



**Laís Andrade Viana**

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

## **Pressões Sobre Cortinas de Contenção em Solos com Nível Freático Elevado**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientador: Nuno Manuel da Costa Guerra, Professor  
Associado, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Rui Lopes Baltazar Micaelo  
Arguente: Prof. Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes de Melo  
Vogal: Prof. Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro de 2014**



Pressões Sobre Cortinas de Contenção em Solos com Nível Freático Elevado

Copyright © de Laís Andrade Viana, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.







# Agradecimentos

Expresso os meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que directa ou indirectamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

Ao orientador, Professor Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra, pela forma como conseguiu transmitir conhecimentos ao longo de todo o percurso académico, motivação, disponibilidade e empenho com que orientou este trabalho.

À todos os Professores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa que de algum modo fizeram parte e contribuíram para o meu percurso académico, em especial à Professora Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana.

Aos meus colegas e amigos pelo companheirismo e entreaajuda ao longo desses anos, em especial aos que se tornaram grandes amigos que levo para a vida. A nostalgia que já nos acomete é resultado do que construímos juntos.

À minha irmã por tudo o que ela sempre foi e representou na minha vida, sendo fundamental na minha formação.

Agradeço, especialmente, aos meus pais por tudo, pela educação e por todas as oportunidades que sempre me proporcionaram, ainda que sempre acompanhadas de grandes expectativas, pelo exemplo que sempre foram e principalmente pelo amor e confiança que sempre depositaram em mim.



# Resumo

No pré-dimensionamento de cortinas de contenção flexíveis multi-escoradas são frequentemente utilizados diagramas aparentes, sobretudo para a previsão das cargas nas escoras. Nos casos de níveis freáticos elevados, tais diagramas, em especial quando dizem respeito a solos arenosos, foram obtidos em situações em que foi possível proceder ao rebaixamento do nível freático. O trabalho pretende contribuir para a compreensão da distribuição das pressões totais sobre a cortina nos casos em que tal rebaixamento não se verifique. Começa-se por fazer uma breve análise do problema com base no publicado na bibliografia. Recorre-se a análises tensão-deformação, por elementos finitos, para o estudo de um caso-base, comparando-se cenários em que não se considera a presença de água no terreno com outros em que tal presença se verifica, tanto modelando os efeitos da percolação como assumindo que a cortina impede a entrada de água para a escavação. Procede-se a análise paramétrica que procura estudar os efeitos nas pressões na cortina da altura enterrada, do peso volúmico do solo, da rigidez das escoras, da rigidez da parede, da largura de escavação, da escala do problema e da resistência do terreno. Analisam-se os resultados obtidos e tiram-se algumas conclusões sobre os diagramas a adoptar no pré-dimensionamento para os casos de nível freático elevado.

Palavras-chave: diagramas aparentes, cortinas multi-escoradas, nível freático elevado, percolação.



# Abstract

In the design of flexible retaining walls supported by several levels of struts, apparent design diagrams are frequently used, particularly to predict the loads applied on the struts. When the water table is high, such diagrams, specially for sandy soils, were obtained for cases where the water level could be lowered. The present work intends contributing to the understanding of total stress distribution on the retaining walls for the cases where lowering the water table is not performed. A brief analysis of the problem based on published information is initially performed. Stress-strain finite element analyses are used to analyse a case study, comparing situations where no water is assumed in the soil with other situations where the water table is assumed; in these cases two types of conditions are considered: those where seepage is allowed around the wall into the excavation and those where no seepage is allowed. A parametric analysis is performed, to study the effects on the retaining wall total pressures of the wall length below the excavation level, of the unit weight of the soil, of the strut stiffness, of the wall stiffness, of the excavation width, of the scale of the problem and of the soil strength. Results are analysed and some conclusions are drawn on the diagrams suitable to be adopted in the design of retaining walls with high water table.

Keywords: apparent diagrams, flexible retaining walls supported by several levels of struts, high water table, seepage.



# Conteúdo

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1 Considerações Gerais . . . . .	3
2.2 Pressões de Terras: Diagramas Aparentes de Terzaghi e Peck . . . . .	4
2.3 Pressões Associadas à Água . . . . .	5
2.3.1 Introdução . . . . .	5
2.3.2 Diagramas Aparentes para o Caso de Pressões Hidrostáticas . . . . .	7
2.3.3 Diagramas Aparentes para o Caso de Escoamento em Regime Estacionário . . . . .	11
2.4 Estabilidade do Fundo de Escavações em Solos Arenosos . . . . .	12
2.5 Considerações Finais . . . . .	14
<b>3 Caso Base</b>	<b>15</b>
3.1 Procedimento . . . . .	15
3.2 Considerações Gerais . . . . .	17
3.3 Definição do Caso Base . . . . .	19
3.4 Resultados Obtidos - C1-C2-C3 . . . . .	22
3.4.1 Pressões na Cortina . . . . .	23
3.4.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	26
3.4.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	29
3.4.4 Análise da Estabilidade Hidráulica . . . . .	30
3.4.5 Pontos Plásticos . . . . .	31
3.4.6 Tensões de Corte Relativas . . . . .	35
3.4.7 Deslocamentos Totais . . . . .	35
3.4.8 Carga Hidráulica no Maciço . . . . .	42
3.4.9 Esforços na Cortina . . . . .	42

3.5	Resultados Obtidos - C4-C5 . . . . .	46
3.5.1	Pressões na Cortina . . . . .	46
3.5.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	50
3.5.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	50
3.5.4	Pontos Plásticos . . . . .	54
3.5.5	Tensões de Corte Relativas . . . . .	54
3.5.6	Deslocamentos Totais . . . . .	59
3.5.7	Esforços na Cortina . . . . .	59
<b>4</b>	<b>Análise Paramétrica para o Caso de Escoamento em Regime Estacionário</b>	<b>65</b>
4.1	Introdução . . . . .	65
4.2	Influência da Ficha . . . . .	65
4.2.1	Pressões na Cortina . . . . .	66
4.2.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	70
4.2.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	74
4.2.4	Análise da Estabilidade Hidráulica . . . . .	75
4.2.5	Pontos Plásticos . . . . .	76
4.3	Influência da Rigidez Axial das Escoras . . . . .	79
4.3.1	Pressões na Cortina . . . . .	79
4.3.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	79
4.3.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	81
4.4	Influência da Rigidez da Parede . . . . .	84
4.4.1	Pressões na Cortina . . . . .	84
4.4.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	86
4.4.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	88
4.5	Influência da Largura de Escavação . . . . .	89
4.5.1	Pressões na Cortina . . . . .	89
4.5.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	91
4.5.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	92
4.5.4	Análise da Estabilidade Hidráulica . . . . .	93
4.5.5	Pontos Plásticos . . . . .	94
4.6	Influência da Escala do Problema . . . . .	96
4.6.1	Pressões na Cortina . . . . .	97
4.6.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	97
4.6.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	100
4.7	Influência das Características Mecânicas do Terreno . . . . .	101
4.7.1	Pressões na Cortina . . . . .	101
4.7.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	103
4.7.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	105
4.8	Influência do Coeficiente de Impulso em Repouso ( $\phi' = 40^\circ$ ) . . . . .	106
4.8.1	Pressões na Cortina . . . . .	106

