



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Fernando Rafael Santos Silva

MODELAÇÃO DE CONTENÇÕES PERIFÉRICAS COMPLEXAS
– ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS 2D E 3D

MODELING OF COMPLEX PERIPHERAL CONTENTIONS - COMPARATIVE
ANALYSIS OF 2D AND 3D MODELS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de
Especialização em Geotecnia, orientada pelo Professor Doutor Paulo
Miguel Cunha Matos Lopes Pinto e pelo Professor Doutor José Carlos
Duarte Grazina

Setembro de 2018



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Fernando Rafael Santos Silva

Modelação de contenções periféricas complexas — Análise comparativa de modelos 2D e 3D

Modeling of complex peripheral contentions — Comparative analysis of 2D and 3D models

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Geotecnia,
orientada pelo Professor Doutor Paulo Miguel Cunha Matos Lopes Pinto e pelo Professor Doutor José Carlos Duarte Grazina

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 18 de Setembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Professor Paulo Pinto pelos ensinamentos transmitidos, bem como a paciência e disponibilidade demonstrada ao longo da realização desta dissertação.

Um muito obrigado ao Professor José Grazina por tudo o que fez para que este trabalho tivesse a qualidade exigida e, por todo o tempo que disponibilizou para que este fosse possível.

Um grande obrigado à minha Mãe e ao Vítor por estarem sempre presentes. Sem eles nada disto teria sido possível.

Ao meu irmão por estar sempre presente e por ter sempre uma palavra amiga e de conforto.

À Juliana por todo o carinho, amor, paciência e por todas as palavras de incentivo.

Ao José, ao Manuel e ao Tiago por todo o apoio e amizade que nunca irei esquecer.

Agradeço à Nicole por toda a ajuda e pelas palavras de motivação.

Um obrigado também a todos os professores que se cruzaram comigo ao longo deste meu percurso académico.

A todos os meus amigos pelas palavras amigas, as noites bem passadas e as histórias sem fim.

À minha Avó.

RESUMO

A crescente ocupação dos espaços urbanos faz com que a utilização do espaço subterrâneo seja necessária, obrigando à execução de escavações. Como tal, é indispensável a realização de estudos e análises de modo a que se perceba a influência dessas escavações nas infraestruturas e edifícios existentes.

Nesta dissertação pretende-se realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos por modelações numéricas 2D e 3D de uma contenção periférica suportada por ancoragens. Para tal, foi considerada uma escavação baseada numa secção da estação de metro da Encarnação, situada na linha vermelha do Metro de Lisboa.

Para realizar a análise dessa escavação foi necessário recorrer ao programa de elementos finitos bidimensional RS2, e ao programa tridimensional RS3. Com base nestes dois *softwares* foi possível comparar as principais diferenças entre os dois modelos, nomeadamente a influência dos cantos numa escavação.

Os modelos utilizados para simular o comportamento do solo foram o modelo Mohr-Coulomb e o modelo Duncan-Chang. O modelo Mohr-Coulomb é o mais utilizado na prática, dada a sua simplicidade. Por outro lado, o modelo Duncan-Chang é aquele que permite uma simulação mais realista do comportamento do solo.

Conclui-se que o modelo 3D com paredes transversais apresenta menores deslocamentos que o modelo 2D. Os valores reduzidos dos deslocamentos devem-se à influência dos cantos da cortina, implicando que nessa zona seja mobilizado um elevado valor de momento fletor.

O modelo Mohr-Coulomb apresenta valores mais reduzidos para os deslocamentos horizontais da cortina. No entanto, o deslocamento vertical do maciço junto à cortina apresenta valores mais elevados, quando comparado com o modelo Duncan-Chang.

Palavras-chave

Modelação numérica; Elementos finitos; Análise 2D; Análise 3D; Contenção periférica; Modelo de Mohr-Coulomb; Modelo de Duncan-Chang.

ABSTRACT

The increasing occupation of urban spaces makes the use of underground space necessary, forcing the execution of excavations. As such, it is essential to carry out studies and analyzes in order to understand the influence of these excavations on existing infrastructures and buildings.

In this dissertation it is intended to perform an analysis of a peripheral containment supported by anchors. To do this, an excavation was carried out based on a section of the Encarnação metro station, located on the red line of the Lisbon Metro.

To perform the analysis of this excavation it was necessary to use the two-dimensional finite element program RS2, and the RS3 three-dimensional program. Based on these two software it was possible to compare the main differences between the two models, namely the influence of the corners in an excavation.

The models used to simulate soil behavior were the Mohr-Coulomb model and the Duncan-Chang model. The Mohr-Coulomb model is the most commonly used in practice given its simplicity. On the other hand, the Duncan-Chang model is one whose simulation of soil behavior is closer to actual behavior.

It is concluded that the 3D model with transverse walls presents smaller displacements than the 2D model. The reduced values of the displacements are due to the influence of the corners of the retaining wall, implying that a high bending moment value is mobilized in this zone.

The Mohr-Coulomb model presents lower values for the horizontal displacements of the curtain. However, the vertical displacement of the soil mass near the retaining wall presents higher values when compared to the Duncan-Chang model.

Keywords:

Numerical modeling; Finite elements; 2D Analysis; 3D Analysis; Peripheral Containment; Mohr-Coulomb model; Duncan-Chang model.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
Palavras-chave	iii
ABSTRACT	iv
Keywords:.....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento do Tema	1
1.2. Objetivos da dissertação	2
1.3. Organização da dissertação.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Considerações iniciais.....	4
2.2. Comportamento de escavações suportadas por cortinas de estacas.....	4
2.3. Influência da geometria da escavação	6
2.3.1. Escavações com planta retangular.....	6
2.3.2. Influência do ângulo do canto	10
2.4. Caso da Estação de Metro de Bağcilar - Istanbul	14
3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO CASO DE ESTUDO	19
3.1. Considerações iniciais.....	19
3.2. Descrição do caso de estudo	19
3.3. Modelos constitutivos para os materiais geotécnicos	21
3.3.1. Modelo de Mohr-Coulomb.....	21
3.3.2. Modelo hiperbólico de Duncan-Chang.....	23
3.4. Parametrização de modelos	25
3.5. Modelos constitutivos para os elementos estruturais.....	28
3.5.1. Cortina de Estacas	28
3.5.2. Ancoragens	29

3.6.	Modelação do maciço e faseamento construtivo	31
3.7.	Modelação 2D.....	33
3.8.	Modelação 3D.....	34
4.	RESULTADOS DA MODELAÇÃO NUMÉRICA	37
4.1.	Considerações iniciais.....	37
4.2.	Resultados da modelação 2D	37
4.2.1.	Condições iniciais.....	37
4.2.2.	Deslocamentos na cortina.....	39
4.2.3.	Assentamentos na superfície	41
4.2.4.	Esforços na cortina	43
4.2.5.	Esforços nas ancoragens	49
4.3.	Resultados da modelação 3D	51
4.3.1.	Condições iniciais.....	51
4.3.2.	Deslocamentos na cortina.....	52
4.3.3.	Assentamentos na superfície	54
4.3.4.	Esforços na cortina	56
4.3.5.	Esforços nas ancoragens	62
4.4.	Comparação entre modelações 2D e 3D.....	64
4.4.1.	Deslocamentos na cortina.....	64
4.4.2.	Assentamentos na superfície	67
4.4.3.	Esforços na cortina	68
4.4.4.	Esforços nas ancoragens	74
5.	CONCLUSÕES.....	77
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-Padrão geral de movimento de cortinas flexíveis e apoiadas	4
Figura 2.2-Relação entre profundidade de escavação e deslocamento lateral para vários tipos de solo (Clough e O'Rourke., 1990)	5
Figura 2.3- Relação entre profundidade de escavação e assentamentos na superfície do terreno para vários tipos de solo (Clough e O'Rourke., 1990)	6
Figura 2.4 – Esquema das modelações numéricas (Chang-Yu Ou et al., 1993)	7
Figura 2.5-Resultados dos deslocamentos laterais na cortina (Chang-Yu Ou et al., 1993)	7
Figura 2.6-Secção de escavação em estudo	8
Figura 2.7-Deslocamentos laterais na secção do Inclínometro I4	9
Figura 2.8-Deslocamentos laterais na secção do Inclínometro I5 (Chang-Yu Ou et al., 1993) ..	9
Figura 2.9-Layouts em planta da escavação (Szepesházi, et al. 2016).....	10
Figura 2.10-Comparação de momentos fletores nos modelos 2D e 3D (Szepesházi, et al. (2016),	11
Figura 2.11-Secções verticais dos layouts de cantos (Szepesházi, et al., 2016).....	12
Figura 2.12-Secções horizontais dos layouts de cantos (Szepesházi, et al., 2016)	12
Figura 2.13-Momentos no eixo horizontal aplicados na secção 3 (Szepesházi, et al., 2016) ..	13
Figura 2.14-Momentos em torno do eixo vertical na secção 4 (Szepesházi, et al., 2016)	13
Figura 2.15-Momentos em torno do eixo vertical na aresta de canto (Szepesházi, A. et al., 2016)	14
Figura 2.16- Planta de localização da escavação e dos inclinómetros (Ustaoğlu, 2015)	16
Figura 2.17 - Modelo 2D da estação de metro de Bağcilar (Ustaoğlu, 2015).....	16
Figura 2.18 - Modelo 3D estação de metro de Bağcilar (Ustaoğlu, 2015).....	16
Figura 2.19 – Cargas dos edificios no modelo 3D (Ustaoğlu, 2015)	17
Figura 3.1 - Secção em estudo da estação da Encarnação	21
Figura 3.2 - Envoltente de rotura de Mohr-coulomb (Manual Plaxis)	22
Figura 3.3 - Comportamento do solo no modelo Mohr-Coulomb (Manual Plaxis).....	22
Figura 3.4 - Curva tensão-deformação de um solo (Manual Plaxis).....	23
Figura 3.5 – Variação da deformação volumétrica com extensão axial (Manual Plaxis)	23
Figura 3.6 - Modelo Duncan-Chang.....	25
Figura 3.7-Modelo triaxial RS2.....	26
Figura 3.8-Gráficos de tensão-deformação para cada uma das camadas	28
Figura 3.9-Diagrama de pressões aparentes Terzaghi Peck (Almeida e Sousa e Pedro, 2017)29	
Figura 3.10-Colocação do bolbo de selagem (Almeida e Sousa e Pedro, 2017).....	31

Figura 3.11-Modelo 2D no programa de cálculo RS2.....	33
Figura 3.12-Modelo 3D estado plano deformação	35
Figura 3.13-Modelo 3D paredes laterais	36
Figura 4.1 – Variação das tensões de repouso em profundidade.....	38
Figura 4.2 – Variação do módulo de deformabilidade do maciço em profundidade	39
Figura 4.3 – Deslocamentos horizontais na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	40
Figura 4.4 – Assentamentos na superfície ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C	42
Figura 4.5 – Diagrama de momentos fletores na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	44
Figura 4.6 – Diagrama de esforços transversos na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	45
Figura 4.7 – Diagrama de esforços axiais na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	47
Figura 4.8 – Envolventes de esforços na cortina: a) momentos fletores; b) esforços transversos.	49
Figura 4.9 – Evolução dos esforços axiais nas ancoragens com o faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	50
Figura 4.10- Variação das tensões de repouso em profundidade	51
Figura 4.11-Deslocamentos horizontais na secção central da cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C	53
Figura 4.12- Assentamentos na superfície ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	55
Figura 4.13— Diagrama de momentos fletores na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	57
Figura 4.14- Diagrama de esforços transversos na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	59
Figura 4.15- Diagrama de esforços axiais na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	60
Figura 4.16 -Envolventes de esforços na cortina: a) momentos fletores; b) esforços transversos.	62
Figura 4.17- Evolução dos esforços axiais nas ancoragens com o faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	63
Figura 4.18- Deslocamentos horizontais na secção central da cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	65
Figura 4.19- Deslocamentos horizontais na secção longitudinal, (22m profundidade), a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C	66

Figura 4.20- Assentamentos na superfície ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C	68
Figura 4.21- Diagrama de momentos fletores na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	69
Figura 4.22- Diagrama esforços axiais na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	71
Figura 4.23- Envoltivos de momentos fletores na cortina: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.	72
Figura 4.24- Diagrama de momentos fletores na secção longitudinal da cortina (22m de profundidade): a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C	74
Figura 4.25- Evolução dos esforços axiais nas ancoragens com o faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.....	75

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Parâmetros do maciço	17
Quadro 2.2 – Deslocamentos máximos da cortina	18
Quadro 3.1- Características das camadas de solo consideradas nas modelações 2D e 3D	26
Quadro 3.2-Parametrização do modelo Duncan-Chang	26
Quadro 3.3-Parâmetros dos modelos de Mohr Coulomb	27
Quadro 3.4- Parâmetros da cortina	29
Quadro 3.5-Propriedades das ancoragens.....	31
Quadro 3.6-Parâmetros de solo usados nos cálculos com o modelo de D-C	32
Quadro 3.7-Faseamento construtivo com o modelo de M-C.....	32

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Tema

Nesta dissertação é realizado um estudo comparativo, de cálculo numérico, com recurso a programas de elementos finitos, com modelos bidimensionais e tridimensionais, no caso de escavações profundas.

As escavações são parte essencial do presente e do futuro, sendo que com o espaço superficial do terreno cada vez mais ocupado, é necessário colmatar essa falta de espaços com o aproveitamento subterrâneo, sendo estas para parques de estacionamento, meios de comunicação, entre outros. Como tal, é necessária uma análise por parte dos projetistas de modo a entender o comportamento e influência destas escavações nas infraestruturas ao redor.

Para tal, são realizados modelos de análise do comportamento dessas escavações, podendo ser eles 2D ou 3D. Os modelos 2D são bastante utilizados pelos projetistas, sendo estes bastante simples e com uma velocidade de cálculo mais elevada do que os 3D. O modelo 2D apresenta-se como um modelo de estado plano de deformação, sendo que quanto menor for a largura real da cortina maior será o erro causado pela simplificação do modelo. Esse erro deve-se ao efeito de arco onde, para larguras menores, esse efeito é mais elevado. O modelo 2D não permite analisar certas singularidades tais como o efeito dos cantos da cortina, os quais constituem um ponto crítico de análise por nessas zonas existir um grande aumento de momentos fletores.

O modelo 3D é mais complexo que o modelo 2D. Essa complexidade faz com que muitos projetistas fiquem apenas pelo cálculo 2D, sendo que para o cálculo 3D é necessário um maior tempo de cálculo, bem como um modelo mais detalhado da escavação, sendo necessário modelar toda a escavação e todo o faseamento da mesma. Esse detalhamento pode ser vantajoso quando estamos na presença de geometrias complexas, o que pode reduzir custos e tempo de obra.

O modelo 2D deve apresentar momentos fletores e deslocamentos horizontais na cortina superiores àqueles que acontecem no modelo 3D. O modelo 3D pode ser fundamental para o dimensionamento dos cantos da escavação. Portanto, o modelo 2D deve ser usado como uma primeira aproximação, sendo que a partir do modelo 3D é obtida informação complementar para a análise da cortina.

1.2. Objetivos da dissertação

Esta dissertação tem como objetivo efetuar uma análise do comportamento de uma escavação ao longo do faseamento construtivo. Como tal, serão realizados três tipos de modelos: um modelo 2D e dois modelos 3D. Um dos modelos 3D é uma análise do estado plano de deformação e, o outro é um modelo de uma escavação retangular com paredes transversais.

Estes modelos tiveram por base as obras de escavação da estação da Encarnação, inserida na Linha Vermelha do Metro Lisboa, quando esta sofreu uma extensão de 3 quilómetros que permitiu ligar Saldanha ao Aeroporto. Os projetos começaram em 2006 e prolongaram-se até 2008, no entanto a estação da Encarnação bem como as estações do Aeroporto e Moscavide foram apenas inauguradas em julho de 2012. O investimento relativo à extensão da linha vermelha rondou os 220 milhões de euros. Ao fim de 10 meses da inauguração da extensão desta linha vermelha foram servidos 10 milhões de passageiros, sendo que, apenas foram registados 900 mil utilizadores na estação da Encarnação.

Para cada um dos modelos referidos acima serão utilizados dois tipos de modelos reológicos de solo, sendo usado o modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb e o modelo hiperbólico de Duncan-Chang. O modelo de Mohr-Coulomb é bastante usado na prática, devido à rapidez de cálculo e à simplicidade na obtenção dos parâmetros desse mesmo modelo. O modelo Duncan-Chang, por sua vez, tem um comportamento mais realista do solo, contudo é um modelo em que a velocidade de cálculo é bastante mais morosa. A obtenção dos parâmetros para a definição do modelo também é mais difícil, o que faz com que não seja tão utilizado.

Para todos os modelos serão analisados os esforços e deslocamentos horizontais na secção central da cortina, deslocamento vertical na secção central do maciço, esforços nas ancoragens e os esforços e deslocamentos num nível longitudinal de ancoragens.

Por fim, serão comparados os resultados de todos os modelos e retiradas as respetivas conclusões, e percebendo as limitações e vantagens dos mesmos.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação é composta por cinco capítulos, sendo o primeiro uma introdução ao estudo em causa com um enquadramento do tema e com os objetivos esperados com a realização da mesma.

No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica de estudos efetuados por outros autores. São apresentadas informações acerca da influência da geometria da escavação com especial foco dos cantos de escavação e, a influência das dimensões de uma escavação retangular. Será ainda abordado um caso de estudo de uma estação de metro em Bagcilar, onde foi realizada uma retro análise com modelos 2D e 3D.

O capítulo três descreve o caso de estudo da dissertação e os modelos constitutivos do comportamento do solo. É também realizada a parametrização do tipo de solo existente no modelo, bem como a modelação dos elementos estruturais presentes no mesmo. Por fim, serão apresentados os modelos e os detalhes dos elementos finitos constituintes dos mesmos.

No quarto capítulo são mostrados os resultados obtidos pela modelação numérica e analisados os esforços e deslocamentos aplicados na cortina. Em primeiro lugar serão mostrados os resultados obtidos no modelo 2D para ambos os modelos constitutivos. Em seguida serão apresentados os resultados para o modelo 3D com paredes laterais para ambos os modelos constitutivos de solo. Por fim, serão apresentados os resultados para todos os modelos: 3D PL (uma escavação retangular com paredes transversais), 3D EPD, (uma escavação no modelo 3D em estado plano de deformação), e 2D, para os dois modelos constitutivos de solo.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões retiradas de forma a perceber o que cada modelo transmite, as limitações existentes nos modelos e, as vantagens de usar cada um dos modelos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados de análises numéricas, apresentados por diversos autores, onde se procurou fazer uma análise da influência das dimensões e configuração em planta de escavações. Inicialmente são apresentados os resultados de análises onde se fez variar as dimensões de uma escavação com planta retangular (Chang-Yu et al., 1993), seguindo-se a apresentação de um estudo focado na influência da concavidade dos ângulos dos cantos das escavações (Szepesházi et al., 2016). Por fim, é apresentada a análise numérica aplicada ao caso real da escavação da Estação de Metro de Bağcilar – Istanbul (Ustaoğlu, 2015).

2.2. Comportamento de escavações suportadas por cortinas de estacas

O comportamento de escavações foi analisado por Clough e O'Rourke. (1990). Para tal recorreram a dados existentes de movimentos de cortina in situ. Realizando alguma análise dos dados recolhidos aferiram que o movimento de uma cortina de contenção era dependente de vários fatores como condições do solo, profundidade de escavação, fator de segurança, sobrecarga, entre outras. Os autores realizaram então uma análise de influência do tipo de contenção usada com a profundidade de escavação e os deslocamentos laterais da cortina. Estes autores apresentam um padrão geral para os deslocamentos laterais e assentamentos na superfície para uma cortina de contenção, apresentando três casos, sendo eles de cortinas flexíveis, cortina mono-apoiadas e multi-apoiadas, como representado na Figura 2.1

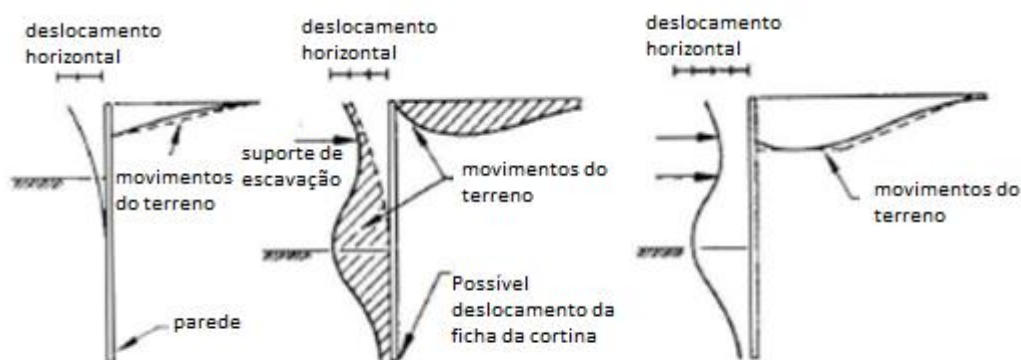


Figura 2.1-Padrão geral de movimento de cortinas flexíveis e apoiadas

Estes verificaram que o deslocamento lateral é frequentemente 0.2% da profundidade da cortina, os assentamentos na proximidade da cortina tem valores de cerca de 0.15% da profundidade da cortina, para cortinas multi apoiadas, em argilas duras, como se verifica na Figura 2.2 e Figura 2.3, respetivamente.

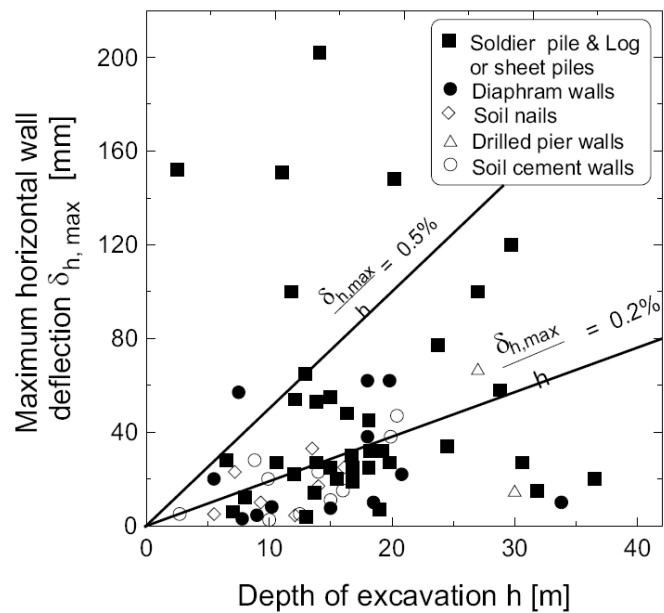


Figura 2.2-Relação entre profundidade de escavação e deslocamento lateral para vários tipos de solo (Clough e O'Rourke., 1990)

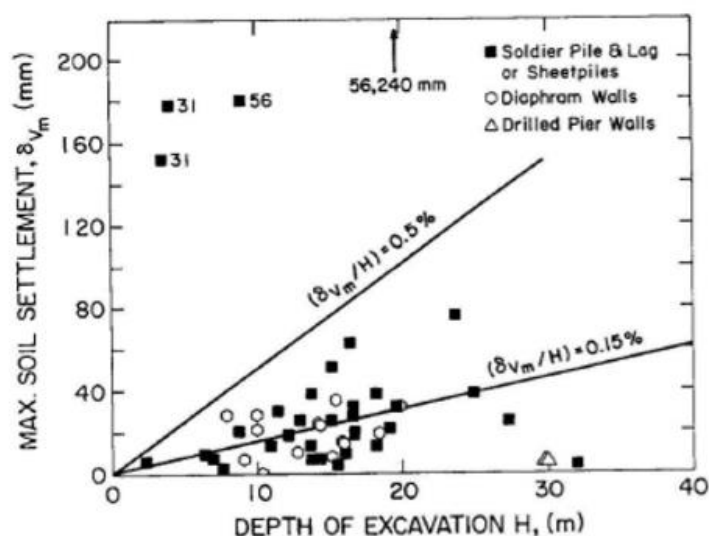


Figura 2.3- Relação entre profundidade de escavação e assentamentos na superfície do terreno para vários tipos de solo (Clough e O'Rourke., 1990)

2.3. Influência da geometria da escavação

2.3.1. Escavações com planta retangular

A influência da geometria no comportamento de escavações com planta retangular foi analisada por Chang-Yu Ou et al. (1993). Para o efeito foram realizadas diversas análises tridimensionais (3D) pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) onde se consideraram diferentes comprimentos das cortinas longitudinais (Cortinas Primárias – “Primary Walls”) e se fizeram variar os comprimentos das cortinas transversais que lhes conferem travamento nos cantos (Cortinas Complementares – “Complementary Walls”). Em todas as análises a altura da escavação foi de 16 m e a escavação suportada por 3 níveis de lajes. Nestas análises foram determinados os deslocamentos perpendiculares às cortinas primárias a diferentes distâncias das suas extremidades, ou seja, dos cantos da estrutura de contenção, onde se situa o travamento conferido pelas cortinas complementares. O esquema das análises efetuadas encontra-se na Figura 2.4.

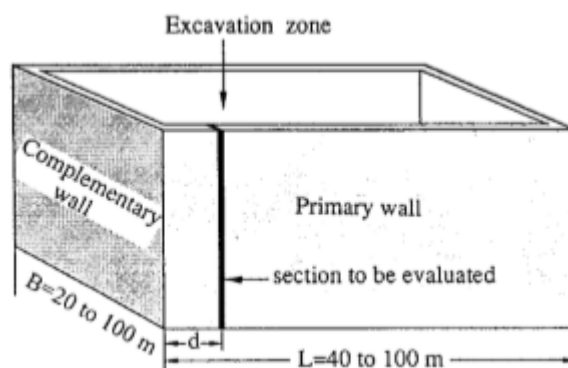


Figura 2.4 – Esquema das modelações numéricas (Chang-Yu Ou et al., 1993)

Complementarmente, a fim de comparar com os resultados das análises 3D, foram também efetuados cálculos bidimensionais (2D) em estado plano de deformação. Os resultados dos deslocamentos máximos obtidos pelos cálculos 3D para as diversas configurações e para os cálculos 2D encontram-se na Figura 2.5. As análises foram efetuadas para comprimentos das cortinas complementares, B, de 20 m, 40 m, 60 m e 100 m. Por sua vez, as cortinas primárias foram avaliadas para comprimentos, L, de 40 m, 60 m, 80 m e 100 m. O modelo reológico considerado para o solo foi o de Duncan e Chang (1970).

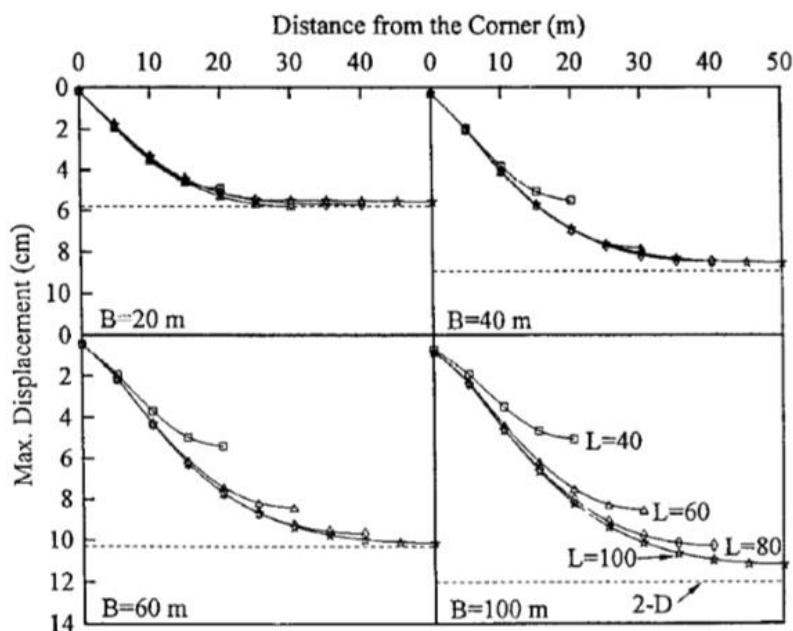


Figura 2.5-Resultados dos deslocamentos laterais na cortina (Chang-Yu Ou et al., 1993)

Pela Figura 2.5 observa-se que, como expectável, os deslocamentos das cortinas primárias tendem a aumentar com o afastamento dos cantos, atingindo os valores mais elevados para a secção média. Por sua vez, os deslocamentos nos cantos são bastante reduzidos, embora tenham tendência crescente com o aumento do comprimento B das cortinas complementares, ou seja, com a redução da rigidez na direção transversal. Também se observa que, em virtude de não serem considerados os efeitos das paredes complementares, os resultados das análises 2D podem ser considerados como limites superiores para os deslocamentos máximos em todos os casos.

No caso em que $B=20$ m, com a ligação nos cantos a corresponder a uma maior rigidez ao movimento transversal e em que as cortinas complementares têm uma menor deflexão, observa-se que não existem diferenças de relevo para os vários comprimentos das cortinas atingindo-se um resultado equivalente ao das análises 2D para a secção média das cortinas primárias com comprimentos superiores a 60 m. Com o aumento do comprimento das cortinas complementares começam a verificar-se diferentes perfis de deslocamentos máximos em função do comprimento das cortinas principais, observando-se que mesmo para o maior comprimento destas cortinas ($L=100$ m) os deslocamentos máximos nunca atingem o valor obtido pelas análises 2D.

Os mesmos autores fizeram uma aplicação dos estudos anteriores à análise de um canto de uma escavação de grandes dimensões, executada na cidade de Taipei (Taiwan), com uma profundidade de 20,3 m e apoiada em 6 níveis de lajes. A planta da escavação e o canto sob análise estão representados na Figura 2.6.

