

**Projeto de cortinas de contenção ancoradas -
Efeito das características geotécnicas e
geométricas no dimensionamento**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana

Autor

Alexandre Emanuel dos Santos Jorge

Orientador

Prof. Doutor Carlos Manuel da Cruz Moreira

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os que me acompanharam ao longo desta caminhada.

Ao Zé pelo incentivo, ao Luís pelos cafés, ao Gil pelas palavras sábias, ao Fernando pelo exemplo de força e coragem, ao Hugo pela alegria, ao Ivo porque será sempre o Ivo e a todos os outros amigos que não menciono mas que estão igualmente presentes. Obrigado!

Obrigado à Andreia, minha namorada, pela insistência, pela paciência e às vezes pela falta dela.

Agradeço ao meu orientador, Doutor Carlos Moreira, pela disponibilidade que sempre ofereceu para a realização deste trabalho e pela participação ativa que manifestou sob a forma de sugestões e críticas, esclarecimento de dúvidas e cedência de referências bibliográficas.

Agradeço à minha família, pilar essencial em todo o meu percurso e suporte capaz de sustentar todos os impulsos resultantes das situações mais adversas, principalmente aos meus avós, à minha madrinha, aos meus irmãos e sobretudo à minha Mãe, pessoa mais íntegra, forte e lutadora que conheço.

Obrigado a alguém que já cá não está, mas que cá estará sempre.

RESUMO

Neste trabalho pretende-se estudar a influência das características geotécnicas e geométricas no dimensionamento de cortinas de contenção ancoradas.

Para a concretização destes objetivos escolheu-se uma parede tipo Berlim definitivo ancorada, tendo-se abordado o seu processo construtivo e constatado a necessidade de o seguir com rigor. Concluído isto, fez-se uma introdução ao programa de elementos finitos, Phase2, da Rocsciense.

A parte mais importante da presente dissertação visa perceber o funcionamento deste tipo de construção e o que mais influencia o seu comportamento. Após se ter admitido um modelo, as características do solo a utilizar, e compreendido de que forma poderia ser utilizado o *software* mencionado e como proceder à modelação que mais se aproxima de uma situação real, simulou-se o caso de estudo considerado e efetuou-se a sua análise do ponto de vista de deslocamentos horizontais na cortina. Esta primeira análise resultou em deslocamentos que, comparados com os dos casos de estudo referidos na bibliografia, se consideram aceitáveis.

Após análise do estudo base, que será designado ao longo do trabalho por estudo base 1 (E1), procedeu-se a uma análise paramétrica, ou seja, realizaram-se vários estudos, onde para cada um deles se fez variar um parâmetro de cada vez. Esses parâmetros são propriedades geotécnicas do solo, características geométricas da parede e características dos elementos de ancoragem. No estudo 2, também designado por E2, utiliza-se uma parede moldada em substituição do muro de Berlim definitivo utilizado no E1.

Estes estudos paramétricos vão desde o Estudo 2 (E2) ao Estudo 15 (E15) e todos eles são apresentados em comparação com o estudo base.

Por fim, conclui-se que o comportamento entre o muro de Berlim definitivo e a parede moldada são diferentes, sobretudo na distribuição de deslocamentos ao longo da cortina, sendo esta diferença provocada essencialmente pelas diferenças no processo construtivo. Quanto à alteração dos parâmetros em estudo os que mais afetam o comportamento do muro são a variação do módulo de deformabilidade do solo, a presença de um estrato rijo ao nível do fundo da escavação, a variação da inclinação das ancoragens e a força de pré-esforço aplicada.

PALAVRAS-CHAVE: Muro de Berlim, processo construtivo, cortina flexível, deslocamentos horizontais, ancoragens.

ABSTRACT

This work aims to study the influence of geotechnical and geometrical characteristics in the design of containment curtains anchored.

For the pursuit of these goals it was chosen a definitive Berlin type wall anchor, and it was approached its construction process and found the need to follow rigorously. That done, there was an introduction to the finite element program Phase2, the Rocscience.

The most important part of this work attempts to understand the functioning of this type of construction and what most influences its behavior. Once the model selected, after define the soil characteristics in order to understand how the mentioned software could be used and how to make the modeling closest to a real situation, it was simulated the present case study, which results were analyzed in terms of horizontal displacements in the curtain. This first analysis acknowledge displacements that, the comparison made with the case studies listed in the bibliography, are considered acceptable.

After analyzing the basic study, which will be designated throughout the work based by study 1 (E1), it was developed a parametric analysis, i.e., several studies on which of them was varied one parameter at a time. These parameters are geotechnical soil properties, geometric characteristics Wall and anchoring elements characteristics. In study 2, also called E2, uses a diaphragm wall instead of the Berlin wall type used in E1.

These parametric studies go from Study 2 (E2) to study 15 (E15) and they are all represented in comparison with the base study.

Finally, it is concluded that the behavior of the final Berlin wall and the diaphragm wall is different, mostly in the distribution of displacements along the curtain essentially caused by differences in the construction process. Evaluated parameters that most affect the behavior of the wall are a variation of the deformability modulus of the soil, the presence of a hard layer level of the excavation, the variation of the inclination of the anchors and their prestressing force applied.

KEYWORDS: Berlin Wall, constructive process, flexible curtain, horizontal displacements, anchors.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE QUADROS	xiv
SIMBOLOGIA	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento geral.....	1
1.2. Objetivos da dissertação.....	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
2. ESTRUTURAS DE SUPORTE.....	5
2.1. Paredes de contenção tipo Berlim definitivo.....	6
2.1.1. Processo construtivo	6
2.1.2. Controlo e monitorização.....	13
2.2. Paredes Moldadas.....	14
2.2.1. Processo construtivo	15
3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	17
3.1. Introdução.....	17
3.2. Descrição do programa Phase2	17
3.2.1. Módulos do Programa.....	19
4. CARACTERIZAÇÃO DO MODELO ADOTADO.....	23
4.1. Apresentação do modelo	23
4.1.1. Definição da geometria	23
5. DESCRIÇÃO E MODELAÇÃO DO CASO DE ESTUDO BASE (E1).....	25
5.1. Introdução.....	25
5.2. Características e propriedades do solo e da estrutura de contenção.....	25
5.3. Faseamento construtivo do modelo.....	27
5.4. Características a analisar para o estudo E1	28
5.4.1. Diagramas de deslocamentos horizontais	28

5.5. Observações	28
5.7. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do estudo E1	30
5.8. Conclusões E1.....	34
6. ANÁLISE PARAMÉTRICA	35
6.1. Introdução	35
6.2. Descrição dos estudos realizados.....	35
6.4. Estudo 2	37
6.4.1. Caracterização do E2.....	37
6.4.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E2	37
6.5. Estudo 3 e 4.....	40
6.5.1. Caracterização do E3 e E4.....	40
6.5.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E3 e E4	40
6.6. Estudo 5 e 6.....	41
6.6.1. Caracterização do E5 e E6.....	41
6.6.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E5 e E6	41
6.7. Estudo 7 e 8.....	42
6.7.1. Caracterização do E7 e E8.....	42
6.7.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E7 e E8	42
6.8. Estudo 9	43
6.8.1. Caracterização do E9.....	43
6.8.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E9	43
6.9. Estudo 10 e 11.....	45
6.9.1. Caracterização do E10 e E11.....	45
6.9.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E10 e E11	45
6.11. Estudo 12 e 13.....	46
6.11.1. Caracterização do E12 e E13.....	46
6.11.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E12 e E13	46
6.12. Estudo 14 e 15.....	47
6.12.1. Caracterização do E14 e E15.....	47
6.12.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E14 e E15	47
7. CONCLUSÕES E ORIENTAÇÕES PARA PROGRESSO FUTURO	49
7.1. Conclusões gerais	49

7.2. Conclusões finais.....	50
7.3. Orientações para desenvolvimentos futuros.....	51
8. Bibliografia.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Perfis metálicos cravados no terreno (Tecgeo, 09/10/2013)	6
Figura 2.2 - Camada de areia na base da viga de coroamento (Santos, João, 2011)	7
Figura 2.3 - Pormenor do perfil embutido na viga de coroamento (Santos, João, 2011)	7
Figura 2.4 - Banquetas entre painéis primários (Brito, 2001).....	8
Figura 2.5 - Tubo de PVC inserido no painel (Santos, João, 2011).....	8
Figura 2.6 - Pormenor da armadura de espera (Santos, João, 2011).....	8
Figura 2.7 - Cofragem dos painéis com recurso a cofragem metálica (à esquerda) ou de madeira (à direita) (Brito, 2001)	9
Figura 2.8 - Máquina de furação para abertura do furo da ancoragem (Georumo, 9/10/2013)	10
Figura 2.9 - Colocação dos cabos de ancoragem e bainhas de injeção (Oliveira, Inês, 2012)	10
Figura 2.10 - Injeção primária concluída (Oliveira, Inês, 2012).....	11
Figura 2.11 - Aplicação do macaco hidráulico para aplicação do pré-esforço à esquerda e pormenor da cabeça de ancoragem com as cunhas à direita (Santos, João, 2011).	11
Figura 2.12 - Armadura da sapata (Santos, João, 2011)	12
Figura 2.13 - Célula de carga em ancoragem (Oliveira, Inês, 2012)	13
Figura 2.14 – Pormenor das paredes tipo Berlim definitivo	13
Figura 2.15 – Pormenor do faseamento construtivo das paredes tipo Berlim definitivo.....	14
Figura 2.16 - Fases de execução de uma parede moldada: a),b) escavação; c) colocação da armadura e tubos de junta; d) betonagem; e) início da escavação do painel seguinte (Moreira, Carlos, 2012).....	15
Figura 3.1 - Exemplos de modelos de análise: a)Escavação para mina a céu aberto; b)túnel; c)ensecadeiras; d)estabilização de taludes; e)muros de gravidade de contenção de terras; f)estruturas de terras estabilizadas mecanicamente; (Rocscience, 2013)	18
Figura 3.2 - Interação entre os módulos do Phase2 (Rocscience, 2013)	19
Figura 3.3 – Funcionalidades Phase2 Model	20
Figura 3.4 – Secções Project Settings	20
Figura 4.1 - Discretização do modelo com elementos isoparamétricos triangulares de seis nós.	24
Figura 5.1 – Apresentação caso de estudo E1.....	25
Figura 5.2 – Exemplo para interpretação de resultados	29
Figura 5.3 - Mapa de deslocamentos horizontais, <i>Absolute Horizontal displacements</i> (Rocscience, 2013).....	30
Figura 5.4 – Deslocamentos ao longo do 1º nível de escavação.....	31
Figura 5.5 – Deslocamentos ao longo do 2º nível de escavação.....	31
Figura 5.6 – Deslocamentos ao longo do 3º nível de escavação.....	32
Figura 5.7 - Deslocamentos no final da escavação do 4º nível.....	32
Figura 5.8 - Deslocamentos após aplicação do pré-esforço em cada nível de escavação.....	33
Figura 6.1 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 1º nível de escavação	38
Figura 6.2 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 2º nível de escavação	38
Figura 6.3 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 3º nível de escavação	39

Figura 6.4 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação	39
Figura 6.5 – Deformada final Muro Berlim (E1)	40
Figura 6.6 – Deformada final Parede Moldada (E2)	40
Figura 6.7 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação no E3 e E4.....	41
Figura 6.8 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação no E5 e E6.....	42
Figura 6.9 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $E_{\text{solo}}=75\text{Mpa}$	43
Figura 6.10 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $E_{\text{solo}}=25\text{Mpa}$	43
Figura 6.11 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação	44
Figura 6.12 – Deformada final E1	44
Figura 6.13 – Deformada final E9	44
Figura 6.14 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $e_p=0,50\text{m}$	45
Figura 6.15 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $e_p=0,25\text{m}$	45
Figura 6.16 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $\alpha_{\text{Anc}}=40^\circ$	46
Figura 6.17 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $\alpha_{\text{Anc}}=10^\circ$	46
Figura 6.18 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $F_{\text{anc}}=500\text{kN}$	47
Figura 6.19 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $F_{\text{anc}}=200\text{kN}$	47

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 5.1 Propriedades do solo	25
Quadro 5.2 - Propriedades da parede	26
Quadro 5.3 - Características das ancoragens	26
Quadro 5.4 - Características dos perfis	26
Quadro 5.5 - Descrição das fases construtivas.....	27
Quadro 5.6 - Descrição das cotas de projeto.....	28
Quadro 6.1 - Quadro resumo das análises paramétricas realizadas	36
Quadro 6.2 – Deslocamentos ao longo da cortina para E1 e E2.....	39
Quadro 6.3 – Resumo da variação e deslocamentos máximos para cada caso de estudo após conclusão dos trabalhos	48

SIMBOLOGIA

γ_{solo} - Peso volúmico do solo

$\gamma_{\text{betão}}$ - Peso volúmico do betão armado

E_{solo} - Módulo de elasticidade do solo

$E_{\text{betão}}$ - Módulo de elasticidade do betão

ν - Coeficiente de Poisson

c - Coesão do solo

ϕ' - Ângulo de atrito do solo

e_p - Espessura da parede de contenção

α_{anc} - Inclinação da ancoragem

L_{anc} - Comprimento ancoragem

F_{anc} - Força de pré-esforço na ancoragem

ABREVIATURAS

E1 – Estudo base 1

E2 – Estudo paramétrico 2 – Alteração do tipo de estrutura utilizado.

E3 – Estudo paramétrico 3 - Aumento do ângulo de atrito do solo.

E4 – Estudo paramétrico 4 – Diminuição do ângulo de atrito do solo.

E5 – Estudo paramétrico 5 – Aumento da coesão do solo.

E6 – Estudo paramétrico 6 – Alteração do tipo de solo.

E7 – Estudo paramétrico 7 – Aumento do módulo de deformabilidade do solo.

E8 – Estudo paramétrico 8 – Diminuição do módulo de deformabilidade do solo.

E9 – Estudo paramétrico 9 – Consideração de um estrato rijo no fundo da escavação.

E10 – Estudo paramétrico 10 – Aumento da espessura da parede.

E11 – Estudo paramétrico 11 – Diminuição da espessura da parede.

E12 – Estudo paramétrico 12 – Aumento da inclinação da ancoragem.

E13 – Estudo paramétrico 13 – Diminuição da inclinação da ancoragem.

E14 – Estudo paramétrico 14 – Aumento da força de pré-esforço.

E15 – Estudo paramétrico 15 – Diminuição da força de pré-esforço.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

A realização de qualquer obra geotécnica, assim como de qualquer outra obra de engenharia, assenta essencialmente em três fases de extrema importância que não podem nunca ser descuidadas ou realizadas de forma independente. São elas o estudo prévio, a fase de construção e o controlo e monitorização da obra ao longo da sua vida útil. A primeira fase incide essencialmente no conhecimento profundo das características geotécnicas do terreno, análise do meio envolvente, presença de restrições construtivas, escolha da solução a utilizar, influência paisagística e impacto ambiental, etc.

A segunda fase, a de construção, deverá ser executada tendo em conta todos os condicionalismos detetados anteriormente, executando a obra de forma responsável, seguindo da melhor forma o método construtivo inerente à técnica utilizada, evitando facilitismos que por vezes podem ser fatais, recorrendo a equipamentos e profissionais competentes para levar a obra a cabo respeitando todas as normas de segurança.

A terceira fase, que embora descrita como terceira deverá ser tida em conta assim que se dê início aos trabalhos, consiste em monitorizar o andamento dos mesmos e em averiguar se o comportamento da estrutura está de acordo com o previsto. Este controlo deve fazer-se de forma periódica ao longo da vida útil do projeto.

No âmbito da realização desta dissertação, procura-se compreender a interação entre o solo e as estruturas flexíveis de contenção ancoradas, estudar a influência que as características geotécnicas e geométricas têm no seu dimensionamento e de que forma estas poderão influenciar o comportamento global da estrutura. Com esse objetivo foi feita a modelação de um Muro de Berlim definitivo, com recurso à utilização do software Phase2 da Rocscience.

A tecnologia construtiva deste tipo de cortina flexível caracteriza-se pela execução alternada de painéis ancorados de betão armado, de cima para baixo, à medida que a escavação avança. Por sua vez, a técnica em questão tira partido do faseamento construtivo para minimizar deslocamentos na parede e nos maciços de solo adjacentes. Nesse sentido, torna-se bastante importante o cumprimento das orientações de projeto e do faseamento construtivo.

No que diz respeito à utilização desta tecnologia construtiva, constatou-se que existem relativamente poucos elementos bibliográficos envolvendo análise de casos de estudo, quer sejam eles reais ou académicos, e ainda menos simulações com recurso ao Phase2.

1.2. Objetivos da dissertação

A presente dissertação visa dois objectivos principais:

1. Analisar o comportamento da cortina flexível em estudo;
2. Estudar a influência que as características geotécnicas e geométricas têm no comportamento das estruturas flexíveis fazendo variar os seguintes parâmetros:
 - I. Ângulo de atrito do solo (ϕ);
 - II. Coesão do solo (c);
 - III. Módulo de deformabilidade do solo (E_{solo});
 - IV. Presença de um estrato rijo no fundo da escavação;
 - V. Espessura da cortina (e_p);
 - VI. Inclinação das ancoragens (α_{anc});
 - VII. Pré-esforço nas ancoragens (F_{anc}).

