUNÇÃO CARGADIST

```
Function CargaDist(z As Double, carga As Double, largura As Double, distancia As Double) As Double
    Dim P, d, B, alfa, delta As Double

    P = carga
    B = largura
    d = distancia

    If z <> 0 Then
        alfa = Atn((B + d) / z) - Atn(d / z)
        delta = Atn(d / z)
        CargaDist = P / WorksheetFunction.Pi() * (alfa - Sin(alfa) * Cos(alfa + 2 * delta))
    Else
        CargaDist = 0
    End If
End Function
```

B.4. MÓDULO 4 – OUTRAS SUBROTINAS

Option Explicit

```
Sub AtObjectivoForca()
    Attribute AtObjectivoForca.VB_ProcData.VB_Invoke_Func = "f\n14"
    ActiveCell.GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=ActiveCell.Offset(-2, -15).Range("A1")
End Sub
```

```
Sub AtObjectivoMmax()
    Attribute AtObjectivoMmax.VB_ProcData.VB_Invoke_Func = "m\n14"
    ActiveCell.GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=ActiveCell.Offset(0, -19).Range("A1")
End Sub
```

```
Sub MudarParaDados()
    Worksheets("Dados").Activate
End Sub
Sub MudarParaDadosCargas()
    Worksheets("DadosCargas").Activate
End Sub
```

```
Sub DeltaPhiAdm()
    Dim indice As Integer

    indice = Range("Y14").Value

    Select Case indice

    Case 1
        With Range("Q15").Validation
            .Delete
            .Add Type:=xlValidateList, AlertStyle:=xlValidAlertStop, Operator:= _
            xlBetween, Formula1:="$X$19:$AA$19"
            .IgnoreBlank = True
            .InCellDropdown = True
            .InputTitle = ""
            .ErrorTitle = "Erro: Valor não Permitido"
            .InputMessage = ""
            .ErrorMessage = "Existe um conjunto restrito de valores permitidos." & Chr(13) & Chr(13) _
            & "Selecione os valores da lista."
            .ShowInput = True
            .ShowError = True
        End With

        Range("Q15").Value = 2 / 3
    End Select
End Sub
```

```
Case 2
  With Range("Q15").Validation
    .Delete
    .Add Type:=xlValidateInputOnly, AlertStyle:=xlValidAlertStop, Operator _
    :=xlBetween
    .IgnoreBlank = True
    .InCellDropdown = True
    .InputTitle = ""
    .ErrorTitle = ""
    .InputMessage = ""
    .ErrorMessage = ""
    .ShowInput = True
    .ShowError = True
  End With
End Select
End Sub
```

B.5. MÓDULO 5 – SUBROTINAS UTILIZADAS NO CÁLCULO DOS DIAGRAMAS

```
Option Explicit
Option Base 0

Sub FixarAD(celula As String)
  Attribute FixarAD.VB_ProcData.VB_Invoke_Func = "q\n14"
  Dim Form, esquerda, direita As String
  Dim pos As Integer

  Range(celula).Activate

  Form = ActiveCell.Formula
  pos = 1

  If ActiveCell.Formula <> 0 Then
    Do
      pos = InStr(pos, Form, "AD")

      If pos = 0 Then Exit Do
      If IsNumeric(Left(Right(Form, Len(Form) - (pos + 1)), 1)) Then

        esquerda = Left(Form, pos + 1)
        direita = Right(Form, Len(Form) - (pos + 1))

        Form = esquerda & "$" & direita
      End If

      'MsgBox pos & Chr(13) & Form & Chr(13) & Chr(13) & esquerda & Chr(13) & direita
      pos = pos + 1
    Loop

    ActiveCell.Formula = Form

    'ActiveCell.Formula = ActiveCell.Formula & "+" & coluna & "$" & linhaAct - 1
  End If
End Sub

Sub Adicionar(celula As String)
  If Len(ActiveCell.Formula) > 1 Then
    ActiveCell.Formula = "=" & celula & "+" & Right(ActiveCell.Formula, _
      Len(ActiveCell.Formula) - 1)
  Else
    ActiveCell.Formula = "=" & celula & "+" & ActiveCell.Formula
  End If
End Sub
```

```

Sub DefArgITEC()
Dim Form, esquerda, direita As String
Dim pos, linha As Integer
linha = ActiveCell.Row

Form = ActiveCell.Formula

If Form <> 0 And Len(Form) > 1 And Right(Form, 1) = ")" Then
    pos = 1
    'Alterar o último argumento
    esquerda = Left(Form, Len(Form) - 1)
    Form = esquerda & "-AH$" & linha - 1 & ")"

    'Alterar o Penúltimo argumento
    pos = 1
    pos = InStr(pos, Form, "AG")
    pos = InStr(pos, Form, ",")
    esquerda = Left(Form, pos - 1)
    direita = Right(Form, Len(Form) - (pos - 1))
    Form = esquerda & "-AG$" & linha - 1 & direita

    ActiveCell.Formula = Form
End If
End Sub
    
```