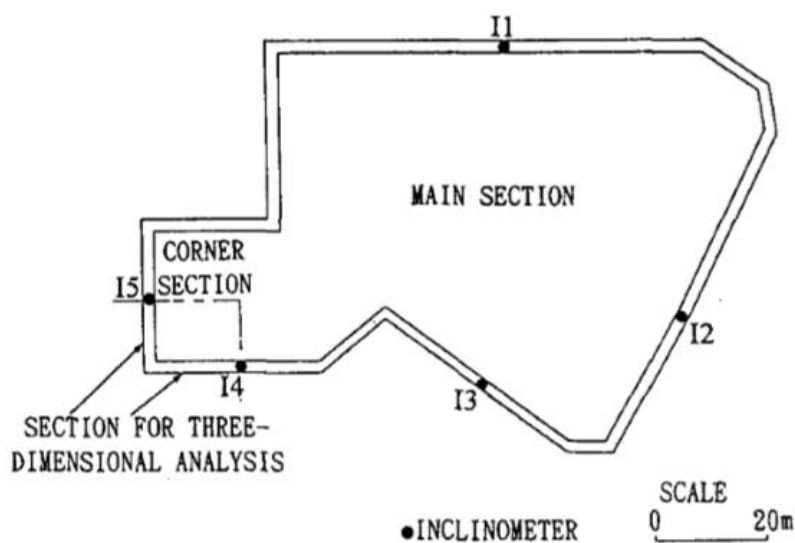


Figura 2.6-Secção de escavação em estudo

Os autores confrontaram os resultados obtidos por cálculos 2D e 3D, assumindo 7 fases de execução da escavação, com os registados em 2 inclinómetros instalados na sua periferia. Os resultados dos deslocamentos em profundidade obtidos pelas análises numéricas para as duas secções de estudo, assim como os valores medidos pelos Inclinómetros I4 e I5, encontram-se na Figura 2.7 e na Figura 2.8, respetivamente.

Para o caso analisado, os resultados permitem concluir que foi conseguida uma boa aproximação através dos cálculos 3D em ambas as secções e para as 3 fases de cálculo apresentadas. Por sua vez, os cálculos 2D afastam-se bastante dos valores registados nos inclinómetros, com os valores dos deslocamentos a serem aproximadamente o dobro dos medidos, pelo que se pode concluir que a presença do canto da escavação tem uma influência significativa nas deformações das cortinas.

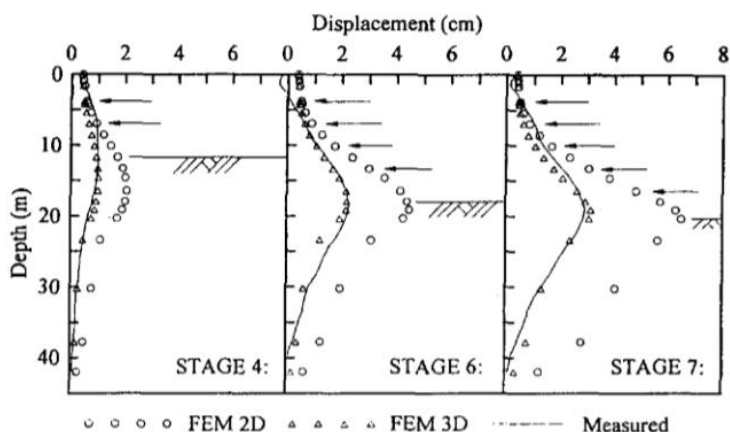


Figura 2.7-Deslocamentos laterais na secção do Inclinómetro I4 (Chang-Yu Ou et al., 1993)

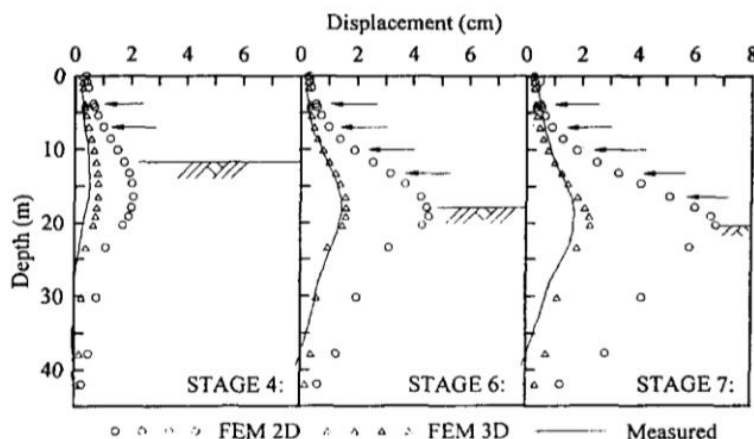


Figura 2.8-Deslocamentos laterais na secção do Inclinómetro I5 (Chang-Yu Ou et al., 1993)

2.3.2. Influência do ângulo do canto

Os autores Szepesházi, et al. (2016) analisaram numericamente, pelo MEF, o efeito dos cantos das cortinas em função da concavidade dos ângulos que estas formam em planta. Na Figura 2.9, estão representados quatro layouts, com diferentes ângulos nos cantos das cortinas, que permitem analisar as forças internas e deslocamentos na parede. A escavação tem 8 metros de profundidade com uma parede de contenção de 18 metros. A escavação é realizada em quatro etapas. O solo foi modelado, segundo Mohr-Coulomb, com um comportamento elastoplástico.

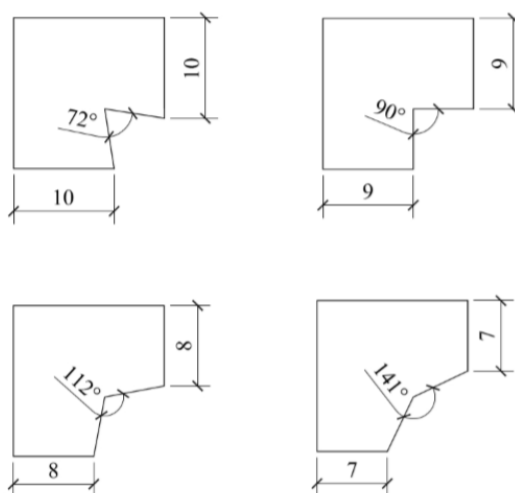


Figura 2.9-Layouts em planta da escavação (Szepesházi, et al. 2016)

Szepesházi, et al. (2016), analisaram ainda os momentos fletores no programa de elementos finitos. Realizaram um modelo 2D e um modelo 3D, onde compararam os momentos fletores em ambas na secção central da cortina, Figura 2.10. É possível verificar que o modelo 2D é aquele em que existe maiores momentos, também é nesse mesmo modelo que existe maiores deformações da cortina.

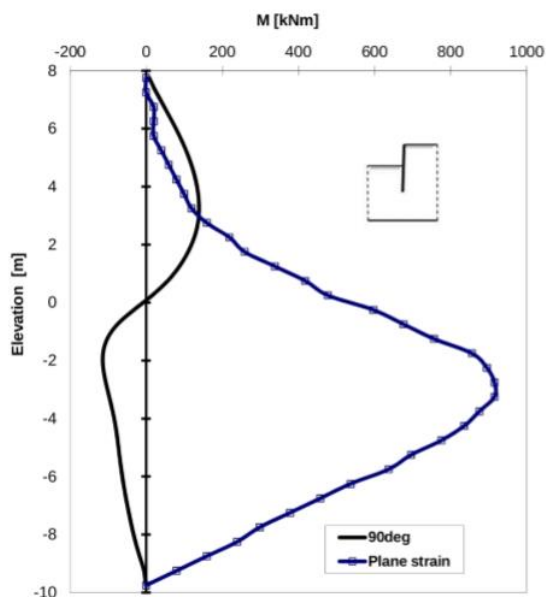


Figura 2.10-Comparação de momentos fletores nos modelos 2D e 3D (Szepesházi, et al. (2016),

O deslocamento horizontal no topo da cortina é de 7.5cm no estado plano de deformação, enquanto no modelo 3D foi de apenas 1.4cm. A diferença de deslocamentos é refletida no diagrama de momentos. Os resultados do estado plano de deformação, implicam algumas simplificações, tais como o efeito de arco. Esse efeito em paredes com uma largura pequena tem bastante influência, provocando uma grande discrepância entre os dois modelos. Terzaghi, (1943), designou o efeito de arco como:

“Quando uma parte da estrutura que suporta uma dada massa de solo se afasta desta, mantendo-se a restante na posição inicial, o solo adjacente à primeira tende a acompanhá-la. Ao movimento relativo no interior do solo opõe-se a resistência ao corte na zona de contacto da massa, que tende a deslocar-se da remanescente, tentando manter a primeira na posição inicial. Por esse motivo, as pressões de terras diminuem na parte da estrutura de suporte que se afastou e aumentam nas que se mantiveram imóveis (ou que se deslocam menos, ou, até, que se deslocam contra o solo. É esta a transferência de tensões que se designa por ‘efeito de arco’”. Então o efeito de arco é uma tendência da estrutura para redistribuir as tensões, aumentando-as em zonas menos móveis e diminuindo-as em zonas mais deformáveis.

Os autores analisaram ainda os efeitos dos cantos, como representado no layout da Figura 2.11. Para tal, realizaram uma análise de momentos girando no eixo horizontal na secção 3 representada na Figura 2.11. Compararam ainda os momentos em torno do eixo vertical para as secções 1,4 e 6 representadas na Figura 2.12.

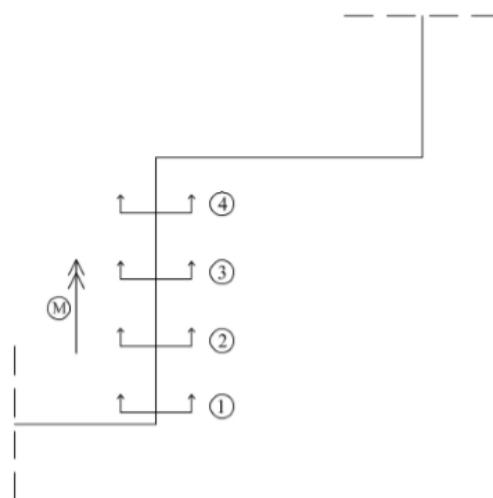


Figura 2.11-Secções verticais dos layouts de cantos (Szepesházi, et al., 2016)

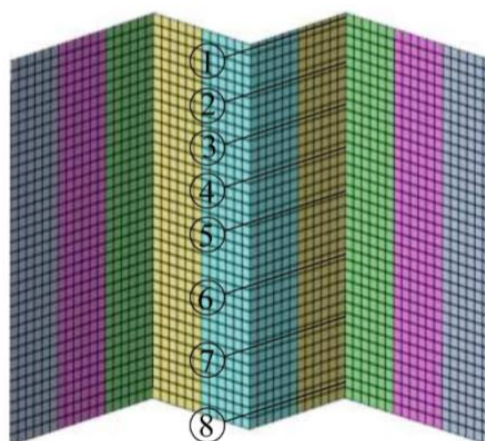


Figura 2.12-Secções horizontais dos layouts de cantos (Szepesházi, et al., 2016)

Os momentos no eixo horizontal na secção 3 da Figura 2.12 são apresentados na Figura 2.13, sendo que estes aumentam com o aumento dos ângulos dos cantos. Isto, deve-se ao facto de que com o aumento dos ângulos aumenta a massa de terra retida, o que provoca maiores momentos da cortina.

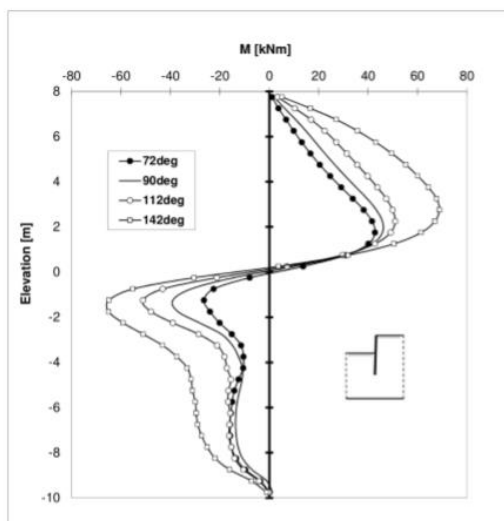


Figura 2.13-Momentos no eixo horizontal aplicados na secção 3 (Szepesházi, et al., 2016)

Na análise dos momentos em torno do eixo vertical na secção 4, como se encontra representado na Figura 2.14, verifica-se um grande aumento do momento junto aos cantos da cortina, sendo que ângulos menores geram momentos de sentido inverso.

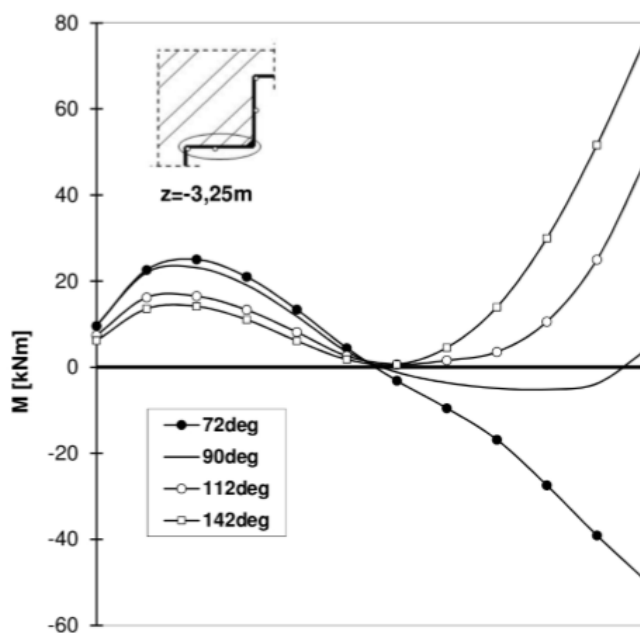


Figura 2.14-Momentos em torno do eixo vertical na secção 4 (Szepesházi, et al., 2016)

Os autores analisaram os momentos em torno do eixo vertical, na aresta do canto, para cada um dos ângulos estudados. Perceberam que quanto menor é o ângulo, mais o diagrama de momento se desloca para a zona negativa, como se verifica na Figura 2.15

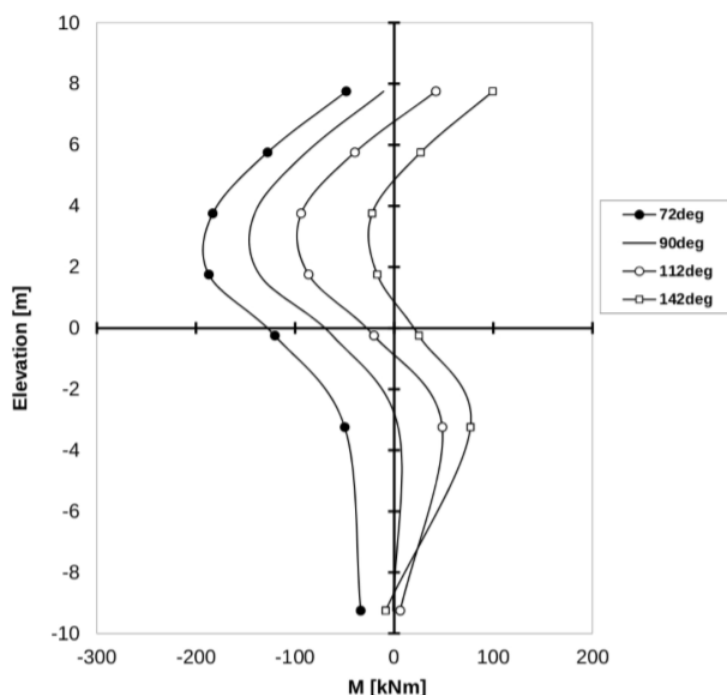


Figura 2.15-Momentos em torno do eixo vertical na aresta de canto (Szepesházi, A. et al., 2016)

Em suma, os autores concluíram que os momentos em torno do eixo horizontal são menores no modelo 3D, quando comparados com o modelo 2D. Retiveram ainda que os momentos em torno do eixo vertical perto dos cantos são uma zona crítica, podendo ser estes os momentos condicionantes de projeto. Referem ainda a importância de usar modelos 3D no dimensionamento de estruturas, uma vez que os modelos 2D são bastante limitados.

2.4. Caso da Estação de Metro de Bağcilar - Istanbul

Ustaoğlu, A. (2015) desenvolveu um estudo da escavação da estação de metro de Bağcilar, pertencente à linha de metro ligeiro de Istanbul, onde apresenta uma análise comparativa dos resultados obtidos por cálculos bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) com os registos dos deslocamentos medidos na periferia da escavação através de inclinómetros. O maciço onde foi efetuada a escavação é predominantemente argilo-siltoso, com o nível freático localizado aproximadamente à profundidade de 10 m. A escavação da estação tem dimensões em planta de 132 m de comprimento e 31 m de largura, sendo a profundidade máxima de 54 m. O processo construtivo adotado foi do tipo “top-down”, atendendo à necessidade de manter a circulação do tráfego na superfície. A construção foi iniciada pela construção de paredes moldadas para a contenção periférica, com espessura de 1,5 m e encastradas a uma profundidade de 8 m, seguida

pela construção da laje de topo apoiada em colunas compósitas de aço-betão, encastradas até uma profundidade de 18 m abaixo do fundo da escavação. A construção foi feita sequencialmente com a colocação de escoras e a construção das lajes dos pisos intermédios até ao nível de cada escavação, havendo 8 níveis de lajes incluindo a laje de fundo. Na Figura 2.16 estão representadas a planta da escavação e a localização dos 3 inclinómetros utilizados na medição das deformações do maciço, assim como as plantas dos edifícios envolventes.

Os cálculos numéricos 2D e 3D foram desenvolvidos com recurso aos programas PLAXIS 2D e PLAXIS 3D, respetivamente. Para o efeito foram utilizados modelos de elementos finitos com geometrias e faseamentos compatíveis com a obra de escavação executada, sendo igualmente consideradas as cargas transmitidas na superfície. Foram utilizados 3 modelos 2D, correspondentes às secções transversais que incluem os inclinómetros, com o cálculo a ser efetuado assumindo o estado plano de deformação. Figura 2.17 apresenta-se, a título exemplificativo, um desses modelos. Quanto ao modelo 3D, conforme representado na Figura 2.18, foi considerada a totalidade do modelo face à impossibilidade de se assumir a simplificação do modelo, através da consideração de qualquer plano de simetria, devido à localização assimétrica dos edifícios (ver Figura 2.19). Para a modelação do maciço foi utilizado o modelo Hardening-Soil, cujas principais propriedades de resistência e de deformabilidade se encontram no Quadro 2.1.



Figura 2.16- Planta de localização da escavação e dos inclinómetros (Ustaoğlu, 2015)

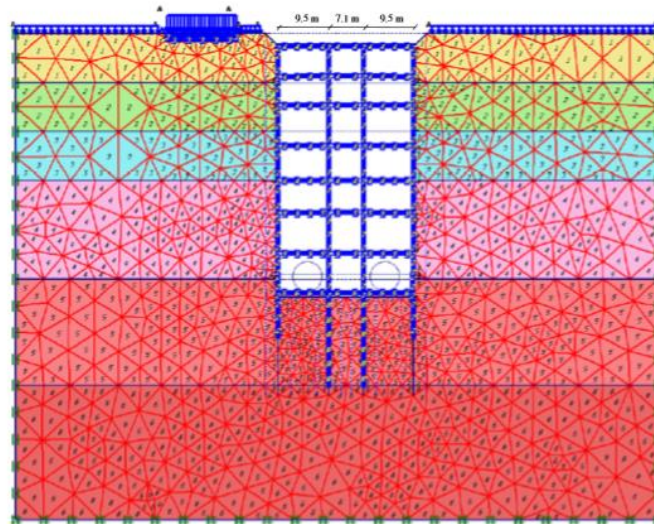


Figura 2.17 - Modelo 2D da estação de metro de Bağcilar (Ustaoğlu, 2015)

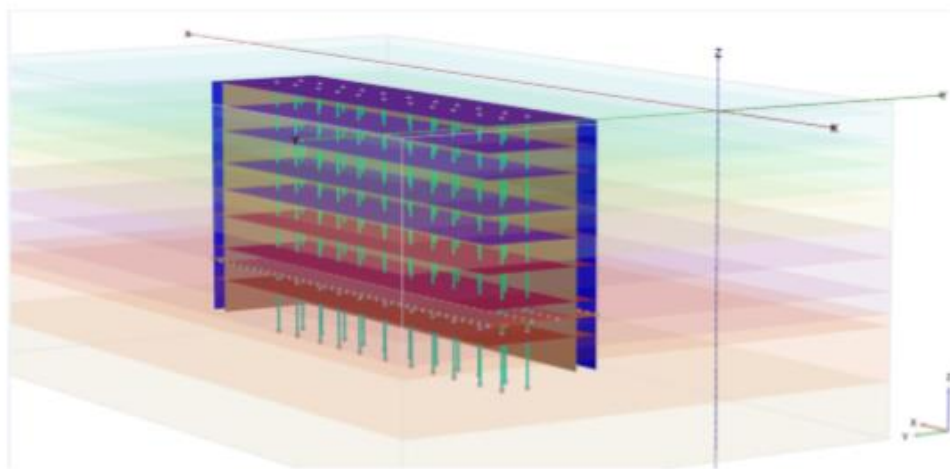


Figura 2.18 - Modelo 3D estação de metro de Bağcilar (Ustaoğlu, 2015)

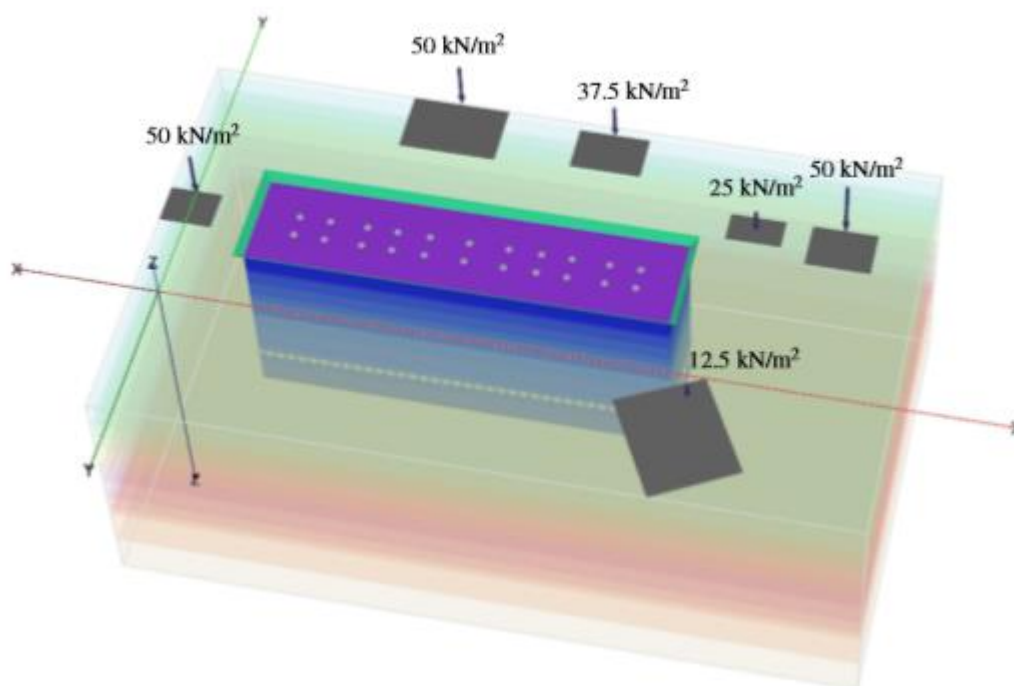


Figura 2.19 – Cargas dos edifícios no modelo 3D (Ustaoğlu, 2015)

Quadro 2.1 - Parâmetros do maciço

Tipo de solo	γ (kN/m ³)	Profundidade	c' (kPa)	ϕ' (°)	E' (MPa)
Argila siltosa	20	0-10 m	15	26	40
Argila siltosa	20	10-20 m	25	26	64
Argila siltosa	20	20-30 m	35	26	74
Argila siltosa	20	30-50 m	50	26	96
Argila siltosa	20	>50 m	50	26	128

No Quadro 2.2 estão representados os valores máximos dos deslocamentos na direção transversal à cortina, para 10 fases de cálculo. Verifica-se em todos os casos uma boa concordância entre os resultados medidos nos inclinómetros e os calculados pela análise 3D, sendo esta aproximação mais evidente para os Inclinómetros 1 e 3. Em relação às análises 2D, como seria expectável por assumirem um estado plano de deformação, os resultados são muito semelhantes entre si. Contudo, em todos os casos os valores obtidos nos cálculos 2D são significativamente superiores aos dos cálculos 3D e dos medidos nos inclinómetros. Se tal é compreensível para o caso do Inclinómetro 1 em que no cálculo 2D não é considerado o travamento conferido pelas cortinas na direção transversal, já nos Inclinómetros 2 e 3, dada a grande dimensão da cortina, seria de esperar uma maior aproximação entre os resultados.

Quadro 2.2 – Deslocamentos máximos da cortina

Fase	Deslocamento lateral máximo Inclinómetro 1 (m)			Deslocamento lateral máximo Inclinómetro 2 (m)			Deslocamento lateral máximo Inclinómetro 3 (m)		
	Leituras	3D	2D	Leituras	3D	2D	Leituras	3D	2D
1	0,004	0,001	0	0,004	0,001	0	0,006	0,001	0
2	0,003	0,002	0,001	0,003	0,002	0,001	0,007	0,003	0,001
3	0,003	0,005	0,005	0,004	0,005	0,004	0,007	0,005	0,005
4	0,005	0,009	0,014	0,005	0,01	0,013	0,01	0,01	0,014
5	0,008	0,009	0,02	0,005	0,01	0,2	0,009	0,011	0,02
6	0,006	0,009	0,028	0,009	0,01	0,027	0,013	0,011	0,028
7	0,006	0,011	0,038	0,009	0,013	0,038	0,013	0,014	0,039
8	0,007	0,012	0,039	0,012	0,013	0,039	0,014	0,015	0,04
9	0,011	0,012	0,05	0,016	0,013	0,049	0,013	0,015	0,05
10	0,012	0,012	0,05	0,017	0,013	0,05	0,015	0,015	0,051

O autor conclui então que os resultados dos modelos 3D devem ser usados com um fator de segurança devido á proximidade com os valores reais obtidos em campo. O autor refere ainda que os resultados de deslocamentos perto dos cantos são menores que no centro da escavação. No entanto os resultados na Fase 9 e 10 do inclinómetro 2 são maiores que no inclinómetro 3, o autor não faz qualquer referência à discrepância dos resultados.

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO CASO DE ESTUDO

3.1. Considerações iniciais

As modelações numéricas que se apresentam neste trabalho foram efetuadas com recurso aos programas de elementos finitos da Rocscience, RS2 v9.0, para análises 2D, e o programa também da Rocscience RS3 v2.0, para análises 3D. Estes programas permitem efetuar cálculos elastoplásticos de elementos finitos considerando diversas condições de carregamento, ou de solicitações, e utilizando diferentes modelos reológicos para o comportamento dos materiais geotécnicos, assim como tipos de elementos específicos para a modelação de elementos estruturais.

Este capítulo inicia-se com uma descrição muito sumarizada da obra que serviu de base para as modelações numéricas, tendo-se utilizado, de forma aproximada, as mesmas características geométricas da escavação e algumas características do suporte com algumas adaptações. Seguidamente é apresentada uma parametrização dos modelos de Duncan-Chang e de Mohr-Coulomb para os materiais geotécnicos a considerar nos cálculos. É feita, igualmente, uma descrição dos procedimentos seguidos no faseamento com a aplicação destes modelos. Por fim, faz-se uma descrição dos modelos de elementos finitos que serviram para os cálculos cujos resultados se apresentam no capítulo seguinte.

3.2. Descrição do caso de estudo

A escavação a analisar neste trabalho tem como referência algumas das características das obras de escavação e contenção da Estação da Encarnação, situada em Moscavide, Lisboa, pertencente à Linha Vermelha do Metro de Lisboa e que liga a Estação de S. Sebastião ao Aeroporto Humberto Delgado. Esta escavação tem uma área total em planta de 2800 m², em forma de cruz e com uma profundidade variável que atinge um valor máximo de 35 m. Na Figura 3.1 é possível ver a configuração em planta da totalidade da escavação e as ancoragens e escoras que servem de apoio às cortinas de contenção. Nesta figura está também assinalada a zona que serve de referência para as análises numéricas, localizada no topo Nordeste da escavação.

Nas sondagens realizadas no local da construção da estação da encarnação foram identificados dois tipos de solo: Arenitos dos Grilos e Argila de Xabregas. Foi também encontrado o nível

freático aproximadamente a meia altura da escavação, com este a localizar-se a cerca de 15 m de profundidade na zona de referência para o estudo.

Para a construção da estação foi usado o método *Top Down e Bottom up* com a construção de diversos níveis de lajes que servem de travamento das paredes contenção. Para além destas e da laje de fundo, que serve de ensoleiramento, foi ainda construída uma laje superior de cobertura com inclinação ajustada à morfologia do terreno. A solução adotada para a contenção periférica foi materializada por cortinas de estacas moldadas em betão da classe C30/37 e reforçadas com armadura de aço da classe A500NR, tendo sido executadas com trado curto. As estacas têm 0,8 m de diâmetro e afastamento entre eixos de 1,2 m, em que a profundidade enterrada tem um comprimento mínimo de 5 m na zona sob análise.

Nesta escavação os apoios das cortinas são materializados por ancoragens, escoras e bandas de laje que no final foram incorporadas pelas lajes definitivas da estação. Na secção em estudo existem 7 níveis de ancoragens, constituídas por 7 cordões de 0,6” de diâmetro em aço Y1860. O primeiro nível de ancoragens situa-se a uma profundidade de 2 m e os restantes com espaçamento de 4 m e de 2,4m nas direções vertical e horizontal, respetivamente. Relativamente às escoras de canto, estas foram aplicadas em 7 níveis, sendo constituídas por perfis metálicos do tipo SHS com dimensões 500×500×20, 625×625×20 e 750×759×24, em aço S535.