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação é dividida em 7 capítulos, estruturando-se da seguinte forma:

No presente capítulo (Introdução), introduz-se o tema da dissertação, apresentam-se os objetivos e a metodologia do trabalho e ainda a estrutura da mesma.

No capítulo 2 (Estruturas de suporte), faz-se uma referência geral ao tipo de estruturas de suporte existentes, à sua forma de funcionamento e aos fatores de seleção da alternativa mais adequada. Neste capítulo dá-se especial atenção aos muros de Berlim definitivos também referidos como Munique, uma vez que se trata da solução a estudar, descrevendo de forma breve todas as fases de construção. São ainda referidas as principais características das paredes moldadas e mencionadas as fases do processo construtivo.

No capítulo 3 (Modelo de elementos finitos), numa primeira parte explica-se a importância da utilização de um modelo numérico baseado em elementos finitos e em que situações pode e deve ser utilizado. Para terminar resumem-se as principais funcionalidades do Phase2 tais como as integrantes dos módulos *Model*, *Compute* e *Interpret*.

Em seguida, no capítulo 4 (Caracterização do modelo), faz-se a apresentação do modelo a estudar, o tipo de discretização utilizada, o tipo de malha (*Mesh type*), o fator de gradação (*Gradation factor*) e as características dos limites exteriores, bem como toda a definição da geometria da cortina, abordando a forma como se introduziram todos os elementos no programa e as considerações tidas em conta para uma simulação o mais próxima possível do comportamento real.

No capítulo 5 (Descrição e modelação do caso de estudo base E1), é feita uma introdução ao estudo base, uma vez que se trata do estudo que servirá de base de comparação com todos os outros, são descritas as propriedades dos solos e da estrutura de contenção, é detalhado o processo construtivo seguido e são apresentadas algumas considerações tidas em conta e por fim expõem-se os resultados da modelação, fazendo-se a sua interpretação e tirando-se algumas conclusões.

O capítulo 6 (Análise paramétrica) incide sobre a simulação de vários casos de estudo em que, em cada um deles, se alterou um dos parâmetros mencionados nos objetivos desta dissertação. Foram apresentados os resultados de cada modelação e foi feita a sua interpretação tendo por base a comparação com o estudo base E1.

No Capítulo 7 (Conclusão e desenvolvimentos futuros) apresentam-se as principais conclusões a retirar dos estudos efetuados e, para terminar, indicam-se algumas orientações passíveis de melhor análise no futuro e alguns temas a desenvolver no seguimento desta dissertação.

2. ESTRUTURAS DE SUPORTE

Sempre que exista necessidade de suporte/contenção de terras poderá recorrer-se a diversas soluções. De forma simplista, poderemos fazer a separação entre estruturas de suporte rígidas, como os muros de suporte por gravidade, onde a sua resistência é mobilizada através da sua massa, e estruturas de suporte flexíveis, onde o seu funcionamento depende sobretudo da sua resistência à flexão.

No que respeita às estruturas de suporte flexíveis, existindo uma panóplia bastante diversificada de soluções, terão de ser ponderados de forma pormenorizada vários aspetos, não só do ponto de vista técnico como também de uma análise de custos e duração pretendida da solução, sendo que algumas soluções poderão ser de carácter definitivo ou provisório.

Em “Estruturas Flexíveis de Contenção Periférica” (Moreira, Carlos, 2012), enumeram-se diversos fatores a ter em conta na seleção da alternativa mais adequada a cada caso particular:

1. Características intrínsecas dos terrenos;
2. Condições hidrogeológicas e posição do lençol de água;
3. Espaço disponível para implantação da estrutura;
4. Condições das edificações e outros dispositivos urbanos adjacentes;
5. Carácter provisório ou definitivo do sistema de contenção;
6. Integração ou não do paramento na restante estrutura a edificar;
7. Possibilidade de execução de ancoragens nos terrenos vizinhos;
8. Custos de execução e manutenção do sistema, etc.

De entre as várias estruturas de suporte flexíveis, as mais comuns são:

- Cortinas de estacas prancha;
- Paredes tipo Berlim provisórias;
- Paredes tipo Berlim definitivas;
- Paredes Moldadas (ou Diafragma);
- Cortinas de estacas de betão;

Em cada solução, de forma a dar resposta às solicitações do terreno e/ou aumentar a resistência à flexão da estrutura flexível, poderão introduzir-se elementos capazes de transmitir ao terreno um esforço de tração que lhe seja aplicado. Esses elementos são designados por ancoragens.

No capítulo seguinte, abordar-se-á de forma sucinta apenas as paredes de contenção tipo Berlim definitivo e as Paredes Moldadas, sendo feita no capítulo 6 uma análise e uma comparação dos deslocamentos horizontais da parede entre estes dois tipos de estruturas.

2.1. Paredes de contenção tipo Berlim definitivo

As paredes de contenção tipo Berlim definitivo (Muros de Munique) são estruturas cujo objetivo principal é sustentar grandes volumes de terra, impedindo o seu colapso desde o início da escavação, e, no caso de a sua aplicação ser feita em meio urbano, garantir de forma eficaz a segurança dos edifícios existentes na sua periferia. Esta solução construtiva é conseguida pela conjugação de perfis metálicos colocados na vertical, normalmente da série “H” ou “I”, espaçados com uma distância variável em função da altura do muro e preenchidos entre si por painéis de betão armado, reforçados pontualmente com ancoragens.

2.1.1. Processo construtivo

2.1.1.1. Trabalhos preparatórios

Deve começar-se pelo reconhecimento do local de implantação, escavando em seguida uma profundidade compreendida entre 0,60m e 1,00m em toda a extensão do muro para enchimento de uma viga de coroamento e deve proceder-se de seguida à marcação das posições corretas dos perfis.

2.1.1.2. Introdução dos perfis metálicos

Prosseguem os trabalhos com a perfuração do terreno para introdução dos perfis, normalmente espaçados de 1,5 a 3m, conforme o tipo de terreno e condições do nível freático. Uma vez colocados, os perfis são selados (encastrados) na sua base, até à cota do fundo da escavação pretendida.



Figura 2.1 - Perfis metálicos cravados no terreno (Tecgeo, 09/10/2013)

2.1.1.3. Execução da viga de coroamento

Seguidamente, faz-se a viga de coroamento, com o objetivo de solidarizar todos os perfis, permitindo que estes respondam em conjunto às solicitações causadas pelos impulsos do terreno e cargas aplicadas.



Figura 2.2 - Camada de areia na base da viga de coroamento (Santos, João, 2011)



Figura 2.3 - Pormenor do perfil embutido na viga de coroamento (Santos, João, 2011)

2.1.1.4. Painéis primários

Após a conclusão da viga de coroamento, dá-se início à escavação dos painéis primários, até atingir a cota do primeiro nível de escavação. Depois, são escavados os painéis secundários que serão intercalados com os primeiros. Isto para todos os níveis de escavação até se chegar à cota final.

2.1.1.5. Escavação

A escavação dos primeiros painéis (primários) deve ser feita entre os perfis metálicos, mais cerca de 0,50m para cada lado destes, de modo a garantir espaço para colocação da armadura de espera para receber posteriormente o painel secundário justaposto a este. Dos lados esquerdo e direito da escavação ficarão, portanto, duas banquetas de terreno por escavar que servirão como contraforte de solo e garantirão a estabilidade da escavação.

A escavação, numa primeira fase, pode ser feita por uma retroescavadora, podendo ser munida com ripper ou martelo hidráulico, conforme o tipo de terreno. Depois, o que será o tardo da parede será regularizado pelos operários através de ferramentas mais leves e colocada uma manta geotêxtil drenante.



Figura 2.4 - Banquetas entre painéis primários (Brito, 2001)

2.1.1.6. Colocação da armadura

Antes da colocação da armadura, é aconselhável deixar uma camada de areia na base do painel com a intenção de garantir a não infiltração do betão no terreno e a existência de espaço para colocação das armaduras verticais de espera que irão ser utilizadas para amarração do painel inferior. Após a betonagem, esta camada deverá ser lavada com jato de água a fim de ser removida. Concluído este trabalho preparatório, a armadura, geralmente já armada em painéis no estaleiro ou em obra, é colocada pelos operários com o auxílio de meios elevatórios, sendo o primeiro painel a ser colocado o posterior (do lado do terreno) e só depois o anterior (do lado da cofragem). Sendo estes os processos que antecedem a cofragem e betonagem, é necessário ter em conta a colocação de negativos para furação do terreno e colocação dos cabos de pré-esforço (normalmente tubos de PVC, colocados com a inclinação prevista da ancoragem), assim como o reforço das armaduras em torno dessa zona para resistência ao punçoamento e flexão.



Figura 2.5 - Tubo de PVC inserido no painel (Santos, João, 2011)



Figura 2.6 - Pormenor da armadura de espera (Santos, João, 2011)

2.1.1.7. Cofragem e betonagem

Antes da betonagem, deverão ser cofrados os painéis, podendo este processo ser feito por painéis metálicos, de madeira ou de contraplacado. Interessa, sim, garantir a estanqueidade do elemento a betonar, o recobrimento da armadura nas faces posterior e anterior e a sua estabilidade e resistência aos impulsos provocados pela queda do betão. Estes aspetos são assegurados escorando a cofragem com escoras que se apoiam no terreno ou em maciços criados/colocados no solo para o efeito.

A betonagem é feita pela parte superior do painel, onde foi deixado na cofragem uma abertura para o efeito. Caso esta seja realizada com recurso a camião bomba, deverá aproximar-se a mangueira do fundo do painel para redução dos impulsos do betão e segregação deste.

A descofragem poderá ser feita após 48 horas, ou antes, caso tenham sido utilizados aceleradores de presa.



Figura 2.7 - Cofragem dos painéis com recurso a cofragem metálica (à esquerda) ou de madeira (à direita) (Brito, 2001)

2.1.1.8. Execução do furo para ancoragens

Após a descofragem do painel, pode iniciar-se a furação do terreno, através do negativo deixado no betão, para colocação da ancoragem.

A abertura do furo pode ser feita com recurso a diversos equipamentos, como, por exemplo, furação por roto-percussão com varas e bit e com injeção de água, furação por roto-percussão com martelo de fundo de furo e com recurso a ar-comprimido ou furação com recurso a trado contínuo. Este último método é o mais aconselhado em solo coesivos e com o nível freático baixo e o mais utilizado associado a paredes tipo Munique. O trado funciona como um “parafuso sem fim” e por esse facto vai retirando o solo de dentro do furo escavado à medida que sustém as paredes do mesmo. Para comprimentos elevados existe a possibilidade de acoplar vários tramos de trado e assim chegar à profundidade pretendida.



Figura 2.8 - Máquina de furação para abertura do furo da ancoragem (Georumo, 9/10/2013)

2.1.1.9. Colocação dos cabos de pré-esforço no furo

Estando a abertura do furo concluída, poderão introduzir-se os cabos de ancoragem. Cada cabo de aço flexível é constituído por vários cordões de alta resistência e baixa, ou muito baixa relaxação, normalmente protegidos por uma manga de PVC em todo o seu comprimento livre, e desprotegidos na zona da selagem (bolbo de selagem), de modo a que haja aderência entre os varões e o terreno envolvente.

Os cabos são envolvidos, próximo da extremidade, por uma ponteira cônica que facilita a sua progressão no furo e a estabilidade das paredes. Junto dos cabos é colocado um tubo de PVC (tubo secundário), munido de válvulas anti-retorno (manchetes) situadas na zona correspondente ao bolbo de selagem, “espaçadas aproximadamente de 1 a 1,5m” (Brito, 2001) utilizadas para injeção da calda de reinjeção e que se abrem sob pressão, permitindo o preenchimento da zona envolvente, bem como fissuras ou falhas existentes no maciço.

Paralelamente aos cabos são colocados outros tubos de PVC (tubos primários), de menor diâmetro, utilizados para a injeção primária que servirá para preenchimento do furo e garantir o recobrimento dos cabos.



Figura 2.9 - Colocação dos cabos de ancoragem e bainhas de injeção (Oliveira, Inês, 2012)

2.1.1.10. Selagem da ancoragem e criação do bolbo de selagem

Colocados os cabos e tubos no furo, começa-se por fazer a selagem primária, deixando escoar por gravidade através dos tubos primários a calda de cimento até aparecer à “boca” do furo.

Passadas cerca de 24 horas, ou assim que a calda atinja a presa necessária, poderá proceder-se à reinjeção, ou injeção secundária, para formação do bolbo de selagem. Esse processo é feito injetando a calda sobre pressão através das válvulas anti-retorno, podendo ser um processo único ou feito em várias fases.



Figura 2.10 - Injeção primária concluída (Oliveira, Inês, 2012).

2.1.1.11. Execução do pré-esforço

Passados 3 a 7 dias após a conclusão do bolbo de selagem, e tendo em conta a utilização ou não de aceleradores de presa, poderá fazer-se o corte das bainhas de pré-esforço e tubos de injeção, e a colocação da placa metálica e da cabeça de ancoragem. Feito isto, poderá aplicar-se o pré-esforço às ancoragens.

Este pré-esforço consegue-se recorrendo a macacos hidráulicos que tracionam os cabos até à tensão pretendida. Para assegurar que fica instalada a tensão necessária, são colocadas cunhas metálicas que travam os cabos.



Figura 2.11 - Aplicação do macaco hidráulico para aplicação do pré-esforço à esquerda e pormenor da cabeça de ancoragem com as cunhas à direita (Santos, João, 2011).

2.1.1.12. Execução dos painéis secundários

Concluídos os painéis primários e aplicado o pré-esforço, poderão executar-se os painéis secundários, sendo os seus processos construtivos em tudo semelhantes.

Deverá, contudo, ter-se em atenção a amarração das suas armaduras às armaduras de espera, deixadas no painel construído em primeiro lugar, bem como deixar armaduras verticais de espera para o painel do nível inferior.

2.1.1.13. Execução dos painéis dos restantes níveis

Concluído o primeiro nível de escavação, repete-se o processo construtivo para os níveis seguintes, respeitando sempre a sequência de trabalhos descrita.

2.1.1.14. Execução da sapata de fundação

Concluído o último nível de escavação, executa-se a fundação da parede. A sapata, normalmente excêntrica, uma vez que na maior parte das vezes não é possível escavar para o tardo do muro, irá suportar todo o peso próprio da parede e todas as cargas verticais provenientes dos elementos estruturais que possam vir a ser ligados à parede (lajes, fachadas, vigas), caso se trate de uma estrutura definitiva integrante de uma construção.

A sapata é construída como uma sapata superficial corrente. Ou seja, faz-se a escavação, aplica-se o betão de limpeza, coloca-se a armadura procedendo-se ao seu empalme nas armaduras de espera dos painéis superiores, faz-se a cofragem contra o terreno, faz-se a betonagem e, após a presa, faz-se a descofragem.

No caso de não ser possível executar fundação superficial, deverá executar-se uma fundação profunda, sendo a sapata da parede o maciço de encabeçamento das estacas.



Figura 2.12 - Armadura da sapata (Santos, João, 2011)

2.1.2. Controlo e monitorização

Tanto na fase de construção como após a conclusão da parede, é necessário monitorizar diversos parâmetros de forma a avaliar o comportamento do muro e das ancoragens. Recorre-se para isso a inclinómetros, marcas e alvos topográficos cuidadosamente colocados para medir deslocamentos horizontais e verticais da parede de contenção, e células de carga nas ancoragens, que permitem medir os seus deslocamentos e a perda de tensão dos cabos.

Monitorizar as ancoragens permite ir verificando o seu funcionamento e proceder à sua substituição, caso haja sinais de mau funcionamento ou alterações no comportamento previsto do solo.



Figura 2.13 - Célula de carga em ancoragem (Oliveira, Inês, 2012)

Como forma de resumo do processo construtivo descrito, apresenta-se os esquemas da Figura 2.14 e Figura 2.15.