B.6. MÓDULO 6 – FUNÇÕES PARA A APLICAÇÃO DO TEOREMA DOS ESTADOS CORRESPONDENTES

B.6.1. FUNÇÃO IAHCTEC

```

Option Explicit

Function IahcTEC(A_ As Double, B_ As Double, fi As Double, coe As Double, kah As Double, _
    Iah1_ As Double, Iah2_ As Double) As Double

Dim iah1, iah2, iahTECteo, Xnulo As Double

If A_ = B_ Then
    IahcTEC = 0
    Exit Function
End If

iah1 = Iah1_ * 2 / (B_ - A_)
iah2 = Iah2_ / (B_ - A_)
iahTECteo = (1 - kah) * coe * 1 / Tan(WorksheetFunction.Pi() * fi / 180)

'Sempre positivo
If iahTECteo <= iah2 Then
    IahcTEC = -iahTECteo * (B_ - A_)
'MsgBox "Iahtec " & A_ & " - " & B_ & " -> Sempre Positivo"

'É negativo em Parte
ElseIf iahTECteo < (iah1 + iah2) Then
    Xnulo = (iahTECteo - iah2) * (B_ - A_) / iah1
    IahcTEC = -(iahTECteo * (B_ - A_) - (iahTECteo - iah2) * Xnulo / 2)
'MsgBox "Iahtec " & A_ & " - " & B_ & " -> É negativo em parte"

'É sempre negativo
Else
    IahcTEC = -(Iah1_ + Iah2_)
'MsgBox "Iahtec " & A_ & " - " & B_ & " -> É Sempre Negativo"
End If

End Function
    
```

B.6.2. FUNÇÃO CGIahcTEC

```
Function CGIahcTEC(A_ As Double, B_ As Double, fi As Double, coe As Double, kah As Double, _
    Iah1_ As Double, Iah2_ As Double) As Double

Dim iah1, iah2, iahTECteo, Xnulo As Double

If A_ = B_ Then
    CGIahcTEC = 0
    Exit Function
End If

iah1 = Iah1_ * 2 / (B_ - A_)
iah2 = Iah2_ / (B_ - A_)
iahTECteo = (1 - kah) * coe * 1 / Tan(WorksheetFunction.Radians(fi))

'Sempre positivo
If iahTECteo <= iah2 Then
    CGIahcTEC = (B_ - A_) / 2

'É negativo em parte
ElseIf iahTECteo <= (iah1 + iah2) Then
    Xnulo = (iahTECteo - iah2) * (B_ - A_) / iah1
    CGIahcTEC = ((iah2 * (B_ - A_) ^ 2 / 2) + _
        (iah1 * (B_ - A_) ^ 2 / 3) - _
        (iah1 + iah2 - iahTECteo) * (B_ - A_ - Xnulo) / 2 * (2 / 3 * (B_ - A_ - _
        Xnulo) + Xnulo)) / ((iah2 + iah1 / 2) * (B_ - A_) - (iah1 + iah2 - _
        iahTECteo) * (B_ - A_ - Xnulo) / 2)

'É Sempre negativo
Else
    CGIahcTEC = (Iah2_ * (B_ - A_) / 2 + Iah1_ * (B_ - A_) * 2 / 3) / (Iah1_ + Iah2_)

End If
End Function
```