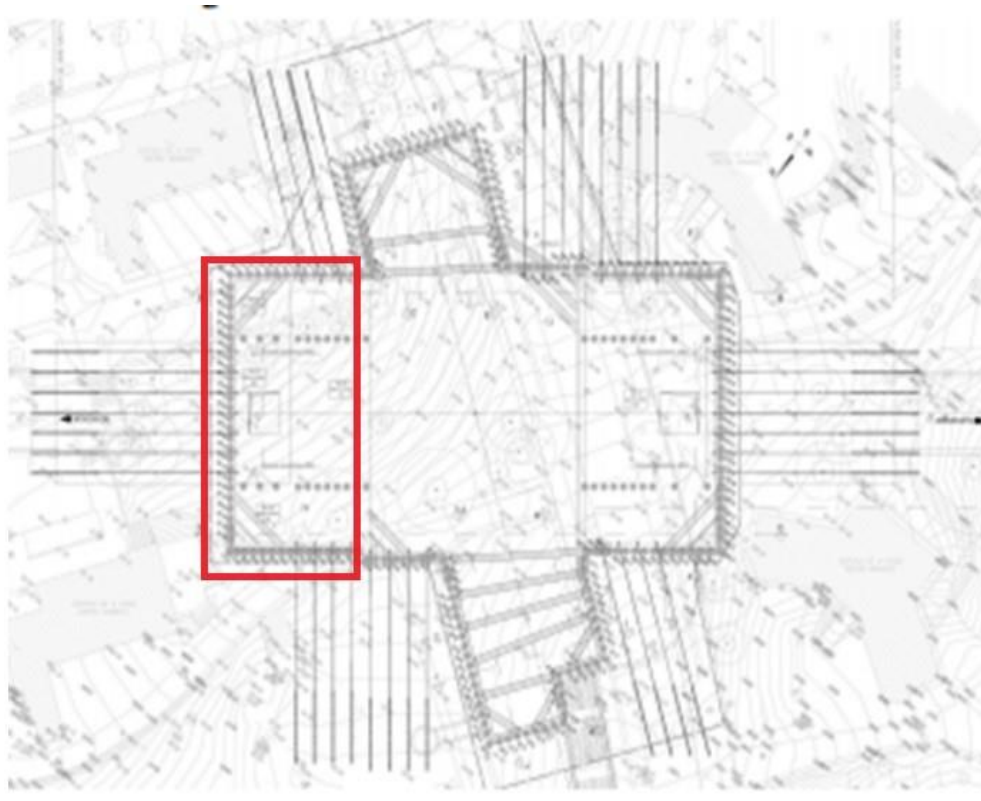


Figura 3.1 - Secção em estudo da estação da Encarnação

3.3. Modelos constitutivos para os materiais geotécnicos

3.3.1. Modelo de Mohr-Coulomb

O modelo de Mohr-Coulomb (M-C), disponível nos programas comerciais da Rocscience, associa o comportamento elástico perfeitamente plástico do material ao critério de rotura de Mohr-Coulomb. Este modelo é bastante usado em projetos geotécnicos, dada a sua simplicidade e rapidez de cálculo, sendo muitas vezes aplicado como uma primeira aproximação para o comportamento do solo. Outra vantagem é que se baseia em parâmetros com significado concreto e do conhecimento geral da engenharia. Este modelo considera um comportamento elástico linear até se atingir a cedência, seguindo-se um comportamento perfeitamente plástico. A cedência é definida pelo critério de rotura de Mohr-Coulomb pela Eq. 1, em que c representa a coesão do material e φ o ângulo de resistência ao corte:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_c = 2c * \cos\varphi + (\sigma_1 + \sigma_3)_c * \sin\varphi \quad (1)$$

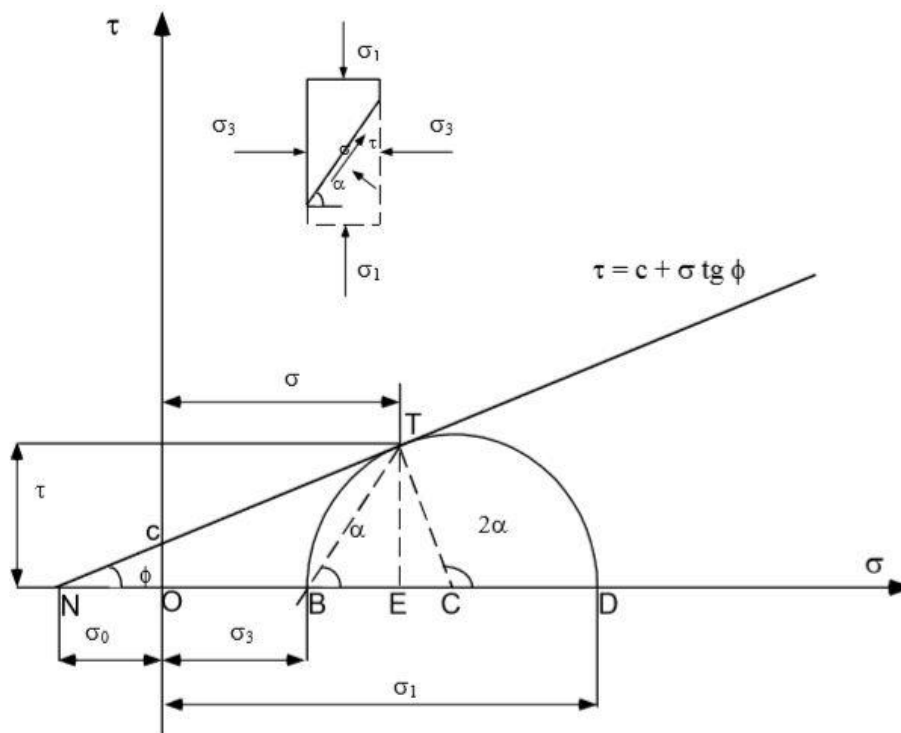


Figura 3.2 - Envoltório de rotura de Mohr-coulomb (Manual Plaxis)

A fase elástica do modelo tem por base a Lei de Hooke, onde existe proporcionalidade na relação tensão-deformação através do módulo de deformabilidade, E.

$$\sigma = \varepsilon * E \tag{2}$$

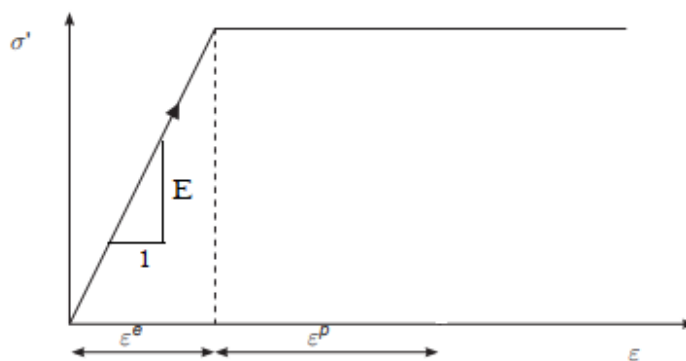


Figura 3.3 - Comportamento do solo no modelo Mohr-Coulomb (Manual Plaxis)

No comportamento perfeitamente plástico a rigidez é nula, pelo que existe a geração de deformações plásticas sem acréscimo de tensão. Portanto, no modelo M-C existem dois tipos

de deformações: deformações elásticas, completamente recuperáveis, e deformações plásticas não recuperáveis, como se verifica na Figura 3.3.

A quantificação do valor de E deve ter em consideração a deformação a que o material está sujeito, sendo que em casos de deformações muito pequenas pode usar-se o valor tangente inicial E_0 e para maiores valores dessas deformações valores menores do módulo de deformabilidade, geralmente associados a uma percentagem da resistência máxima mobilizável. Na parametrização dos modelos a utilizar neste trabalho irá ser usado o valor de E_{80} , definido pela inclinação da reta secante à curva tensão-deformação correspondente ao valor de 80% da carga de rotura.

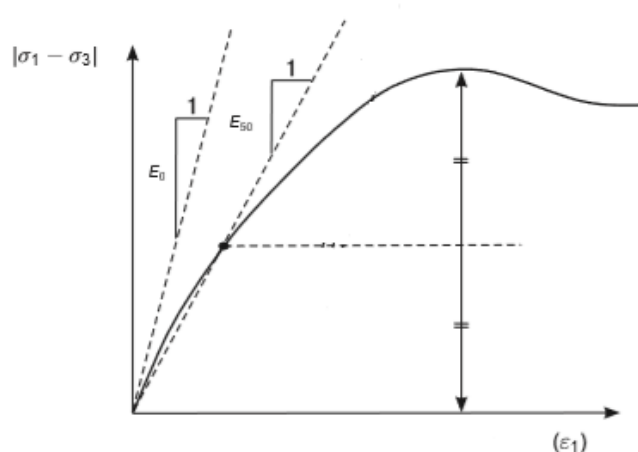


Figura 3.4 - Curva tensão-deformação de um solo (Manual Plaxis)

A deformação volumétrica da amostra é definida pelo coeficiente de Poisson, (ν), e pela dilatância (ψ) quando se está na presença de solos densos.

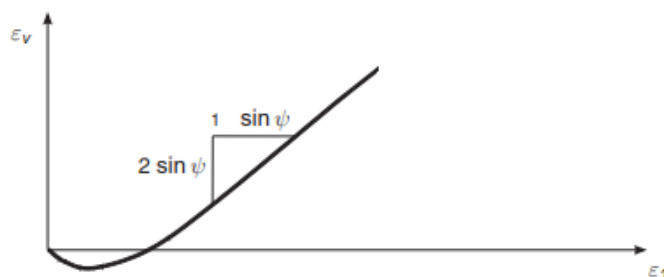


Figura 3.5 – Variação da deformação volumétrica com extensão axial (Manual Plaxis)

3.3.2. Modelo hiperbólico de Duncan-Chang

O modelo de Duncan e Chang (1970) (D-C) assume uma relação tensão-deformação hiperbólica, tendo sido desenvolvido a partir de resultados de ensaios triaxiais. Neste modelo o material é considerado elastoplástico desde o início do carregamento, podendo ser ajustado ao comportamento real do solo através dos parâmetros de resistência e de deformabilidade. A cedência do material é definida pelo critério de rotura de Mohr-Coulomb.

O módulo de deformabilidade inicial no modelo D-C é calculado a partir da tensão de confinamento aplicado no solo, pela seguinte expressão:

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

sendo K um parâmetro adimensional, p_a a pressão atmosférica e σ_3 tensão principal mínima.

O módulo tangente é definido pela expressão:

$$E_t = (1 - R_f S)^2 E_i \quad (4)$$

sendo R_f a razão entre a assintota da curva hiperbólica e a tensão de cedência, e S é a fração da resistência mobilizada, definida por:

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_{1f} - \sigma_{3f})} \quad (5)$$

Quando o modelo está em descarga ou recarga, ou seja, quando $\sigma_1 - \sigma_3$ for menor que o valor máximo atingido anteriormente, é usado o módulo de deformabilidade de recarga e descarga, E_{ur} .

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (6)$$

Na Figura 3.6 encontra-se representado o modelo Duncan-Chang, onde se pode observar que o módulo de deformabilidade tangente, E_t , é variável até se atingir a rotura. Por sua vez, nas fases descarga/recarga o valor do módulo, E_{ur} , é sempre constante. Nesta figura é ainda visível o valor do módulo de deformabilidade secante, E_{50} , correspondente a um valor de 50% da carga de rotura.

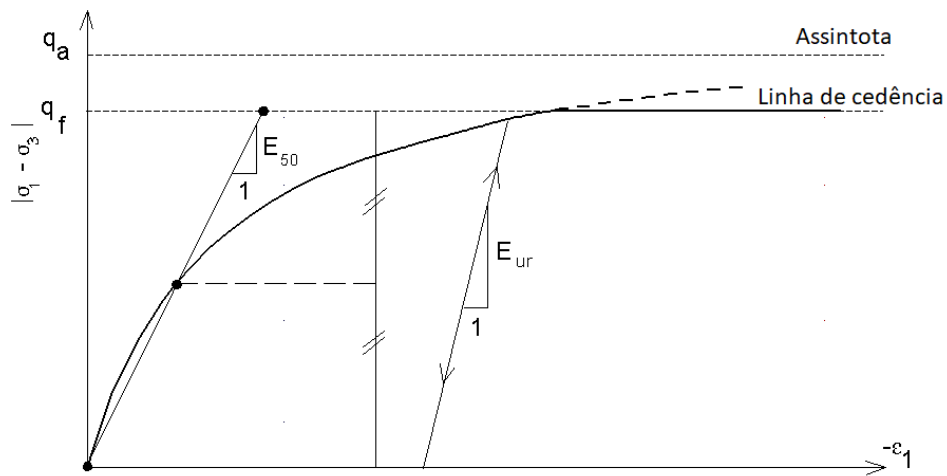


Figura 3.6 - Modelo Duncan-Chang

3.4. Parametrização de modelos

Foram então realizadas simulações de ensaio triaxiais no programa RS2, com o modelo axi simétrico, com aplicação de deslocamentos, (Figura 3.7), com o objetivo de validar os resultados obtidos a partir dos modelos da escavação. As dimensões do provete são 10cm de altura por 2.5cm de largura. Foram então simulados 5 ensaios relativos a cada uma das camadas de solo existentes nos modelos de escavação comparando os resultados obtidos a partir do software com os resultados calculados analiticamente. Foi então aplicado um incremento de deslocamentos no topo do provete triaxial, sendo que era aplicado um deslocamento de 0.05 em cada fase, até o valor máximo de 1mm.

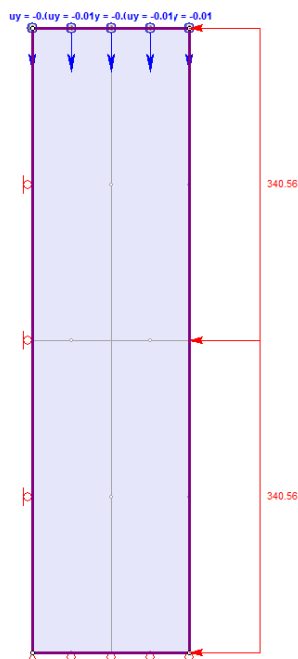


Figura 3.7-Modelo triaxial RS2

No quadro abaixo é possível verificar os parâmetros utilizados no cálculo em cada uma das camadas. O módulo de Young foi calculado a partir da reta tangente a 80% da carga crítica existente no modelo Duncan-Chang, (Quadro 3.3

Quadro 3.1 e Quadro 3.2). Os parâmetros do modelo Mohr-Coulomb podem ser verificados no Quadro 3.3

Quadro 3.1- Características das camadas de solo consideradas nas modelações 2D e 3D

Material	γ (kN/m ³)	Espessura (m)	Prof. do ponto médio (m)	K_0	ν	σ_3 (kPa)
Camada 1	18	10	5	0.44	0.3	39.6
Camada 2	18	10	15	0.44	0.3	118.8
Camada 3	18	10	25	0.44	0.3	198
Camada 4	18	10	35	0.44	0.3	277.2
Camada 5	18	6	43	0.44	0.3	340.6

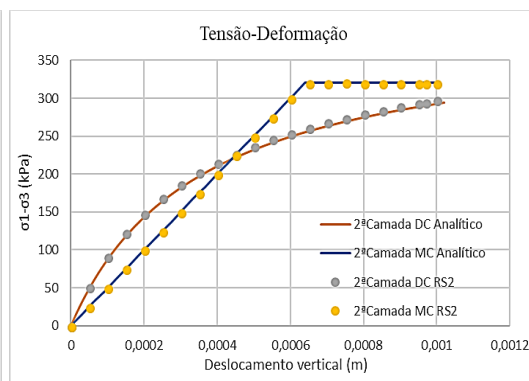
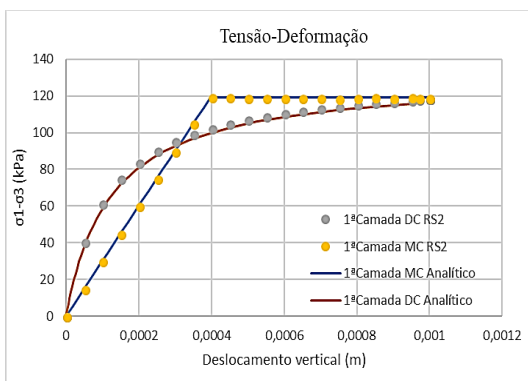
Quadro 3.2-Parametrização do modelo Duncan-Chang

Material	ϕ (°)	c' (kPa)	K_e	n	K_u	R_f
Camada 1	34	5	1120	0.05	1120	0.9
Camada 2	34	5	1120	0.05	1120	0.8

Camada 3	34	5	1120	0.6	1120	0.75
Camada 4	34	5	1120	0.6	1120	0.6
Camada 5	34	5	1120	0.5	1120	0.5

Quadro 3.3-Parâmetros dos modelos de Mohr Coulomb

Camada	c' (kPa)	Profundidade(m)	φ' (°)	E'(Mpa)	σ_3 (kPa)
1	5	5	34	30	39.6
2	5	15	34	50	118.8
3	5	25	34	70	198
4	5	35	34	90	277.2
5	5	43.5	34	110	340.56



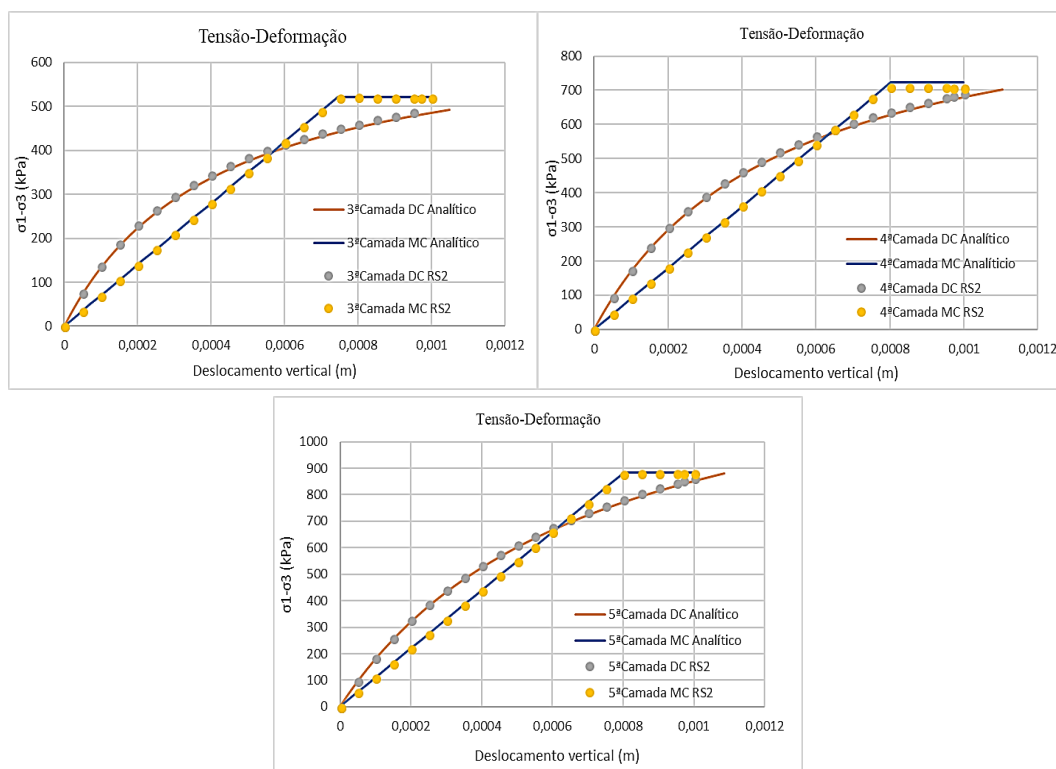


Figura 3.8-Gráficos de tensão-deformação para cada uma das camadas

Como se verifica na Figura 3.8 os resultados estão perfeitos e em concordância com os resultados previamente obtidos. É possível verifica que o módulo de Young foi calculado com base em 80% da carga crítica do modelo Duncan-Chang. É possível verificar que assim que a carga crítica é atingida o modelo encontra-se na zona plástica.

3.5. Modelos constitutivos para os elementos estruturais

3.5.1. Cortina de Estacas

A cortina utilizada nas modelações numéricas foi considerada com comportamento elástico linear e com rigidez à flexão equivalente a uma cortina de estacas com 0,7 m de diâmetro e com espaçamento entre eixos de 1,0 m. A compatibilização da rigidez à flexão foi efetuada através da Eq. 7, resultando num elemento com desenvolvimento linear de 0,53 m de espessura. Para este elemento foi assumido um módulo de elasticidade para o betão, E, de 30 GPa. As propriedades da cortina estão resumidas no Quadro 3.4.

$$I_{\text{retângulo}} = I_{\text{circunferência}} \equiv \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{\pi \cdot r^4}{4} \quad (7)$$

Quadro 3.4- Parâmetros da cortina

Espessura (m)	E (kPa)	v
0.5354	30000000	0.2

Como o programa RS3 não permite a consideração de elementos de interface, foi assumido na modelação 2D que este tipo de elementos existente no contacto entre a cortina e o solo têm um coeficiente de interface de 1,0. Este coeficiente relaciona a resistência ao corte da interface com a resistência ao corte dos materiais adjacentes.

3.5.2. Ancoragens

As ancoragens são os outros elementos estruturais existentes nos modelos, sendo a estes aplicado um pré-esforço de forma a minimizar e atenuar os deslocamentos sofridos pela cortina de contenção. Para as modelações 2D e 3D foram considerados 7 níveis de ancoragens, sendo o primeiro a 2 metros da superfície e os restantes espaçados de 4 metros.

Foi realizado um pré-dimensionamento das ancoragens a ser aplicado nos modelos pelo método tradicional, sendo esse pré-dimensionamento necessário para saber o esforço a que as cortinas iriam estar sujeitas bem como o pré-esforço a aplicar. Em primeira instância foi realizado o cálculo das pressões de terra atuantes na cortina, onde foram usados os procedimentos de cálculo de Terzaghi e Peck (1967). Sendo que estes referiram que para um solo arenoso o diagrama de pressões poderia ser considerado constante com valor calculado pela expressão:

$$p = 0.65K_a\gamma H \quad (8)$$

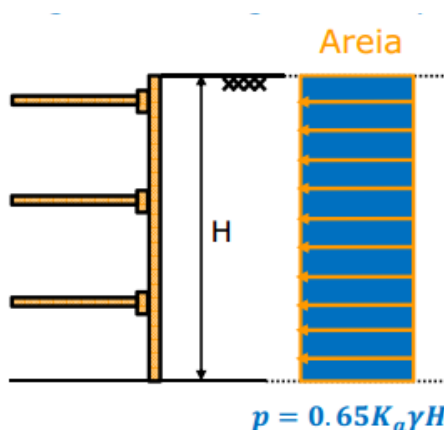


Figura 3.9-Diagrama de pressões aparentes Terzaghi Peck (Almeida e Sousa e Pedro, 2017)

Em seguida foram calculadas as áreas de influência correspondente a cada uma das ancoragens. O tipo de aço utilizado nas ancoragens foi St 1670/1860, sendo que o diâmetro de cordão usado foi 0,62”, com uma área de 150 mm². A resistência de cada cordão pode ser calculada pela expressão:

$$T_{t0,1k} = A \cdot f_{t0,1k} \quad (9)$$

Sendo A a área de cada cordão e $f_{t0,1k}$ a resistência à tracção do aço para 0,1% da sua deformação. Em seguida é calculada a tensão admissível na ancoragem, sendo que as ancoragens são de carácter provisório, sendo Y_r o coeficiente de segurança de 1,35. São constituídas por 8 cordões no primeiro nível de ancoragens e por 7 cordões nos restantes níveis.

$$T_l = \frac{T_{t0,1k} \cdot n}{Y_r} \quad (10)$$

A tensão admissível no 1º nível de ancoragens é de 1484kN e 1298kN nas restantes. Finalizado o dimensionamento interno dos cordões é necessário dimensionar o bolbo de selagem pelo método proposto por Bustamente e Doix (1985)

$$T_r = \tau \cdot \pi \cdot D_s \cdot L_s \quad (11)$$

Sendo que τ é o atrito lateral limite unitário, D_s é o diâmetro do bolbo de selagem e L_s é o comprimento do bolbo de selagem. A esta resistência é aplicada o fator de segurança que varia conforme a ancoragem seja de carácter provisório ou definitivo. O atrito lateral considerado no bolbo de selagem tem o valor de 200 kPa, sendo esse um valor assumido por falta de informação do tipo de solo. A tensão admissível no 1º nível de ancoragens para o bolbo de selagem é de 1518kN e de 1138kN para os restantes níveis de ancoragens.

No entanto no fim de realizado o pré-dimensionamento das ancoragens é necessário perceber a distância necessária de comprimento livre de ancoragens para que o bolbo de selagem fique fora da cunha ativa de solo. A cunha ativa é definida pela imagem abaixo:

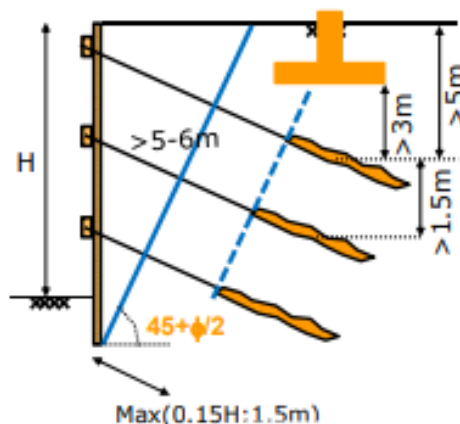


Figura 3.10-Colocação do bolbo de selagem (Almeida e Sousa e Pedro, 2017)

No Quadro 3.5 estão resumidas as principais propriedades das ancoragens utilizadas nas modelações 2D e 3D, tais como o espaçamento horizontal entre ancoragens, (S_h).

Quadro 3.5-Propriedades das ancoragens

Nível de ancoragens	Comprimento (m)	Comprimento Bolbo (m)	Tensão cedência (kN)	S_h (m)	Pré-esforço (kN)
1°	41.69	20	1484	2.4	600
2°	34.81	15	1299	2.4	600
3°	32.93	15	1299	2.4	600
4°	31.05	15	1299	2.4	600
5°	29.17	15	1299	2.4	600
6°	27.293	15	1299	2.4	600
7°	25.42	15	1299	2.4	600

3.6. Modelação do maciço e faseamento construtivo

Relativamente ao maciço, foram consideradas 5 camadas de solo, cujas propriedades para o modelo de M-C foram apresentadas no Quadro 3.3. Em relação ao modelo de D-C, verificou-se haver uma grande dificuldade em se obter a convergência devido às muito baixas tensões na camada superficial, às quais estão associados igualmente valores muito reduzidos dos módulos de deformabilidade. Por esse motivo foi necessário considerar uma camada superficial com 1,0 m de espessura constituída por um material com módulo de deformabilidade constante e igual a 10 MPa, designado como Solo 1 no Quadro 3.6. Pelo mesmo motivo, foi igualmente necessário substituir o material mais superficial da escavação por esse material com exceção do

último nível de escavação em que o material é substituído pelo Solo 7, com módulo de deformabilidade de 90MPa.

Quadro 3.6-Parâmetros de solo usados nos cálculos com o modelo de D-C

Material	Profundidade (m)	Ângulo de atrito	Coesão	Módulo de Young	Coefficiente de Poisson
Solo 1	0-1	34	5	1000	0.3
Solo 2	1-10	34	5	E_t	0.3
Solo 3	10-20	34	5	E_t	0.3
Solo 4	20-30	34	5	E_t	0.3
Solo 5	30-40	34	5	E_t	0.3
Solo 6	40-46	34	5	E_t	0.3
Solo 7	*	34	5	90000	0.3

Os faseamentos construtivos usados em ambos os modelos 2D e 3D começaram pela definição do estado de tensão inicial em repouso sem qualquer tipo de interferência, em seguida é colocada a contenção periférica, após a colocação da contenção inicia-se a escavação do primeiro nível e em seguida aplica-se o nível de ancoragens, e assim em diante. No Quadro 3.7 encontram-se detalhados os faseamentos utilizados para os modelos de M-C e de D-C, em que no caso deste último modelo existe o procedimento adicional de substituir a camada mais superficial da escavação por material correspondente ao Solo 1.

Quadro 3.7-Faseamento construtivo com o modelo de M-C

Fase	Descrição
1	Estado de tensão inicial
2	Aplicação da cortina
3	1ºNível de escavação (0-3m) (+ substituição por Solo 1 (3-6m) modelo D-C)
4	Aplicação do 1º Nível de Ancoragens (2m)
5	2ºNível de escavação (3-7m) (+ substituição por Solo 1 (7-10m) modelo D-C)
6	Aplicação do 2º Nível de Ancoragens (6m)
7	3ºNível de escavação (7-11m) (+ substituição por Solo 1 (12-15m) modelo D-C)
8	Aplicação do 3º Nível de Ancoragens (10m)
9	4ºNível de escavação (11-15m) (+ substituição por Solo 1 (16-17m) modelo D-C)
10	Aplicação do 4º Nível de Ancoragens (14m)
11	5ºNível de escavação (15-19m) (+ substituição por Solo 1 (19-21m) modelo D-C)
12	Aplicação do 5º Nível de Ancoragens (18m)
13	6ºNível de escavação (19-23m) (+ substituição por Solo 1 (23-26m) modelo D-C)
14	Aplicação do 6º Nível de Ancoragens (22m)

15	7ºNível de escavação (23-27m) (+ substituição por Solo 1 (27-30m) modelo D-C)
16	Aplicação do 7º Nível de Ancoragens (26m)
17	8ºNível de escavação (27-30m) (+ substituição por Solo 7 (30-36m) modelo D-C)

3.7. Modelação 2D

O presente estudo é caracterizado por uma secção da escavação de 30 metros de profundidade e 19.2 metros de largura. Os meios contínuos são compostos por elementos finitos do tipo triangulares, com 6 pontos nodais. A cortina foi modelada com elementos do tipo “Liner”, com as propriedades apresentadas no Quadro 3.4. Como referido anteriormente, foram utilizados elementos de junta entre a cortina e o solo com coeficiente de interface de 1,0. As ancoragens foram modeladas utilizando os elementos do tipo “Tieback”, com as propriedades apresentadas no Quadro 3.5

Na Figura 3.11 está representada a imagem do modelo com a malha de elementos finitos utilizada nestes cálculos. Este modelo tem no total uma largura de 80m e altura de 46m, com a fronteira lateral do lado da escavação e do lado do maciço afastadas da cortina de distâncias de 19,2m e de 60,8m, respetivamente. Em relação à fronteira inferior, esta localiza-se a uma profundidade de 9m em relação ao pé da cortina. As condições de fronteira consideradas são as impostas habitualmente neste tipo de análises, com restrição de deslocamentos horizontais nas fronteiras laterais e com restrição de deslocamentos nas duas direcções na fronteira da base.