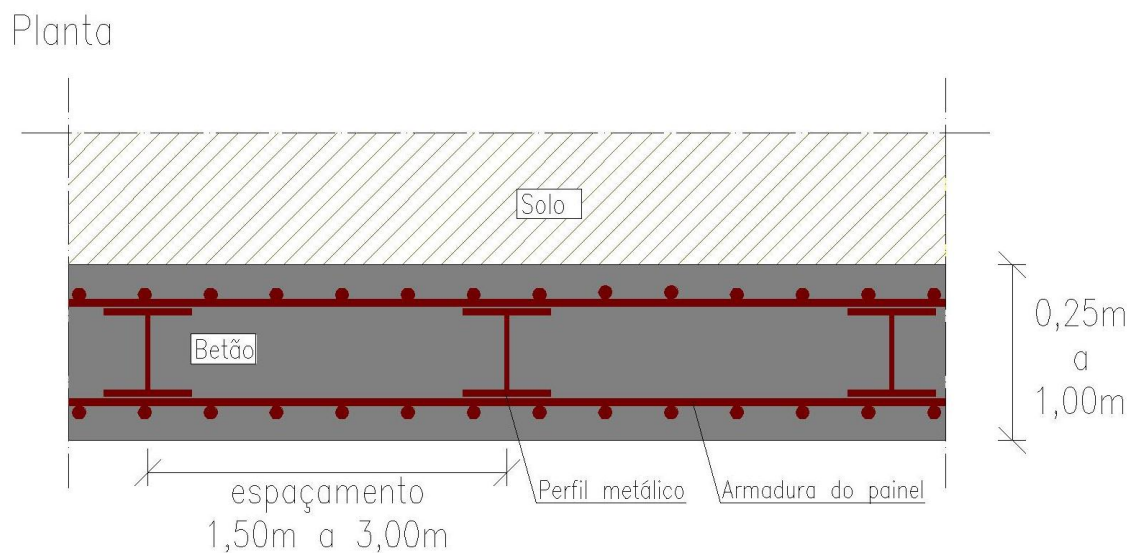


Figura 2.14 – Pormenor das paredes tipo Berlim definitivo



Figura 2.15 – Pormenor do faseamento construtivo das paredes tipo Berlim definitivo

2.2. Paredes Moldadas

As paredes moldadas são, como já foi referido, elementos de contenção utilizados em solos com fraca coesão e nível freático elevado, construídos com recurso a lamas bentoníticas, que permitem conter as paredes da escavação durante a fase de execução. Estes elementos são executados enterrados, procedendo-se posteriormente à remoção do terreno do interior da contenção. Para garantir a estabilidade das paredes durante a escavação, utilizam-se ancoragens, na maioria das vezes, provisórias.

Este tipo de estrutura de contenção é constituído por painéis com medidas compreendidas entre 0,40 e 1,20m de espessura podendo atingir profundidades superiores a 45m.

Uma vez que o seu método construtivo provoca poucas vibrações e baixa descompressão no terreno, pode ser utilizado muito próximo de construções vizinhas sem provocar deformações nas mesmas.

2.2.1. Processo construtivo

De uma forma geral, a execução de uma parede moldada *in situ* compreende as seguintes etapas:

1. Execuções dos muros-guia;
2. Preparação e controlo das lamas bentoníticas;
3. Escavação dos painéis de parede moldada e simultâneo preenchimento com lama bentonítica até à profundidade de projeto;
4. Colocação de juntas entre painéis;
5. Preparação e colocação da armadura;
6. Betonagem ou enchimento da parede moldada;
7. Recuperação da lama bentonítica no momento da introdução da armadura e durante a colocação do betão na cavidade;
8. Remoção de juntas;
9. Demolição dos muros-guia e saneamento do topo da parede;
10. Execução da viga de coroamento;
11. Escavação no intradorso da parede.

Apresenta-se esquema resumo do processo construtivo descrito na Figura 2.16.

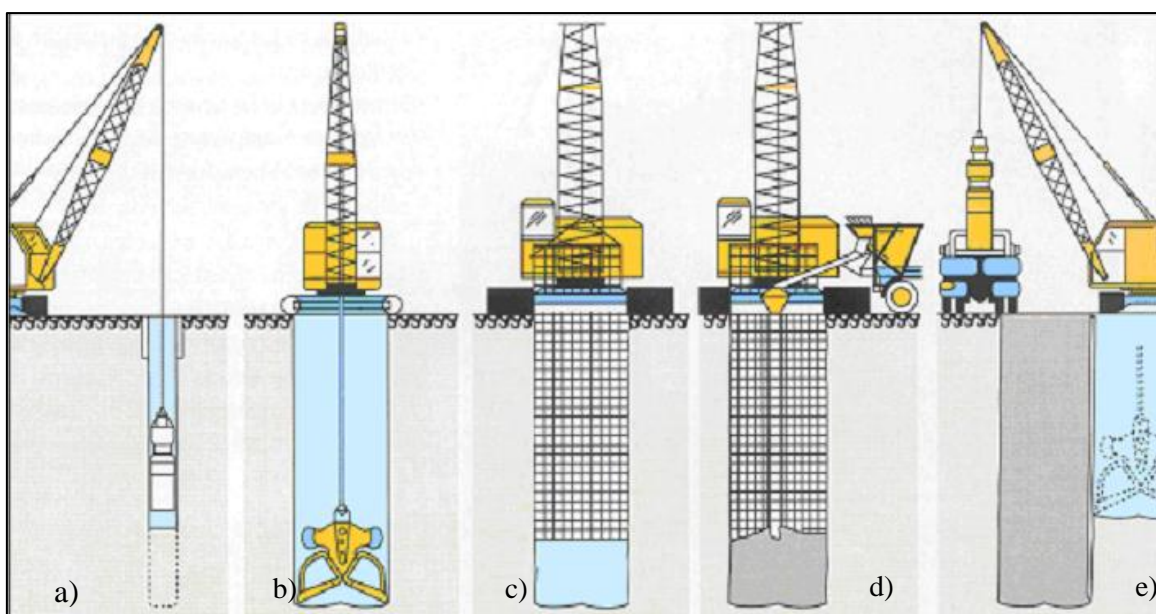


Figura 2.16 - Fases de execução de uma parede moldada: a),b) escavação; c) colocação da armadura e tubos de junta; d) betonagem; e) início da escavação do painel seguinte (Moreira, Carlos, 2012)

3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

3.1. Introdução

O método dos elementos finitos é um método numérico utilizado com recurso a *software* informático que tem como princípio a discretização de um sistema contínuo complexo, regido por leis matemáticas conhecidas.

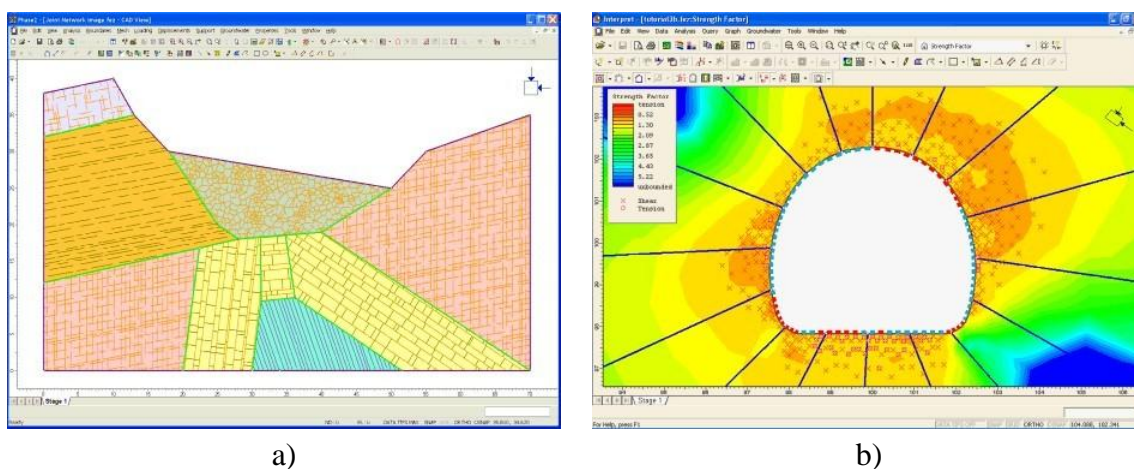
Se utilizarmos o enorme potencial do método dos elementos finitos, é possível avaliar com bastante precisão e de forma bastante rápida a influência de uma determinada propriedade, ou de um conjunto de propriedades ou parâmetros, no comportamento global de uma estrutura durante a sua execução e vida útil. É, por isso, uma ferramenta de grande importância que permite testar e analisar diversas soluções de forma económica e rápida, auxiliar a tomada de decisão sobre a estrutura a utilizar, antever o comportamento da estrutura e respetivas respostas do solo e salvaguardar a influência da mesma nas construções envolventes.

No presente trabalho recorreu-se ao programa de cálculo automático de elementos finitos Phase2 da Rocscience.

3.2. Descrição do programa Phase2

O phase2 é um programa 2D de análise de elementos finitos elasto-plástico, utilizado em escavações subterrâneas ou superficiais, tanto em rocha como em solo. Pode ser utilizado para uma ampla gama de projetos de engenharia tais como estabilidade de taludes, infiltração de águas subterrâneas, análise probabilística, etc.

Podemos facilmente criar e analisar de forma rápida modelos complexos com várias fases. Esses modelos podem ser túneis, aterros, cortinas flexíveis para estabilidade de taludes, enscadeiras, muros de gravidade de contenção de terras, estruturas de terras estabilizadas mecanicamente e muitas mais situações (Figura 3.1).



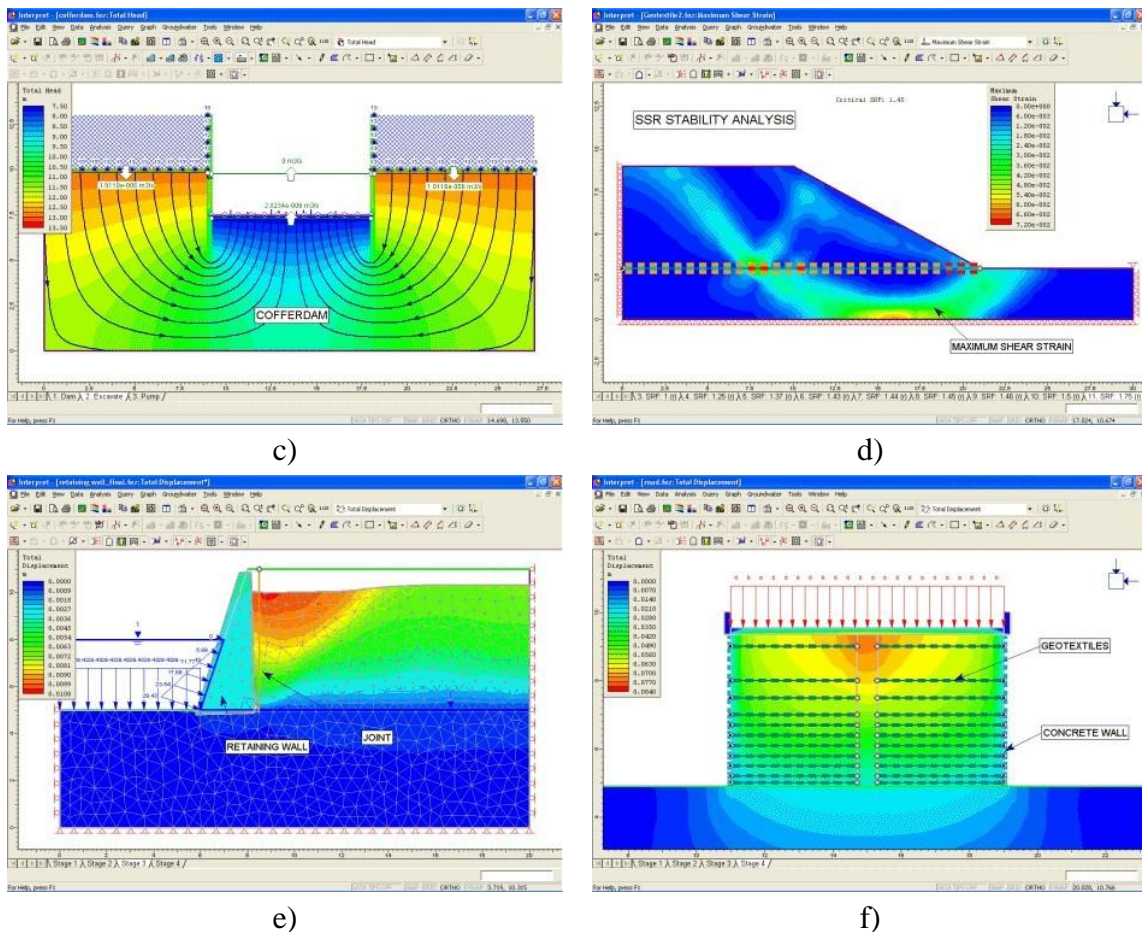


Figura 3.1 - Exemplos de modelos de análise: a)Escavação para mina a céu aberto; b)túnel; c)ensecadeiras; d)estabilização de taludes; e)muros de gravidade de contenção de terras; f)estruturas de terras estabilizadas mecanicamente; (Rocscience, 2013)

O programa Phase2 oferece uma ampla gama de opções de modelação de apoio. Elementos *Liner* (suporte) podem ser aplicados na modelação de betão armado, betão, sistemas de aço, muros de retenção, multi-camadas de revestimento compostas por geotêxteis e muito mais. Estes elementos permitem determinar o fator de segurança das modelações. Uma das características principais do Phase2 é a análise de elementos finitos da estabilidade de taludes usando o método de redução da tensão de corte. Esta opção é totalmente automatizada e pode ser usada com o método de Mohr-Coulomb ou Hoek-Brown para quaisquer parâmetros de força. Facilmente se pode importar/exportar entre Slide e Phase2 modelos de inclinação, permitindo assim uma fácil comparação entre equilíbrio limite e os resultados de elementos finitos.

O Phase2 inclui na análise de elementos finitos a percolação em regime permanente, e, uma vez que esta se encontra incluída no programa, não existe necessidade de recorrer a outros programas para a analisar. Ele determina a pressão dos poros, assim como o fluxo e o gradiente, com base nas definições introduzidas pelo utilizador relativas às condições de contorno e condutividade hidráulica do material em causa. O programa inclui automaticamente os resultados da pressão dos poros na análise de forças. Podemos dizer de

uma forma geral que o Phase2 é um programa de elementos finitos 2D elasto-plástico, que permite calcular as tensões e deslocamentos em torno de aberturas subterrâneas e pode ser utilizado tanto em problemas de mineração como em problemas de engenharia geotécnica e civil, envolvendo:

- Escavações em rocha ou solo;
- Fases de escavações (até 300 fases possíveis);
- Materiais elásticos ou plásticos;
- Múltiplos materiais;
- Suporte *bolt* (tipo parafuso);
- Suporte *liner* (pode ser tipo betão armado, betão, geossintéticos);
- Tipo de campo de forças em que podemos considerar constante ou com ação da gravidade;
- Análise plana ou axisimétrica;
- Linha piezométrica.

Pode-se dizer que o Phase2 é constituído por três módulos, são eles o *Model*, o *Compute* e o *Interpret*, que no capítulo 3.2 serão abordados apenas de forma breve, uma vez que estes já foram descritos de forma pormenorizada em (Pereira, 2011).

3.2.1. Módulos do Programa

3.2.1.1. Model

Este é o módulo utilizado para inserir e editar os limites do modelo e as suas condições, as características do suporte, forças, propriedades dos materiais, geração da malha de elementos finitos entre outros pontos. De uma forma sucinta, o Model(M), Compute(C) e Interpret(I) interagem entre si (Figura 3.2).

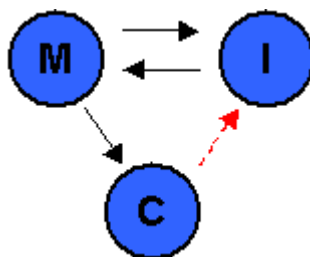


Figura 3.2 - Interação entre os módulos do Phase2 (Rocscience, 2013)

Depois de definido o modelo, terá de se realizar o processamento através do Compute, que guardará o ficheiro num arquivo. Feito isso, poderá analisar-se diversos resultados no *Interpret*.

Na constituição do *Model*, destacam-se essencialmente as funcionalidades ilustradas na (Figura 3.3).

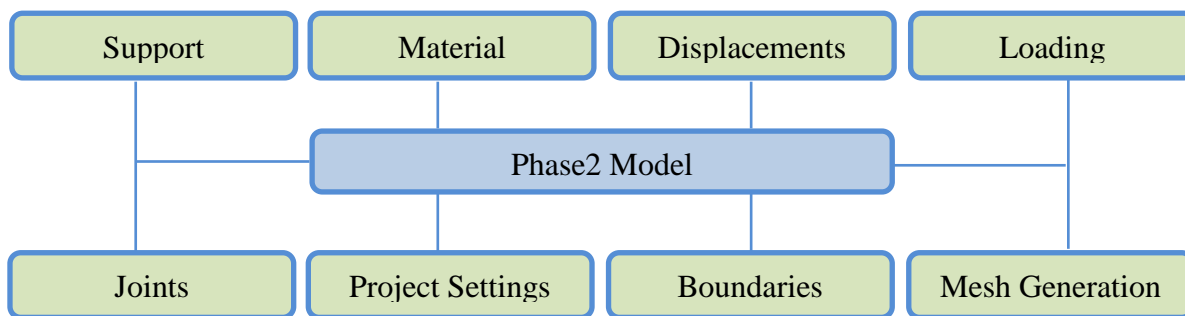


Figura 3.3 – Funcionalidades Phase2 Model

3.2.1.2. Project Settings

O comando *Project Settings* permite ao utilizador configurar a modelação primária e os parâmetros de análise para o Phase2 Model. As configurações do projeto, como o caso do número de fases, tipo de análise, unidades, entre outras, devem ser escolhidas no início da modelação, uma vez que algumas destas configurações condicionam a operação de diversas opções de modelação.

O comando *Project Settings* está organizado segundo as secções ilustradas na Figura 3.4.