B.7. FOLHA DADOS

```
Option Explicit
Dim n_camadas As Single
Dim camada_N As Integer
Dim linha As Integer
Dim Nanterior As Integer

Private Sub Worksheet_Change(ByVal Target As Range)

Select Case Target.Address

Case "$I$14" 'Procedimento a executar quando se introduz o número de camadas

    n_camadas = Target.Value

    'Testa se o valor introduzido é inteiro
    If n_camadas \ 1 <> n_camadas Then
        Range("$I$14").Activate
        MsgBox "O número de camadas tem que ser inteiro!!!", 48, "Erro!!"
        Range("$I$14").Value = Nanterior
        Exit Sub
    End If

    'Cria célula para introduzir
    'Nota: Se o Valor introduzido não for inteiro isto não é executado

    'Range("C" & Nanterior
    'Range("C18:I27").Clear
    LinhaEspessaCima ("C18:I18")

    If n_camadas > Nanterior Then
        For camada_N = Nanterior + 1 To n_camadas Step 1
            linha = 18 + (camada_N - 1)
            Range("C" & linha).Value = "Horizonte " & camada_N
        Next
    End If

End Sub
```

```

        Range("E" & linha).Interior.Color = 15773696
        Range("G" & linha).Interior.Color = 15773696
        With Range("H" & linha).Interior
            .ThemeColor = xlThemeColorLight2
            .TintAndShade = 0.799981688894314
        End With
        Range("I" & linha).Interior.Color = 15773696

        LinhaEspessaBaixo ("C" & linha & ":" & "I" & linha)
    Next
    ElseIf n_camadas < Nanterior Then
        Range("C" & 18 + n_camadas & ":" & "I" & 18 + Nanterior - 1).Clear
        LinhaEspessaBaixo ("C" & 18 + n_camadas - 1 & ":" & "I" & 18 + n_camadas - 1)
    End If
End Select
End Sub

Private Sub Worksheet_SelectionChange(ByVal Target As Range)

Select Case Target.Address

Case "$I$14" 'Gaurdar o valor quando se selecciona
    Nanterior = Target.Value
End Select
End Sub

Private Sub LinhaEspessaBaixo(alvo As String)
    Dim celulas As Range
    Set celulas = Range(alvo)
    With celulas.Borders(xlEdgeBottom)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlMedium
    End With
End Sub

Private Sub LinhaEspessaCima(alvo As String)
    Dim celulas As Range
    Set celulas = Range(alvo)
    With celulas.Borders(xlEdgeTop)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlMedium
    End With
End Sub

```

B.8. FOLHA DADOS CARGAS

Option Explicit

```

Dim n_cargas As Single
Dim carga_N As Integer
Dim linha As Integer
Dim Nanterior As Integer

```

```

Private Sub Worksheet_Change(ByVal Target As Range)

```

```

Select Case Target.Address

```

```

Case "$H$7" 'Procedimento a executar quando se introduz o número de cargas lin

```

```

    n_cargas = Target.Value

```

```

    'Testa se o valor introduzido é inteiro

```

```

    If n_cargas \ 1 <> n_cargas Then

```

```

        Range("$H$7").Activate

```

```

        MsgBox "O número de camadas tem que ser inteiro!!!", 48, "Erro!!"

```

```

        Range("$H$7").Value = Nanterior

```

```

        Exit Sub

```

```

    End If

```

```

    LinhaEspessaCima ("C11:H11")