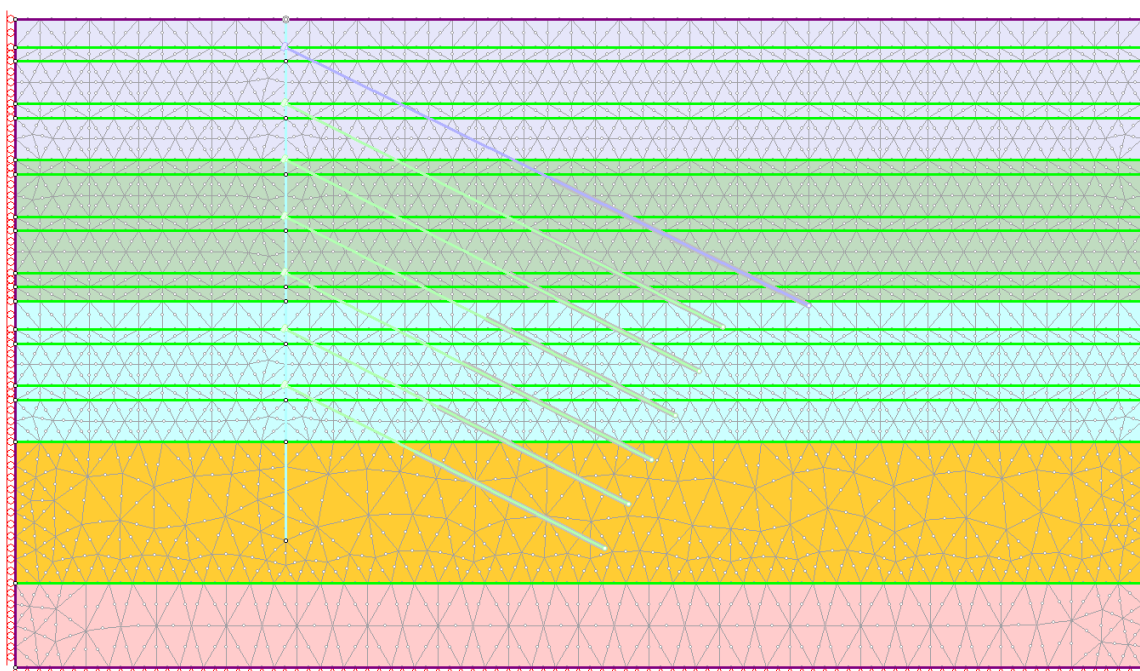


Figura 3.11-Modelo 2D no programa de cálculo RS2

3.8. Modelação 3D

Foram criados 2 modelos 3D distintos, em que num deles se pretendeu fazer uma análise próxima ao estado plano de deformação (EPD), portanto, sem as cortinas na direção transversal e considerando apenas um desenvolvimento longitudinal da cortina a analisar. Este modelo foi considerado com um desenvolvimento longitudinal de 80m e com uma escavação de largura 32,4m, sendo que a base da cortina está a 9 metros da ficha da cortina, e que o maciço tem uma profundidade de 46m. As fronteiras foram restringidas em todas as direções na base do modelo, sendo que as laterais foram restringidas perpendicularmente às suas faces. Os meios contínuos foram compostos por elementos tetraédricos de 4 nós sendo a malha definida por 212762 elementos.

No modelo 3D com as paredes laterais (PL), a escavação foi definida por um retângulo de 31.2 metros comprimento e 19.2 metros de largura, o maciço continua a ter 46m de profundidade. A malha tem um comprimento de 80m e uma largura de 131.2m. A malha é composta por elementos tetraédricos de 4 nós, sendo a malha composta por 673246 elementos.

Na elaboração do modelo 3D teve-se em conta a compatibilização de modelo 2D com o 3D, de maneira a que os resultados obtidos pudessem ser comparados de forma eficaz. As estacas foram modeladas aplicando igualmente elementos do tipo “Liner”, da mesma forma que foi aplicada no modelo 2D, no entanto no modelo 3D na versão inicial não era possível aplicar elementos junta, ficando apenas dependente do material como no modelo anterior. A contenção periférica foi colocada em forma de um retângulo sendo que tem uma largura de 19,2 m e um comprimento de 32,4 m. A profundidade de escavação continuou a ser 30 m sendo que a cortina tem 7 m de ficha, tal como no modelo 2D.

As ancoragens foram colocadas em 7 níveis diferentes, tal como o sucessivo no modelo 2D, o 1º nível de ancoragens situa-se a 2m de profundidade, e os restantes afastados 4 metros de profundidade. O espaçamento longitudinal entre as ancoragens são de 2.4m entre eles e afastadas dos cantos da cortina de 1.2m, sendo que as escoras de cantos propostas em projeto foram modeladas numericamente como uma ancoragem.

Os modelos de elementos finitos estão representados na Figura 3.12 e Figura 3.13 para o modelo 3D EPD e 3D PL, respetivamente.

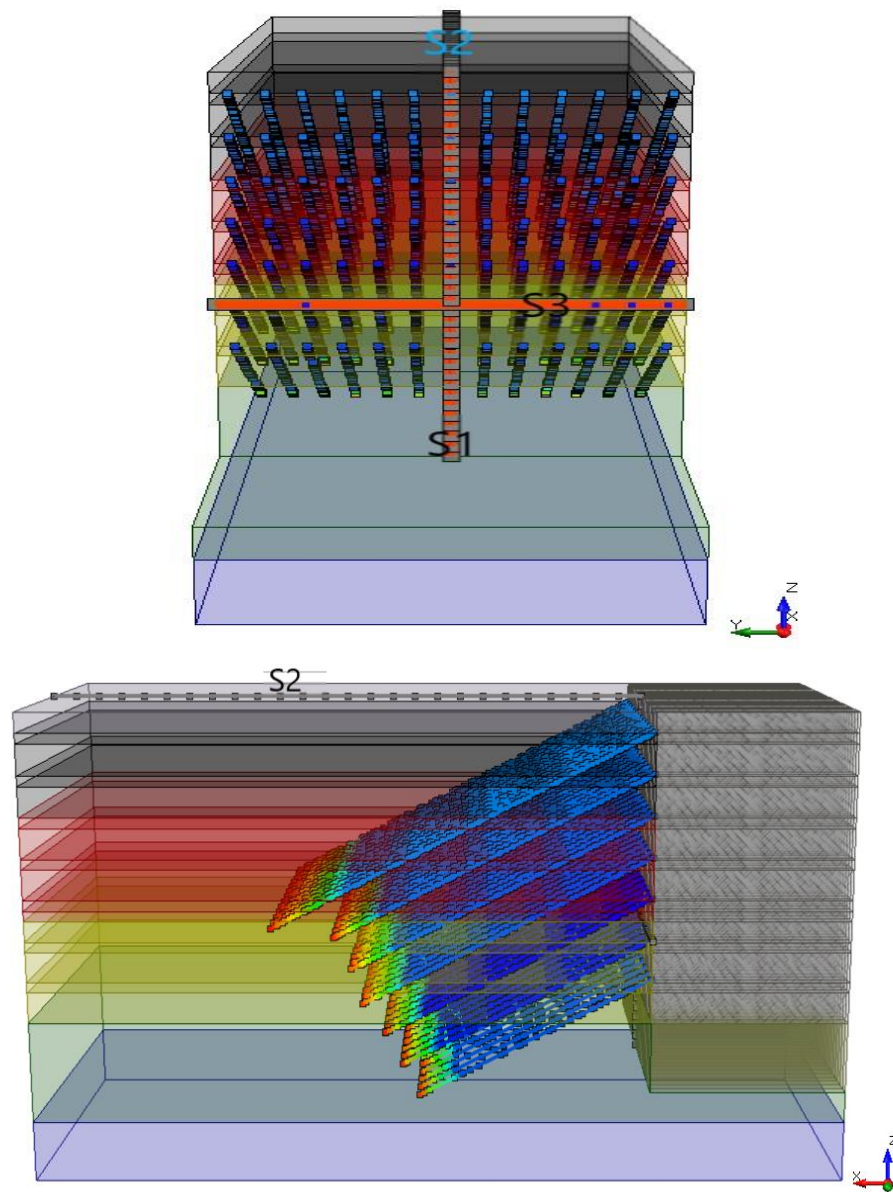


Figura 3.12-Modelo 3D estado plano deformação

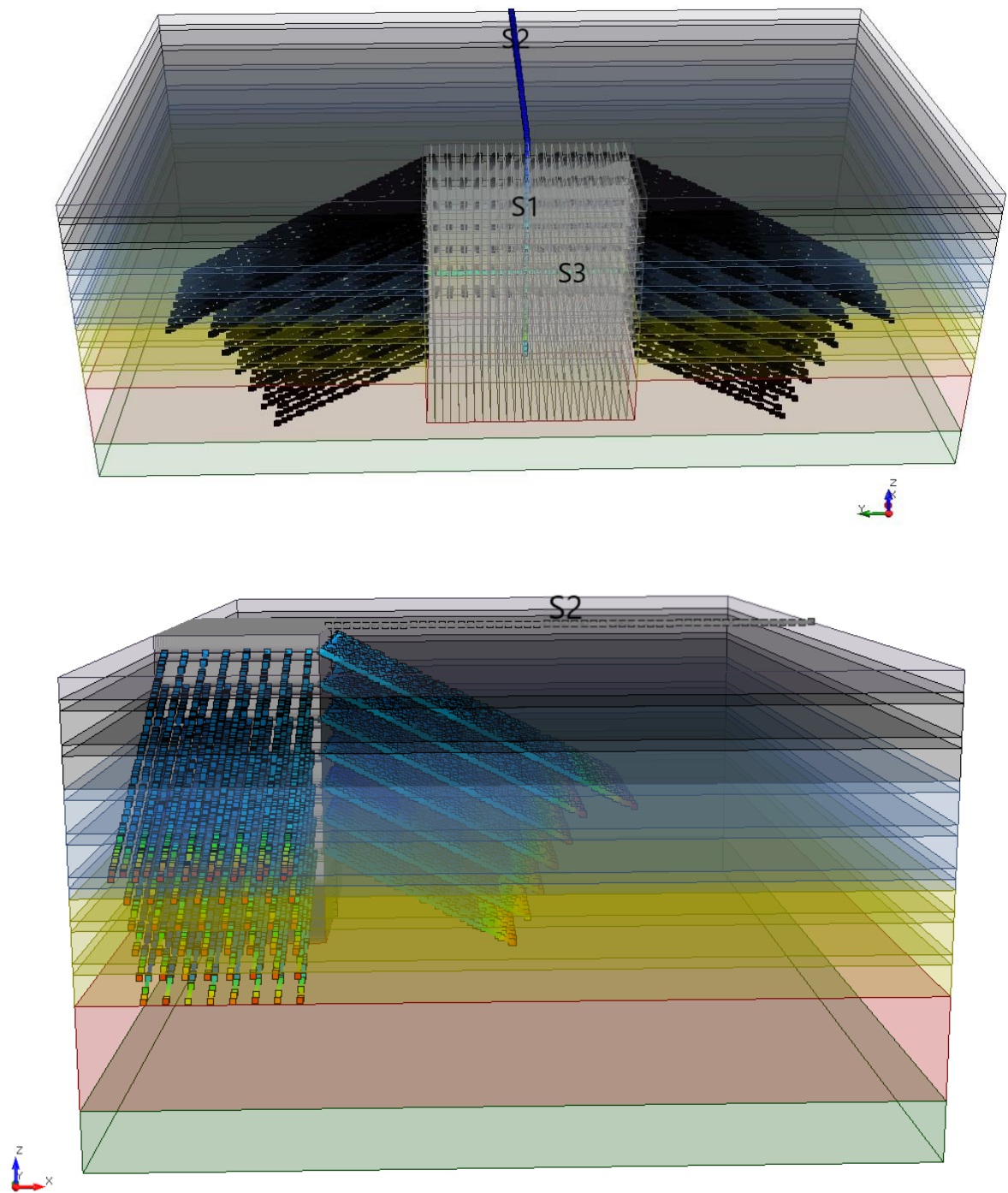


Figura 3.13-Modelo 3D paredes laterais

4. RESULTADOS DA MODELAÇÃO NUMÉRICA

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos pelas modelações numéricas com modelos 2D e 3D, para ambos os modelos de comportamento do solo de Mohr-Coulomb e de Duncan-Chang. Os resultados que se apresentam são os deslocamentos na cortina e na superfície do terreno, os diagramas de esforços na cortina, as envolventes dos esforços e as forças axiais nas ancoragens.

Inicialmente, na secção 4.2 são apresentados os resultados para o modelo 2D, sendo realizada uma comparação entre os dois modelos de Mohr-Coulomb e Duncan-Chang. Na secção 4.3 serão apresentados os resultados homólogos, mas referentes ao modelo 3D restringido pelas paredes laterais. Na secção 4.4 é realizada a comparação entre o modelo 2D e os modelos 3D para a situação com paredes laterais (PL) e em estado plano de deformação (EPD).

4.2. Resultados da modelação 2D

4.2.1. Condições iniciais

Realizado o cálculo numérico os resultados são analisados começando pela tensão efetiva inicial do modelo para uma verificação de confiança do modelo.

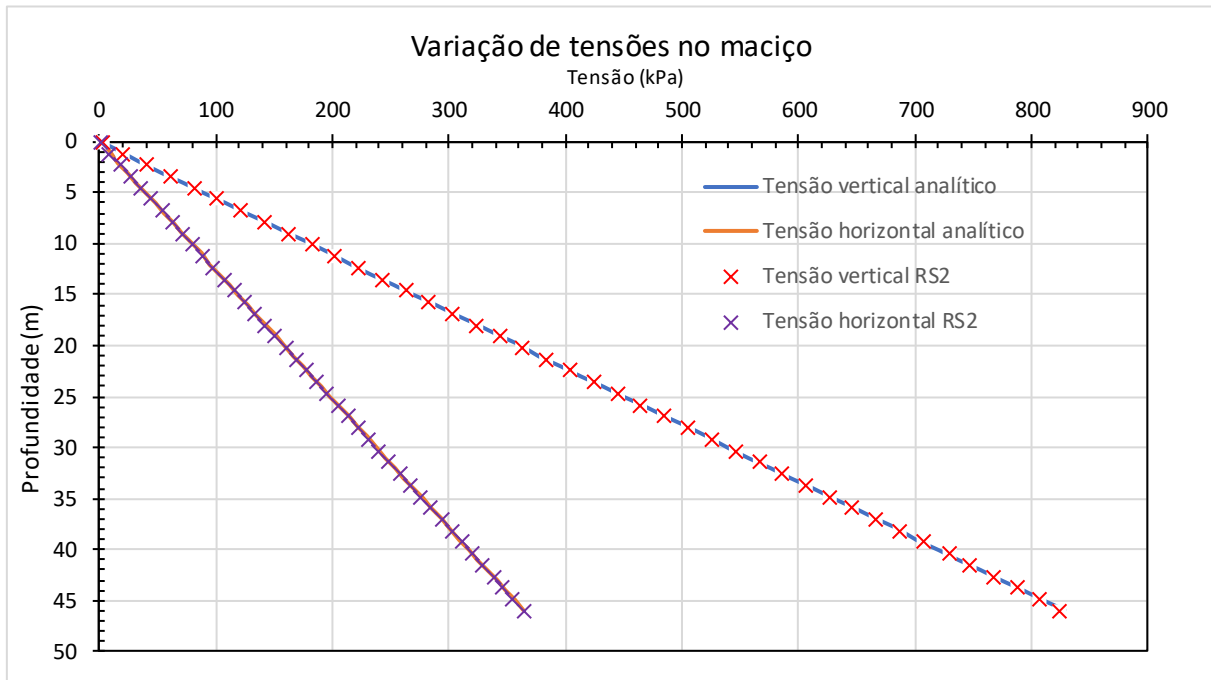


Figura 4.1 – Variação das tensões de repouso em profundidade

Verifica-se então um aumento da tensão efetiva em profundidade com o valor máximo atingido no fundo do maciço com valor de 828kPa, calculado analiticamente. No software RS2 a tensão efetiva é bastante semelhante ao calculado analiticamente, como se verifica na Figura 4.1, sendo que o valor máximo obtido na zona mais profunda do maciço é de 824kN. O valor da tensão horizontal é dependente do valor da tensão vertical sendo que o valor de $K_0=0.44$.

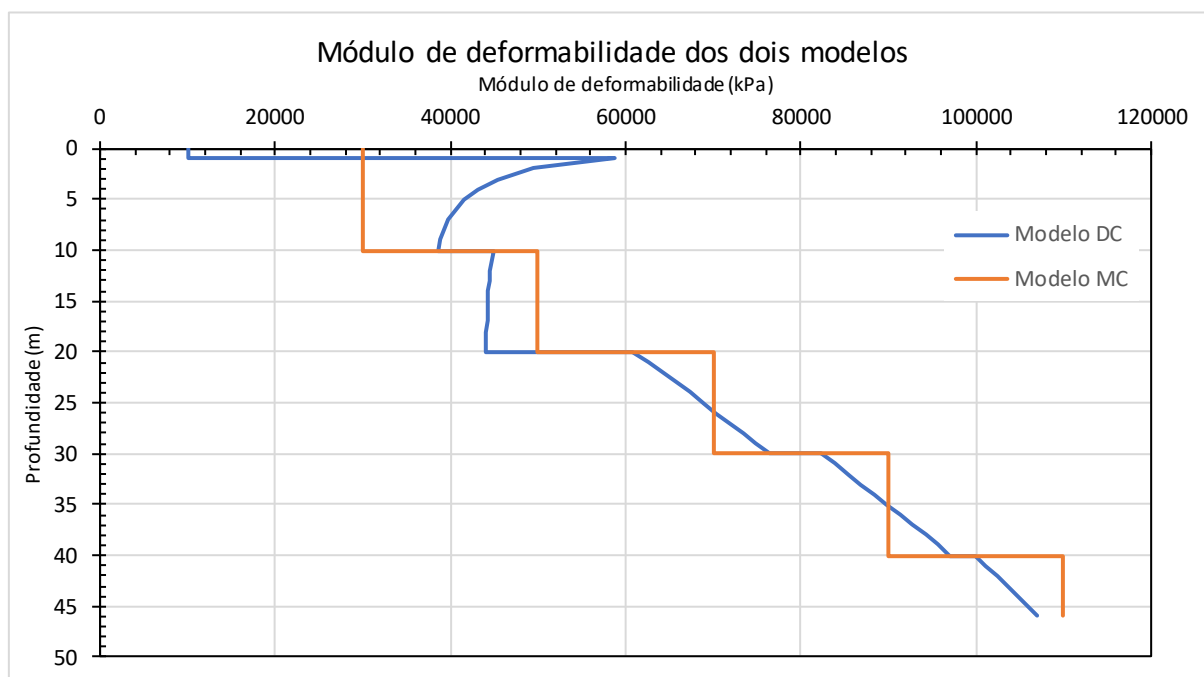


Figura 4.2 – Variação do módulo de deformabilidade do maciço em profundidade

A variação de módulo de deformabilidade em profundidade é diferente para os modelos de Mohr-Coulomb e de Duncan-Chang. Na Figura 4.2 é possível verificar que E é constante para o modelo Mohr-Coulomb sendo que varia de camada para camada. No modelo Duncan-Chang o módulo E varia em profundidade sendo que na camada 1 e 2 isso não acontece. A razão para que tal não acontece deve-se ao parâmetro n , do modelo Duncan-Chang ser bastante baixo. O parâmetro n define a dependência do módulo de elasticidade com a tensão efetiva horizontal. Como na camada 1 e 2 o valor de n é 0.05, acontece que não exista uma variação em profundidade, como nos restantes casos. Mais se verifica que no 1º metro da camada o módulo E é constante com 10MPa, essa foi a solução encontrada para que o modelo pudesse convergir.

4.2.2. Deslocamentos na cortina

Em seguida são analisados os deslocamentos da cortina com o avanço do faseamento construtivo. Para a apresentação dos resultados foram seleccionadas as fases 3,4,7,8,11,12,15,16 e 17, tendo-se evitado apresentar os resultados de todas as fases para não sobrecarregar as imagens. As fases escolhidas permitem avaliar o efeito do faseamento construtivo e avaliar também a influência da ativação das ancoragens.

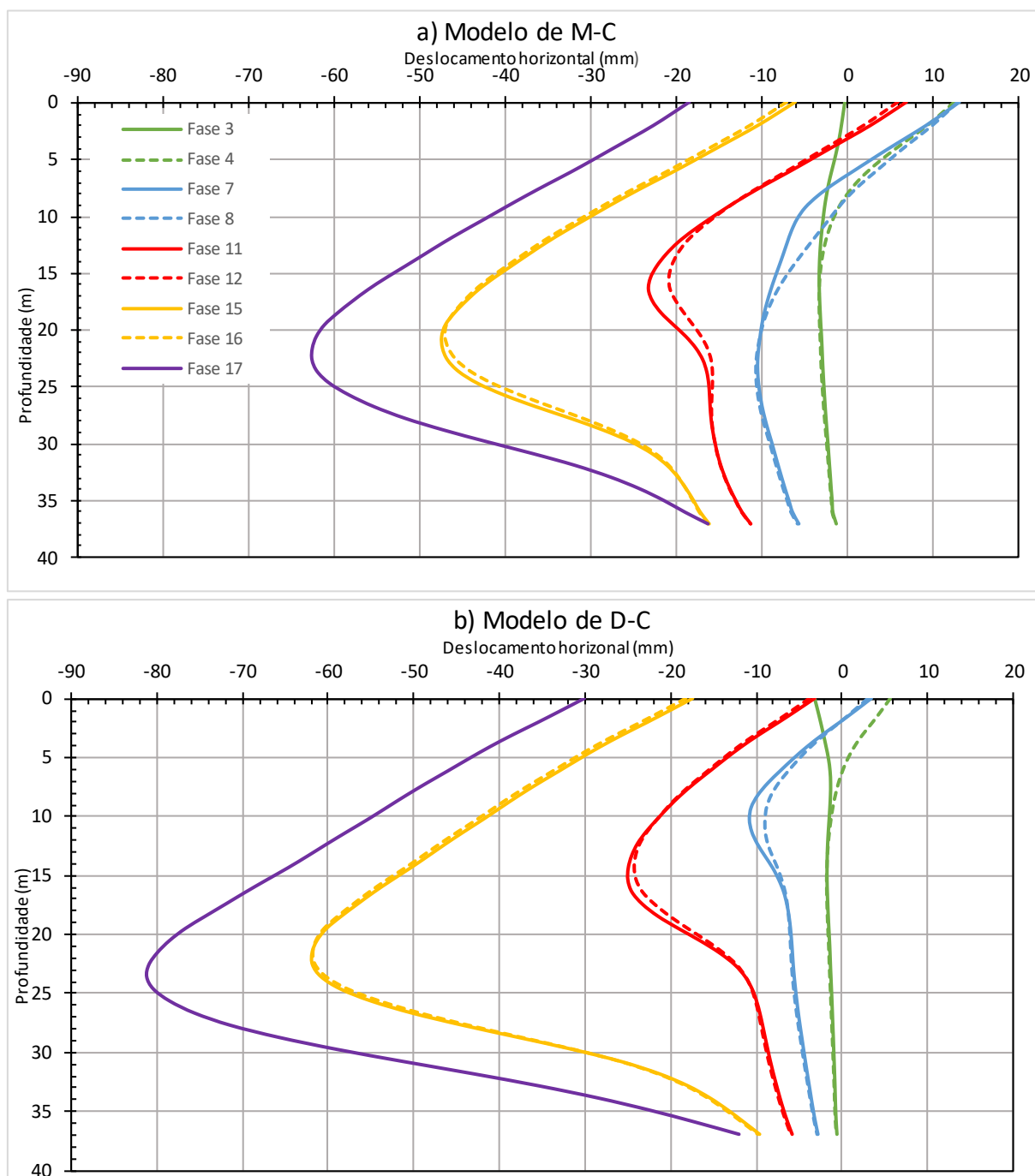


Figura 4.3 – Deslocamentos horizontais na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.3 são exibidos os deslocamentos na cortina ao longo do faseamento de escavação. Os modelos M-C e D-C apresentam um comportamento bastante semelhante. Na Figura 4.3 a) é possível verificar um comportamento da cortina junto à superfície com um avanço da cortina contra o terreno, esse comportamento é devido ao módulo de elasticidade de Mohr-Coulomb

que não tem em consideração o aumento de tensão devido às ancoragens. No modelo Duncan-Chang esse deslocamento na superfície não é tão significativo, uma vez que o modelo de comportamento do solo considera a tensão efetiva horizontal, o que o torna num solo mais rígido, não permitindo um deslocamento elevado como acontece no modelo M-C.

Verifica-se ainda que com o aumento da profundidade de escavação a localização do ponto com maiores deslocamentos tende a localizar-se mais abaixo da cortina, sendo que o valor máximo acontece na última fase de escavação aos 22m e 23m, no modelo M-C e D-C, respetivamente, apresentando os valores de 62mm e 91mm, respetivamente. A diferença destes valores está também relacionado com o valor de E dos dois modelos, sendo que no modelo D-C este valor é influenciado pela tensão efetiva horizontal, uma vez que esta sofre uma diminuição ao passar de estado de repouso para o estado ativo, ocorre a diminuição do valor de E, com um consequente aumento de deformações.

O deslocamento da ficha da cortina é semelhante em ambos os modelos sendo que o deslocamento máximo acontece na última fase, tendo valor de 16mm e 14mm, nos modelos M-C e DC, respetivamente. No topo da cortina as diferenças são bastante maiores, sendo que o maior avanço da cortina acontece na Fase 3, tomando valores de 12mm e 6mm, para os modelos M-C e D-C, respetivamente. Esse efeito é recuperado com o avanço do faseamento de escavação sendo que na última fase a cortina tem deslocamento para o lado da escavação de 20mm e 30mm, nos modelos M-C e D-C, respetivamente.

Os efeitos das ancoragens são bastante representativos nas Fases 4 e 8, sendo que nas últimas fases esses efeitos não são tão representativos, devendo-se ao facto de que todas as ancoragens apresentam o mesmo valor de pré-esforço aplicado. Nas fases iniciais pode ser excessivo, provocando deslocamentos associados aos mesmo. Nas fases mais profundas da cortina esse pré-esforço não é tão significativo, não provocando assim efeitos nos deslocamentos já existentes da cortina. Na Fase 7 e 8 é ainda possível verificar um grande recuo por parte da cortina devido á aplicação do 3º nível de ancoragens.

4.2.3. Assentamentos na superfície

Os deslocamentos na superfície são apresentados para as mesmas fases consideradas anteriormente. Estas evoluções estão representadas na Figura 4.4.a) e na Figura 4.4.b) para os cálculos com os modelos de M-C e de D-C, respetivamente.

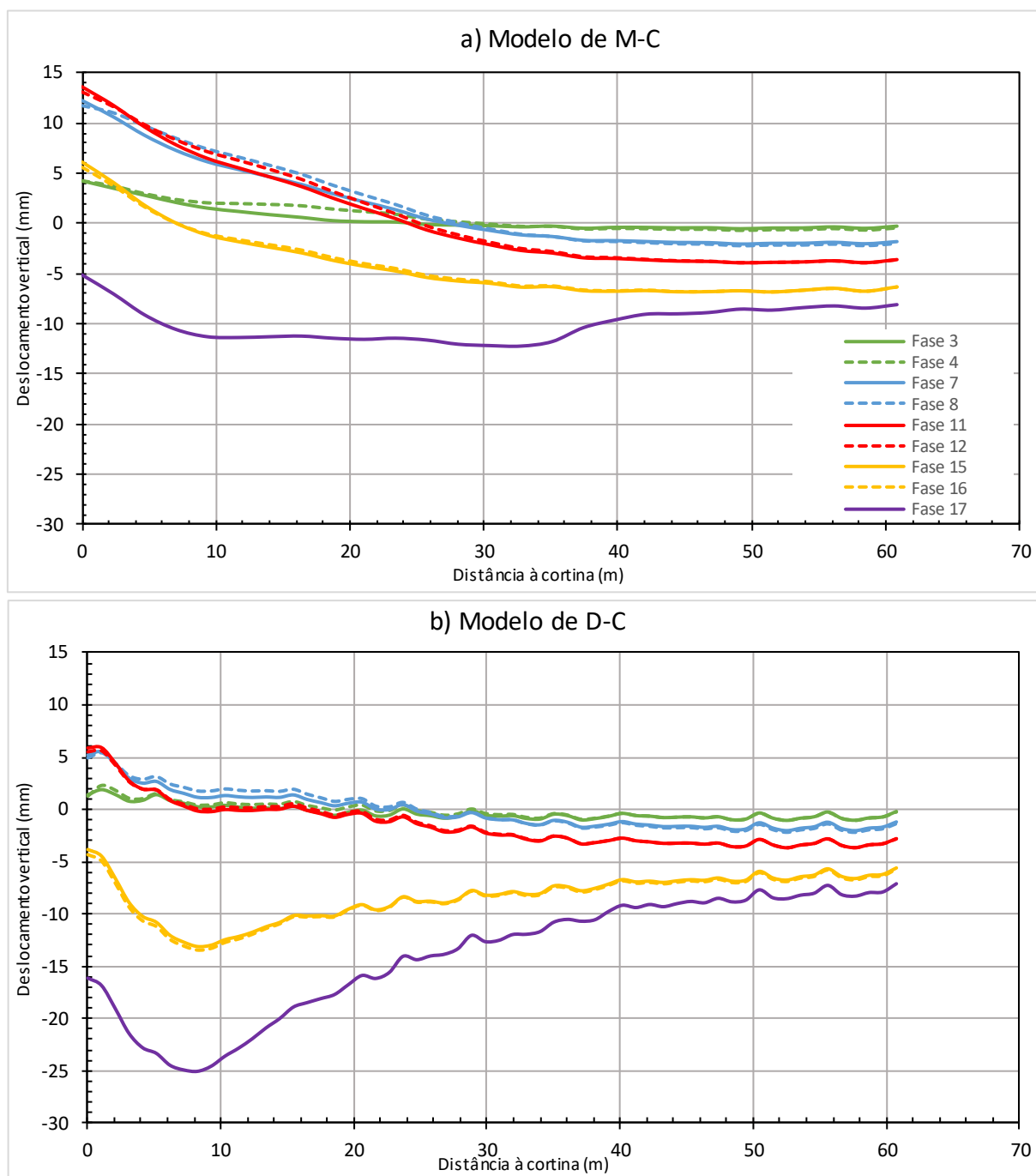


Figura 4.4 – Assentamentos na superfície ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.4 a) verifica-se um grande empolamento junto á cortina desde a Fase 4 até à Fase 12, sendo ele máximo junto á cortina com o valor de 14 mm. Na Fase 15 esse empolamento é bastante reduzido, 5mm junto á cortina, tal como o que acontece nessa fase com a diminuição

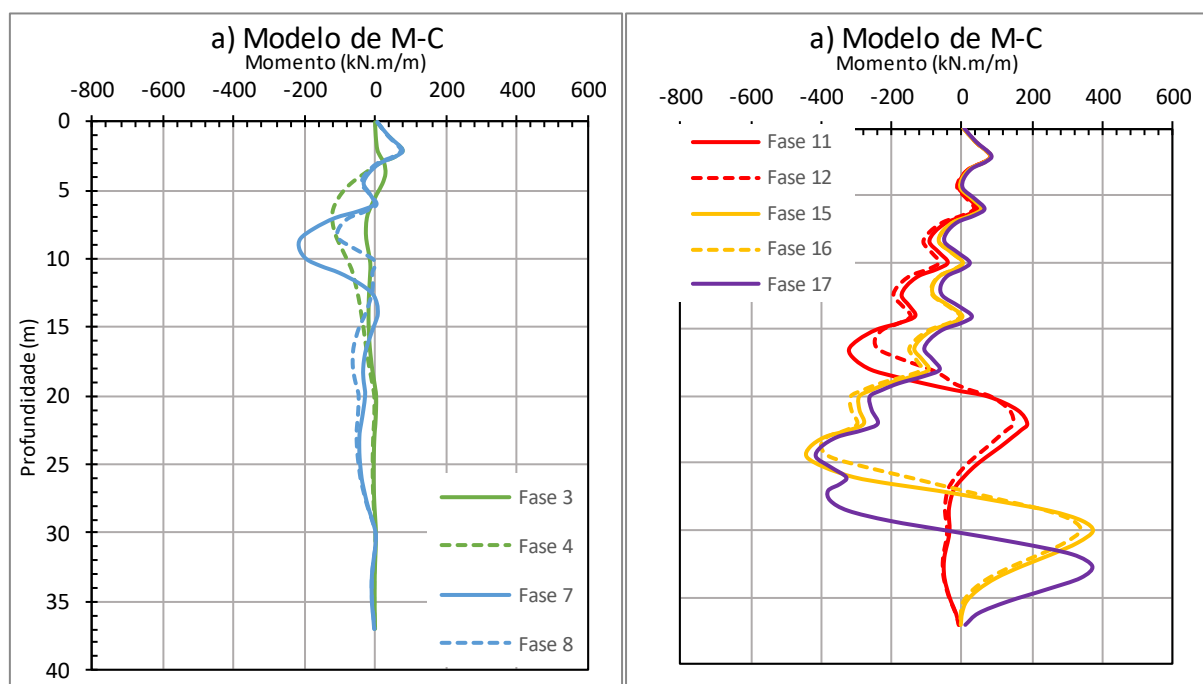
do avanço da cortina contra o terreno. Na última fase existe um assentamento máximo de 12mm entre os 10 e 34m afastados da cortina. Na Figura 4.4 b) o empolamento é muito inferior atingindo o valor máximo de 5mm na Fase 11. À semelhança do que acontece no modelo M-C, o assentamento maior acontece na última fase, a 8 metros da cortina com um valor de 25mm.