4.8.2	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	107
4.9	Influência do Peso Volúmico ( $\phi' = 30^\circ$ ) . . . . .	108
4.9.1	Pressões na Cortina . . . . .	108
4.9.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	109
4.9.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	111
4.9.4	Análise da Estabilidade Hidráulica . . . . .	113
4.9.5	Pontos Plásticos . . . . .	114
4.10	Influência do Peso Volúmico ( $\phi' = 40^\circ$ ) . . . . .	116
4.10.1	Pressões na Cortina . . . . .	116
4.10.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	116
4.10.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	118
<b>5</b>	<b>Análise Paramétrica para o Caso de Pressões Hidrostáticas</b>	<b>119</b>
5.1	Introdução . . . . .	119
5.2	Influência da Ficha . . . . .	119
5.2.1	Pressões na Cortina . . . . .	120
5.2.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	124
5.2.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	124
5.3	Influência da Rigidez Axial das Escoras . . . . .	129
5.3.1	Pressões na Cortina . . . . .	130
5.3.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	130
5.3.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	133
5.4	Influência da Rigidez da Parede . . . . .	134
5.4.1	Pressões na Cortina . . . . .	134
5.4.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	136
5.4.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	136
5.5	Influência da Largura de Escavação . . . . .	139
5.5.1	Pressões na Cortina . . . . .	139
5.5.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	139
5.5.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	142
5.6	Influência da Escala do Problema . . . . .	143
5.6.1	Pressões na Cortina . . . . .	143
5.6.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	144
5.6.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	144
5.7	Influência das Características Mecânicas do Terreno . . . . .	148
5.7.1	Pressões na Cortina . . . . .	148
5.7.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	148
5.7.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	151
5.8	Influência do peso volúmico ( $\phi' = 30^\circ$ ) . . . . .	152
5.8.1	Pressões na Cortina . . . . .	152
5.8.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	154

5.8.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	154
5.9	Influência do Peso Volúmico ( $\phi' = 40^\circ$ ) . . . . .	156
5.9.1	Pressões na Cortina . . . . .	157
5.9.2	Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz . . . . .	157
5.9.3	Forças nas Escoras e Pressões Aparentes . . . . .	158
<b>6</b>	<b>Proposta Preliminar para os Diagramas Aparentes</b>	<b>161</b>
6.1	Introdução . . . . .	161
6.2	Pressões Adimensionalizadas . . . . .	162
<b>7</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>169</b>
7.1	Conclusões . . . . .	169
7.2	Desenvolvimentos Futuros . . . . .	170
	<b>Bibliografia</b>	<b>171</b>

# Lista de Figuras

2.1	Diagramas de Terzaghi e Peck (Guerra, 2003) . . . . .	5
2.2	Distribuição simplificada das pressões da água: situação de percolação para o interior da escavação (Guerra, 2003) . . . . .	6
2.3	Método 2, peso volúmico efectivo para solos parcialmente saturados (Ebeling e Morrison, 1992) . . . . .	8
2.4	Diagrama aparente de pressões de terra calculado usando parâmetros de resistência do solo em tensão efectiva com nível freático hidrostático (Strom e Ebeling, 2001) . . . . .	9
2.5	Aplicação dos métodos 1 e 2 à situação em que se considera o nível freático à superfície . . . . .	10
2.6	Diagramas aparentes para situações com nível freático elevado . . . . .	10
2.7	Diagramas aparentes para situações com nível freático elevado para o caso de escoamento em regime estacionário . . . . .	11
2.8	Bloco para a análise da segurança quanto ao levantamento hidráulico . . . . .	13
3.1	Representação esquemática dos diferentes cenários considerados . . . . .	16
3.2	Representação esquemática do modelo utilizado . . . . .	17
3.3	Representação esquemática dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 tal como são abordados no Caso Base . . . . .	19
3.4	Modelo utilizado no programa de elementos finitos Plaxis . . . . .	20
3.5	Cenários C1, C2 e C3: Pressões na cortina após a instalação da parede (em cima), após a 1 <sup>a</sup> escavação (ao centro), e após a 2 <sup>a</sup> escavação (em baixo) . . . . .	24
3.6	Cenários C1, C2 e C3: Pressões na cortina após a 3 <sup>a</sup> escavação (em cima) e após a 4 <sup>a</sup> escavação (em baixo); na figura de baixo inclui-se igualmente as pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras que serão abordadas na secção 3.4.3 . . . . .	25
3.7	Cenário C1: Pressões na cortina após a 4 <sup>a</sup> escavação e pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras . . . . .	26
3.8	Cenários C1, C2 e C3: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta após a 1 <sup>a</sup> escavação e após a 2 <sup>a</sup> escavação . . . . .	27
3.9	Cenários C1, C2 e C3: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta após a 3 <sup>a</sup> escavação e após a 4 <sup>a</sup> escavação . . . . .	28
3.10	Cenário 1: Pontos plásticos em cada fase de escavação . . . . .	32
3.11	Cenário 2: Pontos plásticos em cada fase de escavação . . . . .	33

3.12	Cenário 3: Pontos plásticos em cada fase de escavação . . . . .	34
3.13	Cenário 1: Tensões de corte relativas em cada fase de escavação . . . . .	36
3.14	Cenário 2: Tensões de corte relativas em cada fase de escavação . . . . .	37
3.15	Cenário 3: Tensões de corte relativas em cada fase de escavação . . . . .	38
3.16	Cenário 1: Deslocamentos totais em cada fase de escavação . . . . .	39
3.17	Cenário 2: Deslocamentos totais em cada fase de escavação . . . . .	40
3.18	Cenário 3: Deslocamentos totais em cada fase de escavação . . . . .	41
3.19	Cenário 3: Equipotenciais em cada fase de escavação . . . . .	43
3.20	Cenários C1 (em cima), C2 (ao centro) e C3 (em baixo): Esforços na cortina em cada fase de escavação . . . . .	44
3.21	Cenários C1, C2 e C3: Esforços na cortina após a 4 <sup>a</sup> escavação . . . . .	45
3.22	Cenários C4 e C5: Pressões na cortina após a instalação da parede (em cima), após a 1 <sup>a</sup> escavação (ao centro), e após a 2 <sup>a</sup> escavação (em baixo) . . . . .	47
3.23	Cenários C4 e C5: Pressões na cortina após a 3 <sup>a</sup> escavação (em cima) e após a 4 <sup>a</sup> escavação (em baixo); na figura de baixo inclui-se igualmente as pressões aparentes que serão abordadas na secção 3.5.3 . . . . .	48
3.24	Cenários C3 e C5: Pressões na cortina após a 4 <sup>a</sup> escavação; na figura 3.24(a) inclui-se igualmente as pressões aparentes que serão abordadas na secção 3.5.3 . . . . .	49
3.25	Cenários C4 e C5: Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta após a 1 <sup>a</sup> escavação e após a 2 <sup>a</sup> escavação . . . . .	51
3.26	Cenários C4 e C5: Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta após a 3 <sup>a</sup> escavação e após a 4 <sup>a</sup> escavação . . . . .	52
3.27	Cenários C3 e C5: Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta após a 4 <sup>a</sup> escavação . . . . .	53
3.28	Cenário 4: Pontos plásticos em cada fase de escavação . . . . .	55
3.29	Cenário 5: Pontos plásticos em cada fase de escavação . . . . .	56
3.30	Cenário 4: Tensões de corte relativas em cada fase de escavação . . . . .	57
3.31	Cenário 5: Tensões de corte relativas em cada fase de escavação . . . . .	58
3.32	Cenário 4: Deslocamentos totais em cada fase de escavação . . . . .	60
3.33	Cenário 5: Deslocamentos totais em cada fase de escavação . . . . .	61
3.34	Cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Esforços na cortina em cada fase de escavação . . . . .	62
3.35	Cenários C4 e C5: Esforços na cortina após a 4 <sup>a</sup> escavação . . . . .	63
4.1	Representação esquemática dos cenários C1 e C3 tal como são abordados na análise da influência da variação da ficha . . . . .	66
4.2	Pressões na cortina para D=3m (em cima) e D=4m (em baixo): Comparação entre os cenários C1 e C3 . . . . .	67
4.3	Pressões na cortina para D=5m (em cima), D=6m (ao centro) e D=8m (em baixo): Comparação entre os cenários C1 e C3 . . . . .	68
4.4	Pressões na cortina para o cenário C1 (em cima) e para o cenário C3 (em baixo): Influência da variação da ficha da cortina . . . . .	69