```

```
If n_cargas > Nanterior Then
    For carga_N = Nanterior + 1 To n_cargas Step 1
        linha = 11 + (carga_N - 1)
        Range("C" & linha).Value = "Plin " & carga_N

        OpcTipo ("G" & linha)
        Range("G" & linha).Value = "Perm."
        OpcAplic ("H" & linha)
        Range("H" & linha).Value = "Antes"
        LinhaEspessaBaixo ("C" & linha & ":" & "H" & linha)
    Next
ElseIf n_cargas < Nanterior Then
    Range("C" & 11 + n_cargas & ":" & "H" & 11 + Nanterior - 1).Clear
    LinhaEspessaBaixo ("C" & 11 + n_cargas - 1 & ":" & "H" & 11 + n_cargas - 1)
End If
Range("D11").Select

Case "$Q$7" 'Procedimento a executar quando se introduz o número de cargas dist

    n_cargas = Target.Value

    'Testa se o valor introduzido é inteiro
    If n_cargas \ 1 <> n_cargas Then
        Range("$Q$7").Activate
        MsgBox "O número de camadas tem que ser inteiro!!!", 48, "Erro!!"
        Range("$Q$7").Value = Nanterior
        Exit Sub
    End If

    LinhaEspessaCima ("K11:Q11")

    If n_cargas > Nanterior Then
        For carga_N = Nanterior + 1 To n_cargas Step 1
            linha = 11 + (carga_N - 1)
            Range("K" & linha).Value = "Pdist " & carga_N

            OpcTipo ("P" & linha)
            Range("P" & linha).Value = "Perm."
            OpcAplic ("Q" & linha)
            Range("Q" & linha).Value = "Antes"

            LinhaEspessaBaixo ("K" & linha & ":" & "Q" & linha)
        Next
    ElseIf n_cargas < Nanterior Then
        Range("K" & 11 + n_cargas & ":" & "Q" & 11 + Nanterior - 1).Clear
        LinhaEspessaBaixo ("K" & 11 + n_cargas - 1 & ":" & "Q" & 11 + n_cargas - 1)
    End If
    Range("L11").Select

End Select
End Sub

Private Sub Worksheet_SelectionChange(ByVal Target As Range)

    If Target.Address = "$H$7" Or Target.Address = "$Q$7" Then 'Gaurdar o valor quando se selecciona

        Nanterior = Target.Value
    End If
End Sub

Private Sub LinhaEspessaBaixo(alvo As String)
    Dim celulas As Range
    Set celulas = Range(alvo)
    With celulas.Borders(xlEdgeBottom)
        .LineStyle = xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlMedium
    End With
End Sub

Private Sub LinhaEspessaCima(alvo As String)
    Dim celulas As Range
    Set celulas = Range(alvo)
    With celulas.Borders(xlEdgeTop)
        .LineStyle = xlContinuous
    End With
End Sub
```

```
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = xlMedium
    End With
End Sub

Private Sub OpcTipo(alvo As String)
    Range(alvo).Select
    With Selection.Validation
        .Delete
        .Add Type:=xlValidateList, AlertStyle:=xlValidAlertStop, Operator:= _
xlBetween, Formula1:="=$W$6:$W$7"
        .IgnoreBlank = True
        .InCellDropdown = True
        .InputTitle = ""
        .ErrorTitle = ""
        .InputMessage = ""
        .ErrorMessage = ""
        .ShowInput = True
        .ShowError = True
    End With
End Sub

Private Sub OpcAplic(alvo As String)
    Range(alvo).Select
    With Selection.Validation
        .Delete
        .Add Type:=xlValidateList, AlertStyle:=xlValidAlertStop, Operator:= _
xlBetween, Formula1:="=$Z$6:$Z$7"
        .IgnoreBlank = True
        .InCellDropdown = True
        .InputTitle = ""
        .ErrorTitle = ""
        .InputMessage = ""
        .ErrorMessage = ""
        .ShowInput = True
        .ShowError = True
    End With
End Sub
```

Anexo C. Pormenorização da Solução Estrutural Calculada

Nas páginas seguintes, apresenta-se os desenhos relativos à solução estrutural para a Zona 2A calculada no Capítulo 5.

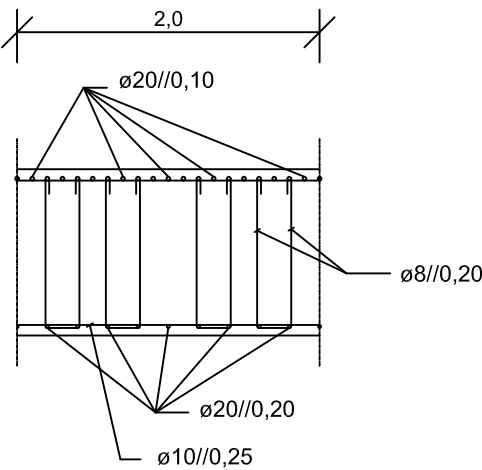
Escala 1:100 	Betão C30/37 Aço A500 c = 5 cm
---	---

Aço A500
c = 5 cm

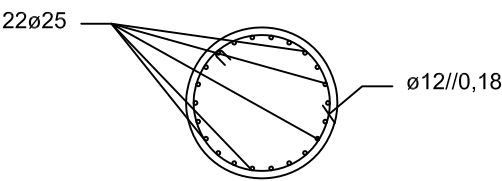
Secção 2A - km 1+170

Cortes

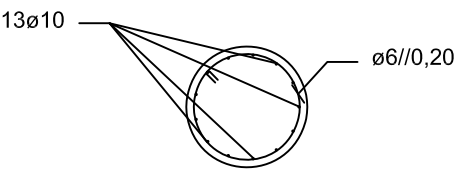
Corte A-A'



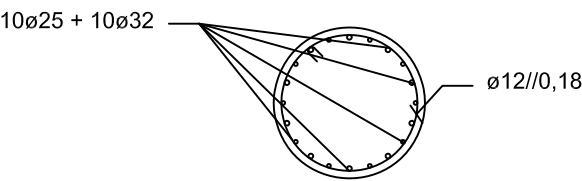
Corte B-B'

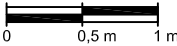


Corte C-C'



Corte D-D'



Escala 1:50 	Betão C30/37 Aço A500 c = 5 cm
--	---