Os deslocamentos na superfície do terreno comprovam a veracidade do que atrás foi explicado. No modelo Mohr-Coulomb os maiores deslocamentos da cortina, fazem com que o empolamento neste modelo seja bastante superior também. Por outro lado, no modelo Duncan-Chang existe um embarrigamento muito superior da cortina fazendo com que os assentamentos sejam superiores aos que acontecem no modelo Mohr-Coulomb.

No modelo D-C é possível verificar a forma côncava nos assentamentos da superfície do terreno, sendo essa forma bastante recorrente em escavações do género, verificado também por Clough e O'Rourke, (1990). Por outro lado, no modelo M-C os assentamentos são bastante mais reduzidos, mas estendem-se por um maior comprimento.

4.2.4. Esforços na cortina

Os diagramas de momentos flectores ao longo do faseamento de escavação do modelo 2D são apresentados na Figura 4.5 a) e Figura 4.5 b), para o modelo de M-C e D-C, respetivamente.



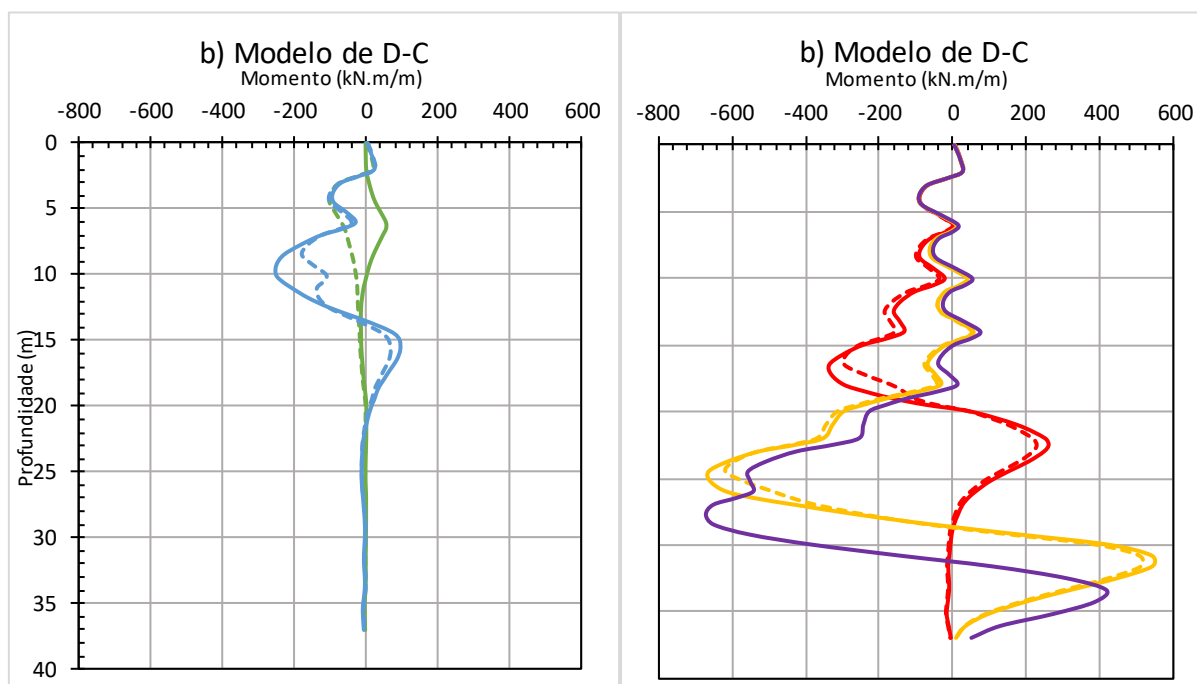


Figura 4.5 – Diagrama de momentos fletores na cortina ao longo do faseamento da escavação:
a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.5 são apresentados os diagramas de momento fletor na cortina tanto no modelo de M-C como D-C. É possível verificar que os diagramas de momentos fletores são bastante semelhantes. Na Figura 4.5, na Fase 3 em ambos os modelos, a cortina comporta-se como uma viga em balanço, com valores dos momentos pequenos. Na Fase 4 é possível verificar, em ambos os modelos, um momento máximo de 120kN.m/m, sendo que existe um pico derivado do 1º nível de ancoragens. Na Fase 7 o momento máximo é registado aos 8 e 10m de profundidade de 240 e 280kN.m/m, no modelo de M-C e D-C respetivamente. Na fase 8 existe uma diminuição do momento aplicado em ambos os modelos devido à aplicação de mais um nível de ancoragens. Na fase 11 o momento máximo é de 320 e 330kN.m/m na profundidade de 17 e 16,5m, nos modelos M-C e D-C, respetivamente, é possível verificar 4 picos no diagrama sendo devido às ancoragens. Na fase 12 existe uma diminuição do momento aplicado em ambos os modelos devido à aplicação de mais um nível de ancoragens. Os momentos aplicados nas Fases 15 e 16 são bastante semelhantes sendo na Fase 16 ligeiramente inferiores, no entanto os valores máximos de momento acontecem na profundidade de 25m em ambos modelos e com valores de 420 e 660kN.m/m, no modelo M-C e D-C, respetivamente. Na última fase os valores máximos são de 415 e 670kN.m/m, a profundidades de 24,5 e 27m, no modelo M-C e D-C, respetivamente.

Na Figura 4.6 a) e Figura 4.6 b) são apresentados os diagramas do esforço transverso ao longo do faseamento construtivo, para o modelo de M-C e D-C, respetivamente.

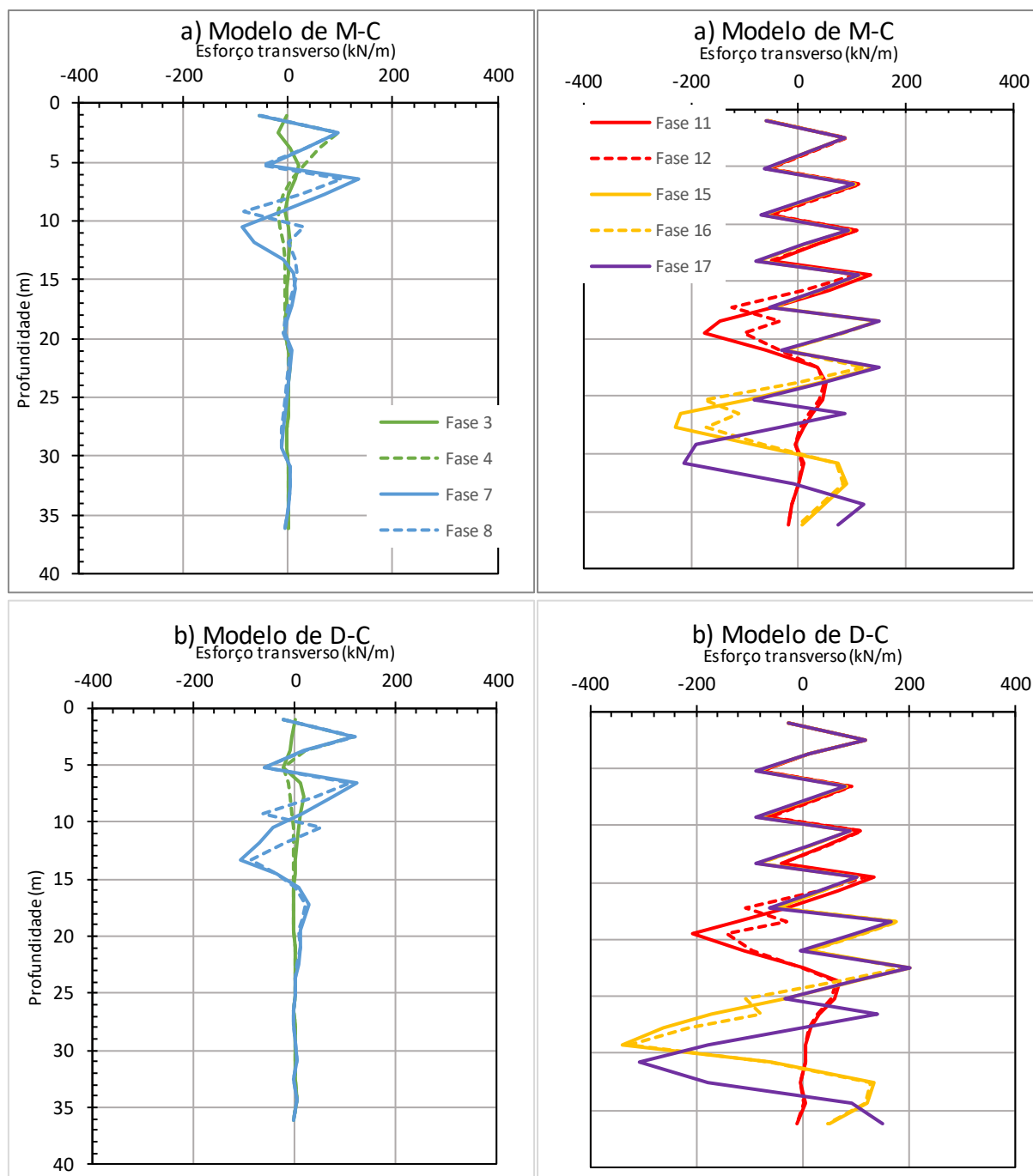


Figura 4.6 – Diagrama de esforços transversos na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.6 são apresentados os diagramas de esforço transversal na cortina tanto no modelo de M-C como D-C. É possível verificar que os diagramas de esforço transversal são também bastante semelhantes, sendo que a cortina tem um comportamento semelhante a uma viga com vários apoios, sujeita a uma carga distribuída. Como as trajetórias e valores de tensões são bastante semelhantes será realizada uma análise da última fase.

Na Figura 4.6 a) o maior valor de esforço transversal surge na Fase 15 e é de 225kN/m, tomando esse valor na zona que ainda não foi efetuada a escavação. Na fase 17 o valor máximo é de 212kN/m, muito próximo do valor da Fase 12, o valor máximo acontece na profundidade de 31 metros, zona da ficha da cortina. Na Figura 4.6 b) na Fase 15 acontece o maior valor de esforço transversal, tendo ele 325kN/m, e à semelhança do que acontece no modelo de M-C, este acontece na zona ainda enterrada da cortina. Na última Fase o maior valor de esforço transversal é de 305kN/m, sendo este aos 31 metros de profundidade, profundidade onde já se encontra a ficha da cortina.

O diagrama de esforço axial ao longo do faseamento construtivo é apresentado na Figura 4.7 a) e Figura 4.7 b), para o modelo de M-C e D-C, respetivamente.

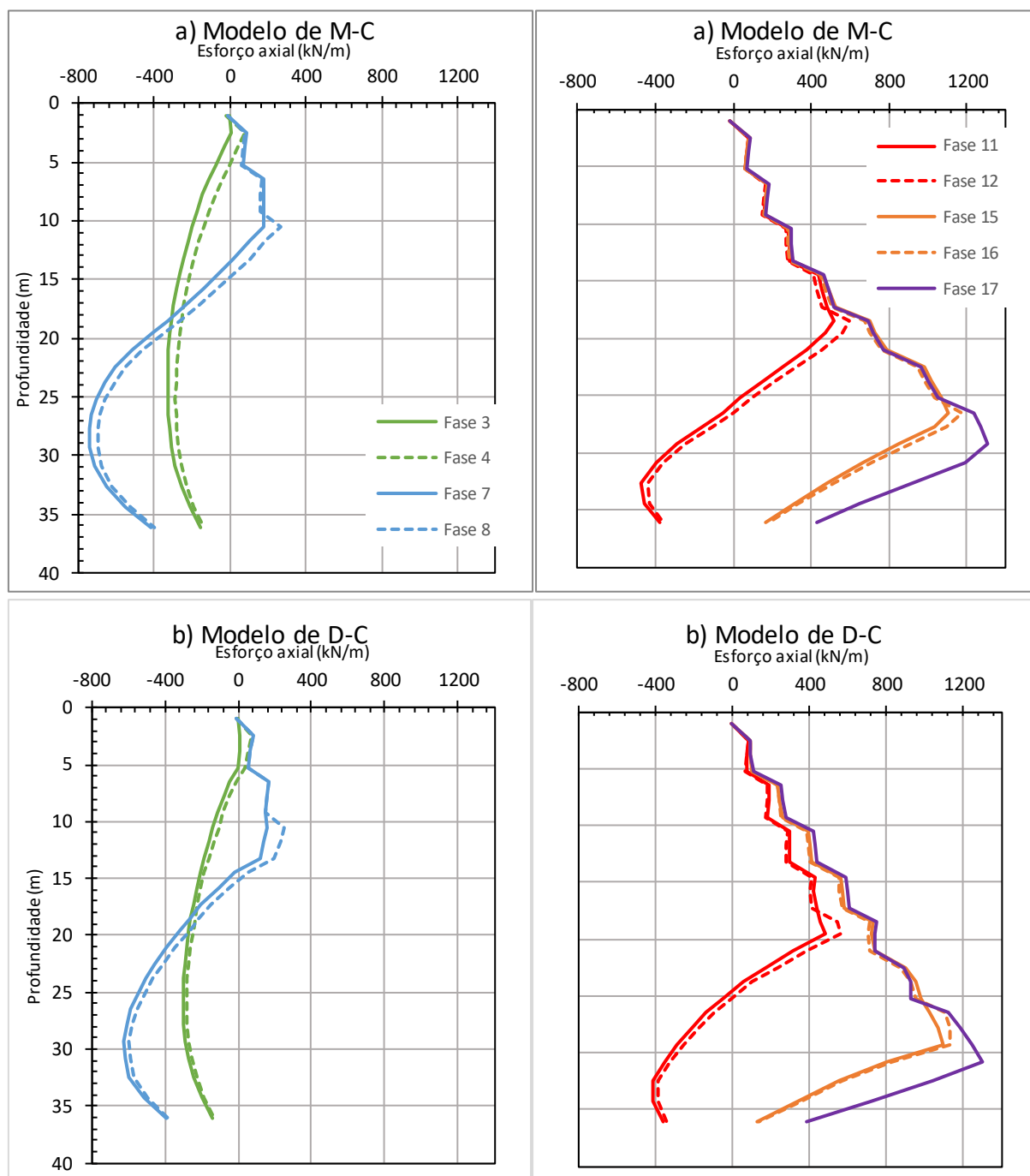
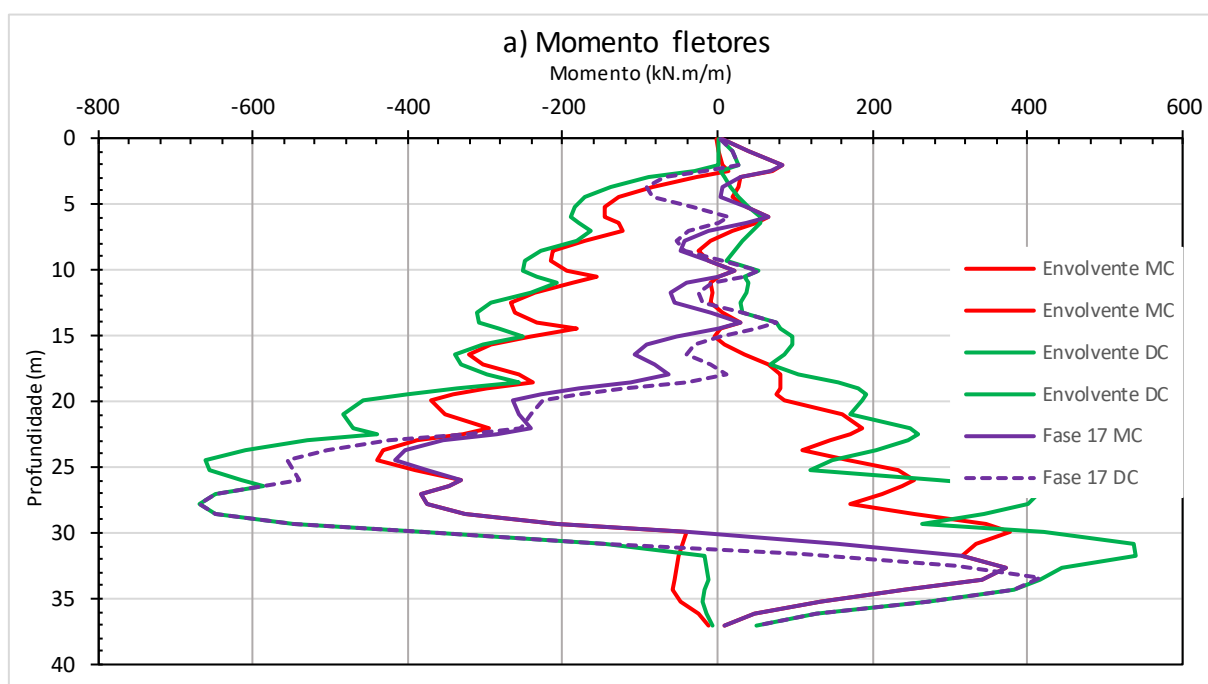


Figura 4.7 – Diagrama de esforços axiais na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.7 são apresentados os diagramas de esforço axial na cortina tanto no modelo de M-C como D-C. É possível verificar que os esforços axiais são bastante semelhantes em ambos os modelos. Verifica-se que ao aplicar um nível de ancoragens, parte desse esforço é transmitido

como esforço axial na cortina. Isto pode ser explicado devido à inclinação das ancoragens que decompõe a força numa componente vertical e outra horizontal. Os valores negativos estão relacionados com o esforço aplicado pelo terreno à cortina, com a aplicação de ancoragens esse valor vai se reduzindo. O esforço axial máximo no modelo Mohr-Coulomb acontece na Fase 17, com um valor máximo de 1300kN/m, aos 31m de profundidade. No modelo Duncan-Chang o valor máximo de força axial também ocorre na última fase sendo que toma o valor de 1300kN/m.

Na Figura 4.8 a) e Figura 4.8 b) são apresentadas as envolventes de momento fletores e de esforço transversal, respetivamente, para todas as fases do modelo. É ainda apresentada a última fase do modelo de Mohr-Coulomb e Duncan-Chang para cada uma das envolventes.



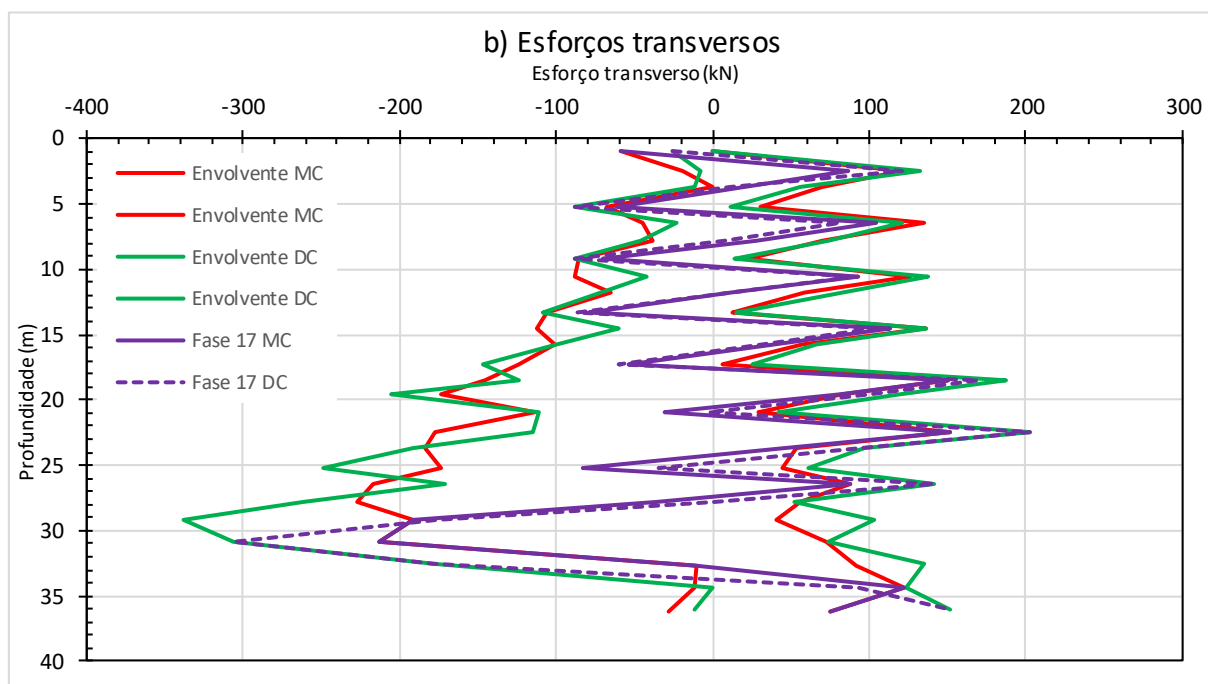


Figura 4.8 – Envolventes de esforços na cortina: a) momentos fletores; b) esforços transversos.

Na Figura 4.8 a) a envolvente de momentos fletores foi possível constatar tudo o que foi dito acima, sendo que os modelo D-C apresenta momentos superiores aos momentos do modelo M-C. Os deslocamentos na cortina também são superiores no modelo D-C o que provoca um aumento de Força axial nas ancoragens e momento fletor na cortina. Na Figura 4.8 b) é possível verificar que os esforços transversos são superiores no modelo D-C, uma vez que o momento fletor é maior, é natural que os esforços transversos acompanhem esse cálculo.

4.2.5. Esforços nas ancoragens

É apresentada na Figura 4.9 a) e Figura 4.9 b) a variação de força axial no modelo de M-C e de D-C, respetivamente. São apresentadas todas as ancoragens dos modelos.

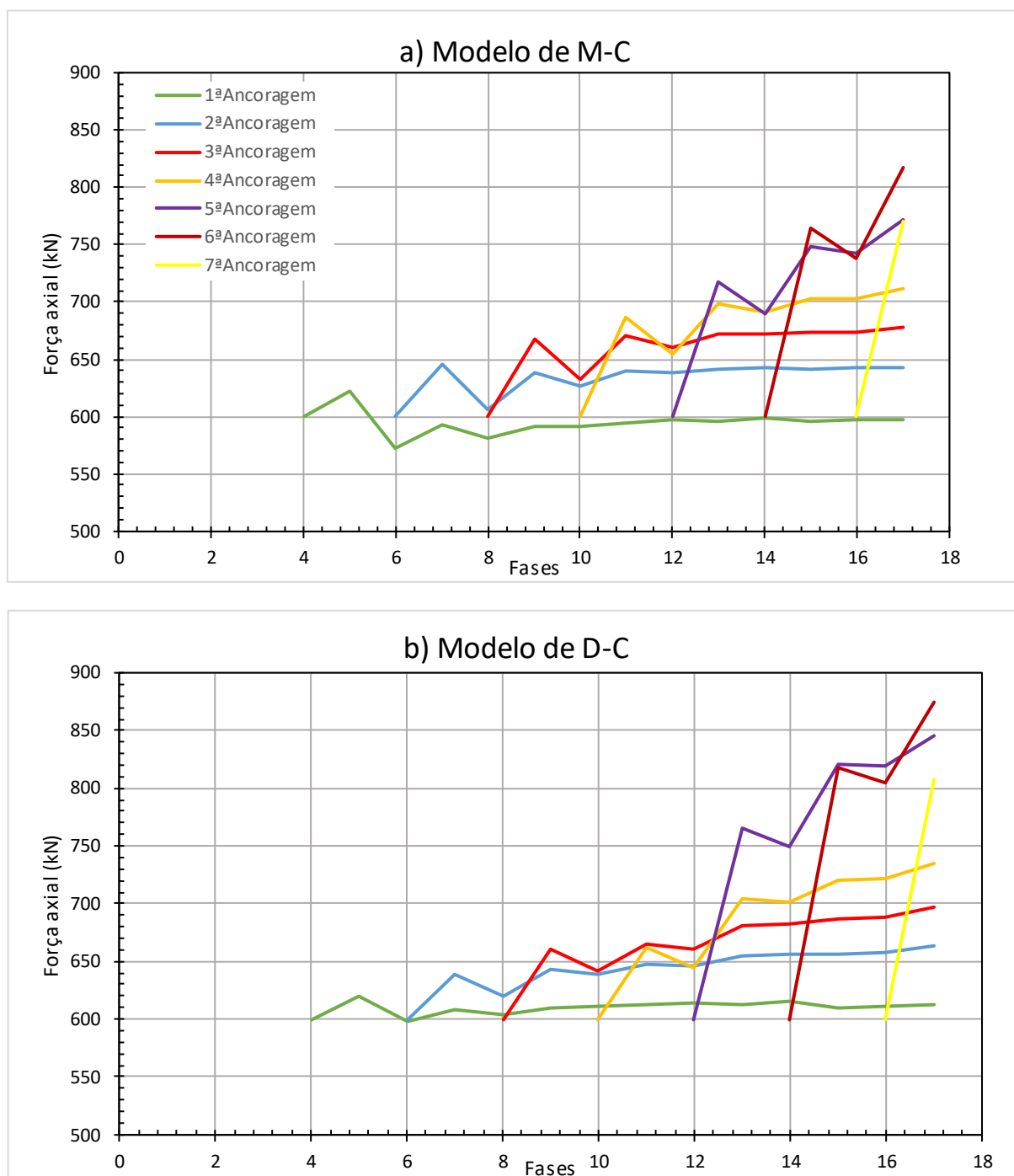


Figura 4.9 – Evolução dos esforços axiais nas ancoragens com o faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

A Figura 4.9 representa os esforços axiais em cada uma das ancoragens em todas as fases. É possível verificar que à medida que cada novo nível de ancoragens colocados existe uma redução de força axial nas restantes ancoragens. É nas 3 últimas ancoragens, que se verifica uma maior variação da força axial aplicada, nas mesmas que existe maiores deslocamentos da

cortina. No modelo M-C os esforços axiais são 770, 815 e 770kN, na 5ª, 6ª e 7ª ancoragem, respetivamente. No modelo D-C os esforços axiais são 845, 875 e 810kN, na 5ª, 6ª e 7ª ancoragem, respetivamente. O modelo D-C é aquele em que existe maiores deslocamentos na cortina e, conseqüentemente ocorre maiores forças axiais nas ancoragens.

Verifica-se ainda que com o aumento da força axial nas ancoragens é possível verificar um ligeiro aumento no esforço transversal da cortina, assim como uma variação maior no esforço axial da cortina.

4.3. Resultados da modelação 3D

4.3.1. Condições iniciais

Após a realização do cálculo numérico do modelo 3D foi realizada uma análise das tensões efetivas, à semelhança do que foi efetuado no modelo 2D.