4.5	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para $D=3\text{m}$ : Comparação entre os cenários C1 e C3 . . . . .	70
4.6	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para $D=4\text{m}$ : Comparação entre os cenários C1 e C3 . . . . .	71
4.7	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para $D=5\text{m}$ : Comparação entre os cenários C1 e C3 . . . . .	71
4.8	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para $D=6\text{m}$ : Comparação entre os cenários C1 e C3 (notar a alteração de escala relativamente às figuras 4.5 a 4.7) . . . . .	72
4.9	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para $D=8\text{m}$ : Comparação entre os cenários C1 e C3 . . . . .	72
4.10	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C1 (em cima) e para o cenário C3 (em baixo): Influência da variação da ficha da cortina . . . . .	73
4.11	Pontos plásticos na última fase de escavação para o cenário C3: Influência da variação da ficha da cortina ( $D=3\text{m}$ ; $D=4\text{m}$ e $D=5\text{m}$ ) . . . . .	77
4.12	Pontos plásticos na última fase de escavação para o cenário C3: Influência da variação da ficha da cortina ( $D=6\text{m}$ e $D=8\text{m}$ ) . . . . .	78
4.13	Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação da rigidez das escoras . . . . .	80
4.14	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C1: Influência da variação da rigidez das escoras . . . . .	81
4.15	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C3: Influência da variação da rigidez das escoras. O gráfico de baixo corresponde ao mesmo caso do gráfico de cima com, no entanto, uma diferente escala de deslocamentos que permite ver os deslocamentos para $EA=25000\text{kN/m}$ . . . . .	82
4.16	Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação da rigidez da parede . . . . .	85
4.17	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C1: Influência da variação da rigidez da parede . . . . .	86
4.18	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C3: Influência da variação da rigidez da parede. O gráfico de baixo corresponde ao mesmo caso do gráfico de cima com, no entanto, uma diferente escala de deslocamentos que permite ver os deslocamentos para $e=0,2\text{m}$ . . . . .	87
4.19	Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação da largura de escavação . . . . .	90
4.20	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C1: Influência da variação da largura de escavação . . . . .	91
4.21	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C3: Influência da variação da largura de escavação . . . . .	91
4.22	Pontos plásticos na última fase de escavação para o cenário C3: Influência da variação da largura de escavação . . . . .	95
4.23	Representação esquemática do cenário C3 tal como é abordado na análise da influência da escala do problema . . . . .	96

4.24	Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação da escala do problema . . . . .	98
4.25	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta para o cenário C1: Influência da variação da escala do problema . . . . .	99
4.26	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta para o cenário C3: Influência da variação da escala do problema . . . . .	99
4.27	Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação das características mecânicas do terreno . . . . .	102
4.28	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta para o cenário C1: Influência da variação das características mecânicas do terreno . . . . .	104
4.29	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta para o cenário C3: Influência da variação das características mecânicas do terreno . . . . .	104
4.30	Pressões na cortina para o cenário C3: Influência da variação do coeficiente de impulso em repouso . . . . .	107
4.31	Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação do peso volúmico . . . . .	110
4.32	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta para o cenário C1: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	111
4.33	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico. O gráfico de baixo corresponde ao mesmo caso do gráfico de cima com, no entanto, uma diferente escala de deslocamentos que permite ver os deslocamentos para $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ . . . . .	112
4.34	Pontos plásticos na última fase de escavação para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	115
4.35	Pressões na cortina para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico	117
4.36	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	117
5.1	Representação esquemática dos cenários C4 e C5 tal como são abordados na análise da influência da variação da ficha . . . . .	120
5.2	Pressões na cortina para D=0m (em cima), D=2m (ao centro) e D=4m (em baixo): Comparação entre os cenários C4 e C5 . . . . .	121
5.3	Pressões na cortina para D=6m (em cima), D=8m (ao centro) e D=10m (em baixo): Comparação entre os cenários C4 e C5 . . . . .	122
5.4	Pressões na cortina para o cenário C4 (em cima) e para o cenário C5 (em baixo): Influência da variação da ficha da cortina . . . . .	123
5.5	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta para D=0m: Comparação entre os cenários C4 e C5 . . . . .	125
5.6	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta para D=2m: Comparação entre os cenários C4 e C5 . . . . .	125
5.7	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta para D=4m: Comparação entre os cenários C4 e C5 . . . . .	126
5.8	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta para D=6m: Comparação entre os cenários C4 e C5 . . . . .	126

5.9	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para $D=8m$ : Comparação entre os cenários C4 e C5 . . . . .	127
5.10	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para $D=10m$ : Comparação entre os cenários C4 e C5 . . . . .	127
5.11	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C4 (em cima) e para o cenário C5 (em baixo): Influência da variação da ficha da cortina . . . . .	128
5.12	Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação da rigidez das escoras . . . . .	131
5.13	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C4: Influência da variação da rigidez das escoras . . . . .	132
5.14	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C5: Influência da variação da rigidez das escoras . . . . .	132
5.15	Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação da rigidez da parede . . . . .	135
5.16	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C4: Influência da variação da rigidez da parede . . . . .	136
5.17	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C5: Influência da variação da rigidez da parede. O gráfico de baixo corresponde ao mesmo caso do gráfico de cima com, no entanto, uma diferente escala de deslocamentos que permite ver os deslocamentos para $e=0,2m$ . . . . .	137
5.18	Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação da largura de escavação . . . . .	140
5.19	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C4: Influência da variação da largura de escavação . . . . .	141
5.20	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C5: Influência da variação da largura de escavação . . . . .	141
5.21	Representação esquemática do cenário C5 tal como é abordado na análise da influência da escala do problema . . . . .	143
5.22	Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação da escala do problema . . . . .	145
5.23	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C4: Influência da variação da escala do problema . . . . .	146
5.24	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C5: Influência da variação da escala do problema . . . . .	146
5.25	Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação das características mecânicas do terreno . . . . .	149
5.26	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C4: Influência da variação das características mecânicas do terreno . . . . .	150
5.27	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C5: Influência da variação das características mecânicas do terreno . . . . .	150
5.28	Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação do peso volúmico . . . . .	153