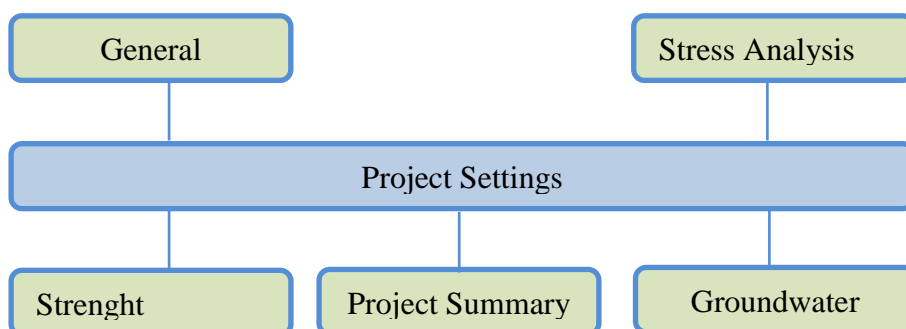


Figura 3.4 – Secções Project Settings

3.2.1.3. General

Nesta opção definem-se o número de fases e o seu nome, o tipo de análise a realizar, a forma de resolução do modelo, ou seja, como o *Compute* resolve a matriz que representa o sistema de equações e as unidades de medição.

3.2.1.4. Stress Analysis

Está relacionado com a forma como é feito o cálculo das iterações, permitindo definir o número máximo de iterações a realizar, bem como o fator de convergência das mesmas.

3.2.1.5. Groundwater

Esta opção permite definir o modo como a pressão da água nos poros é modelada.

3.2.1.6. Strength Reduction

Esta opção permite, de uma maneira geral, executar uma análise usando o método da redução da resistência ao corte (*Shear Strength Reduction*), determinando um fator de redução da resistência de corte para o modelo, sendo esse fator equivalente ao fator de segurança da encosta.

3.2.1.7. Project Summary

Permite definir o título do projeto, informações de análise, comentários, o autor do projeto, etc.

3.2.1.8. Boundaries

Depois de definidas as condições de projecto (*Project Settings*), têm de ser criadas as fronteiras que definem o modelo.

Os tipos de limites que se podem utilizar no Phase2 são:

- *Excavation* – Define a zona a escavar;
- *External* – Define a fronteira exterior do modelo e por consequência delimita o tamanho da malha de elementos finitos;
- *Material* – Define os limites entre os diferentes tipos de materiais existentes;
- *Stage* – Limita os diferentes faseamentos de escavação;
- *Joint* – Representa a junta entre, por exemplo, um elemento de suporte e o terreno ou escavação;
- *Structural interface* – Representa um elemento de apoio que tem uma interface deslizante em ambos os lados do suporte. Conjugada com uma *Joint* e um *Liner* funciona como um elemento de suporte;
- *Piezometric Line* – Define a posição do nível freático ou superfície piezométrica.

3.2.1.9. Mesh Generation

Depois de estarem definidos todos os limites, pode-se gerar a malha de elementos finitos, composta por elementos triangulares ou quadriláteros, e gerada de forma automática.

3.2.1.10. Loading

Esta opção permite definir diferentes tipos de carga num modelo o phase2.

3.2.1.11. Displacements

Classificam-se as condições de apoio do modelo, restringindo ou libertando os deslocamentos segundo cada direcção.

3.2.1.12. Material Properties

Em *Material Properties*, definem-se as propriedades dos solos ou rocha que compõem o modelo. Permite ainda definir o critério de rotura para um material e escolher se o material é elástico ou plástico.

3.2.1.13. Support

Quanto às condições de suporte, as duas principais categorias são as *Bolts* e os *Liners*. Os *Liners* simulam o efeito do betão armado, revestimentos, geogrelhas, geosintéticos e também podem ser compostos por várias camadas de material. As *Bolts* simulam o efeito, por exemplo, de ancoragens, pregagens ou estacas de betão.

3.2.1.14. Joints

Os *Joints* representam uma interface ao longo da qual podem ocorrer movimentos. Ao *Joint* devem associar-se propriedades tal como a força e a rigidez.

3.2.1.15. Compute

O mecanismo de análise em elementos finitos do Phase2 é iniciado selecionando o botão *Compute*.

3.2.1.16. Interpret

No *Interpret*, o utilizador pode ver o resultado da análise de elementos finitos, podendo analisar valores relativos a tensões, fatores de resistência (*Strenght Factor*) e extensões (*Strain*). Estes dados podem ser tratados e exportados para gráficos, folhas de Excel, etc.

4. CARACTERIZAÇÃO DO MODELO ADOTADO

4.1. Apresentação do modelo

O modelo de estudo tem por base, como já foi referido, uma cortina de contenção flexível multi-ancorada, executada para suportar uma escavação com altura total de 12m e reforçada com quatro níveis de ancoragens ativas.

4.1.1. Definição da geometria

Para a construção do modelo começou-se por definir algumas configurações do projeto. Em *Project Settings*, definiram-se as unidades de medida de comprimento, força e tensão, e as várias fases do processo de construção da cortina.

Em seguida, em *Boundaries*, definiu-se a fronteira externa formando uma caixa com as medidas de 80m de largura e 20m de altura e delimitaram-se as linhas que dividem as diferentes fases de escavação. Foram consideradas as medidas de 80x20m para os limites externos por se considerar que com estas dimensões havia distância suficiente entre a contenção e as fronteiras para reproduzir a situação real.

Definida a geometria inicial do modelo, passou-se à inserção dos elementos de contenção e escoramento. Para simular o comportamento do muro de Berlim definitivo, começou-se por desenhar a cortina, com 12 m de altura, recorrendo a um elemento *Liner*. Este elemento pode simular diversos tipos de suporte, como, por exemplo, betão projetado, elementos de betão armado, paredes de estacas, etc. Neste caso, também poderia ter sido utilizado um outro elemento, designado *Structural Interfaces*, composto por uma *Liner* e uma *Joint*. Este tipo de elemento permitiria ter um elemento de betão e uma junta que simularia a interface entre o solo e a parede. Contudo, e após análises prévias efectuadas para os dois casos, chegou-se à conclusão de que na modelação pretendida os resultados de uma e de outra solução seriam muito idênticos, assim optou-se por um elemento *Liner* simples.

A inserção dos perfis HEB no terreno foi tida em conta apenas como um elemento essencial de apoio ao processo construtivo, e por isso não foram inseridos no programa de cálculo, embora, com base em análises feitas na fase de estudo da modelação a adotar, se admita que a sua introdução no betão contribuiria para o aumento da rigidez do painel o que associado à altura de perfil enterrado abaixo do fundo da escavação proporcionaria uma ligeira diminuição dos deslocamentos na cortina, ajudando à estabilidade do muro.

A inserção das ancoragens foi feita recorrendo a um elemento *Bolt* do tipo *tieback* com um bolbo de selagem em função do comprimento total da ancoragem e uma inclinação dentro dos valores normalmente utilizados em casos reais, compreendidos entre, 10m e 25m de comprimento, um bolbo de selagem de 20% a 40% do comprimento total e uma inclinação entre 10° a 45°.

Em relação às restrições dos deslocamentos do modelo, admitiu-se para o limite inferior apoios duplos impedindo deslocamento horizontal e vertical, para os limites laterais apoios simples, restringindo apenas os deslocamentos segundo a horizontal, e em relação ao limite superior considera-se livre.

Para o cálculo do modelo utilizou-se uma malha de elementos finitos do tipo *Graded* constituída por elementos de 6 nós triangulares, tendo a geometria final do modelo ficado com o aspecto que se vê na Figura 4.1.

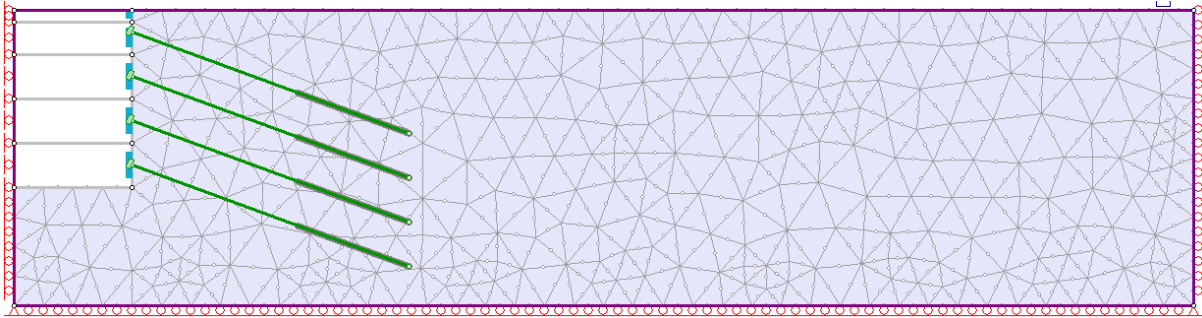


Figura 4.1 - Discretização do modelo com elementos isoparamétricos triangulares de seis nós.

5. DESCRIÇÃO E MODELAÇÃO DO CASO DE ESTUDO BASE (E1)

5.1. Introdução

O estudo base (E1) serve de referência a todos os estudos seguintes, de forma a permitir uma análise comparativa entre eles, tendo em conta as alterações paramétricas efectuadas em cada caso de estudo. As características da estrutura de contenção, propriedades do solo e todas as considerações feitas na simulação do modelo irão ser enumeradas ao longo deste capítulo.

5.2. Características e propriedades do solo e da estrutura de contenção

A escavação considerada tem 12 m de profundidade e é suportada por uma parede de contenção tipo Berlim definitiva construída em betão da classe C25/30, com 0,30m de espessura e ancorada em quatro níveis por ancoragens inclinadas a 20° com um comprimento de 20m correspondendo 40% ao comprimento do bolbo de selagem. O solo é composto por um único estrato, definido por um ângulo de atrito de 25°, uma coesão de 10kpa e um módulo de deformabilidade de 50Mpa.

A representação do caso de estudo descrito faz-se na Figura 5.1 e no Quadro 5.1 e Quadro 5.2 são apresentadas as propriedades do solo e da parede, respectivamente.

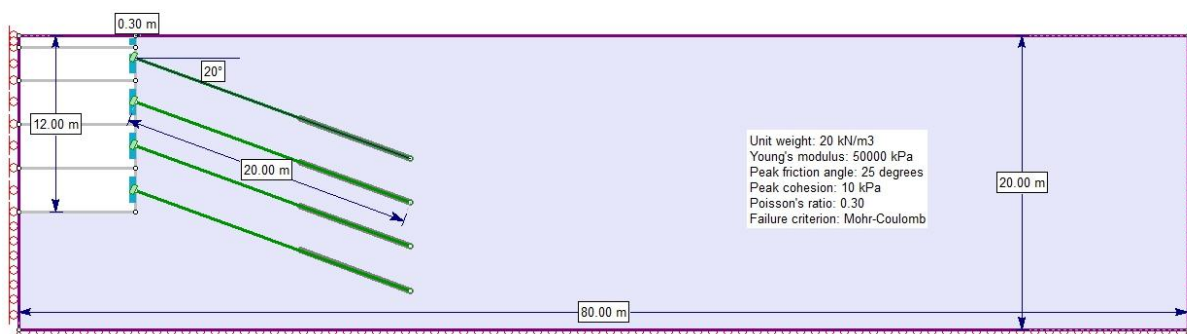


Figura 5.1 – Apresentação caso de estudo E1.

Quadro 5.1 Propriedades do solo

Material	Altura do estrato (m)	Critério de rotura	Tipo de material	E (MPa)	γ (kN/m ³)	ν	c (kPa)	ϕ' (°)
Solo	20	Mohr Coulomb	Elástico	50	20	0,3	10	25

Quadro 5.2 - Propriedades da parede

Material	Espessura (m)	Tipo de material	E (GPa)	γ (kN/m ³)	ν
Betão armado	0,30	Elástico	31	25	0,2

No Quadro 5.3, indicam-se as características das ancoragens utilizadas, e no Quadro 5.4 as características dos perfis admitidos. As ancoragens foram consideradas com comportamento elástico linear e para simplificação, admitiu-se uma carga igual em cada nível de ancoragens, sendo o pré-esforço aplicado de 350kN/m e o perfil utilizado o HEB200.

Quadro 5.3 - Características das ancoragens

Ancoragem	Tipo de material	Pré-esforço F_{anc} (kN)	Inclinação α (°)	Comprimento da ancoragem (m)	Bolbo de selagem (m)	Diâmetro (mm)	E (GPa)
A1/A2/A3/A4	Elástico	350	20	20	40%	25	200

Quadro 5.4 - Características dos perfis

Designação	Tipo de material	Comprimento (m)	Área (m ²)	E (GPa)	γ (kg/m)	ν	Inércia (10 ⁶ mm ⁴)
HEB200	Elástico	15	0,007808	200	61.3	0,49	56.96

5.3. Faseamento construtivo do modelo

Na modelação da parede foi cumprido o processo construtivo descrito no capítulo 2.1.1, e resumido no quadro seguinte, desde a fase 1 à fase 15.

Quadro 5.5 - Descrição das fases construtivas

Fase	Descrição
1	Furação, introdução e selagem dos perfis HEB200
2	Escavação da viga de coroamento (0,80 m)
3	Execução da viga de coroamento
4	1ª Fase de escavação (3,00 m)
5	Execução do 1º painel em betão armado
6	Colocação e pré-esforço da ancoragem 1 (1,50 m)
7	2ª Fase de escavação (6,00 m)
8	Execução do 2º painel em betão armado
9	Colocação e pré-esforço da ancoragem 2 (4,50 m)
10	3ª Fase de escavação (9,00 m)
11	Execução do 3º painel em betão armado
12	Colocação e pré-esforço da ancoragem 3 (7,50 m)
13	4ª Fase de escavação (12,00 m)
14	Execução do 4º painel em betão armado
15	Colocação e pré-esforço da ancoragem 4 (10,50 m)

5.4. Características a analisar para o estudo E1

5.4.1. Diagramas de deslocamentos horizontais

Na análise deste modelo foram tidos em conta dos deslocamentos horizontais da cortina ao longo das várias fases de construção.

Os diagramas de deslocamentos que irão ser apresentados são fundamentais para perceber o comportamento da estrutura à medida que se vai procedendo à sua construção, e, assim, evitar problemas que poderiam surgir em obra caso não fosse feita uma análise prévia do seu comportamento, tais como, deslocamentos excessivos da parede, comportamento inesperado da solução, atrasos devido a alteração no método construtivo, entre outros.

5.5. Observações

Para interpretação dos gráficos seguintes ter-se-á em conta a cota de 0,00m como o início da escavação e o topo da viga de coroamento e 12,00m o fundo da escavação. No Quadro 5.6 identificam-se as cotas dos vários níveis de escavação e o ponto de aplicação das ancoragens.

Quadro 5.6 - Descrição das cotas de projeto

Fase	Cota (m)
1º Nível de escavação	[0,00-3,00]
2º Nível de escavação	[3,00-6,00]
3º Nível de escavação	[6,00-9,00]
4º Nível de escavação	[9,00-12,00]
1ª Ancoragem	1,50
2ª Ancoragem	4,50
3ª Ancoragem	7,50
4ª Ancoragem	10,50

Os deslocamentos a analisar terão valor positivo ou negativo conforme se verificarem para o lado do terreno ou para o interior da zona escavada, respetivamente.

No diagrama de deslocamentos horizontais para cada nível de escavação são apresentados os deslocamentos no muro já construído, mas também os deslocamentos abaixo da zona escavada. Esta apresentação é feita uma vez que abaixo da escavação executada o programa apresenta deslocamentos resultantes do rearranjo interno do solo devido à escavação e em situação real os perfis introduzidos no terreno sofreriam este deslocamento. Este rearranjo interno verifica-se porque à medida que se vai escavando, uma vez que se reduz a camada de solo capaz de mobilizar o impulso passivo do lado da escavação, o terreno sofre uma descompressão que provoca uma rotação da direita para a esquerda de toda a massa de solo do modelo.

Para melhor compreensão do desenvolvimento dos deslocamentos ao longo da construção da cortina, apresenta-se um gráfico para cada fase de escavação. Cada nível corresponde a uma altura escavada de 3m e compreende as fases de escavação (Esc.), execução do painel de betão (Muro) e aplicação do pré-esforço na ancoragem (Anc.).

Na Figura 5.2, apresenta-se o exemplo para interpretação do modelo adotado e observações descritas.