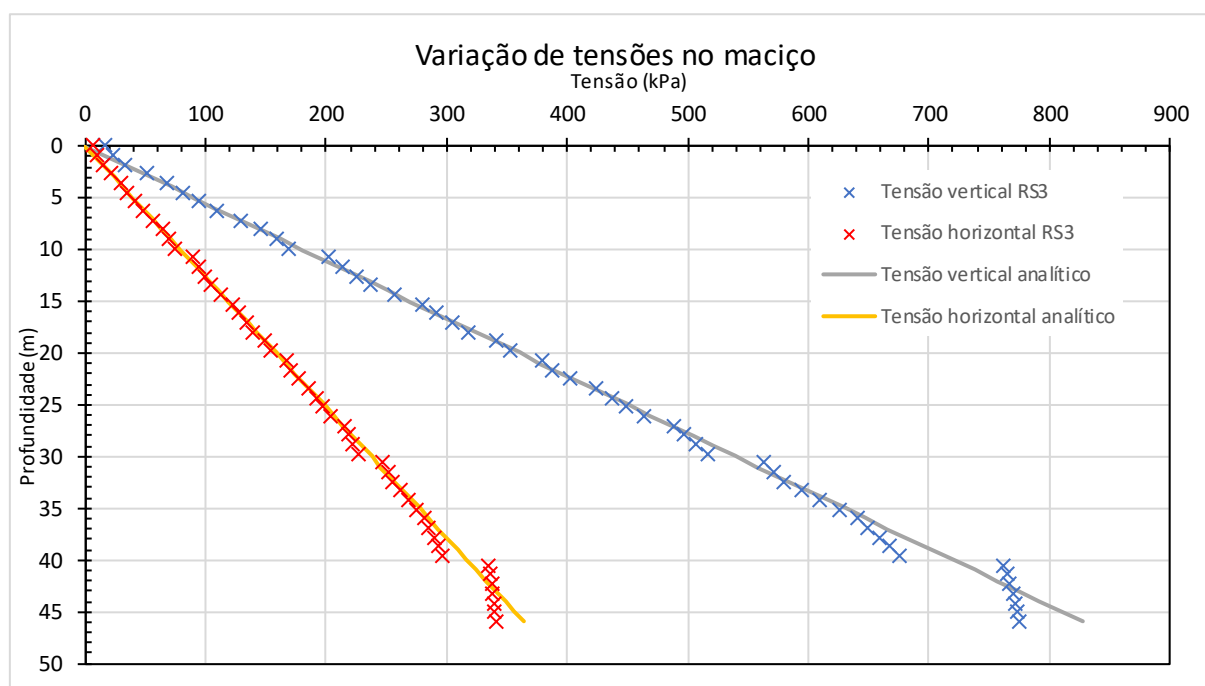
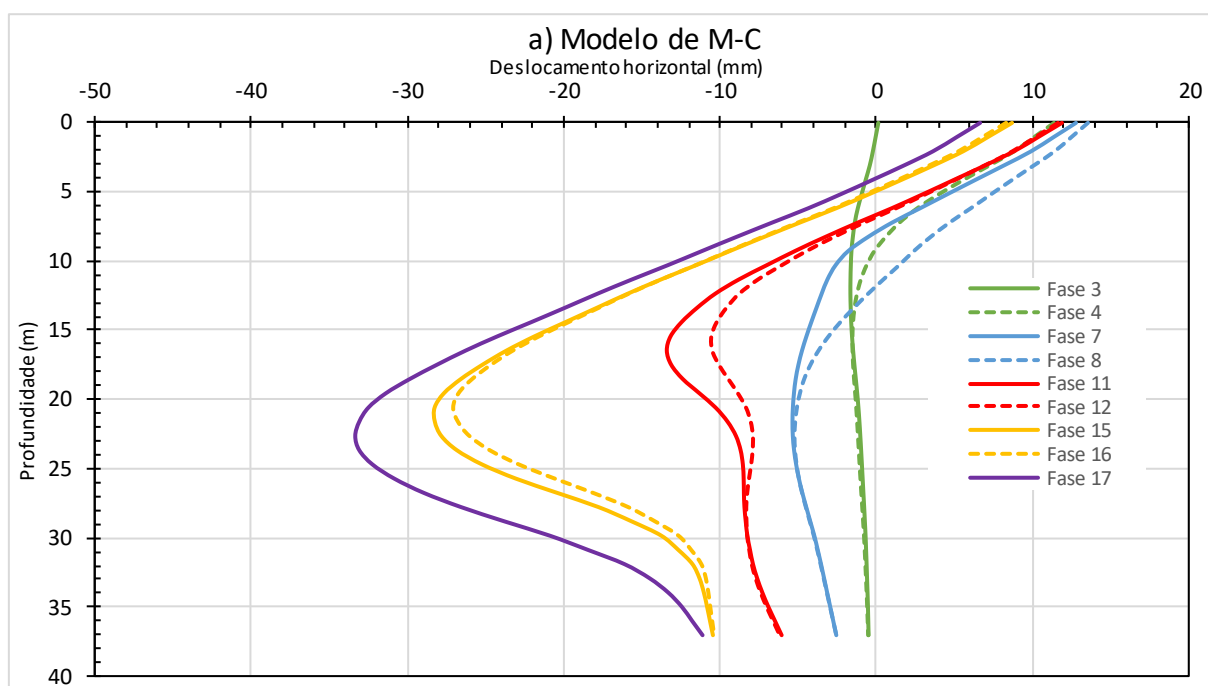


Figura 4.10- Variação das tensões de repouso em profundidade

O modelo 3D apresenta algumas discrepâncias nas zonas de transição de camadas podendo assim influenciar as tensões efetivas, o que não era esperado. Os resultados não têm o rigor desejado, mas não comprometem as análises seguintes. No modelo a tensão vertical máxima toma o valor de 775kPa, enquanto que teoricamente apresenta o valor de 828kPa. O valor de K_0 manteve-se igual ao usado no modelo 2D, ou seja, 0.44

4.3.2. Deslocamentos na cortina

Em seguida são apresentados os resultados dos deslocamentos horizontais na cortina no modelo 3D PL, as fases mostradas são as mesmas que no modelo 2D: 2,4,7,8,11,12,15,16 e 17. Os deslocamentos apresentados referem-se à secção S1, da Figura 3.13. Na Figura 4.11 a) e na Figura 4.11 b) são apresentados os deslocamentos para o modelo de M-C e para o modelo de D-C, respetivamente.



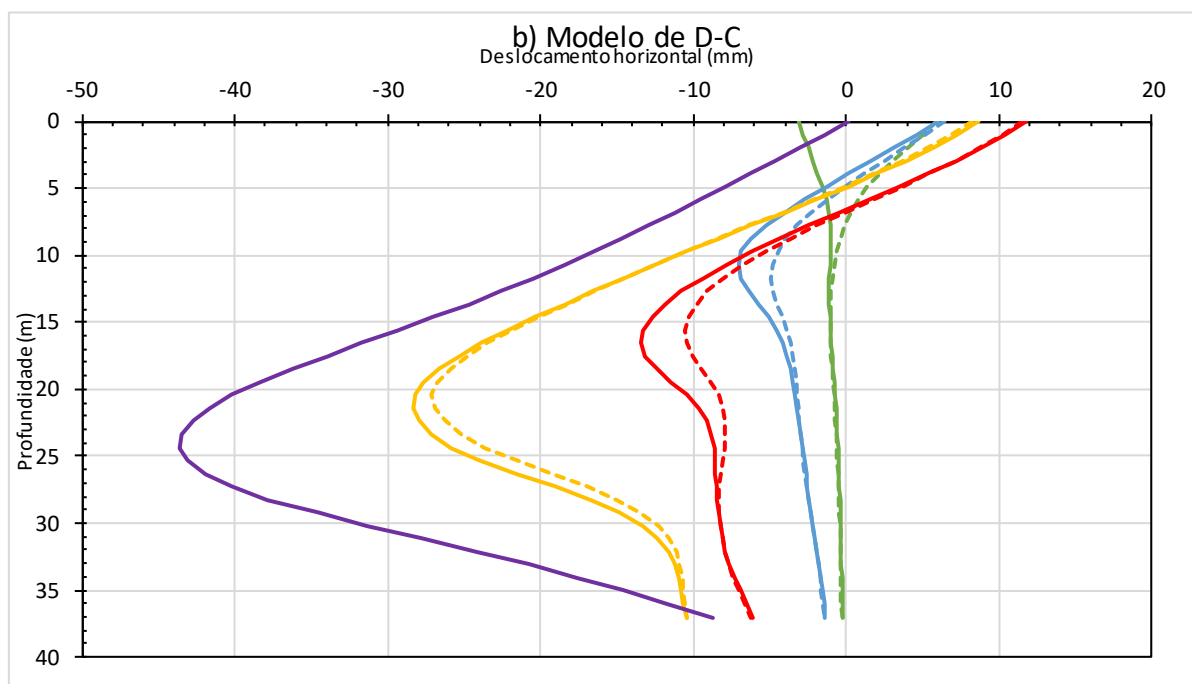


Figura 4.11-Deslocamentos horizontais na secção central da cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.11 são apresentados os deslocamentos horizontais no eixo da cortina. É possível verificar que existe bastante semelhança entre os dois modelos, sendo que as deformações ao longo da cortina são semelhantes nos dois modelos.

Na Figura 4.11 a) é possível verificar um grande deslocamento da Fase 3 para a Fase 4. esse deslocamento da cortina contra o terreno é devido ao pré-esforço e também às limitações do modelo, sendo que a cortina na Fase 4 apresenta um deslocamento de 12mm para o interior do maciço. Nas Fase 7 e 8 existe um deslocamento superior da cortina contra o terreno. Nessas mesmas fases o deslocamento na superfície da cortina chega ao valor máximo do faseamento construtivo de 14mm. É ainda possível verificar, nessas fases referidas anteriormente, uma grande variação de deslocamentos entre os 10 e 15m de profundidade provocados pelo pré-esforço, sendo que a Fase 8 tem uma diminuição de 8 mm nessa mesma profundidade. Nas Fases 15 e 16 a influência do pré-esforço torna-se menor sendo que o deslocamento máximo para o interior da cortina acontece na fase 15 aos 22 metros de profundidade com 28mm de deslocamento, enquanto na Fase 16 é cerca de 27mm. No entanto, a superfície da cortina continua com um deslocamento contra o maciço de cerca de 8mm. Na última fase, o deslocamento é máximo aos 23m de profundidade com 34mm, contudo, a superfície da cortina não recuperou totalmente as deformações, apresentando um deslocamento de 6mm da cortina contra o maciço.

Na Figura 4.11 b) é possível verificar que existe um grande deslocamento da cortina contra o terreno da Fase 3 para a Fase 4. Tal como foi descrito no modelo 2D, o 1º metro do maciço foi modelado com um módulo de elasticidade constante de 10MPa o que, combinado com o pré-esforço, resulta numa deformação da cortina contra o maciço. Na Fase 4 existe um deslocamento máximo na superfície de 6mm. Na Fase 7 e 8 os deslocamentos na superfície são os mesmos que na Fase 4, sendo que a maior diferença encontrada ocorre aos 10m de profundidade apresentando-se o deslocamento da cortina na fase 7 com 6mm enquanto na fase 8 é de apenas 4mm. Nas Fase 11 e 12 os deslocamentos da superfície contra o terreno são máximos com o valor de 12mm e, verifica-se ainda um deslocamento da cortina contra a escavação aos 16m de profundidade de 14 e 10mm, respetivamente. Nas Fase 15 e 16 parte dos deslocamentos na superfície são recuperados ficando com apenas 8mm de deslocamento contra o maciço, e um deslocamento contra a escavação na profundidade de 28 e 26mm. A Fase 17 é aquela cujos deslocamentos contra a escavação são máximos, tomando o valor de 44mm aos 24m de profundidade, e voltando o deslocamento da superfície à posição inicial.

Em suma, o modelo Duncan-Chang provoca maiores deslocamentos contra a escavação e menores contra o maciço. As ancoragens perto da superfície apresentam um maior efeito na cortina, quando são todas aplicadas com o mesmo pré-esforço. O deslocamento da ficha dos dois modelos é semelhante sendo o máximo deslocamento da mesma é cerca de 12mm.

4.3.3. Assentamentos na superfície

Os deslocamentos verticais da secção S2, da Figura 3.13, são apresentados abaixo. As fases apresentadas são as mesmas que anteriormente. Na Figura 4.12 a) e Figura 4.12 b) são apresentados os deslocamentos para o modelo de M-C e D-C, respetivamente.

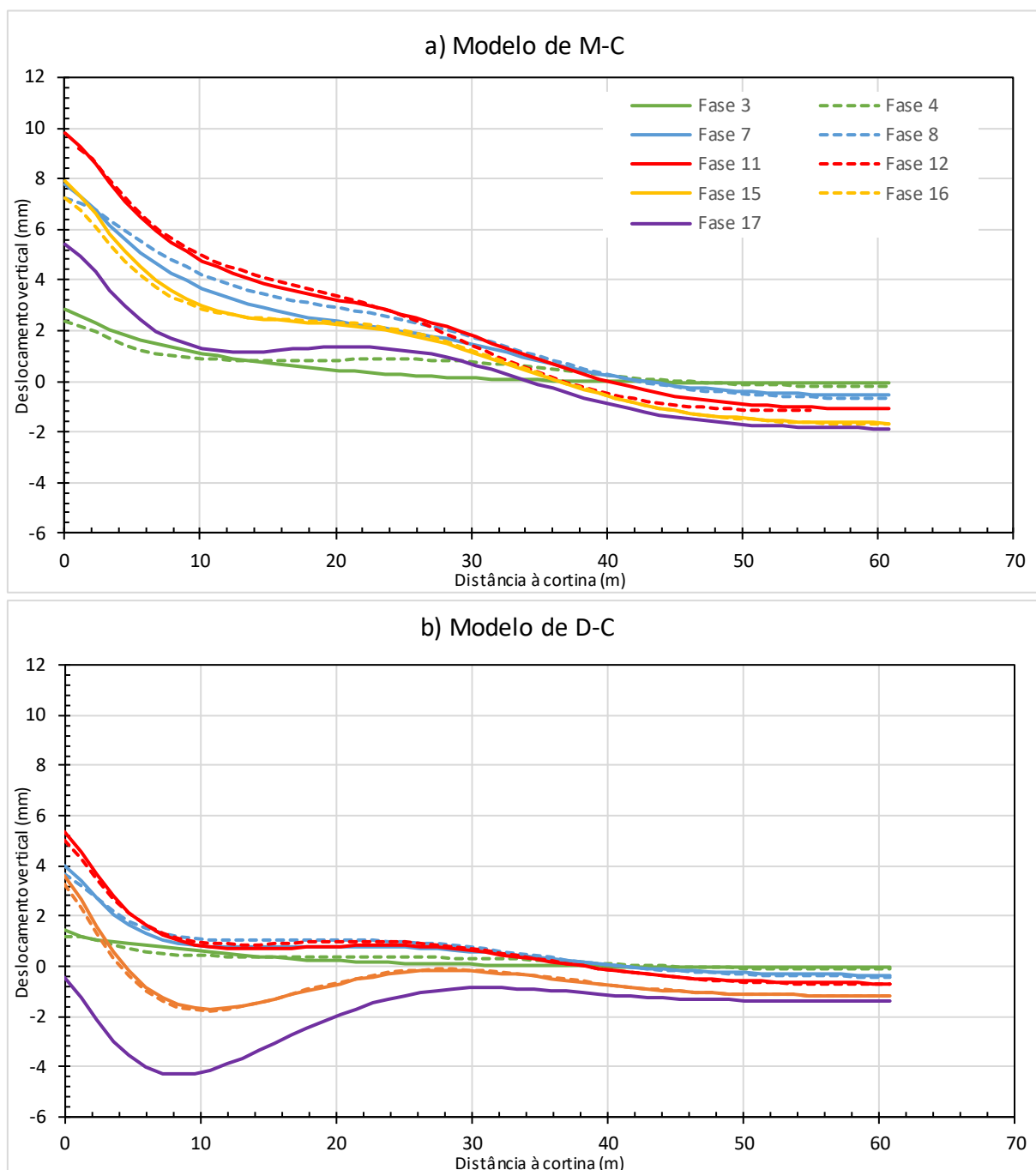


Figura 4.12- Assentamentos na superfície ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.12 é possível notar o que acontece com o deslocamento vertical do maciço. No modelo Mohr-Coulomb os deslocamentos da superfície da cortina são sempre contra o maciço e portanto, não existe assentamentos na superfície do maciço. Existem apenas empolamentos cujo valor máximo nas fases 11 e 12 é de 10mm junto à cortina, como é possível verificar na Figura 4.12 a). No modelo Duncan-Chang os deslocamentos horizontais na superfície da cortina

são menores do que no modelo Mohr-Coulomb, e como tal os empoamentos no maciço também são menores sendo que o valor máximo acontece na Fase 10 com cerca de 6mm junto da cortina. O assentamento máximo ocorre na fase 17 com um assentamento de 4mm a 8m da cortina e, verifica-se ainda que junto da cortina o assentamento é nulo.

Em suma, é possível perceber que o modelo Mohr-Coulomb provoca maiores empoamentos e menores assentamentos, quando comparado com o modelo Duncan-Chang.

4.3.4. Esforços na cortina

Os esforços da cortina foram obtidos a partir da secção S1, da Figura 3.13. Foram obtidos os dados das Fases 3,4,7,8,11,12,15,16 e 17. Na Figura 4.13 a) e Figura 4.13 b) são apresentados o diagrama de momento para o modelo de M-C e D-C, respetivamente.

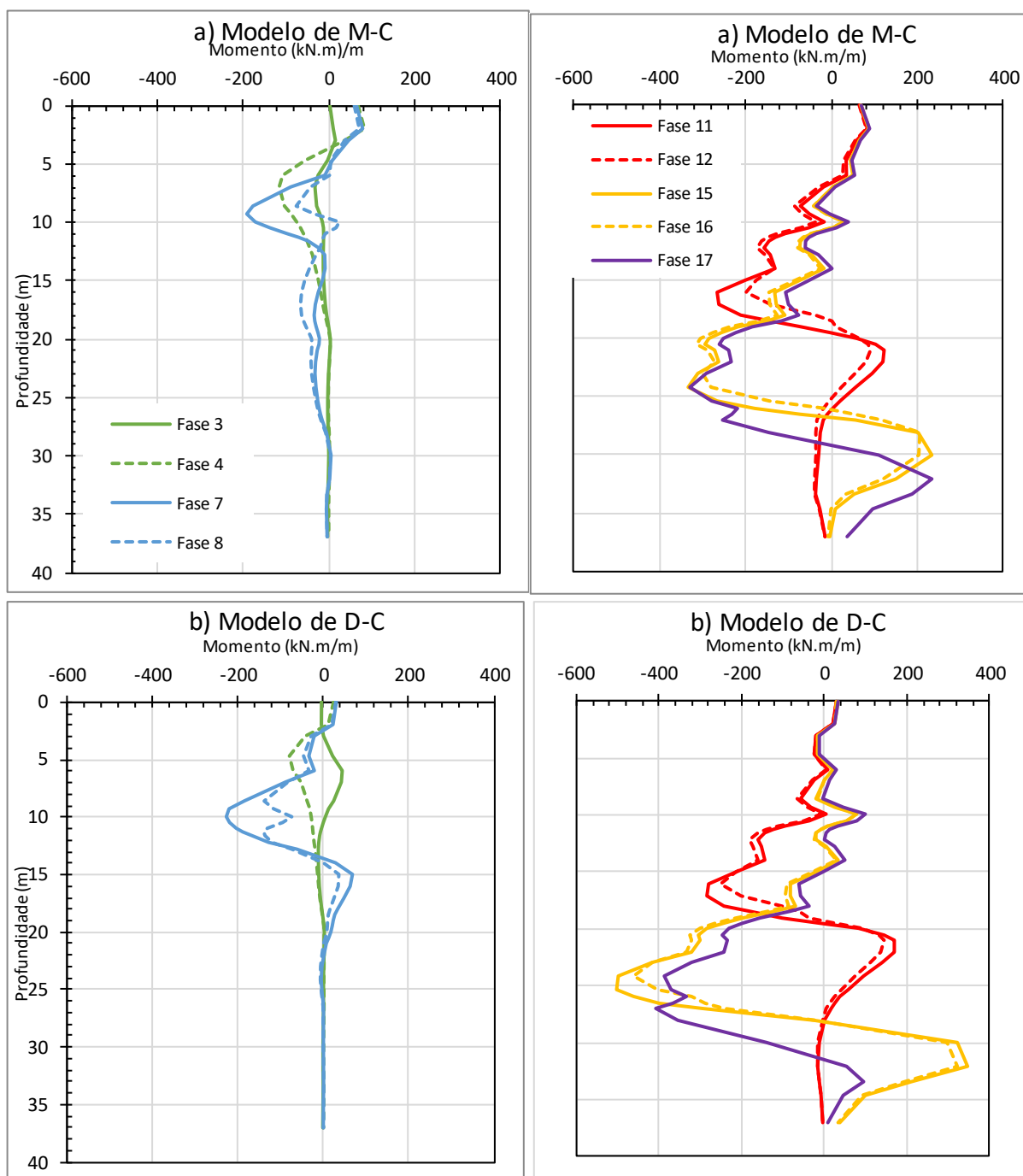


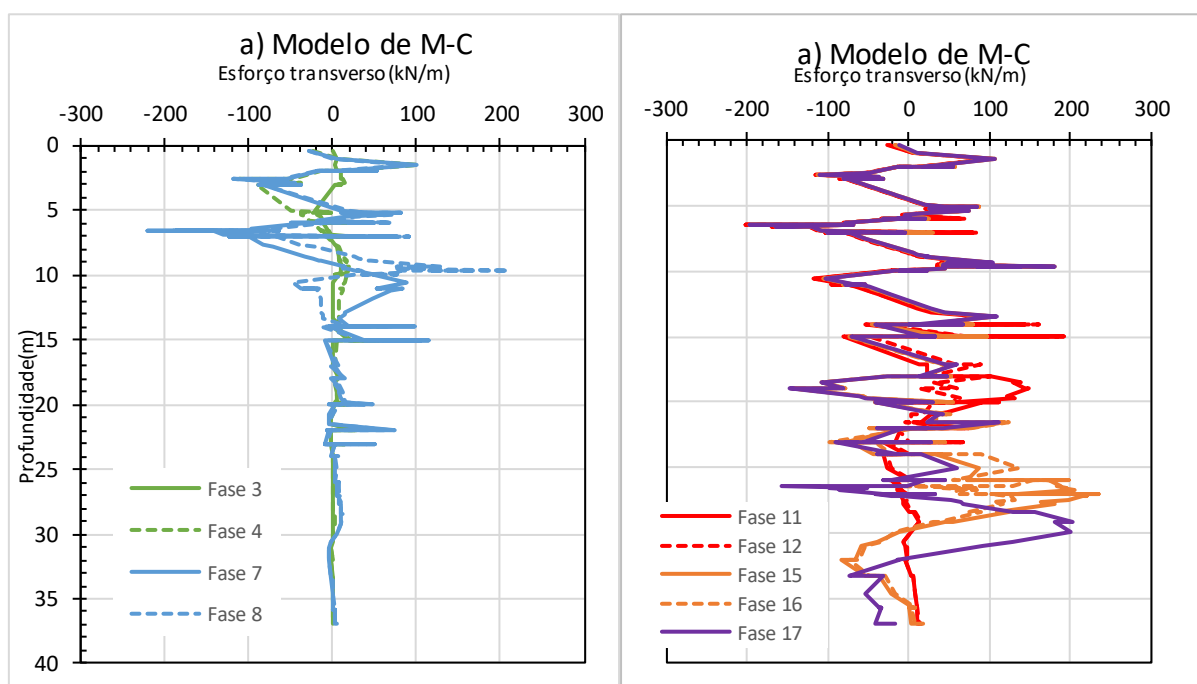
Figura 4.13— Diagrama de momentos fletores na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.13 são apresentados os diagramas de momentos fletores e, é notável a semelhança entre os diagramas dos dois modelos. no entanto, é possível observar que os maiores momentos acontecem no modelo Duncan-Chang, o que é expetável uma vez que os maiores deslocamentos também acontecem neste mesmo modelo.

Na Figura 4.13 a), na Fase 3, os momentos são bastante pequenos e, na Fase 4 existe uma variação relativa à aplicação do 1º nível de ancoragens. Na Fase 7 é possível verificar um momento perto de 200kN.m/m. O momento máximo acontece na Fase 15 e 17 com um valor de 320kN.m/m, na profundidade de 24 metros. Na Fase 17 existem 7 picos referentes à aplicação de ancoragens pré-esforçadas.

Na Figura 4.13 b) o momento da Fase 7 é cerca de 240kN.m/m e ocorre a 10m de profundidade. na fase seguinte ocorre uma diminuição desse valor devido à aplicação de outro nível de ancoragens. O momento máximo acontece na Fase 15 com um valor de 520kN.m/m, na profundidade de 25m. Na Fase 17 o valor máximo é de 400kN.m/m e ocorre a 27m de profundidade.

O diagrama de esforço transverso do modelo de M-C e modelo de D-C é exibido na Figura 4.14 a) e Figura 4.14 b), respetivamente.



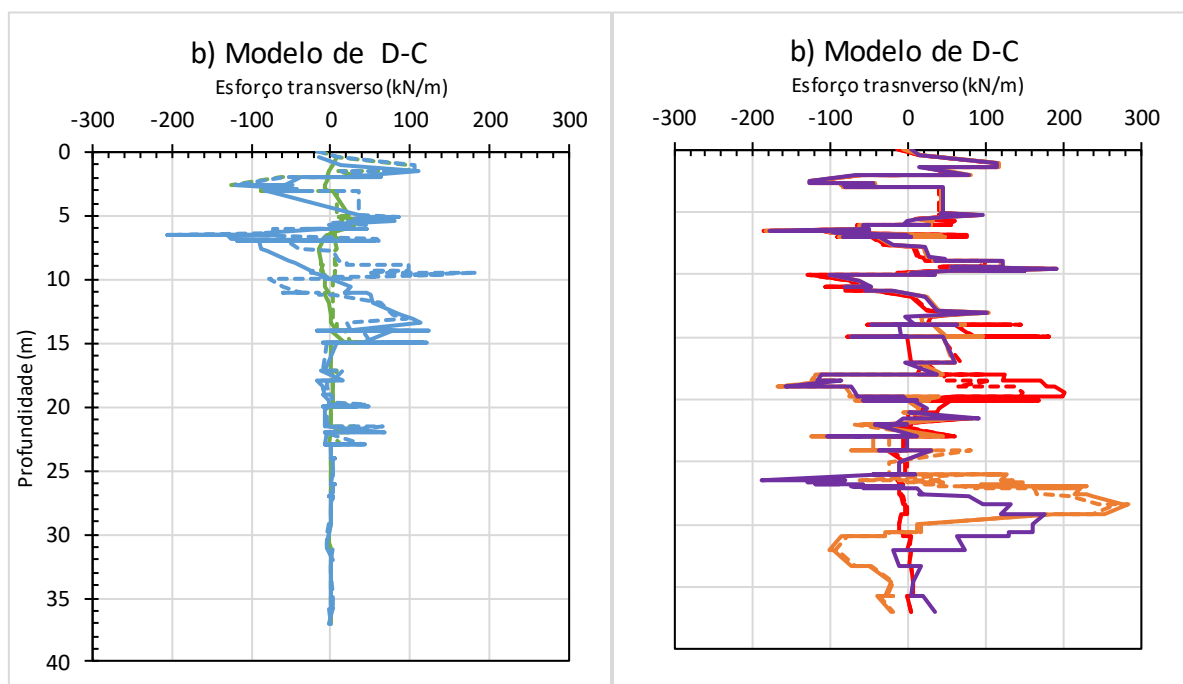


Figura 4.14- Diagrama de esforços transversos na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.14 é possível observar a variação do esforço transverso nos modelos. O esforço transverso é bastante influenciado pelas pressões de terra atuantes na cortina e, pelo esforço, não que as ancoragens transmitem à cortina. A cortina tem um comportamento semelhante a uma viga carregada com vários apoios.

O esforço transverso está sempre perto dos 200kN/m sendo que no modelo Mohr-Coulomb o máximo acontece na Fase 15 com um valor de 240kN/m, a uma profundidade de 27m. No modelo Duncan-Chang o maior valor de esforço transverso tem o valor de 290kN/m e ocorre a uma profundidade de 28m, na Fase 15.

O esforço axial aplicado na secção S1 da cortina, para o modelo de M-C e de D-C, é mostrado na Figura 4.15 a) e Figura 4.15 b), respetivamente.

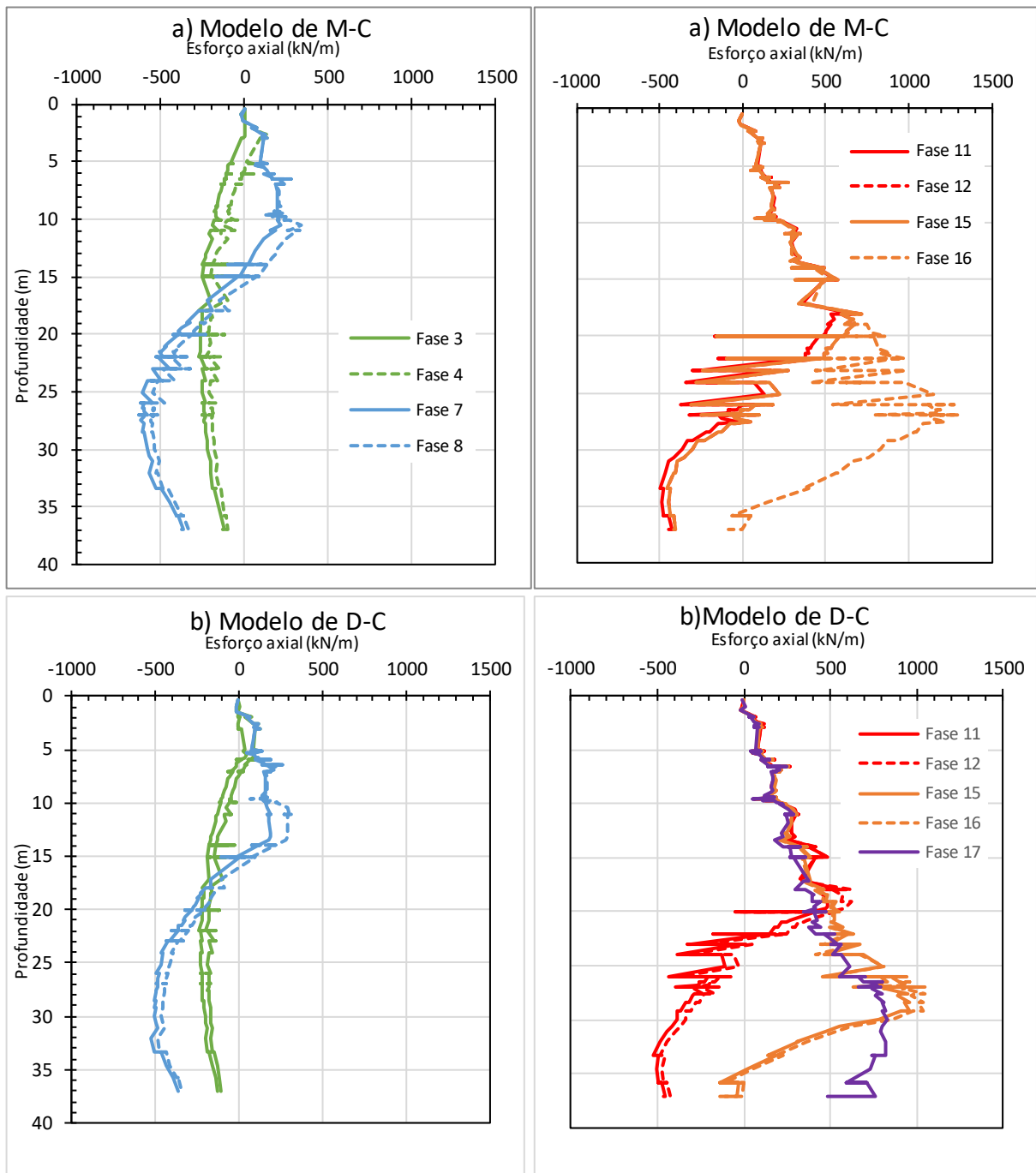


Figura 4.15- Diagrama de esforços axiais na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.15 são apresentados os diagramas de esforço axial. Na fase 17 no modelo Mohr-Coulomb o diagrama de esforço axial não apresentava valores credíveis, e como tal não serão apresentados. Em ambos os modelos os valores máximos de esforço axial acontecem na Fase 16, com valores de 1200 e 1050KN/m, nos modelos de M-C e D-C, respetivamente. Note-se

que existe um aumento do esforço axial com a aplicação de ancoragens, pois o esforço é influenciado pela componente vertical da Força axial das mesmas. O valor negativo é aplicado por parte do terreno á cortina.