5.29	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C4: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	155
5.30	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C5: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	155
5.31	Pressões na cortina para o cenário C5: Influência da variação do peso volúmico	157
5.32	Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C5: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	158
6.1	Pressões adimensionalizadas na cortina para o cenário C1: Influência da variação da ficha da cortina (em cima e à esquerda); Influência da variação da rigidez das escoras (em cima e ao centro); Influência da variação da rigidez da parede (em cima e à direita); Influência da variação da largura de escavação (ao centro e à esquerda); Influência da variação da escala do problema (ao centro e à direita); Influência da variação das características mecânicas do terreno (em baixo e à esquerda); Influência da variação do peso volúmico para o solo base (em baixo e à direita) . . . . .	163
6.2	Pressões adimensionalizadas na cortina para o cenário C3: Influência da variação da ficha da cortina (em cima e à esquerda); Influência da variação da rigidez das escoras (em cima e ao centro); Influência da variação da rigidez da parede (em cima e à direita); Influência da variação da largura de escavação (ao centro e à esquerda); Influência da variação da escala do problema (ao centro e à direita); Influência da variação das características mecânicas do terreno (em baixo e à esquerda); Influência da variação do peso volúmico para o solo base (em baixo e ao centro) e para o solo com melhores características mecânicas (em baixo e à direita) . . . . .	164
6.3	Pressões adimensionalizadas na cortina para o cenário C4: Influência da variação da ficha da cortina (em cima e à esquerda); Influência da variação da rigidez das escoras (em cima e ao centro); Influência da variação da rigidez da parede (em cima e à direita); Influência da variação da largura de escavação (ao centro e à esquerda); Influência da variação da escala do problema (ao centro e à direita); Influência da variação das características mecânicas do terreno (em baixo e à esquerda); Influência da variação do peso volúmico para o solo base (em baixo e à direita) . . . . .	165
6.4	Pressões adimensionalizadas na cortina para o cenário C5: Influência da variação da ficha da cortina (em cima e à esquerda); Influência da variação da rigidez das escoras (em cima e ao centro); Influência da variação da rigidez da parede (em cima e à direita); Influência da variação da largura de escavação (ao centro e à esquerda); Influência da variação da escala do problema (ao centro e à direita); Influência da variação das características mecânicas do terreno (em baixo e à esquerda); Influência da variação do peso volúmico para o solo base (em baixo e ao centro) e para o solo com melhores características mecânicas (em baixo e à direita) . . . . .	166
6.5	Proposta preliminar para diagramas aparentes para situações com nível freá- tico elevado . . . . .	167

# Lista de Tabelas

3.1	Propriedades e parâmetros adotados para o solo . . . . .	21
3.2	Parâmetros adotados para a cortina . . . . .	21
3.3	Parâmetros adotados para as escoras . . . . .	22
3.4	Cenários C1, C2 e C3: Forças nas Escoras . . . . .	29
3.5	Análise da estabilidade hidráulica . . . . .	31
3.6	Cenários C4 e C5: Forças nas Escoras . . . . .	53
4.1	Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da ficha da cortina . . . . .	74
4.2	Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da ficha da cortina . . . . .	74
4.3	Análise da estabilidade hidráulica: Influência da variação da ficha da cortina	75
4.4	Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da rigidez das escoras . . . . .	83
4.5	Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da rigidez das escoras . . . . .	83
4.6	Variação dos parâmetros da cortina . . . . .	84
4.7	Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da rigidez da parede . . . . .	88
4.8	Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da rigidez da parede . . . . .	88
4.9	Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da largura de escavação . . . . .	92
4.10	Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da largura de escavação . . . . .	93
4.11	Análise da estabilidade hidráulica: Influência da variação da largura de escavação . . . . .	93
4.12	Valores adotados para a análise da influência da escala do problema . . . . .	97
4.13	Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da escala do problema . . . . .	100
4.14	Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da escala do problema . . . . .	101
4.15	Propriedades e parâmetros adotados para o solo 2 . . . . .	103

4.16	Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação das características mecânicas do terreno . . . . .	105
4.17	Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação das características mecânicas do terreno . . . . .	105
4.18	Forças nas escoras para o cenário C3: Influência da variação do coeficiente de impulso em repouso . . . . .	107
4.19	Forças máximas nas escoras para o cenário C3: Influência da variação do coeficiente de impulso em repouso . . . . .	108
4.20	Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	111
4.21	Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	113
4.22	Análise da estabilidade hidráulica: Influência da variação do peso volúmico	114
4.23	Forças nas escoras para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico	118
4.24	Forças máximas nas escoras para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	118
5.1	Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da ficha da cortina . . . . .	129
5.2	Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da ficha da cortina . . . . .	129
5.3	Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da rigidez das escoras . . . . .	133
5.4	Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da rigidez das escoras . . . . .	133
5.5	Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da rigidez da parede . . . . .	138
5.6	Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da rigidez da parede . . . . .	138
5.7	Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da largura de escavação . . . . .	142
5.8	Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da largura de escavação . . . . .	142
5.9	Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da escala do problema . . . . .	147
5.10	Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da escala do problema . . . . .	147
5.11	Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação das características mecânicas do terreno . . . . .	151
5.12	Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação das características mecânicas do terreno . . . . .	151
5.13	Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	154

5.14	Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	156
5.15	Forças nas escoras para o cenário C5: Influência da variação do peso volúmico	158
5.16	Forças máximas nas escoras para o cenário C5: Influência da variação do peso volúmico . . . . .	159