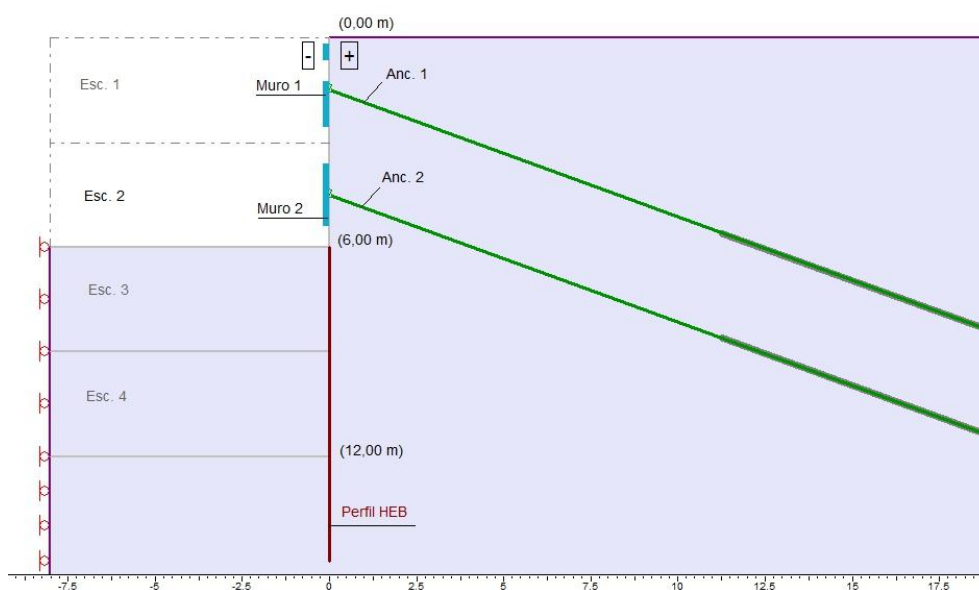


Figura 5.2 – Exemplo para interpretação de resultados

5.7. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do estudo E1

Sendo este o estudo base, optou-se por apresentar as principais fases de construção do muro, analisando cada uma do ponto de vista dos deslocamentos horizontais.

Na Figura 5.3, são apresentados de forma esquemática, e tendo por base uma escala de cores, os deslocamentos horizontais calculados pelo Phase2 ao longo da parede para algumas das fases de construção. Nesta escala, a cor azul-escuro corresponde a deslocamentos de 0mm e a cor vermelha a deslocamentos de 25mm.

Cada fase apresentada corresponde a uma etapa do processo construtivo, desde a furação e inserção dos perfis HEB no terreno (fase1) até à aplicação do pré-esforço no último nível de ancoragens (fase 15).

Na fase inicial (terreno inicial), não existe ainda qualquer trabalho realizado, na fase 6 já foram concluídos os trabalhos do 1º nível, na fase 9 os trabalhos do 2º nível, na fase 12 os trabalhos do 3º nível, na fase 14 já foi construído o muro do 4º nível e na fase 15 já foi feito o tensionamento da ancoragem 4.

A mancha vermelha situada na zona de amarração do bolbo deve-se à existência de esforços elevados nessa zona.

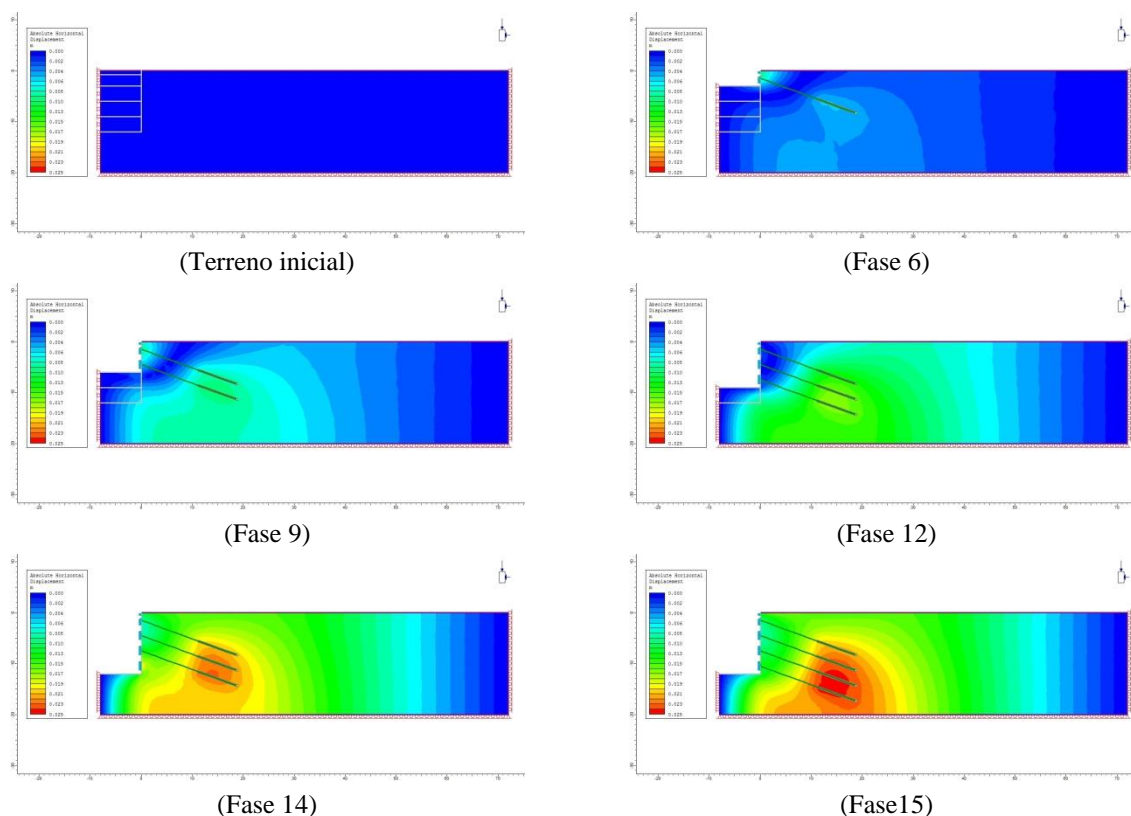


Figura 5.3 - Mapa de deslocamentos horizontais, *Absolute Horizontal displacements* (Rocscience, 2013)

Pela observação da Figura 5.4, correspondente aos trabalhos executados até à cota de 3,00m, verifica-se que praticamente não existe deslocamento da cortina após a escavação e construção do painel de betão do 1º nível, uma vez que os deslocamentos nessa zona situam-se praticamente em cima do eixo vertical correspondente ao deslocamento de 0,00mm. Este facto deve-se à capacidade do solo se auto-sustentar devido à sua coesão e ângulo de atrito interno.

Com a aplicação do pré-esforço na 1ª ancoragem (Anc.1), colocada à cota de 1,50m, verifica-se que o gráfico passa para o lado direito do eixo vertical, ou seja, demonstra-se o deslocamento da parede contra o terreno.

A Figura 5.5 retrata o andamento dos trabalhos desde a cota 3,00m até à cota de 6,00m, onde se verifica que a escavação deste 2º nível e construção do muro 2 acentua os deslocamentos para a esquerda, principalmente nesta zona. Com estas fases verifica-se que o primeiro tramo do muro recupera ligeiramente dos deslocamentos positivos provocados pela aplicação do pré-esforço da 1ª ancoragem, contudo, por imposição do tensionamento da ancoragem 2, colocada à cota de 4,50m, a cortina desloca-se novamente contra o terreno notando-se uma ligeira rotação no ponto de aplicação da ancoragem 1.

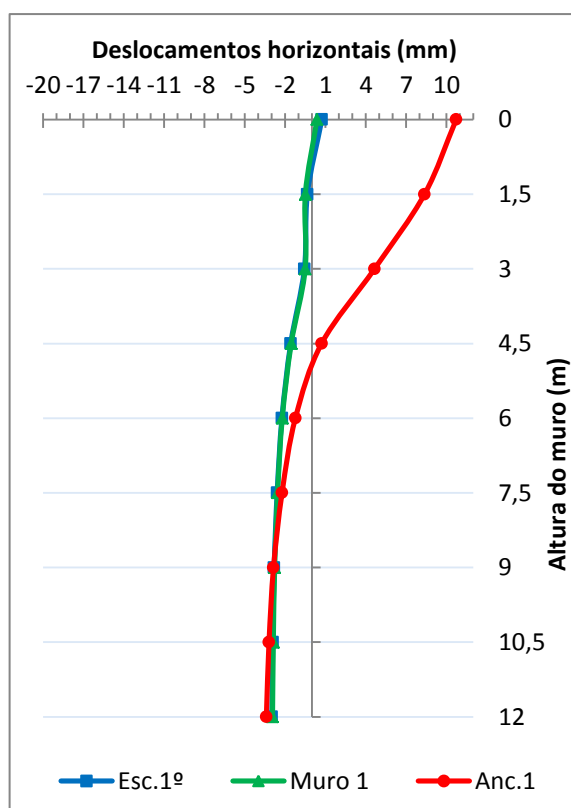


Figura 5.4 – Deslocamentos ao longo do 1º nível de escavação

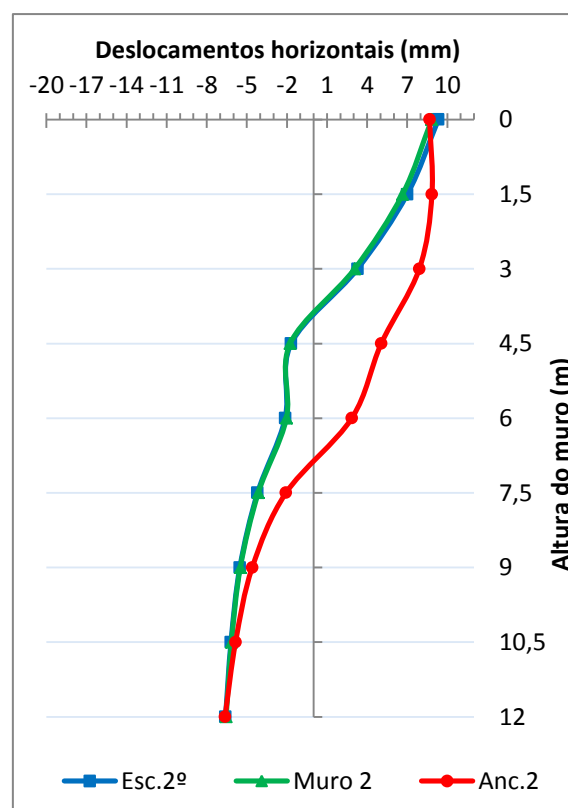


Figura 5.5 – Deslocamentos ao longo do 2º nível de escavação

Na Figura 5.6, com a escavação do 3º nível entre a cota 6,00m e 9,00m e construção do muro 3, continuamos a assistir a um deslocamento do muro para a esquerda, devido à descompressão do terreno pela remoção de terra escavada e pelo incremento do peso próprio do betão dos painéis. Neste nível, o topo do muro deforma-se de forma mais acentuada uma vez que se encontra livre.

Na Figura 5.7, entre as cota 9,00m e 12,00m existe um comportamento semelhante ao que acontece nos níveis anteriores, havendo um deslocamento máximo a meio da altura escavada, que é no entanto reduzido após tensionamento da ancoragem 4.

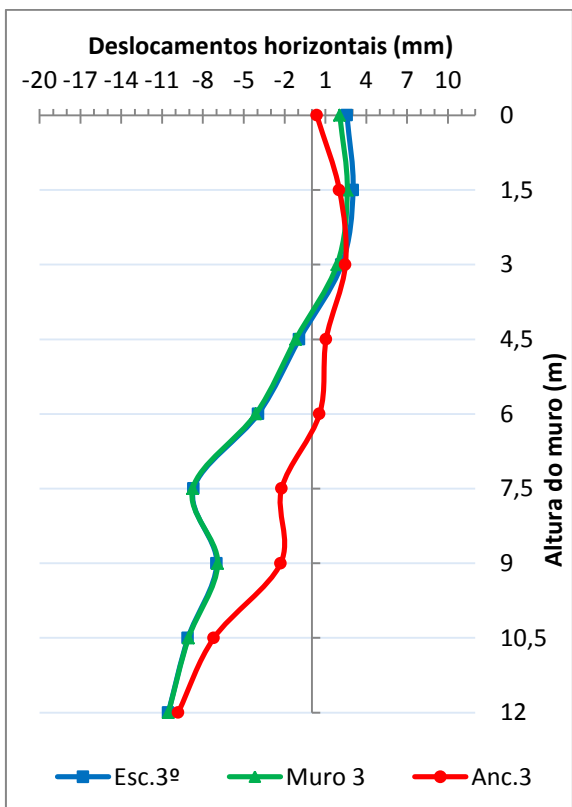


Figura 5.6 – Deslocamentos ao longo do 3º nível de escavação

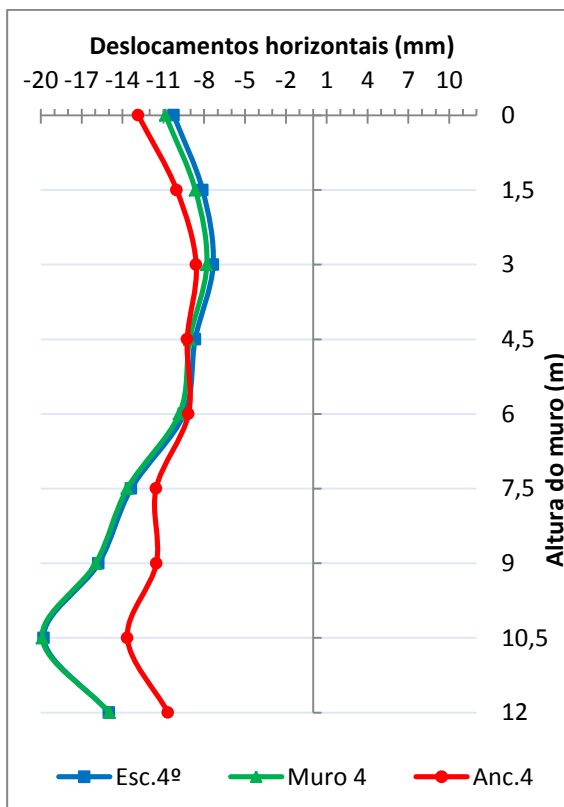


Figura 5.7 - Deslocamentos no final da escavação do 4º nível

Para maior percepção do “andamento” dos deslocamentos durante toda a construção do muro, apresenta-se a Figura 5.8, onde se registam os deslocamentos imediatamente após a aplicação do pré-esforço em cada nível de ancoragem.

Pode-se observar, que cada ancoragem tem influência em todo o muro já construído, contudo é na sua zona de influência desta que mais se verifica o seu efeito de “puxar” a cortina contra o terreno.

À medida que se avança com os trabalhos de cada nível, a ancoragem serve como um apoio intermédio que limita os deslocamentos impedindo que o muro se deforme livremente.

O deslocamento máximo obtido pelo cálculo do phase2 estabiliza com a aplicação do último nível de ancoragem à cota de 10,50m e com o valor de -13,64mm, e no topo do muro (cota 0,00m) o deslocamento atingido é de -12,85mm.

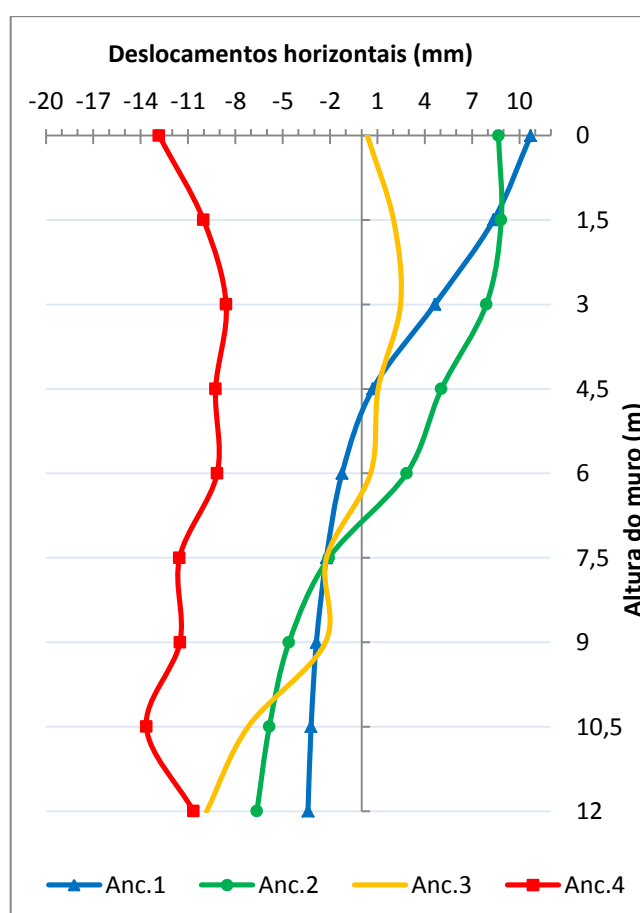


Figura 5.8 - Deslocamentos após aplicação do pré-esforço em cada nível de escavação

Em resumo, verifica-se que o principal fator que influencia o desenvolvimento de deslocamentos para a esquerda é a execução da escavação. Apesar da construção do painel de betão também acentuar estes deslocamentos, apenas o faz de forma ligeira. Já as ancoragens têm um papel preponderante no funcionamento da cortina, uma vez que funcionam como apoios intermédios, limitando os deslocamentos do muro e o colapso da solução.

5.8. Conclusões E1

(Clough & O'Rourke, 1990) registaram em cortinas de contenção multi-escoradas, deslocamentos horizontais máximos de cerca de 0.2% da profundidade de escavação, e verticais de 0.15%. Tendo em conta estes valores, no caso de estudo seriam expectáveis deslocamentos até cerca de 24mm. Segundo esta citação, trabalhos realizados por outros autores, e alguns casos de obra descritos na bibliografia, os deslocamentos verificados no estudo E1 não se consideram exagerados, contudo, é necessário ter em atenção que cada caso é um caso diferente e portanto devem ser analisados os deslocamentos admissíveis em cada caso de estudo em particular, pois, em cada situação, os deslocamentos admitidos serão diferentes, devendo por esse facto ser feita uma análise global, não considerando somente os deslocamentos horizontais da cortina, mas também os deslocamentos verticais e a influência de ambos no comportamento das construções vizinhas, no caso de construções em meio urbano.