Na Figura 4.16 a) e Figura 4.16 b) é exibida a envolvente de momento fletor e de esforço transversal, respetivamente, para todas as fases. É ainda exibido em cada diagrama a última fase do modelo de M-C e D-C.

a) Momento fletor
Momento fletor (kN.m/m)

Profundidade (m)

Legenda:

- Envolvente MC (verde)
- Envolvente DC (vermelho)
- Fase 17 MC (roxo sólido)
- Fase 17 DC (roxo tracejado)

O gráfico apresenta o momento fletor em kN.m/m no eixo horizontal (de -600 a 400) e a profundidade em metros no eixo vertical (de 0 a 40). As linhas representam a envolvente do momento fletor para os modelos MC (verde) e DC (vermelho) em todas as fases, e as linhas roxas representam a última fase (Fase 17) para os modelos MC (sólido) e DC (tracejado). O momento fletor varia significativamente com a profundidade, apresentando picos negativos (compressão) e positivos (tração) em diferentes níveis.

61

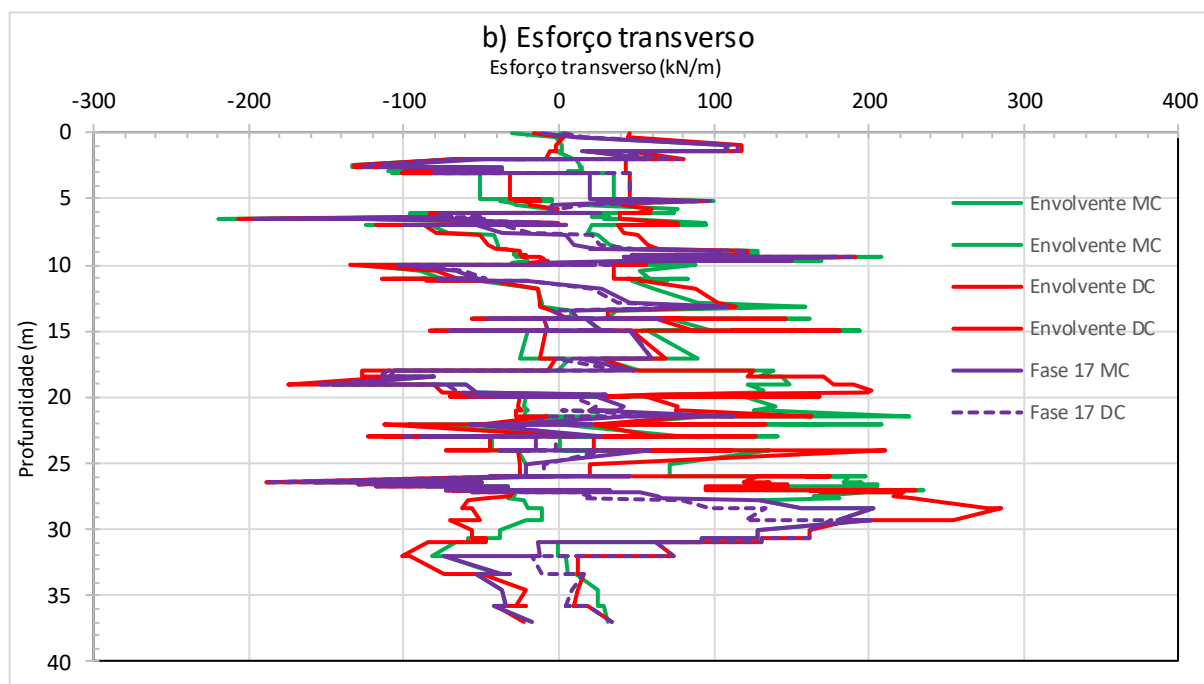


Figura 4.16 -Envolventes de esforços na cortina: a) momentos fletores; b) esforços transversos.

Na Figura 4.16 a) é possível constatar que o momento no modelo Duncan-Chang é superior ao modelo Mohr-Coulomb, à exceção da fase superior da cortina. Esse facto deve-se aos maiores deslocamentos apresentados pela cortina no modelo Duncan-Chang contra a escavação. No entanto, no modelo Mohr-Coulomb, é junto à superfície que ocorrem os maiores deslocamentos e, conseqüentemente é onde existem os maiores momentos.

Na Figura 4.16 b) verifica-se que os maiores esforços transversos ocorrem no modelo Duncan-Chang, o que é perceptível pelo modelo Duncan-Chang uma vez que neste existem maiores momentos fletores.

4.3.5. Esforços nas ancoragens

É apresentado na Figura 4.17 a) e Figura 4.17 b), a força axial das ancoragens no modelo de M-C e de D-C, respetivamente. As ancoragens estão inseridas na secção S1 da Figura 3.13.

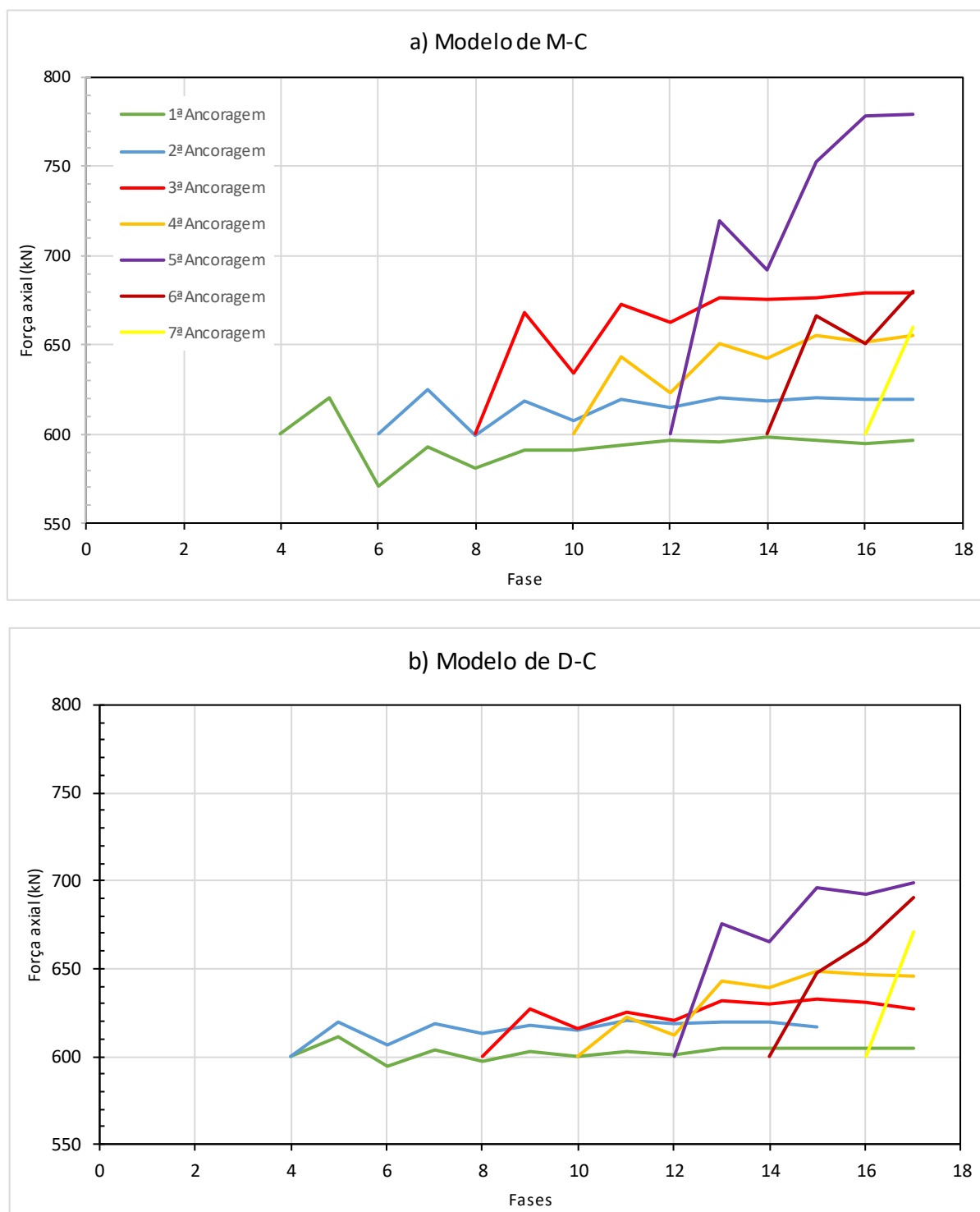


Figura 4.17- Evolução dos esforços axiais nas ancoragens com o faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.17 é possível verificar que quando há uma fase de escavação existe um aumento da força axial nas ancoragens e, por sua vez quando existe a instalação de um novo nível de

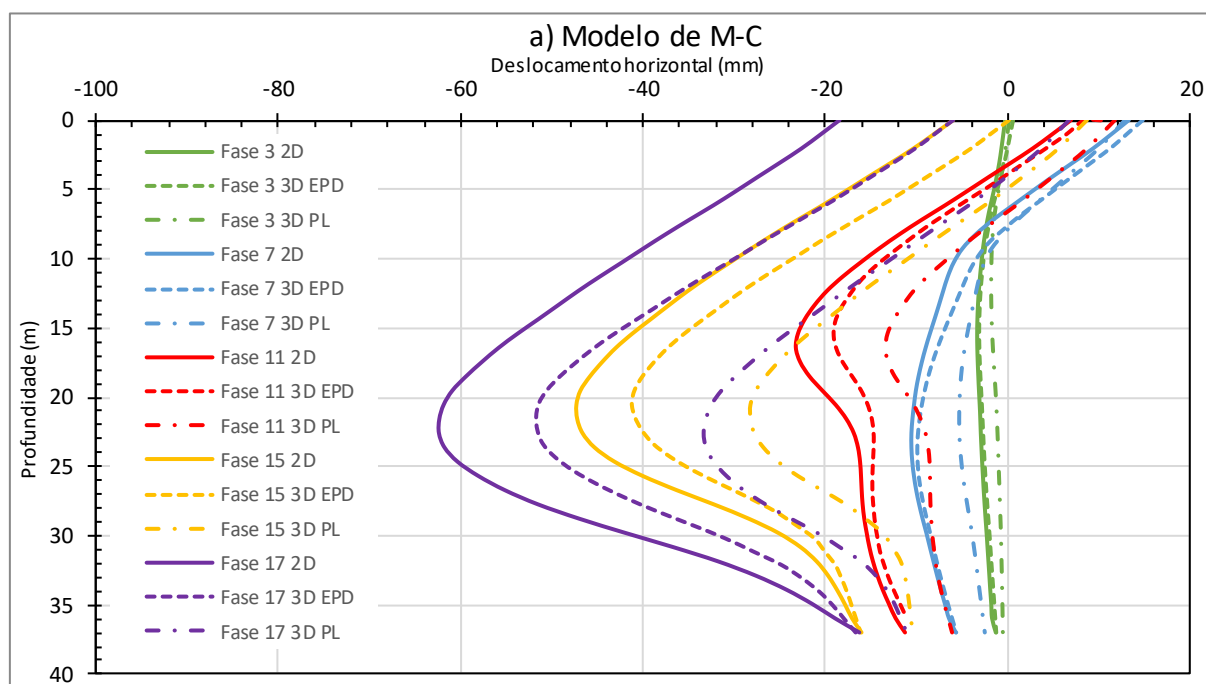
ancoragens diminui o valor da força axial das restantes ancoragens. É ainda possível verificar que existe uma grande variação nas 3 últimas ancoragens no modelo Duncan-Chang, (uma vez que a localização dessas ancoragens corresponde ao maior deslocamento da cortina, assumindo a 5ª ancoragem particular relevância. No modelo Duncan-Chang a ancoragem com maior força axial é a 5ª assumindo um valor perto de 700kN. No modelo Mohr-Coulomb a ancoragem mais esforçada é também a 5ª ancoragem com um valor de cerca de 670kN.

4.4. Comparação entre modelações 2D e 3D

Neste capítulo serão comparados os resultados dos modelos 2D (Figura 3.11), 3D EPD (Figura 3.12) e 3D PL (Figura 3.13), para os dois modelos constitutivos de solos, Mohr-Coulomb e Duncan-Chang. Serão apresentadas apenas algumas fases consideradas as mais representativas para esta análise comparativa.

4.4.1. Deslocamentos na cortina

Em seguida são apresentados os deslocamentos da cortina no modelo 2D, na secção S1 do modelo 3D PL e na secção S1 do modelo 3D EPD. Serão apresentadas as fases 3,7,11,15 e 17, uma vez que são as que tem maiores deslocamentos. Na Figura 4.18 a) e Figura 4.18 b) são representados os modelos de M-C e D-C, respetivamente.



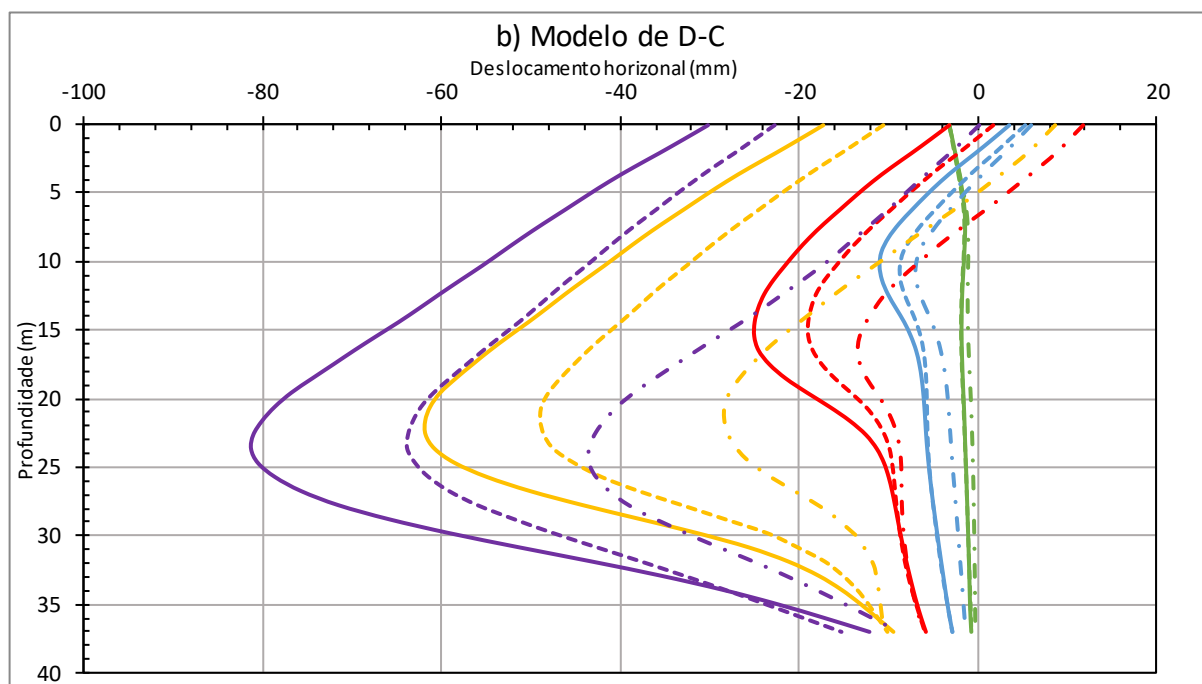


Figura 4.18- Deslocamentos horizontais na secção central da cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Ao observar a Figura 4.18 é possível concluir que os deslocamentos horizontais são superiores aos dos modelos 2D, seguindo-se dos modelos 3D EPD e, por último o modelo 3D PL. É possível perceber ainda que no modelo Duncan-Chang os deslocamentos são superiores. O esperado seria que no modelo 3D EPD os resultados fossem semelhantes aos do modelo 2D. No entanto, não foi possível retirar essa conclusão, o que poderá ser explicado pelo facto da dissipação de forças ser efetuada para outra direção, o que pelo contrário não se verifica no modelo 2D uma vez que existem apenas dois eixos. O modelo 2D tem deslocamentos na cortina de cerca de 2 vezes superiores aos do modelo 3D com paredes laterais. Verifica-se ainda que o avanço da cortina contra o terreno é superior no modelo 3D com paredes laterais.

Em seguida, são apresentados os deslocamentos horizontais na cortina na secção longitudinal localizada a 22 metros de profundidade. Os deslocamentos foram retirados da secção S3 do modelo 3D EPD e 3D PL na Figura 3.12 e Figura 3.13, respetivamente. O modelo 2D é representado apenas por um ponto, localizado a 22 metros de profundidade. As fases exibidas são as referidas anteriormente. Na Figura 4.19 a) e Figura 4.19 b) são exibidos os modelos de M-C e D-C, respetivamente.

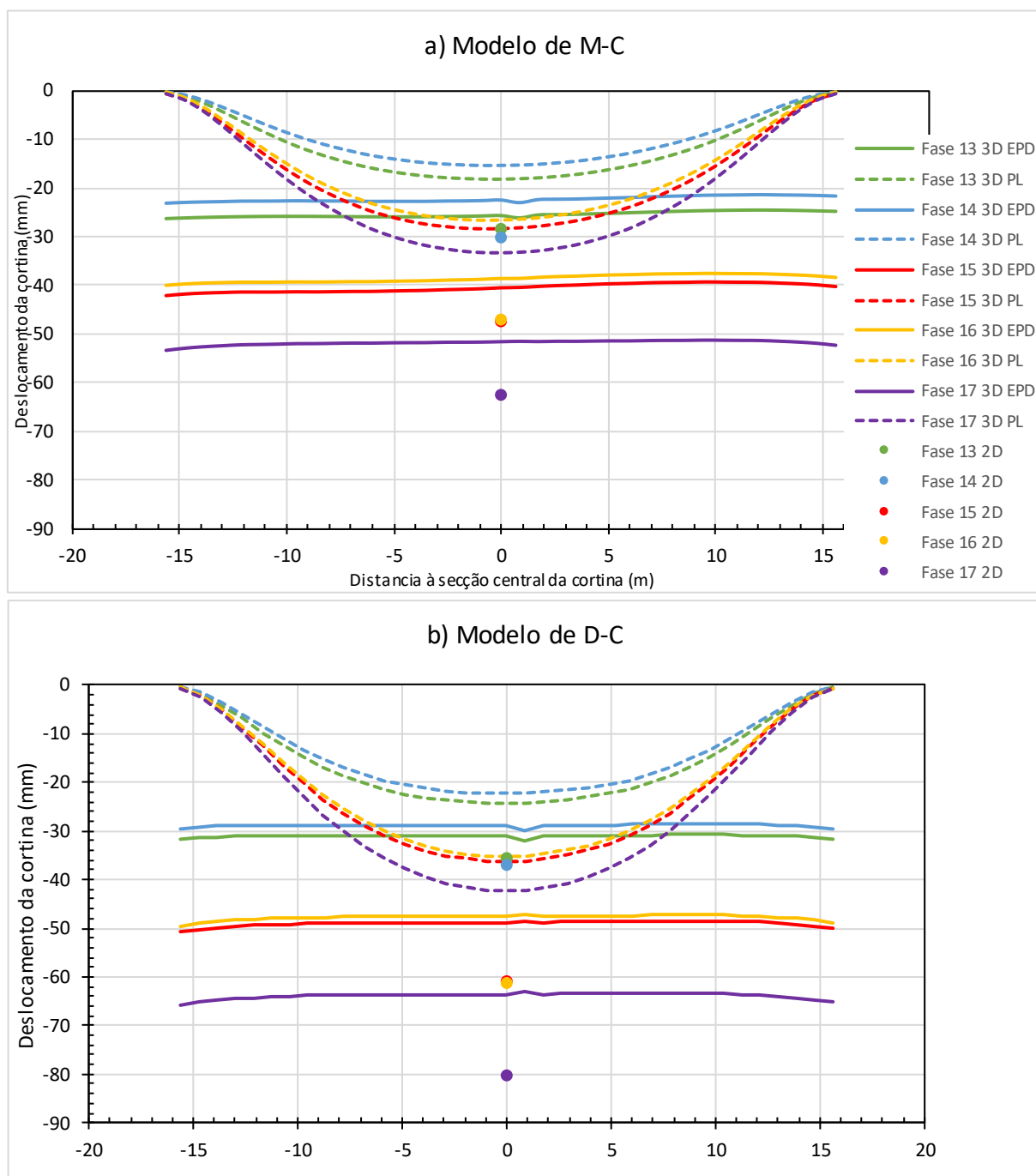


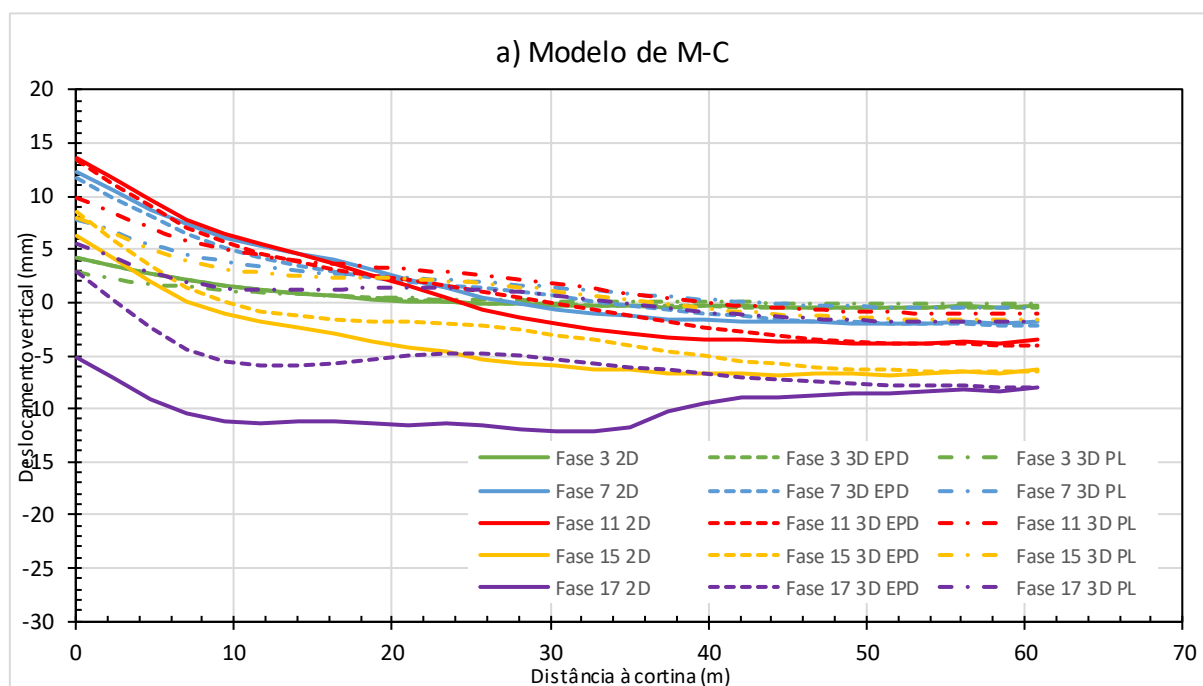
Figura 4.19- Deslocamentos horizontais na secção longitudinal, (22m profundidade), a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.19 são observados os deslocamentos na cortina aos 22 metros de profundidade na face da cortina numa profundidade de 22 metros, onde se localiza o 6º nível de ancoragens, sendo também nessa zona que se verificam maiores deslocamentos. A influência das paredes laterais no modelo 3D PL é bastante visível, funcionando estas como um encastramento que,

resulta em deslocamentos quase nulos. No entanto, no modelo, a parede foi modelada como um elemento contínuo e, no terreno a parede é composta por estacas moldadas, o que significa que ocorre uma redução de rigidez junto aos cantos e, como tal devem-se esperar deslocamentos superiores aos previstos pelo modelo 3D PL. No entanto, o modelo 2D é aquele em que os deslocamentos são superiores tanto no modelo de D-C, como no M-C, seguindo-se o modelo 3D EPD e, por último o modelo 3D PL. O modelo 3D EPD, apresenta deslocamentos constantes em toda a face, tal como era expetável.

4.4.2. Assentamentos na superfície

Na Figura 4.20 a) e Figura 4.20 b) são apresentados os deslocamentos na superfície nos modelos de M-C e D-C, respetivamente. Em ambas as figuras são apresentados os deslocamentos horizontais no maciço do modelo 2D e, os deslocamentos na secção S2 do modelo 3D EPD e 3D PL.



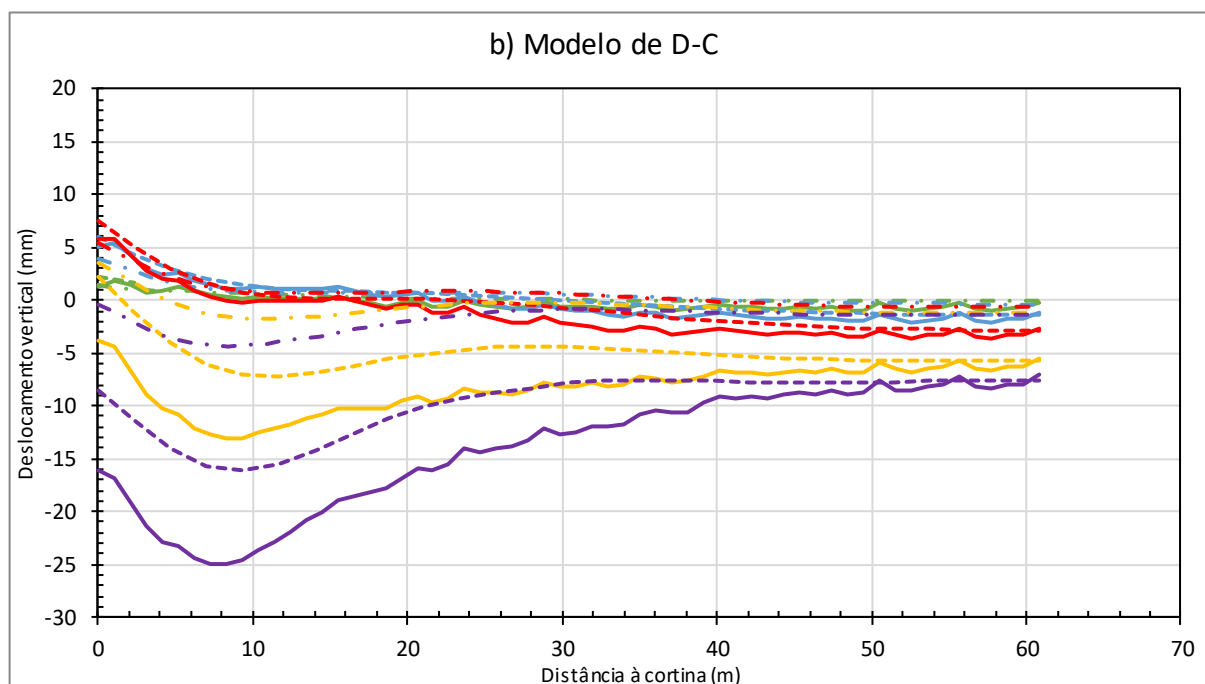


Figura 4.20- Assentamentos na superfície ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.20 é possível analisar os deslocamentos na superfície do maciço, comparando os modelos analisados. O modelo em que existem mais assentamentos é o modelo 2D cujo comportamento do solo foi modelado com o modelo de Duncan-Chang, o que seria previsível visto que esse modelo é aquele onde existem maiores deslocamentos na lateral da cortina. O modelo 3D PL é aquele em que se verificam menores assentamentos no maciço, sendo também aquele em que existem menores deformações. É no modelo Mohr-Coulomb que existem maiores empolamentos junto da cortina enquanto que o modelo Duncan-Chang é responsável pelos maiores assentamentos na superfície do maciço. Os maiores empolamentos ocorrem no modelo 2D e no modelo 3D EPD. Em suma, o modelo 3D PL é aquele em que existe menores variações de assentamentos/empolamentos. Por outro lado, o modelo 2D é aquele em que essa variação é maior. Mais se verifica que a deformada do modelo 2D e 3D EPD são bastante semelhantes.

4.4.3. Esforços na cortina

Em seguida, são apresentados o diagrama de momentos aplicados na cortina no modelo 2D, na secção S1 do modelo 3D PL e 3D EPD. Na Figura 4.21 a) e Figura 4.21 b), são apresentados o modelo de M-C e D-C, respetivamente.