# Lista de Símbolos

A	área
$c'_{\text{ref}}$	coesão efectiva de referência
$c_u$	resistência ao corte não drenada
D	altura enterrada (ficha) da estrutura de contenção
dH	perda de carga
dL	distância na qual se dá a perda de carga
E	módulo de deformabilidade
$E_{\text{oed}}$	módulo de deformabilidade tangente para carregamento edométrico primário
$E_{\text{oed,ref}}$	módulo de deformabilidade de referência tangente para carregamento edométrico primário
$E_{\text{ur}}$	módulo de deformabilidade de descarga e recarga
$E_{\text{ur,ref}}$	módulo de deformabilidade de descarga e recarga de referência
$E_{50}$	módulo de deformabilidade secante para metade da tensão de rotura
$E_{50,ref}$	módulo de deformabilidade secante de referência para metade da tensão de rotura
F	coeficiente de segurança em relação ao "piping"
FS	factor de segurança em relação ao levantamento hidráulico
H	altura de escavação
$H_e$	profundidade do substrato rígido e impermeável em relação à superfície
I	inércia
i	gradiente hidráulico
$i_c$	gradiente hidráulico crítico
$i_s$	gradiente hidráulico de saída
$K_a$	coeficiente de impulso activo
$K_0$	coeficiente de impulso em repouso
$K_p$	coeficiente de impulso passivo
$k_x$	coeficiente de permeabilidade na direcção horizontal
$k_y$	coeficiente de permeabilidade na direcção vertical
L	largura de escavação
m	expoente da relação $E = E_{\text{ref}} \left( \frac{\sigma'_{\text{med}}}{p'_{\text{ref}}} \right)^m$
OCR	grau de sobreconsolidação
$p'_{\text{ref}}$	tensão efectiva média de referência
$R_{\text{inter}}$	relação entre a tangente do ângulo de atrito solo-estrutura e a tangente do ângulo de atrito de resistência ao corte do solo
U	força de percolação

$u$	pressão de água nos poros
$u_{\text{perc}}$	pressão de percolação
$\bar{u}_{\text{perc}}$	pressão de percolação média
$W'$	peso efectivo do prisma de solo para verificação da segurança quanto ao levantamento hidráulico
$w$	peso por metro por metro (da cortina)
$z$	profundidade
$\delta$	ângulo de atrito no contato terreno-estrutura
$\gamma$	peso volúmico
$\gamma'$	peso volúmico submerso
$\gamma_e$	peso volúmico efectivo médio
$\gamma_h$	peso volúmico húmido
$\gamma_{\text{sat}}$	peso volúmico saturado
$\gamma_w$	peso volúmico da água
$\nu$	coeficiente de Poisson
$\phi'$	ângulo de atrito interno (ou de resistência ao corte) em tensões efectivas
$\psi$	ângulo de dilatância
$\sigma$	tensão vertical total
$\sigma'$	tensão vertical efectiva
$\sigma'_{\text{med}}$	tensão efectiva média
$\sigma_H$	tensão horizontal
$\sigma'_H$	tensão horizontal efectiva
$\sigma_N$	tensão normal no paramento de uma estrutura de suporte
$\sigma'_N$	tensão normal efectiva no paramento de uma estrutura de suporte
$\tau_{\text{rel}}$	tensão de corte relativa

# Capítulo 1

## Introdução

O presente trabalho aborda a questão das pressões sobre estruturas de contenção flexíveis multi-apoiadas em solos com nível freático elevado. Até à data não há um acordo universal de como ter em consideração nos diagramas de pressões aparentes, para o pré-dimensionamento, a existência de nível freático elevado neste tipo de sistema de estruturas de contenção, o que no entanto é compreensível dada a complexidade do assunto em questão.

O contínuo crescimento populacional e conseqüente expansão urbana resultam numa ocupação do território cada vez mais massiva. É neste seguimento que a exploração adequada do subsolo emerge como evidente, nevrálgica e até imperativa. É portanto inegável a expressividade das escavações "a céu aberto", nas quais são em muitos casos empregues estruturas de contenções flexíveis multi-escoradas, sendo portanto inevitável o reconhecimento da importância destas.

A escolha de determinado tipo de estrutura é influenciada pelas condições de vizinhança geológicas e geotécnicas do local, bem como pelo factor económico. A limitação do espaço para a realização das obras e a busca pela optimização dos espaços disponíveis instiga a preconização de soluções de contenção que possibilitam a escavação vertical, solicitando assim a menor área possível. Evidenciado ao longo dos tempos e constatada uma tendência permanente, as regiões com maior concentração demográfica e maior grau de desenvolvimento urbano situam-se ao longo das zonas costeiras, onde o nível freático elevado é uma condicionante evidente. É neste âmbito que se destaca a adequabilidade de soluções constituídas por estruturas de contenção flexíveis multi-apoiadas, que conseguem contornar e respeitar as condicionantes, visando a minimização das perturbações em infraestruturas e estruturas adjacentes, garantindo ainda a segurança, a eficácia e o desempenho exigidos.

O pré-dimensionamento de cortinas de contenção flexíveis multi-apoiadas, em particular dos seus elementos de apoio - as escoras e as ancoragens - é realizado frequentemente com recurso a diagramas aparentes. Nos casos em que se verifica níveis freáticos elevados, tais diagramas, em especial quando dizem respeito a solos arenosos, foram obtidos em situações em que foi possível proceder ao rebaixamento do mesmo.

Desta forma, uma investigação que conduza a uma melhor compreensão da distribuição das pressões totais sobre a cortina nos casos em que tal rebaixamento não se verifique manifesta-se como fundamental e valorosa não só a nível académico como também económico e ambiental, sendo portanto claro o seu interesse prático a nível de projecto.

Este trabalho tem assim como objectivo ser um contributo para uma melhor compreensão da distribuição das pressões sobre as estruturas de contenção flexíveis multi-escoradas em solos com nível freático elevado através de análise paramétrica, evidenciando a influência dos diferentes parâmetros que manifestam potencial relevância. Por conseguinte, o intuito é obter numericamente diagramas do tipo dos aparentes, para casos com nível freático elevado, apresentando assim uma proposta para a consideração das pressões em tais situações.

Nesta óptica são abordadas as seguintes questões: análise paramétrica relativa à percolação da água e análise paramétrica relativa à presença da água sem percolação, nas quais foram analisadas a influência da ficha, da rigidez axial das escoras, da rigidez da parede, da largura de escavação, da escala do problema, das características mecânicas do terreno e do peso volúmico do solo.

Salienta-se o facto de serem realizadas análises em duas dimensões, admitindo-se portanto estado plano de deformação. Desta forma, há possíveis efeitos que se verifiquem em três dimensões que não serão contabilizados.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Considerações Gerais

As estruturas de contenção têm a finalidade de reter terreno e água. O material considerado retido (suportado) se é mantido com um talude mais inclinado do que aquele com que ficaria se não existisse estrutura. As estruturas de suporte incluem todos os tipos de muros e de sistemas de sustimento nos quais existam elementos estruturais submetidos a esforços impostos pelo material suportado. As estruturas de suporte conferem, assim, estabilidade contra a rotura de maciços, proporcionando sustentação e evitando o escorregamento suscitado pelo seu peso próprio ou por carregamentos externos.

Com base na deformabilidade, tipo de movimento e características dos apoios é possível estabelecer, no geral, dois tipos distintos de estruturas de contenção: estruturas de contenção rígidas e estruturas de contenção flexíveis.

As estruturas de contenção flexíveis são definidas em NP EN 1997-1 (2010) como estruturas relativamente delgadas de aço, de betão armado ou de madeira, suportadas por ancoragens, por escoras e/ou por pressões de terras do tipo passivo. Estas estruturas devem apresentar uma capacidade resistente à flexão elevada, que desempenha uma função significativa no suporte do material retido, enquanto que a contribuição do seu peso é desprezável. São exemplos de estruturas deste tipo as cortinas de estacas-pranchas de aço ou de betão, as cortinas de estacas e as paredes de betão moldadas no terreno.