6. ANÁLISE PARAMÉTRICA

6.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo simular o comportamento da estrutura de contenção, alterando diferentes parâmetros, tendo sempre como base de comparação o estudo inicial E1. Foram feitas análises paramétricas relativamente às características geotécnicas do terreno e geométricas da cortina e uma análise a outro tipo de estrutura diferente do muro tipo Berlim definitivo. Nestas análises, de forma a avaliar da melhor maneira o comportamento face ao estudo E1, apenas se altera um parâmetro de cada vez.

Na apresentação dos estudos comparativos serão expostos os dados que se consideram mais relevantes, fazendo sempre uma comparação com o E1.

6.2. Descrição dos estudos realizados

Com o objetivo de clarificar estes estudos da melhor forma, apresentam-se, no Quadro 6.1, os diferentes estudos realizados e respetivas alterações paramétricas. Nesse quadro, e_p representa a espessura da cortina em metros, E_p e E_{solo} , o módulo de deformabilidade do betão e do solo respectivamente em kPa, c a coesão do solo em kPa, ϕ' o ângulo de atrito do solo em graus, γ_{solo} o peso volúmico do solo em kN/m^3 , ν o coeficiente de poisson, α_{Anc} a inclinação das ancoragens em graus e F_{anc} a força de pré-esforço aplicado em cada ancoragem, em kN.

As análises efectuadas tiveram como objetivo estudar a influência de três aspetos no comportamento do muro. Foram eles a alteração das características geotécnicas do solo, a alteração das características geométricas da cortina e a alteração das características dos elementos de ancoragem.

Do ponto de vista das características geotécnicas, as análises realizadas tiveram em conta variações do ângulo de atrito (E3 e E4), coesão (E5 e E6), módulo de elasticidade (E7 e E8) e presença de um estrato muito rijo à profundidade de 12m (E9).

Quanto à influência das características geométricas da cortina, foi utilizada uma parede moldada em substituição do muro de Munique no E2 e foi alterada a espessura do muro de Berlim no E10 e E11.

A alteração das características dos elementos de ancoragem consistiu em fazer variar a inclinação das ancoragens (E12 e E13) e alteração da força de pré-esforço (E14 e E15).

Quadro 6.1 - Quadro resumo das análises paramétricas realizadas

Estudo	Estrutura de suporte	Características do modelo									Parâmetro estudado
		e_p (m)	E_p (GPa)	c (kPa)	ϕ' (°)	γ_{solo} (kN/m ³)	E_{solo} (MPa)	ν	α_{Anc} (°)	F_{anc} kN	
E1	Muro de Berlim	0,30	31	10	25	20	50	0,30	20	350	Estudo base
E2	Parede Moldada	0,30	31	10	25	20	50	0,30	20	350	Alteração do tipo de estrutura
E3	Muro de Berlim	0,30	31	10	35	20	50	0,30	20	350	Aumento do ϕ' para 35°
E4	Muro de Berlim	0,30	31	10	15	20	50	0,30	20	350	Diminuição do ϕ' para 15°
E5	Muro de Berlim	0,30	31	80	25	20	50	0,30	20	350	Aumento da coesão para 80kPa
E6	Muro de Berlim	0,30	31	0	25	20	50	0,30	20	350	Alteração do solo $c=0$ kPa
E7	Muro de Berlim	0,30	31	10	25	20	75	0,30	20	350	Aumento do E_{solo} em 50%
E8	Muro de Berlim	0,30	31	10	25	20	25	0,30	20	350	Diminuição do E_{solo} em 50%
E9	Muro de Berlim	0,30	31	0	50	25	20000	0,20	20	350	Solo muito rijo a 12m de profundidade
E10	Muro de Berlim	0,50	31	10	25	20	50	0,30	20	350	Aumento da $e_p=0,50m$
E11	Muro de Berlim	0,25	31	10	25	20	50	0,30	20	350	Diminuição da $e_p=0,25m$
E12	Muro de Berlim	0,30	31	10	25	20	50	0,30	40	350	Aumento α_{Anc} para 40°
E13	Muro de Berlim	0,30	31	10	25	20	50	0,30	10	350	Redução α_{Anc} para 10°
E14	Muro de Berlim	0,30	31	10	25	20	50	0,30	20	500	Aumento da $F_{anc}=500KN$
E15	Muro de Berlim	0,30	31	10	25	20	50	0,30	20	200	Redução da $F_{anc}=200kN$

6.4. Estudo 2

6.4.1. Caracterização do E2

Neste estudo utiliza-se uma parede moldada em comparação com o muro de Berlim utilizado no E1. Com esta análise pretende-se avaliar de forma breve a diferença dos deslocamentos entre estes tipos de cortina flexível.

6.4.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E2

Apresentam-se, nas figuras seguintes, os diagramas de deslocamentos horizontais na “Parede moldada Vs. Muro de Berlim”. De notar que, embora a altura de escavação seja de 12 m em ambos os casos, na parede moldada apresentam-se os deslocamentos até à cota de 15,00m, correspondente ao fundo da parede, incluindo 3m de ficha, enquanto no muro de Berlim apenas se apresentam os deslocamentos até à cota de 12m. Essa diferença é justificada pelo facto de, na realidade, só termos o muro de betão construído até à cota do fundo da escavação.

Relativamente ao processo construtivo destes dois tipos de cortina, a principal diferença está relacionada sobretudo com o facto de, na parede moldada, quando se procede à escavação do terreno, já estar a parede construída, enquanto no muro de Berlim se executa primeiro a escavação e só depois se procede à construção da parede. Esta diferença faz com que o comportamento da estrutura seja diferente.

Na Parede moldada, os deslocamentos resultantes da descompressão do terreno na escavação de cada nível são imediatamente suportados pela parede previamente executada até à cota de projeto, o que limita desde logo os deslocamentos na cortina.

Como se pode observar na Figura 6.2, a execução dos trabalhos até à cota 6,00m apresenta resultados muito semelhantes em ambos os casos de estudo.

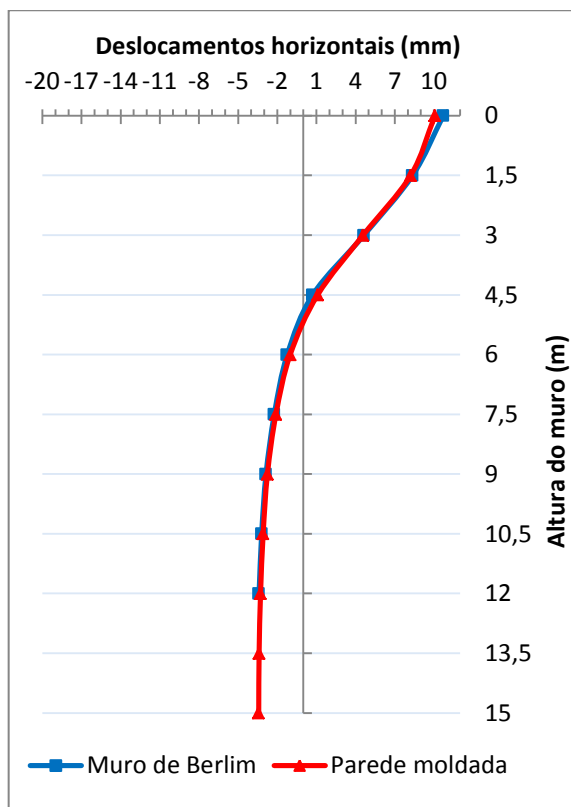


Figura 6.1 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 1º nível de escavação

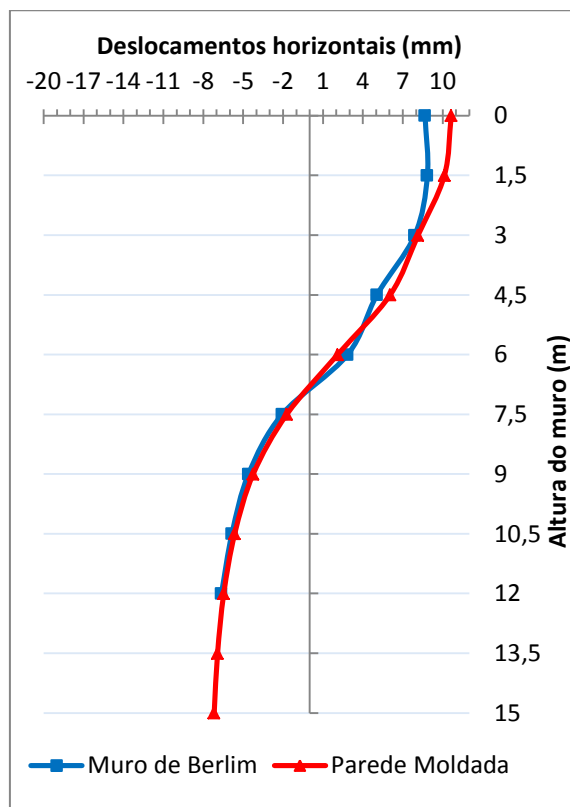


Figura 6.2 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 2º nível de escavação

Relativamente aos deslocamentos finais na cortina (Figura 6.4), verifica-se que são mínimos no topo do muro e máximos na base da escavação. Isto deve-se ao facto de, à medida que se vai avançando com a escavação e tensionando as ancoragens, estas funcionam como apoios que, além de impedirem o deslocamento da parede para o lado da escavação, ainda a “puxam” contra o terreno. Relativamente aos deslocamentos maiores na base, acontecem porque, neste caso de estudo, estamos na presença de um único estrato com características resistentes insuficientes para que comprimento da ficha funcione como um encastramento puro e dá-se a rotação da base da parede.

Conforme o Quadro 6.2, e a Figura 6.4, no muro de Berlim o deslocamento horizontal máximo é de -13,64mm e ocorre à cota de 10,50m, enquanto para a parede moldada o deslocamento horizontal máximo é de -17,15mm e verifica-se na base da cortina. No entanto, comparando os deslocamentos finais apenas na altura de escavação, ou seja, ao longo dos 12m de altura, verificam-se valores de deformação horizontal de -13,64mm para o E1 e -12,64 para o E2.

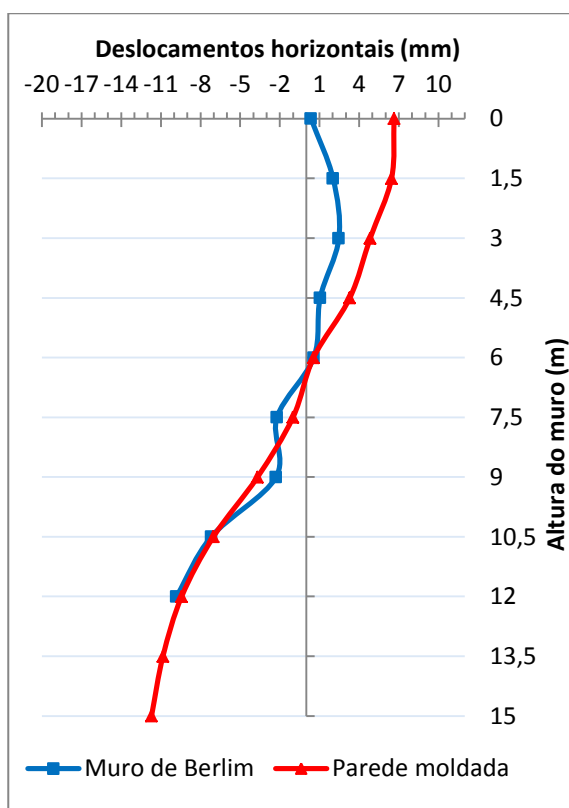


Figura 6.3 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 3º nível de escavação

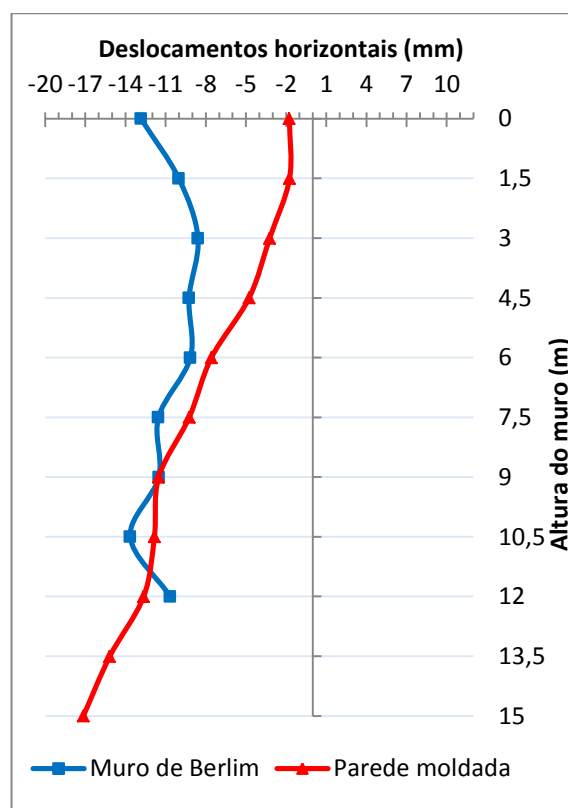


Figura 6.4 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação

Quadro 6.2 – Deslocamentos ao longo da cortina para E1 e E2.

Cota (m)	Deslocamento horizontal (mm)	
	Muro de Berlim	Parede moldada
	E1	E2
0,00	-12,85	-1,75
1,50	-10,02	-1,74
3,00	-8,58	-3,23
4,50	-9,25	-4,76
6,00	-9,15	-7,58
7,50	-11,54	-9,24
9,00	-11,51	-11,52
10,50	-13,64	-11,84
12,00	-10,65	-12,64
13,50	---	-15,17
15,00	---	-17,15

Conclui-se, portanto, que nas mesmas condições os deslocamentos máximos numa e noutra solução são muito próximos. Varia no entanto a distribuição dos deslocamentos ao longo do muro, conforme se observa nas deformadas de cada cortina apresentadas na Figura 6.5 e Figura 6.6, e justificado pela diferença do processo construtivo e características do solo já explicado anteriormente.

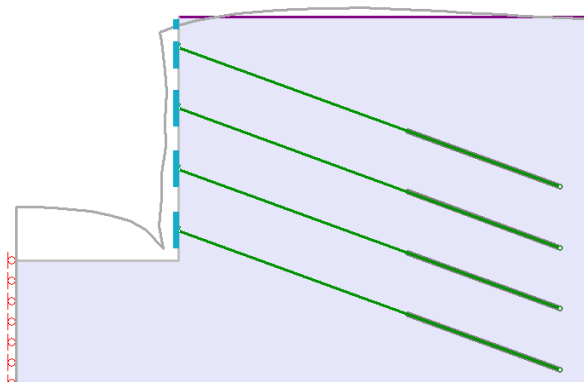


Figura 6.5 – Deformada final Muro Berlim
(E1)

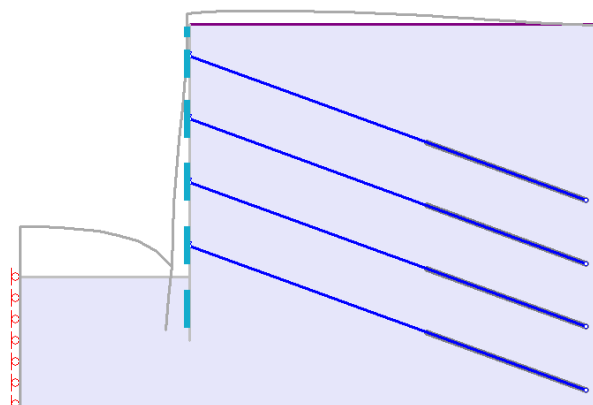


Figura 6.6 – Deformada final Parede Moldada
(E2)

6.5. Estudo 3 e 4

6.5.1. Caracterização do E3 e E4

Neste estudo fez-se a variação do ângulo de atrito do solo com o objetivo de analisar a sua influência no comportamento final no muro.

No estudo 3 utilizou-se um $\phi' = 35^\circ$ e no estudo 4 um $\phi' = 15^\circ$.

6.5.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E3 e E4

Conforme apresentado na Figura 6.7, esta variação não teve influência nos deslocamentos finais da cortina.