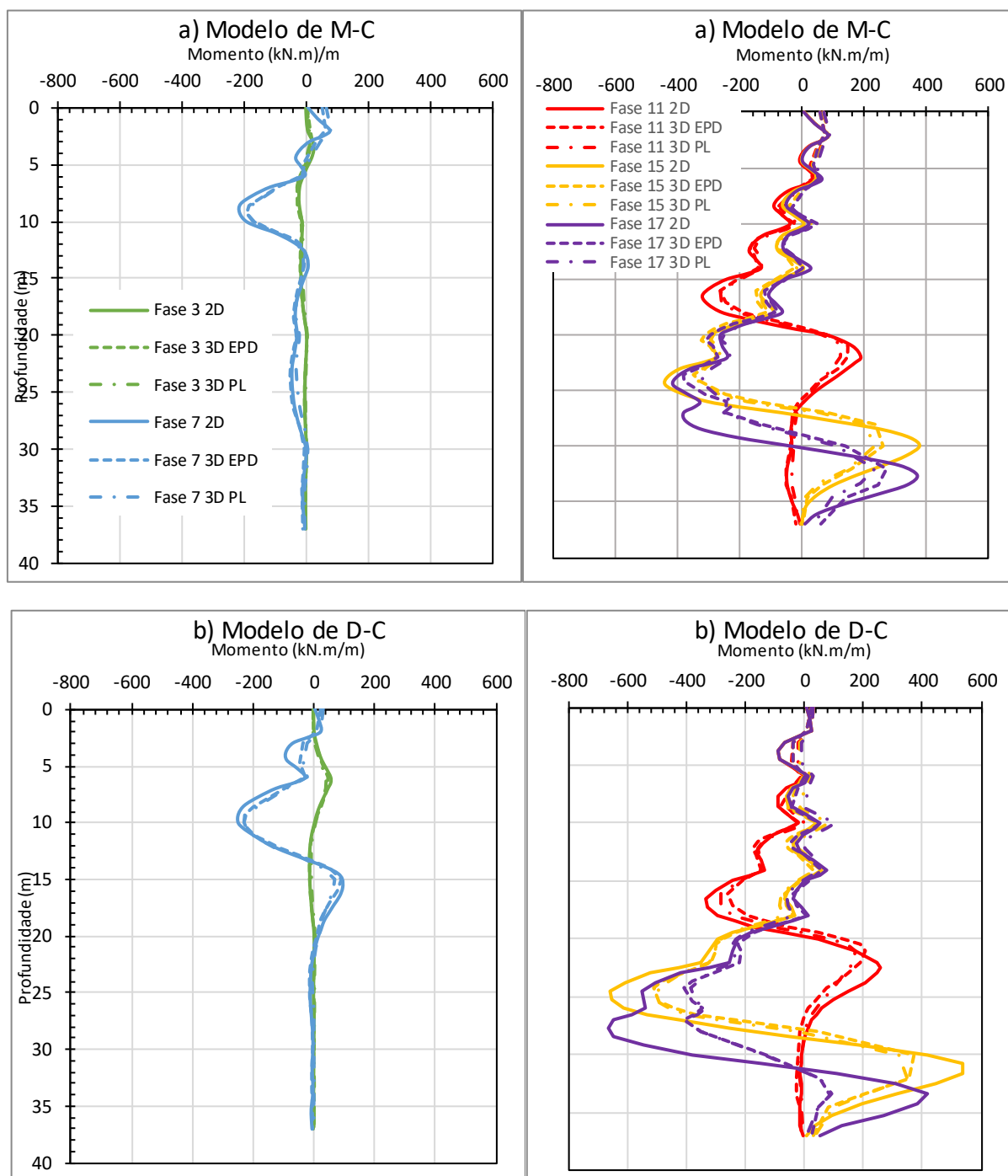
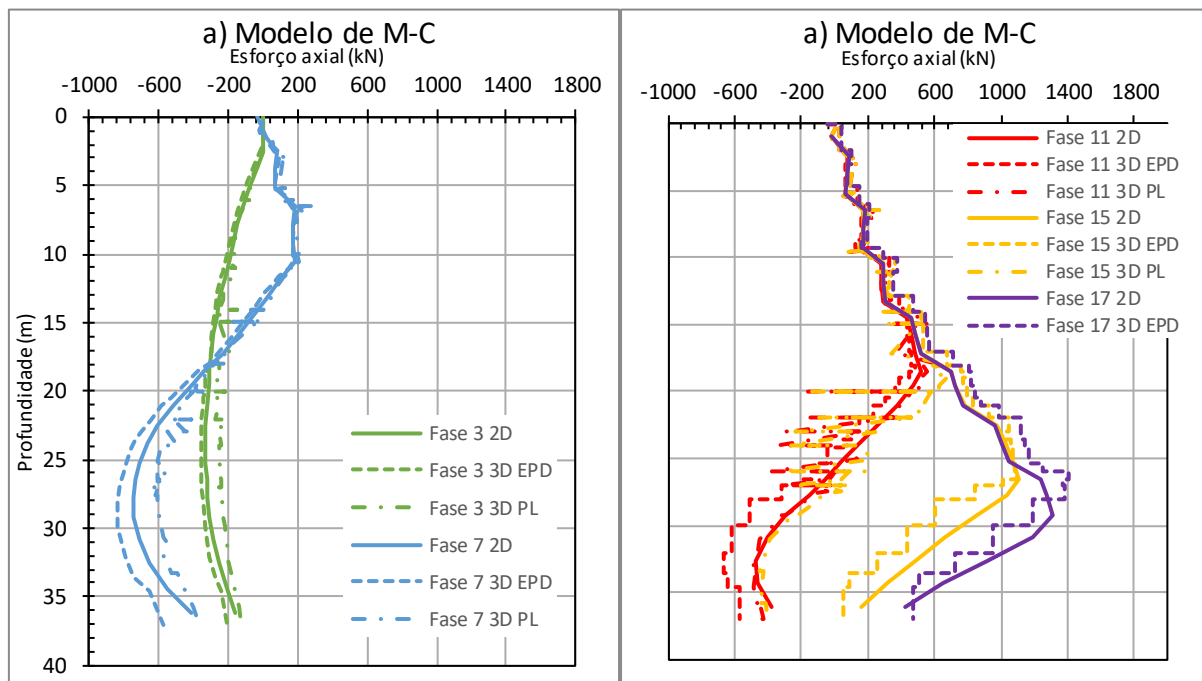


Figura 4.21- Diagrama de momentos flectores na cortina ao longo do faseamento da escavação:
a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Os momentos flectores apresentados na Figura 4.21 estão em conformidade com os valores apresentados nos deslocamentos da secção central da cortina. O maior momento acontece no modelo 2D, sendo que os maiores deslocamento também ocorrem no mesmo. Em ambos os modelos é perceptível a influência das ancoragens, representadas pelos picos do diagrama. O

modelo de comportamento de solo Duncan-Chang é onde os momentos fletores são superiores, quando comparados com o modelo Mohr-Coulomb, que apresenta os maiores deslocamentos. O modelo 3D EPD e 3D PL têm momentos fletores na secção S1, bastante próximos, sendo que era expectável que no modelo 3D PL fossem inferiores devido aos seus menores deslocamentos. No entanto, o facto do modelo 3D PL ser travado pelas paredes laterais faz com que haja diminuição dos deslocamentos sem afetar os momentos da secção central.

Em seguida, são apresentados os diagramas de esforço axial no modelo de M-C e de D-C na Figura 4.22 a) e Figura 4.22 b), respetivamente. São apresentados os resultados da cortina do modelo 2D e os resultados da secção S1 da cortina do modelo 3D EPD e 3D PL, representadas na Figura 2.12 e Figura 3.13, respetivamente.



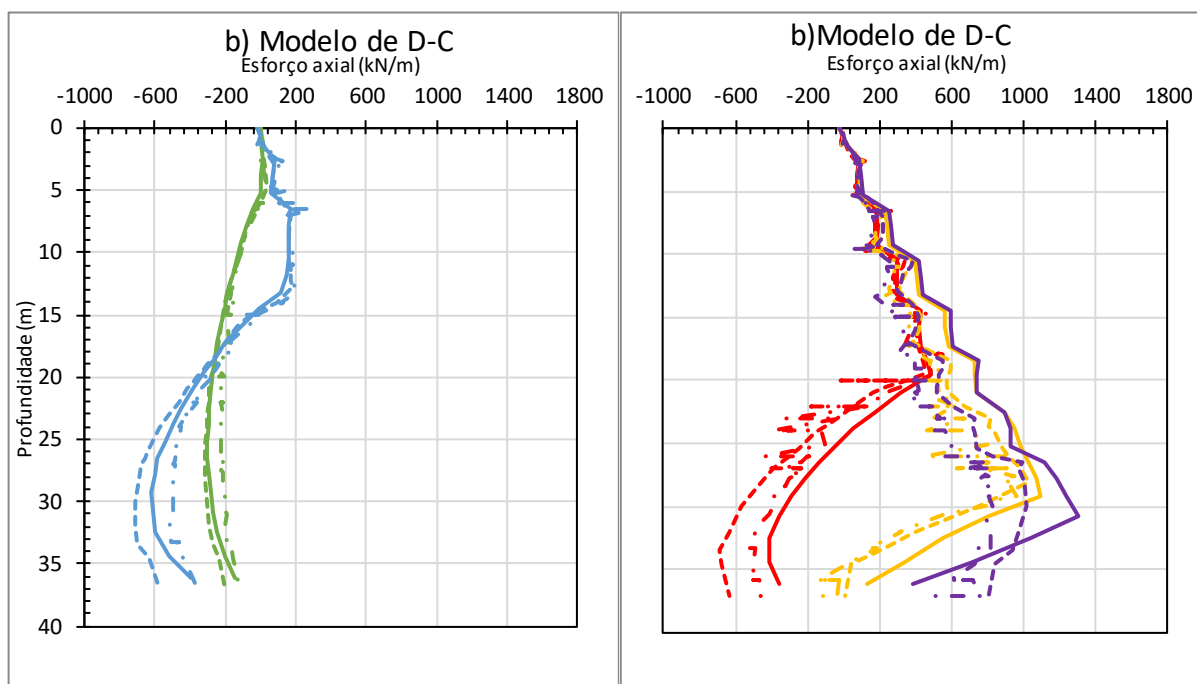


Figura 4.22- Diagrama esforços axiais na cortina ao longo do faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Os diagramas de esforço axial têm comportamentos bastante semelhantes, sendo que a maior influência entre eles é o valor do esforço aplicado pelas ancoragens nas cortinas. Os valores máximos são bastante semelhantes em ambos os modelos. Em todos os modelos é possível verificar os valores negativos causados pelo terreno à cortina, como esforço axial. A maior variação de esforço axial acontece no modelo 2D de D-C, sendo que essa variação pode ser causada por uma grande variação de força axial nas ancoragens. Quanto maior for a força axial aplicada nas ancoragens maior será o valor de esforço axial nas cortinas.

Na Figura 4.23 a) e Figura 4.23 b) são apresentadas as envolventes de momento para o modelo de M-C e D-C, respetivamente. São apresentadas as envolventes de todas as fases de momentos aplicados na cortina no modelo 2D e na secção S1 da cortina do modelo 3D EPD e 3D PL.

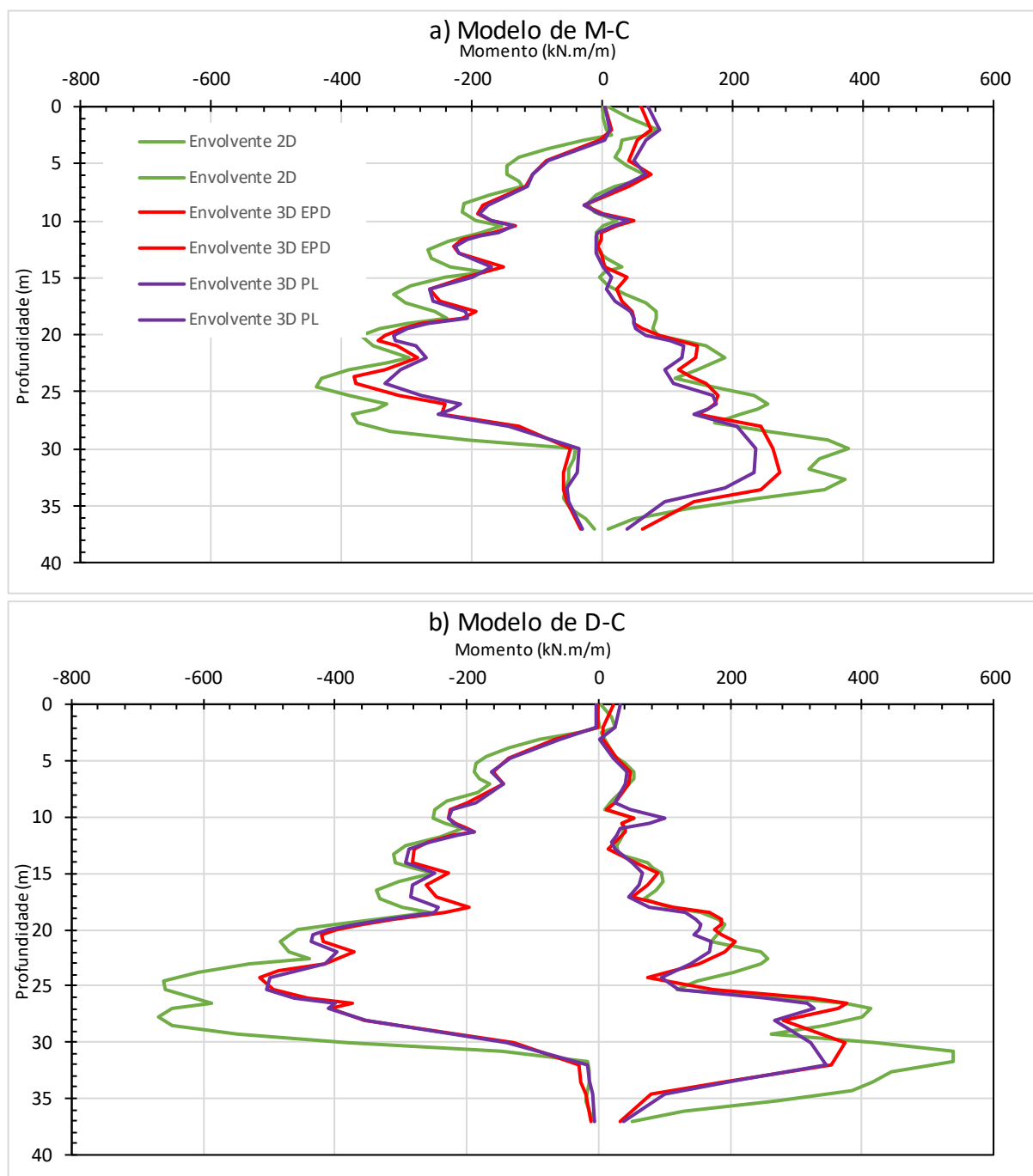
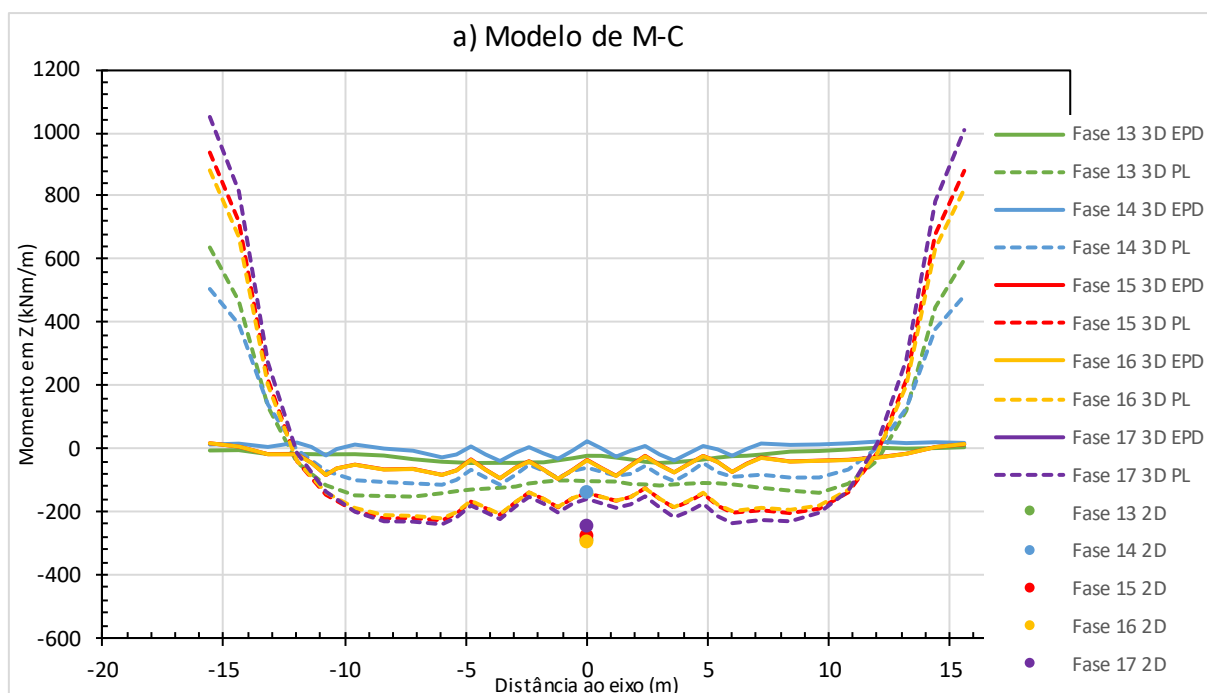


Figura 4.23- Envolventes de momentos fletores na cortina: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C.

Na envolvente de momentos fletores, representada na Figura 4.23, é possível verificar que os momentos na cortina são superiores para os modelos de 2D, sendo que os modelos 3D PL e 3D EPD se encontram bastante próximos. O modelo de comportamento de solo Duncan-Chang é

aquele em que a envolvente de momentos apresenta os maiores valores, existindo nesse mesmo modelo maiores deslocamentos.

Na Figura 4.24 a) e Figura 4.24 b) são exibidos o momento fletor na secção longitudinal da cortina. Os resultados dos momentos advêm da análise da secção S3 do modelo 3D EPD e 3D PL, da Figura 3.12 e Figura 3.13, respetivamente. O modelo 2D é representado por um ponto, sendo esse o valor do momento na cortina. É analisada a fase antes da aplicação do nível de ancoragens e todas as seguintes.



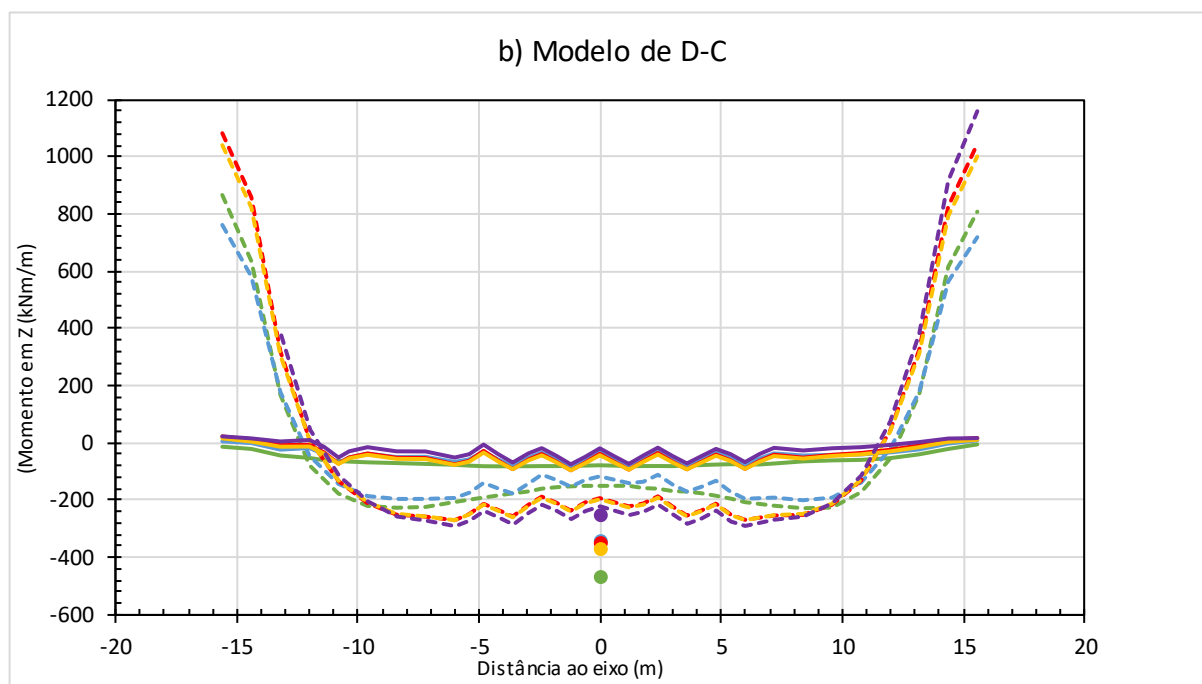


Figura 4.24- Diagrama de momentos fletores na secção longitudinal da cortina (22m de profundidade): a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

Na Figura 4.24 é possível verificar um grande momento no modelo 3D PL localizado junto aos cantos da cortina. A cortina é travada pelas paredes laterais fazendo com que não ocorram deslocamentos nesses pontos, criando assim grandes momentos. É possível verificar ainda a existência de vários picos derivados do 6º nível de ancoragens, acontecendo estes apenas a partir da 14ª Fase. Os momentos fletores máximos continuam a pertencer ao modelo 2D. No entanto, como referido nos deslocamentos, os momentos nos cantos do modelo 3D PL devem ser tomados com alguma precaução, uma vez que a cortina real não tem uma rigidez tão elevada como aquela em que foi efetuada a modelação. O modelo de comportamento de solo Duncan-Chang é aquele em que existem maiores momentos aplicados na secção longitudinal.

4.4.4. Esforços nas ancoragens

Na Figura 4.25 a) e Figura 4.25 b) é mostrada a variação de força axial nas ancoragens com o avanço do faseamento construtivo, no modelo de M-C e de D-C, respetivamente. São representadas todas as ancoragens dos modelos. As ancoragens do modelo 3D EPD e 3D PL são representadas pela secção S1.

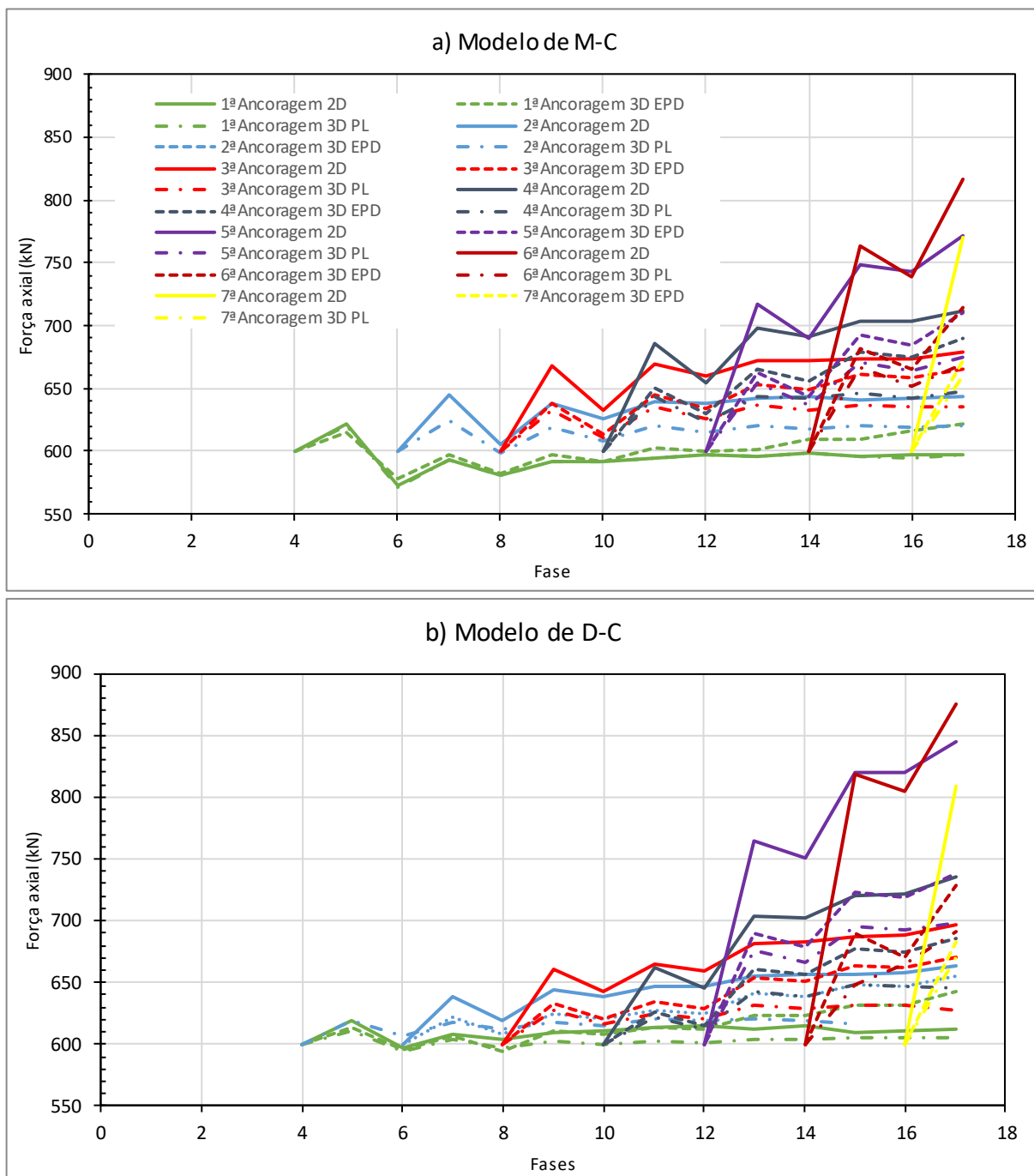


Figura 4.25- Evolução dos esforços axiais nas ancoragens com o faseamento da escavação: a) Modelo de M-C; b) Modelo de D-C

O modelo 2D é aquele em que existe uma maior variação de força axial, sendo que a maior variação existe no modelo 2D Duncan-Chang. Existe ainda uma grande variação de força axial nas três últimas ancoragens, sendo estas aquelas em que existem maiores deslocamentos na

cortina e, conseqüentemente maior variação de força axial. O modelo 3D PL é aquele em que as variações são menores, pois existem menores deslocamentos na cortina.

5. CONCLUSÕES

Comparando as modelações 2D e 3D, o modelo 2D é um modelo bastante simples de trabalhar, o cálculo é bastante rápido e permite resultados razoáveis para os modelos. Esta simplicidade e velocidade de cálculo, é devido às simplificações que estão introduzidas nesse mesmo modelo, sendo ele um estado plano de deformação, não tendo em consideração os efeitos dos cantos. Por outro lado, o modelo 3D é um modelo em que é necessário mais tempo para a realização do próprio modelo, bem como para a recolha dos resultados do mesmo. Um modelo básico de uma escavação no modelo 2D demora cerca de 2 horas a modelar e recolher resultados, o modelo 3D demora 15 horas. Este é muito mais moroso devido a todos os detalhes necessários tais como os níveis de ancoragens, escoras de cantos para toda a cortina.

O modelo de Mohr-Coulomb é um modelo bastante simples, sendo que os parâmetros necessários são usuais em geotecnia. É também um modelo que não necessita de grande memória para correr o cálculo e, que apresenta resultados bons e bastante rápidos dos modelos. No entanto, o modelo Mohr-Coulomb Isotrópico apenas tem em consideração o módulo de deformabilidade assumido inicialmente pelo projetista, não tomando em consideração qualquer alteração que ocorra nas tensões do maciço e, é devido a esse facto que nos modelos apresentados existiam maiores empoamentos do maciço junto da cortina.

O modelo de Duncan-Chang é um modelo em que a definição dos parâmetros não é uma tarefa simples, uma vez que estes são vários e a sua obtenção não é fácil, para adquirir esses parâmetros é necessário realizar um ensaio triaxial e conseguir com que o comportamento do modelo de Duncan-Chang seja semelhante àquele que acontece no triaxial, também podem ser obtidos por bibliografia. O modelo Duncan-Chang tem ainda um problema relacionado com tensões no maciço próximas do valor nulo. Quando isso se verifica, o modelo Duncan-Chang, não consegue convergir devido aos deslocamentos irreais onde as tensões são zero, para esses valores de tensões o módulo de deformabilidade também é 0 o que causa esses deslocamentos. Para solucionar esse problema é necessário que todas as camadas superficiais sejam modeladas com um módulo constante, de modo a que o modelo consiga convergir.

O modelo 2D é, sem dúvida, aquele em que os resultados dos deslocamentos são maiores. Isto deve-se ao facto de estarmos na presença de um modelo de estado plano de deformação sem qualquer tipo de travamentos laterais. Com o aumento dos deslocamentos, existe um maior momento aplicado na cortina e, uma maior variação da força axial das ancoragens.

O modelo Mohr-Coulomb, comparativamente ao modelo Duncan-Chang, é aquele cujos deslocamentos na cortina serão menores, à exceção do deslocamento da superfície da cortina. Isto ocorre devido ao tipo de módulo de deformabilidade usado em cada um dos modelos, sendo que o módulo usado no modelo Mohr-Coulomb é constante em todo o modelo enquanto que, o módulo de Duncan-Chang varia com a tensão principal mínima.

O modelo 3D com Paredes Laterais é onde existem menores deslocamentos na cortina, sendo que os cantos da mesma bastante importantes para esse acontecimento, uma vez que nos cantos a rigidez de translação e de rotação são bastante elevadas, o que leva a que os deslocamentos nessa zona sejam nulos, provocando um aumento bastante significativo de momentos. Os momentos dos cantos da cortina requerem especial atenção, pois existe pouca informação acerca do dimensionamento dos mesmos. No entanto, no modelo 3D PL foi realizada uma cortina linear e, no terreno estamos perante uma cortina de estacas afastadas, solidarizadas com vigas entre elas. Assim, é necessário ter em atenção a rigidez desses cantos que, na prática, devem ser bastante menores do que a rigidez modelada.

O modelo 3D estado plano de deformação, em teoria, deveria obter os mesmos valores que o modelo 2D. A diferença entre estes dois modelos pode ser explicada pela dissipação de forças no modelo 3D, sendo que no modelo 2D apenas é aplicado num ponto, enquanto no modelo 3D existe uma área de aplicação a que advém uma dispersão de forças em mais uma direção.

Para Clough e O'Rourke (1990), a cortina modelada teria um deslocamento lateral de 60mm, (0,2% da profundidade), e um assentamento junto da mesma de 45mm, (0,15% da profundidade). Nos resultados precedentes da análise dos modelos não existe nenhum que estejam em concordância com ambos os resultados, pois os valores estabelecidos pelos autores são para argilas duras. O tipo de solo usado no modelo não tem as características de uma argila dura o faz com que haja maiores deslocamentos no modelo. O deslocamento lateral da cortina tem valores próximo dos previstos pelos autores, sendo que os assentamentos junto da cortina não acompanham esses resultados. Tal facto poderá dever-se aos efeitos que as ancoragens tiveram no início das fases

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bustamante, M., Droix, B. (1985). “Une Méthode Pour le Calcul des Tirants et des Micropieux Injectés”. Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées, Paris, n. 140, pp. 75-92.

Szepesházi, A. Mahler, A., Móczár, B. (2016).” Three Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations’ Concave Corners”

Ou, Chang-Yu & Chiou, Dar-Chang & Wu, Tzong-Shiann. (1996). “Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations.” Journal of Geotechnical Engineering Volume 122 Issue 5, 122. 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:5(337)

Ustaoglu, A. (2015). “Comparison of deformations from 2D and 3D fem analysis with field measurements of a top down deep excavations in Bagcilar metro station”. Tese de mestrado Middle East Technical University, Ankara.

Rocscience (2017) Manual (Consultado em 12/10/2017). Disponível em www.rocscience.com/help/rs2/#t=getting_started%2FRS2_Applications_Overview.htm

Metro Lisboa (2017) História (Consultado em 23/04/2017) Disponível em www.metrolisboa.pt/institucional/conhecer/historia-do-metro/

Almeida e Sousa, J. e Pedro, A. (2017). "Dimensionamento de ancoragens". Apontamentos de Obras de Escavação e Contenção

Duncan, J., Chang, C. (1970). "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soil". ASCE - Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 96, pp. 1629-1653.

Terzaghi, K., Peck, R. (1967). "Soil Mechanics in Engineering Practice". John Wiley and Sons, Inc., New York.

Terzaghi, K. (1943). "Theoretical Soil Mechanics". John Wiley and Sons, Inc., New York.

Plaxis Manual material models (Consultado em 17/05/2017). Disponível em <https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-2d-manuals/>

Clough, G.W., e O'Rourke, T.D., "Construction Induced Movements of Insitu Walls", Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE, pp. 439-470, 1990.