As estruturas de suporte flexíveis experimentam em serviço deformações por flexão susceptíveis de condicionar a grandeza e a distribuição das pressões de terras que actuam sobre elas e, logo, dos esforços para que são dimensionadas (Terzaghi et al., 1967).

Devido às deformações por flexão e aos deslocamentos de corpo rígido, existem pontos da cortina que apresentam maiores deslocamentos relativamente a pontos vizinhos. Estas diferenças ao longo da altura da parede induzem um mecanismo de efeito de arco que agrava as pressões de terras nas zonas com deslocamentos mais reduzidos e atenua as mesmas nas zonas com maiores deslocamentos, podendo mesmo atingir valores inferiores aos correspondentes ao estado activo de Rankine (Rodrigues de Sousa, 2008).

Assim, a deformabilidade da estrutura de suporte altera o diagrama de pressões, o que modifica os esforços e novamente as deformações da estrutura. Nestes casos, o problema em causa é de interacção solo-estrutura e as pressões desenvolvidas não podem ser, à partida, descritas pelas Teorias de Rankine e (ou) de Coulomb (Guerra, 2003).

A intensidade e a distribuição das pressões de terra e os esforços internos dependem em grande parte da rigidez da estrutura, das suas condições de apoio (posição e rigidez de escoras e ancoragens), da rigidez e da resistência do terreno e do estado de tensão inicial deste.

Consoante a forma como é assegurada a estabilidade, as estruturas de contenção flexíveis podem ser designadas como: simplesmente encastradas ou auto-portantes; mono-apoiadas, mono-ancoradas ou mono-escoradas; multi-apoiadas, multi-ancoradas ou multi-escoradas. As cortinas simplesmente encastradas ou auto-portantes são encastradas no solo e têm a estabilidade assegurada graças à mobilização dos impulsos passivos à frente da cortina, dispensando desta forma qualquer outro elemento de apoio. As cortinas mono-apoiadas apresentam um nível de apoio junto ao topo quer por ancoragens ou escoras, mono-ancoradas ou mono-escoradas, respectivamente. As cortinas multi-apoiadas, como o próprio nome já indica, dispõem de vários níveis de apoio ao longo da sua altura, igualmente quer por ancoragens ou escoras, designando-se por multi-ancoradas ou multi-escoradas, respectivamente.

## **2.2 Pressões de Terras: Diagramas Aparentes de Terzaghi e Peck**

Ao longo de largos anos procedeu-se à observação de várias cortinas escoradas realizando-se essencialmente medições dos esforços de compressão no escoramento, a partir das quais foram deduzidos os correspondentes diagramas de pressões na cortina. Os resultados das observações mostram que a forma dos diagramas de pressões aparentes e a grandeza da sua resultante podem variar consideravelmente, inclusive na mesma escavação, resultado de factores inerentes ao processo construtivo (Matos Fernandes, 1983).

Terzaghi et al. (1967) resumiram e analisaram os resultados disponíveis e propuseram os diagramas envolventes que se representam na figura 2.1.

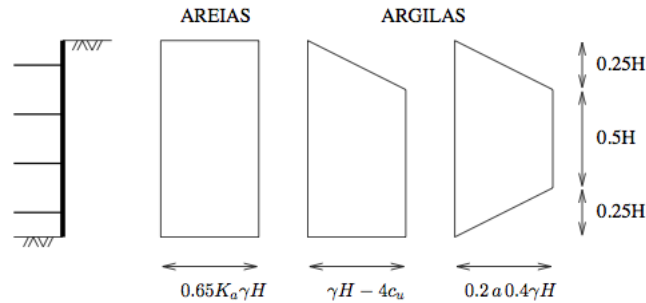


Figura 2.1: Diagramas de Terzaghi e Peck (Guerra, 2003)

Os diagramas das argilas parecem adequados à sua utilização em situações de nível freático elevado. Com efeito, num dos diagramas entra explicitamente a resistência não drenada, válida, portanto, na condição de solo saturado, parecendo razoável aplicar-se tais diagramas a casos com nível freático elevado. Para o caso das areias, no entanto, o diagrama da figura 2.1 não considera a presença de água, sendo o efeito de tal presença o objectivo do presente trabalho.

Constata-se assim que, para o caso das areias é possível traçar-se um diagrama envolvente rectangular com altura igual à altura de escavação,  $H$ , e base com valor da tensão horizontal dada por:

$$\sigma_H = 0.65K_a\gamma H \quad (2.1)$$

em que  $K_a$  é o impulso activo de Rankine,  $\gamma$  é o peso volúmico do solo e  $H$  é a altura de escavação.

Estes diagramas possibilitam que os esforços de compressão nas escoras sejam estimados por um processo inverso àquele que levou à sua obtenção.

## 2.3 Pressões Associadas à Água

### 2.3.1 Introdução

Quando a escavação projectada venha a ser realizada abaixo do nível freático, sem que se proceda ao seu rebaixamento, e a cortina de suporte seja impermeável, uma parte substancial das pressões sobre a cortina são devidas à água, pelo que a previsão dos impulsos de terras se torna menos importante do que uma correcta estimativa da distribuição das

pressões da água (Matos Fernandes, 1983).

Quando a passagem da água para a escavação contornando inferiormente a cortina não é possível (porque esta foi prolongada até um substrato impermeável) a estrutura de suporte tem que ser dimensionada para suportar o impulso hidrostático (Matos Fernandes, 1983).

Nos casos em que seja possível a livre passagem da água para a escavação, sob a cortina, o cálculo das pressões implica, normalmente, o cálculo do escoamento, por exemplo através do traçado da rede de fluxo. Nas condições mais simplificadas o traçado da rede pode fazer-se por métodos gráficos; para as restantes pode calcular-se o escoamento recorrendo, por exemplo, ao método dos elementos finitos (Matos Fernandes, 1983).

Nas situações mais simples, de solo homogêneo, pode considerar-se a distribuição de pressões simplificada que se indica na figura 2.2. A comparação da situação em que se considera a inexistência de percolação, e o correspondente impulso hidrostático, com a simplificação apresentada anteriormente permite concluir que as pressões de água aumentam do lado passivo e diminuem do lado activo (Matos Fernandes, 1983).

Por outro lado, no entanto, as forças de percolação causam, do lado activo, um incremento do peso volúmico (e, conseqüentemente, das pressões de terras) e, do lado passivo, uma diminuição destas. São, portanto, efeitos contraditórios, devendo a sua acção global ser analisada caso a caso (Matos Fernandes, 1983).