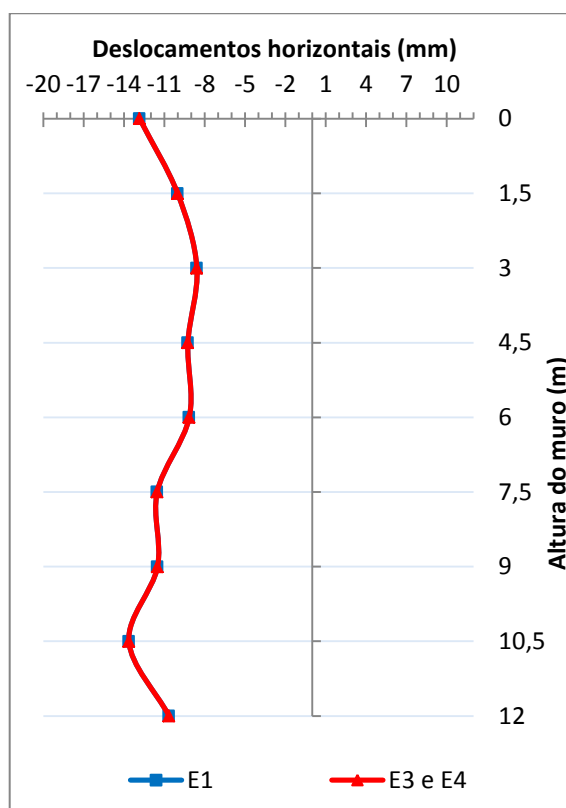


Figura 6.7 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação no E3 e E4

6.6. Estudo 5 e 6

6.6.1. Caracterização do E5 e E6

No estudo E5 e E6, incluído na análise da influência das características geotécnicas no comportamento da cortina, procedeu-se à alteração da coesão do solo. No E5 aumentou-se a coesão para 80kPa e no E6 utilizou-se um solo com $c=0$ kPa.

6.6.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E5 e E6

Como se observa na Figura 6.8, esta alteração não teve influência nos deslocamentos finais do muro

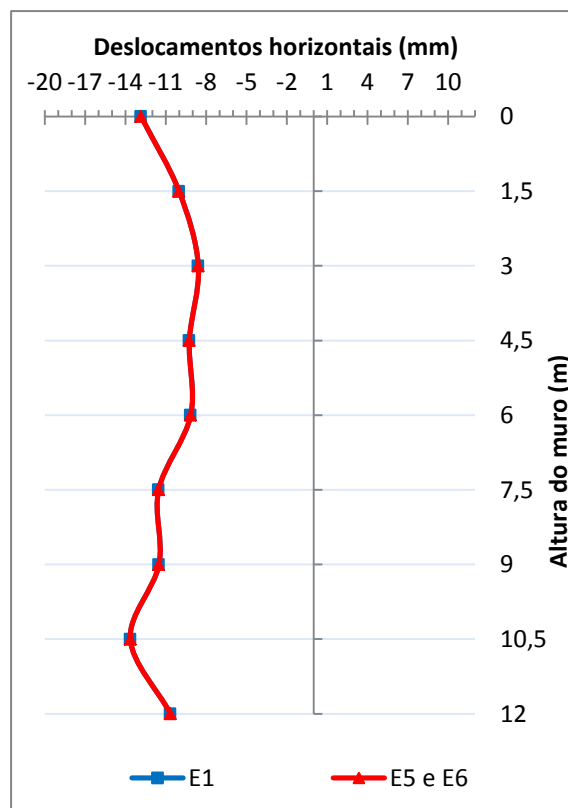


Figura 6.8 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação no E5 e E6

6.7. Estudo 7 e 8

6.7.1. Caracterização do E7 e E8

No estudo E7 e E8, optou-se por fazer a variar o módulo de deformabilidade do solo. Em E7 utilizou-se $E_{\text{solo}} = 75 \text{ Mpa}$ enquanto em E8 utilizou-se $E_{\text{solo}} = 25 \text{ Mpa}$, correspondendo estas alterações ao aumento e redução de 50% do valor inicial.

6.7.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E7 e E8

Para módulos de deformabilidade superiores, verifica-se que o terreno sofre menor descompressão nas fases de escavação, o que se traduz em menores deslocamentos negativos, e na fase de tensionamento das ancoragens o muro também sofre deslocamentos positivos menores.

Verifica-se, na Figura 6.9, que a utilização de solo com menor deformabilidade no E7 representa deslocamentos menores ao longo de toda a cortina, havendo uma redução do deslocamento máximo na ordem de 35%, passando de $-13,64 \text{ mm}$ para $-8,83 \text{ mm}$.

Para módulos de deformabilidade inferiores, os deslocamentos no muro, conforme apresentado na Figura 6.10, aumentam de forma significativa. No caso de estudo E8, a redução de 50% do E_{solo} levou a um aumento de 100% do deslocamento máximo do muro, passando de $-13,64 \text{ mm}$ no E1 para $-28,50 \text{ mm}$ no E8.

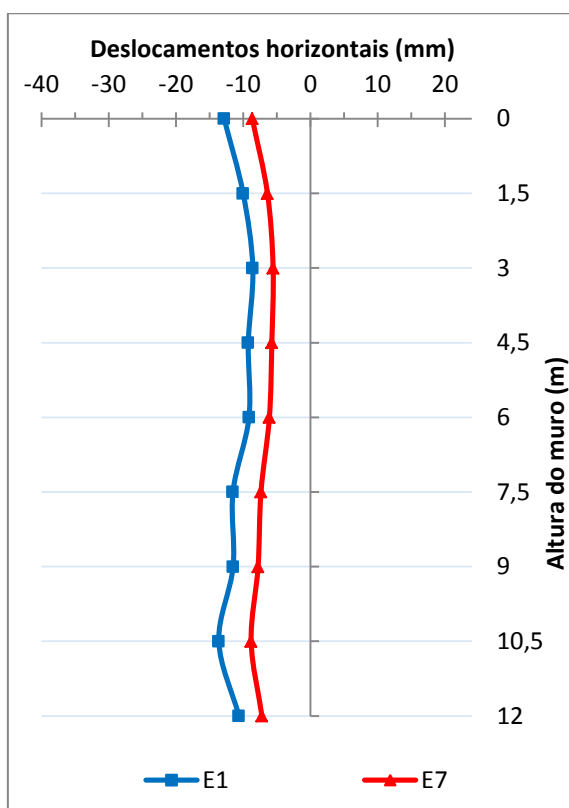


Figura 6.9 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $E_{\text{solo}} = 75 \text{ Mpa}$

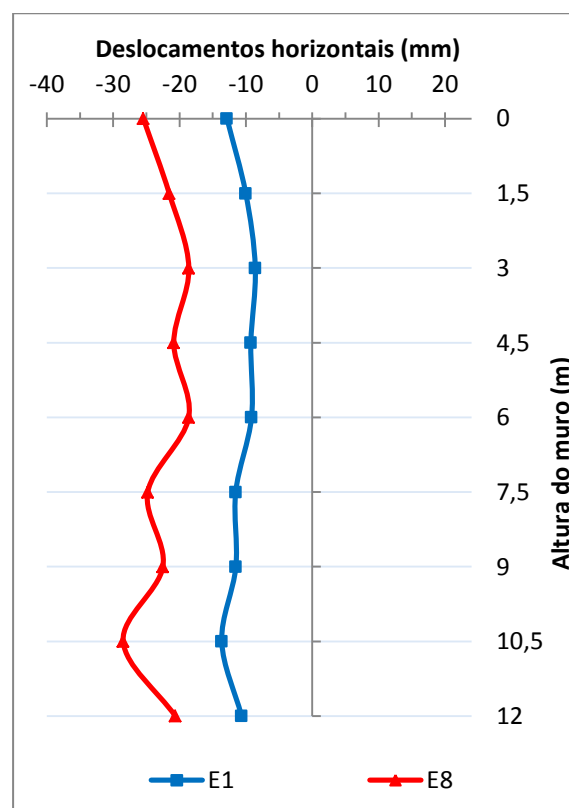


Figura 6.10 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $E_{\text{solo}} = 25 \text{ Mpa}$

6.8. Estudo 9

6.8.1. Caracterização do E9

No estudo 9, simulou-se o efeito da presença de um estrato de solo muito rijo à profundidade de 12,00m. Este solo caracterizou-se com um módulo de deformabilidade de 20GPa e um coeficiente de Poisson de 0,2, tomando as características de uma rocha dura.

6.8.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E9

Como se pode verificar na Figura 6.11, a presença de um estrato de solo rijo à profundidade de 12m leva o muro a comportar-se como tendo um encastramento na sua base. Este facto reduz os deslocamentos na base da cortina para valores praticamente nulos, sendo o deslocamento máximo de 8,97mm à cota de 3m, contrariando completamente o que acontece no E1, em que o deslocamento máximo era de -13,64mm à cota de 10,50m.

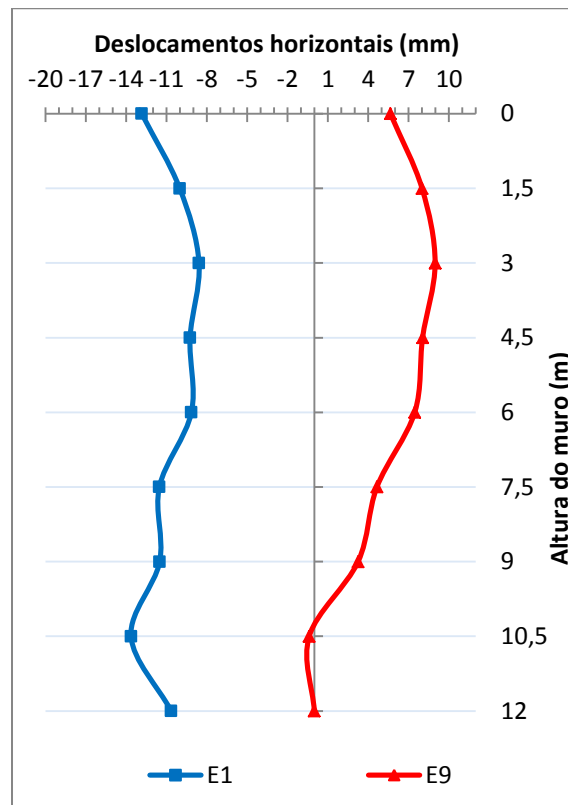


Figura 6.11 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação

Conforme se observa na Figura 6.13, devido à atuação das ancoragens, os deslocamentos do muro acontecem contra o terreno. Este facto torna evidente o sobredimensionamento do valor do pré-esforço nas ancoragens, sendo possível e aconselhável diminuir-se este valor.

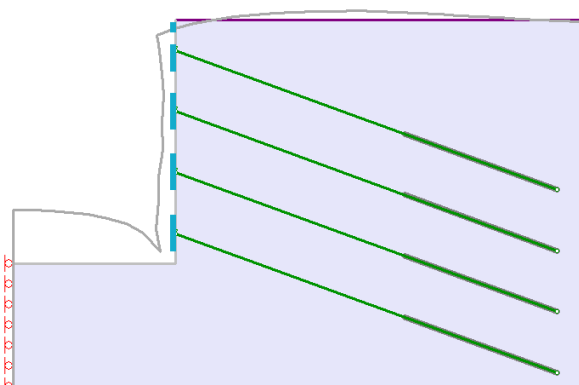


Figura 6.12 – Deformada final E1

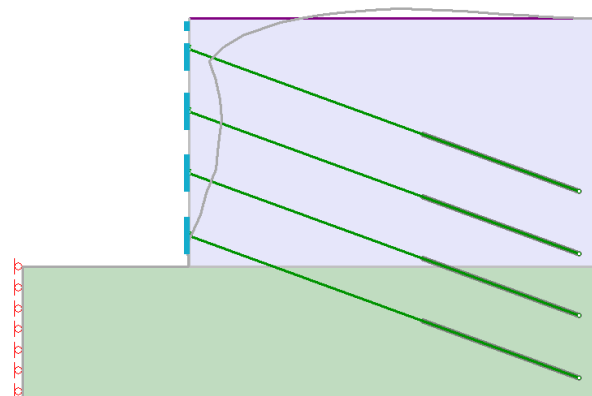


Figura 6.13 – Deformada final E9

6.9. Estudo 10 e 11

6.9.1. Caracterização do E10 e E11

Nos estudo 10 e 11, optou-se por analisar a influência da espessura da cortina no seu comportamento. Para isso procedeu-se a um aumento da espessura de 0,30m para 0,50m no estudo 10 e a uma redução da espessura do muro de 0,30m para 0,25m no estudo 2.

6.9.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E10 e E11

Os resultados obtidos são os apresentados nos gráficos seguintes, onde se verifica que o aumento da espessura do muro agrava os deslocamentos finais e que a sua redução provoca a sua diminuição. Este comportamento deve-se ao facto de que, ao aumentar ou diminuir a espessura do muro, se estar igualmente a aumentar ou diminuir o peso próprio da estrutura, o que influencia os deslocamentos essencialmente na fase da construção do painel de betão.

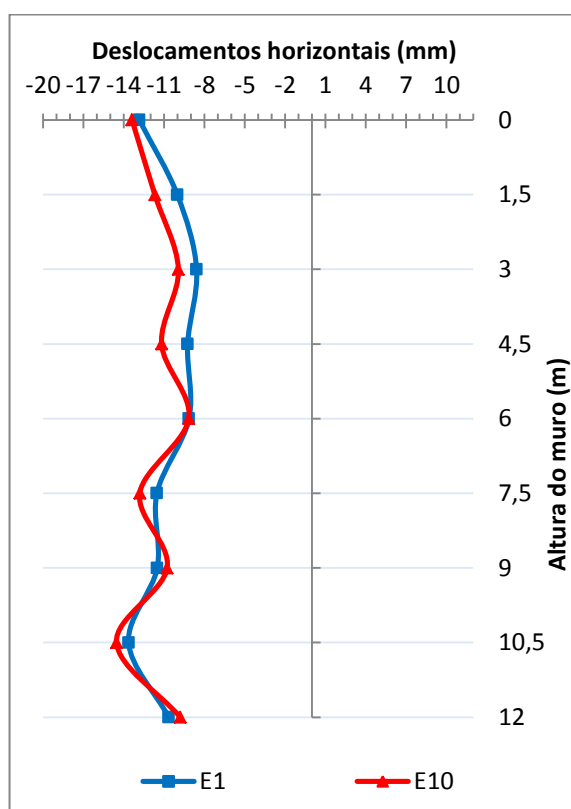


Figura 6.14 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $e_p=0,50m$

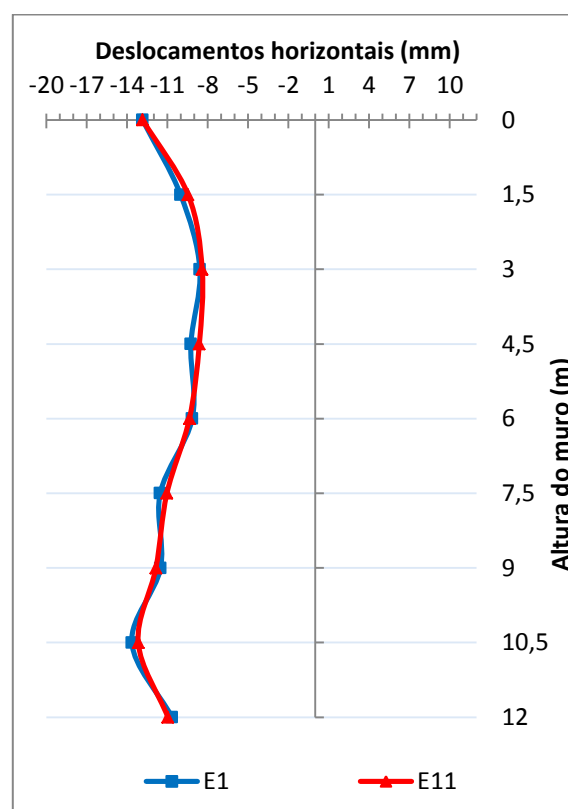


Figura 6.15 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $e_p=0,25m$

6.11. Estudo 12 e 13

6.11.1. Caracterização do E12 e E13

Em obra, a furação do terreno para colocação da ancoragem poderá ser efetuada utilizando diferentes ângulos; assim, achou-se por bem simular o comportamento da estrutura alterando a inclinação das ancoragens.

No estudo 12 utilizou-se $\alpha_{Anc} = 40^\circ$ e no E13 $\alpha_{Anc}=10^\circ$.

6.11.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E12 e E13

Uma força inclinada decompõe-se numa resultante horizontal e vertical, sendo a sua resultante horizontal tanto maior quanto menor o ângulo que esta faz com a horizontal. Assim, conforme se pode observar nas figuras seguintes, com o aumento do ângulo de ancoragem no E12, a força horizontal mobilizada para contrariar os deslocamentos negativos é menor, daí o agravamento dos mesmos nesta simulação. Para o E13, com a redução do ângulo de ancoragem conseguem-se valores da força resultante horizontal maiores, o que se traduz em deslocamentos menores no muro.