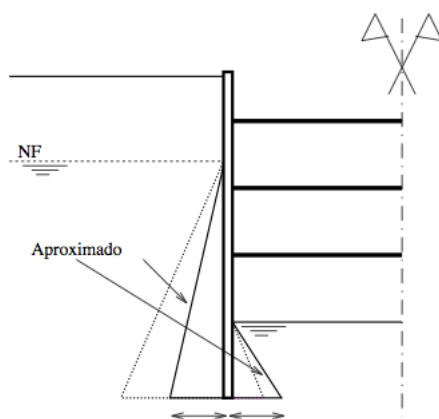


Figura 2.2: Distribuição simplificada das pressões da água: situação de percolação para o interior da escavação (Guerra, 2003)

### 2.3.2 Diagramas Aparentes para o Caso de Pressões Hidrostáticas

Na maioria das estruturas de contenção as pressões horizontais são causadas por uma combinação de pressões de terra e de água. É comum assumir um nível freático hidrostático no tardo da estrutura de contenção.

Como se pode concluir a partir de Strom e Ebeling (2001), para situações em que se verifique solo submerso, utiliza-se, por vezes, o pressuposto de a pressão horizontal de terra e água para condições de nível freático hidrostático ser tomada como a pressão de água mais a pressão de terra baseada no peso volúmico submerso do material. Esta suposição é utilizada para areias e outros solos com comportamento drenado.

A compatibilização dos diagramas aparentes conhecidos (Terzaghi e Peck) com as pressões devidas à água, sobretudo no caso em que parte do solo não está submerso, é uma questão pertinente.

Strom e Ebeling (2001) apresenta a abordagem do peso volúmico efectivo médio, em que o solo acima do nível freático é considerado com o seu peso total e abaixo daquele com o seu peso submerso.

Nesta abordagem o peso volúmico efectivo médio é determinado por um de dois métodos:

M. 1 No método 1 o peso volúmico efectivo médio ( $\gamma_e$ ) é determinado pela multiplicação da altura submersa da parede ( $H_1$ ) pelo peso volúmico submerso ( $\gamma_1$ ), multiplicando-se a altura não submersa da parede ( $H_2$ ) pelo peso volúmico húmido ( $\gamma_2$ ), fazendo a adição dessas duas parcelas e dividindo pela altura total da parede ( $H$ ), ou seja, pela equação 2.2:

$$\gamma_e = \frac{\gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2}{H} \quad (2.2)$$

em que:

$$\gamma_1 = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = \gamma' \quad (2.3)$$

e

$$\gamma_2 = \gamma_h \quad (2.4)$$

M. 2 O método 2 segue os procedimentos apresentados em Ebeling e Morrison (1992). Neste método, em vez de um processo de ponderação com base nas alturas atribuídas ao solo submerso e não submerso, a ponderação baseia-se nas áreas de solos submersos e não submersos contidas na cunha de deslizamento (figura 2.3) e o peso volúmico efectivo médio ( $\gamma_e$ ) é determinado por:

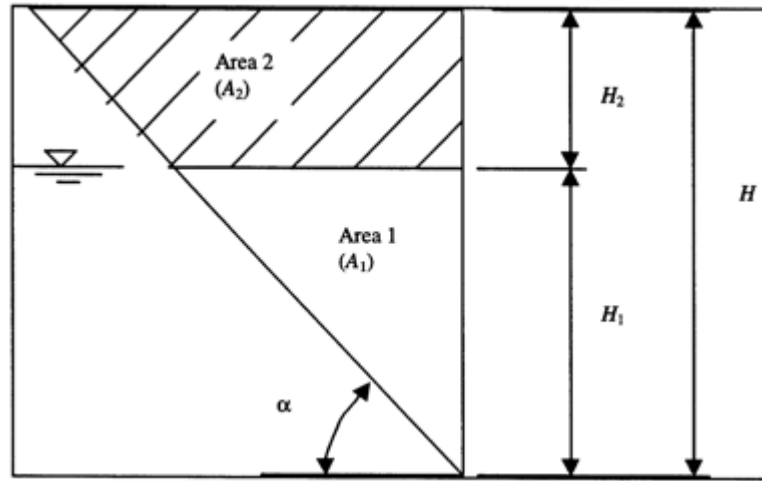


Figura 2.3: Método 2, peso volúmico efectivo para solos parcialmente saturados (Ebeling e Morrison, 1992)

$$\gamma_e = \left[ \frac{A_1}{A_1 + A_2} \right] \gamma_1 + \left[ 1 - \frac{A_1}{A_1 + A_2} \right] \gamma_2 \quad (2.5)$$

ou

$$\gamma_e = \left[ \frac{H_1}{H} \right]^2 \gamma_1 + \left[ 1 - \left( \frac{H_1}{H} \right)^2 \right] \gamma_2 \quad (2.6)$$

O método 2 considera mais adequadamente os pesos dos solos submersos e não submersos na cunha de deslizamento e, por conseguinte, é preferível ao método 1. Quando utilizado em análises de equilíbrio limite, o método 2 irá fornecer a solução correcta.

A partir do peso volúmico efectivo médio ( $\gamma_e$ ) um diagrama aparente de pressões é desenvolvido e a pressão de água é acrescentada separadamente para se obter a pressão total a ser utilizada para o pré-dimensionamento da parede e dos elementos de apoio (figura 2.4).

Para a situação particular em que se considera o nível freático à superfície do terreno, correspondente ao caso em estudo no presente trabalho, a aplicação dos métodos 1 e 2 resultam numa mesma solução como se pode constatar a partir das equações 2.7 e 2.8.

Com efeito, para ambos os métodos  $H_1 = H$  e  $H_2 = 0\text{m}$ , o que conduz a:

M. 1

$$\gamma_e = \frac{\gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2}{H} = \frac{\gamma_1 H + \gamma_2 \times 0}{H} = \gamma_1 = \gamma' \quad (2.7)$$