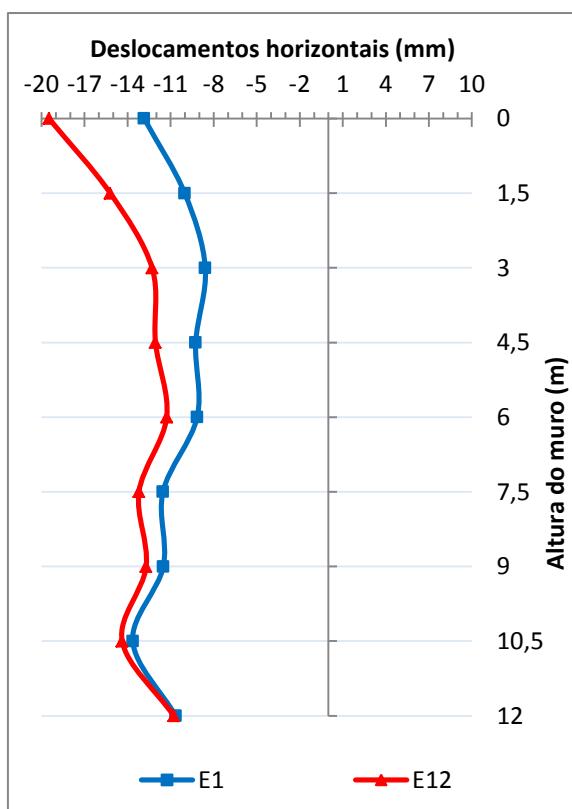


Figura 6.16 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $\alpha_{Anc} = 40^\circ$

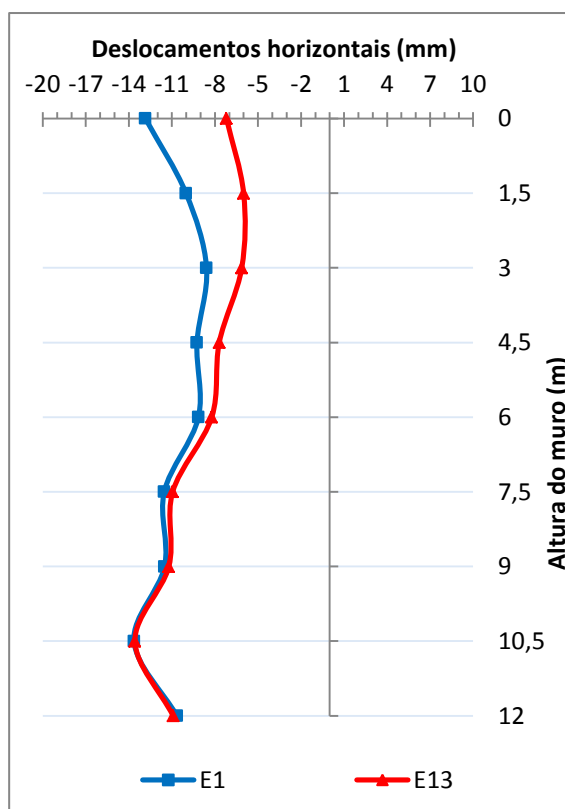


Figura 6.17 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $\alpha_{Anc}=10^\circ$

6.12. Estudo 14 e 15

6.12.1. Caracterização do E14 e E15

Neste estudo pretende-se avaliar a influência do aumento do pré-esforço nas ancoragens. Assim, para o E14 aumentou-se o valor do pré-esforço de 350kN para 500kN e no E15 reduziu-se o valor de 350kN para 200kN.

6.12.2. Apresentação e interpretação dos resultados da análise do E14 e E15

Como era esperado, e tendo em conta simplesmente os deslocamentos horizontais na cortina, o aumento do tensionamento da ancoragem diminuiu os deslocamentos finais, enquanto a sua redução provoca a diminuição dos mesmos.

O aumento da força de ancoragem para 500kN levou a uma redução de cerca de 37% na deformação horizontal final da cortina, que, conforme se observa na Figura 6.18, passou de -13,64mm para -8,56mm.

Na Figura 6.19, a redução da força de pré-esforço de 350kN para 200kN provocou o aumento de 38%, na deformação horizontal passando de -13,64mm para -18,87mm.

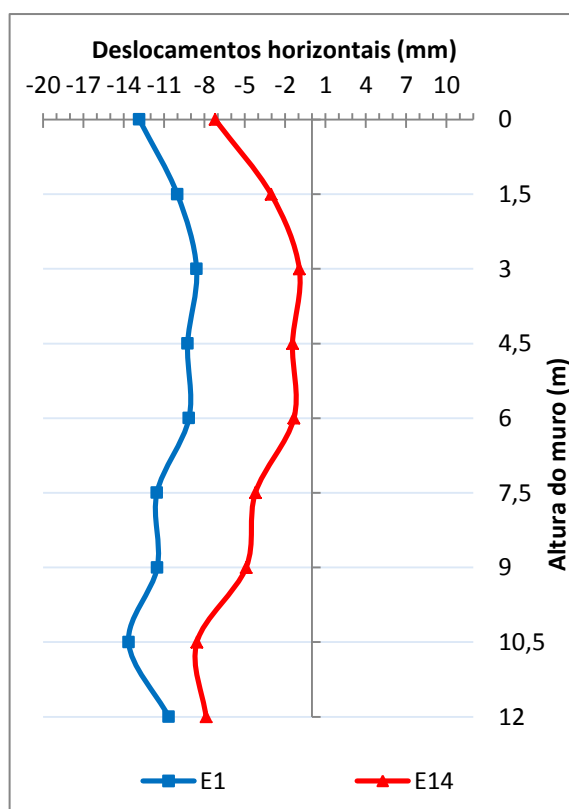


Figura 6.18 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $F_{anc}=500kN$

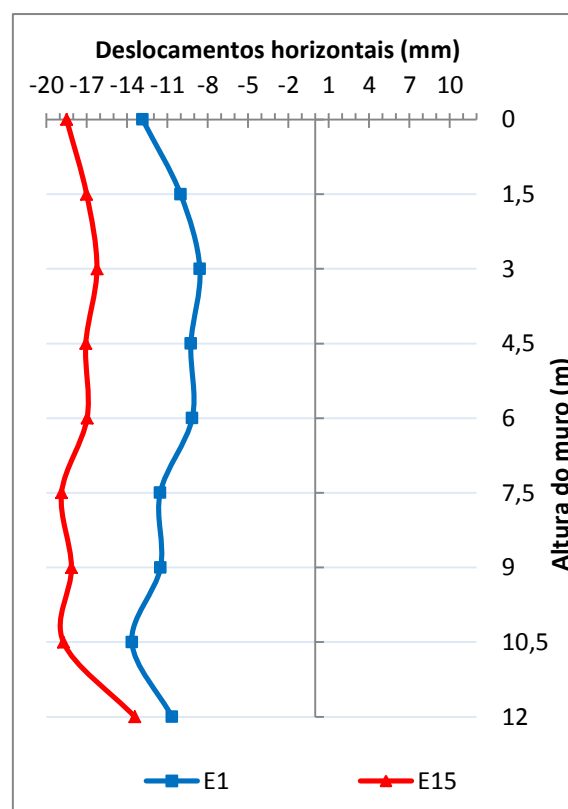


Figura 6.19 – Deslocamentos após aplicação do pré-esforço no 4º nível de escavação para $F_{anc}=200kN$

No Quadro 6.3, apresenta-se uma síntese do valor dos deslocamentos horizontais máximos e mínimos e a cota onde esses mesmos deslocamentos acontecem para cada caso de estudo.

Quadro 6.3 – Resumo da variação e deslocamentos máximos para cada caso de estudo após conclusão dos trabalhos

Caso de estudo	Deslocamento máximo		Deslocamento mínimo		Deslocamento topo muro	
	$\epsilon_{\text{horizontal}}$ (mm)	Cota (m)	$\epsilon_{\text{horizontal}}$ (mm)	Cota (m)	$\epsilon_{\text{horizontal}}$ (mm)	Cota (m)
E1	-13,64	10,50	-8,58	3,00	-12,85	
E2	-12,64	12,00	-1,74	1,50	-1,75	
E3	-13,64	10,50	-8,58	3,00	-12,85	
E4	-13,64	10,50	-8,58	3,00	-12,85	
E5	-13,64	10,50	-8,58	3,00	-12,85	
E6	-13,64	10,50	-8,58	3,00	-12,85	
E7	-8,83	10,50	-5,56	3,00	-8,66	
E8	-28,50	10,50	-18,60	3,00	-25,45	0,00
E9	8,97	3,00	-0,01	12,00	5,65	
E10	-14,54	10,50	-9,17	6,00	-13,39	
E11	-13,17	10,50	-8,41	3,00	-12,84	
E12	-19,48	0,00	-10,78	12,00	-19,48	
E13	-13,57	10,50	-6,00	1,50	-7,20	
E14	-8,56	10,50	-0,95	3,00	-7,21	
E15	-18,87	7,50	-13,42	12,00	-18,50	

7. CONCLUSÕES E ORIENTAÇÕES PARA PROGRESSO FUTURO

7.1. Conclusões gerais

Com a realização desta dissertação pretendia-se contribuir para o conhecimento dos fatores que mais influenciam o comportamento de uma estrutura de contenção flexível, quer do ponto de vista da geometria da cortina, quer das características geotécnicas do solo.

No caso de estudo 1 (E1), o qual se utilizou como o estudo que serve de referência a todos os outros, simulou-se, com recurso ao Phase2, o comportamento do muro com características e medidas que se consideraram exequíveis numa situação real, e num terreno com propriedades geotécnicas consideradas medianas. Neste estudo, a análise dos deslocamentos no muro à medida que se executa cada fase do processo construtivo permitiu ter ideia da reação do terreno às fases de escavação, construção dos painéis de betão e aplicação do pré-esforço nas ancoragens, concluindo-se que, na presença de um solo com características que permitem alguma resistência interna, devido à existência de coesão e a um ângulo de atrito e um módulo de deformabilidade médio, verifica-se a capacidade deste para se auto-sustentar até uma dada altura de escavação.

Verificou-se ainda, que a construção do painel de betão apenas provoca um ligeiro agravamento dos deslocamentos relativamente aos verificados na fase de escavação, sendo o tensionamento da ancoragem o factor que mais influencia o comportamento final da estrutura de contenção.

Relativamente aos deslocamentos horizontais após conclusão dos trabalhos, o valor máximo foi de -13,64mm à cota de 10,50m. Tendo em conta a altura do muro, o estudo de (Clough & O'Rourke, 1990) e outros casos de obra analisados, estes valores consideram-se aceitáveis.

No caso de estudo 2 (E2), utilizou-se um outro tipo de estrutura de contenção flexível. A parede moldada. Esta solução difere do muro de Berlim definitivo, essencialmente no seu processo construtivo, uma vez que se executa primeiro a parede de betão em toda a altura a escavar e o comprimento correspondente à altura enterrada, ou comprimento da ficha, e só depois se escava o terreno. Desta forma, ao executar a escavação, já existe a parede de betão que suporta, desde logo, a descompressão que se verifica no terreno. Com aumento da altura escavada, os deslocamentos são máximos na base da escavação, uma vez que as ancoragens, já em serviço, funcionam como apoios, minimizando os deslocamentos no seu ponto de aplicação.

Relativamente aos deslocamentos finais do E2, o valor máximo foi de -12,64mm à cota de 12,00m, correspondente ao fundo da escavação. Conclui-se portanto, que, comparativamente com E1, o valor de deslocamento máximo atingido é muito semelhante. Contudo, varia a distribuição de deslocamentos ao longo da cortina, justificado pela variação do processo

construtivo já enunciado. Esta semelhança não significa, no entanto, que seja igual utilizar um muro de Berlim definitivo ou uma parede moldada.

Nos casos de estudos em que se fez alteração da propriedades do solo, conclui-se que o aumento ou redução do ângulo de atrito (E3 e E4) e coesão do solo (E6 e E7) não apresentam alterações significativas no comportamento final da estrutura de contenção. Já no que diz respeito à variação de 50% do módulo de deformabilidade do solo (E7 e E8), concluiu-se que, para solos com maior módulo de deformabilidade, a estrutura apresenta deslocamentos menores, enquanto que a redução deste parâmetro leva a valores de deslocamentos maiores.

A presença de um estrato rijo na profundidade correspondente ao fundo da escavação, simulada no E9, influencia totalmente o comportamento da estrutura. Enquanto no E1, os deslocamentos verificaram-se todos para a esquerda do muro, no E9 o muro deslocou-se, por imposição do pré-esforço nas ancoragens, contra o terreno. Este facto reflete a necessidade de, em obra, fazer ensaios para verificar a presença de vários estratos, analisando as suas características geotécnicas e a profundidade a que se situam.

No E10 e E11, analisou-se a influência da variação da espessura da cortina, tendo-se concluído que o aumento da espessura do muro aumenta os deslocamentos horizontais da estrutura, enquanto que a redução da espessura do muro provoca a sua diminuição. Tal resultado deve-se ao facto desta variação agravar ou aligeirar a peso próprio da estrutura. Em situação real, uma vez que variações da espessura da cortina até 50% traduzem-se em deslocamentos de poucos milímetros, poderão ser desprezadas.

Do ponto de vista da influência das características dos elementos de ancoragens, no E12 e E13, fez-se variar a inclinação do pré-esforço das ancoragens, tendo-se concluído que, para maiores inclinações, a força na ancoragem é menor, resultando em maiores deslocamentos na cortina, enquanto que, para menores inclinações, a força de tensionamento da ancoragem é maior, o que se traduz em deslocamentos menores na cortina. Esta variação influencia essencialmente a deformação horizontal no topo da cortina, diminuindo essa influência até à base da mesma, onde não se notaram alterações. No E14 e E15, teve-se em conta o aumento e redução do valor da força de tensionamento das ancoragens, concluindo-se que esse aumento ou redução se traduz em valores de deslocamento menores e maiores, respectivamente.

7.2. Conclusões finais

Com a realização deste trabalho evidenciam-se claramente as necessidades de respeitar o processo construtivo do muro de Berlim definitivo, bem como a necessidade de avaliar de forma exaustiva a solução construtiva a utilizar, pois, embora se conclua que, nas mesmas condições, a deformação horizontal máxima num muro de Berlim definitivo seja, em valor absoluto, muito próxima da verificada numa parede moldada, não se pode afirmar que seja igual utilizar uma ou outra solução com base apenas na comparação de deformações horizontais.

De forma geral, pode-se concluir que os aspetos que mais influenciam o comportamento final de uma estrutura de contenção flexível do tipo muro de Berlim definitivo são:

- A variação do módulo de deformabilidade do solo;
- A presença de um estrato de solo rijo ao nível do fundo da escavação;
- A variação da inclinação das ancoragens;
- Variação da força de pré-esforço das ancoragens.

7.3. Orientações para desenvolvimentos futuros

O estudo de comportamento de estruturas de suporte, quer sejam rígidas ou flexíveis, bem como a análise da influência das propriedades geométricas e geotécnicas no comportamento de qualquer obra geotécnica, apesar de em algumas situações parecerem demasiado exaustivos e/ou pouco conclusivos, serão sempre, uma mais-valia para compreender o funcionamento, não só das obras já construídas, mas também das obras que diariamente necessitam de ser executadas.

Dessa forma, parece importante, em desenvolvimentos futuros, e com o intuito de aumentar a capacidade para compreender todo o mecanismo que envolve a conceção de uma obra geotécnica desta natureza, a realização dos seguintes trabalhos:

- a) Estudar as principais diferenças entre um Muro de Berlim definitivo e uma parede moldada analisando as deformações verticais e a sua influência nas construções vizinhas.
- b) Projetar uma obra geotécnica para um local específico, desde o estudo das características geotécnicas do terreno, através da realização de ensaios, conceção do projeto, fazendo uma análise justificativa da solução escolhida, dimensionamento estrutural da solução construtiva e simulação do comportamento da obra.
- c) Estudar a relação entre os deslocamentos horizontais e verticais numa cortina flexível, bem como a sua influência nas construções vizinhas.
- d) Criação de modelos físicos de muros de suporte a diferentes escalas, fazendo a sua instrumentação e comparação com resultados obtidos através da simulação dos mesmos casos de estudo em programas de cálculo de elementos finitos.

8. Bibliografia

- Brito. (2001). *Paredes tipo Munique.Cadeira de Tecnologia de Contenções e Fundações, Mestrado em Construção,,* . Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Clough, G. W., & O'Rourke, T. D. (1990). *Construction induced movements of in-situ walls. Design and Performance of Earth Retaining Structures.* New York: ASCE Geotechnical special publication 25, pp. 449-470.
- Georumo. (9/10/2013). *Tecnologia de Fundações.* Braga, Portugal: <http://www.georumo.pt/index.php/pt/ancoragens>.
- Guerra, N. M., Fernandes, M. M., Cardoso, A. S., & Correia, A. G. (2002). *Cortinas ancoradas "Tipo Berlim": Mecanismo de colapso por insuficiente resistência às cargas verticais.* São Paulo- Brasil: Artigo em Livro de Actas de Conferência Internacional, 1º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia.
- Moreira, Carlos. (2012). *Apontamentos das disciplinas de Fundações e Contenções Periféricas.* Instituto superior de Engenharia de Coimbra.
- Oliveira, Inês. (2012). *Soluções de Escavação e Contenção Periférica em Meio Urbano.* Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Pereira, T. (2011). *Projecto de uma passagem hidráulica tipo box cluvert - Influência do aterro e da fundação.* Dissertação de Mestrado: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- Rocscience, I. (2013). *Phase2.* Toronto: <http://www.rocscience.com/products/3/support>.
- Santos, João. (2011). *Análise do comportamento de paredes tipo Berlim definitivo.* Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior técnico, Lisboa.
- Tecgeo. (09/10/2013). *sondagens e fundações.* Belo Horizonte, Brasil: <http://www.tecgeo.com.br/servicos/estacas-metalicas-2>.