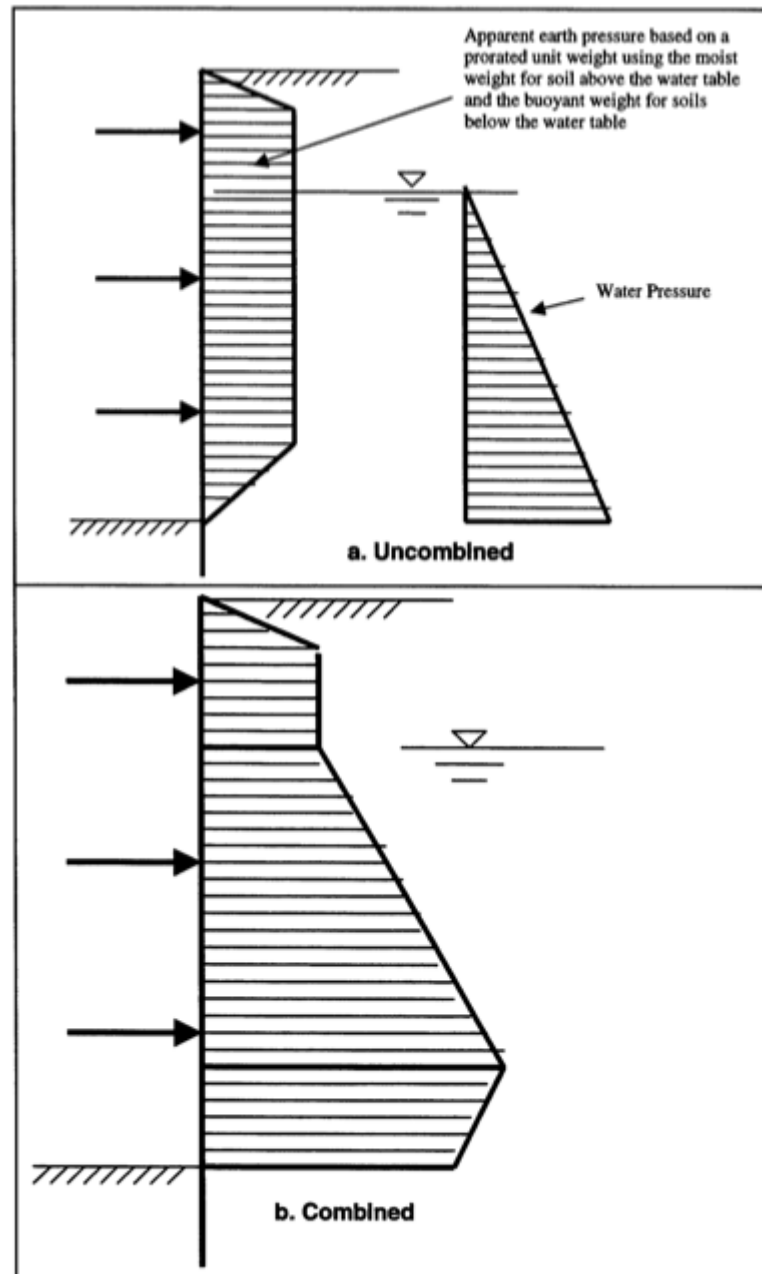


Figura 2.4: Diagrama aparente de pressões de terra calculado usando parâmetros de resistência do solo em tensão efectiva com nível freático hidrostático (Strom e Ebeling, 2001)

M. 2

$$\gamma_e = \left[ \frac{H_1}{H} \right]^2 \gamma_1 + \left[ 1 - \left( \frac{H_1}{H} \right)^2 \right] \gamma_2 = \left[ \frac{H}{H} \right]^2 \gamma_1 + \left[ 1 - \left( \frac{H}{H} \right)^2 \right] \gamma_2 = \gamma_1 = \gamma' \quad (2.8)$$

Resultando, assim, na consideração à profundidade  $z$  de uma tensão horizontal dada por (figura 2.5):

$$\sigma_H = 0.65K_a\gamma_e H + \gamma_w z \quad (2.9)$$

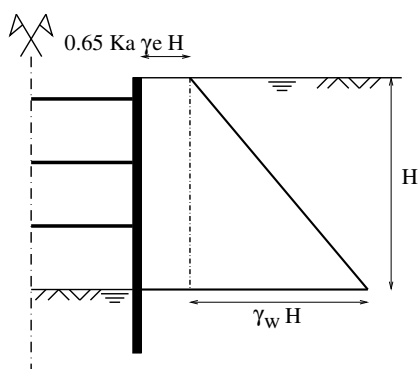


Figura 2.5: Aplicação dos métodos 1 e 2 à situação em que se considera o nível freático à superfície

Este resultado implica a consideração, até uma certa profundidade (igual a  $0.65K_a H$ ), de um diagrama com valor inferior ao que se consideraria caso não houvesse nível freático elevado (figura 2.6).

Neste seguimento apresenta-se uma proposta melhorada para diagramas considerando nível freático elevado que procura corrigir este aspecto (Guerra, 2013):

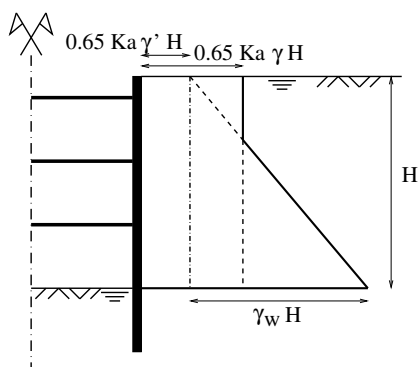


Figura 2.6: Diagramas aparentes para situações com nível freático elevado

$$\sigma_H = \begin{cases} 0.65K_a\gamma H & , z \leq 0.65K_aH \\ 0.65K_a\gamma'H + \gamma_w z & , z \geq 0.65K_aH \end{cases} \quad (2.10)$$

### 2.3.3 Diagramas Aparentes para o Caso de Escoamento em Regime Estacionário

Como se pode concluir a partir de Strom e Ebeling (2001), para situações em que se verifique solo submerso, para casos não hidrostáticos, com regime de percolação estacionário, utiliza-se, por vezes, o pressuposto de a força resultante usada nos cálculos de pressão de terras efectiva horizontal poder ser obtida pela combinação do peso submerso do solo e da força de percolação.

Uma possível aplicação, na prática, deste conceito seria, para o caso de nível freático à superfície do terreno, usar o diagrama da figura 2.7(a), em que o gradiente hidráulico,  $i$ , poderia ser calculado considerando a perda de carga média (determinada rigorosamente em cálculo de percolação) entre P e S ou, de forma aproximada, considerando a perda de carga média ao longo do percurso PQRS. Tal diagrama poderia ainda ser corrigido da forma anteriormente referida, procurando garantir a inexistência de pressões inferiores às que ocorreriam caso não houvesse nível freático instalado no terreno (figura 2.7(b)). Verifica-se que a situação representada na figura 2.7(b) conduz a pressões totais sobre a cortina inferiores às da figura 2.6.

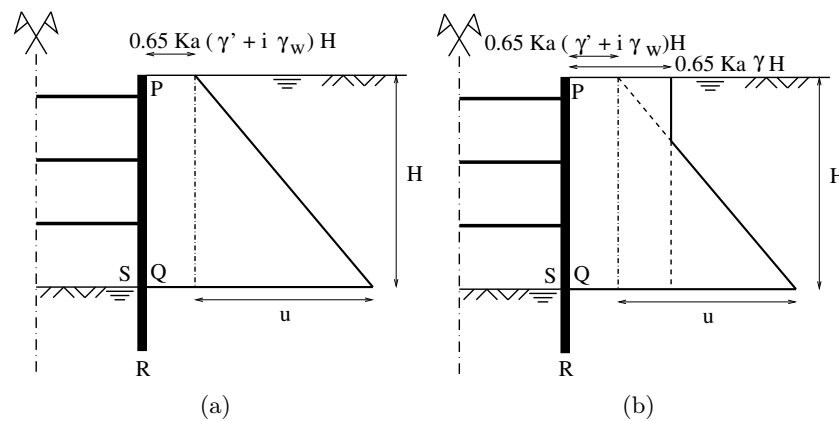


Figura 2.7: Diagramas aparentes para situações com nível freático elevado para o caso de escoamento em regime estacionário

## 2.4 Estabilidade do Fundo de Escavações em Solos Arenosos

Como se viu, a realização de escavações em solos arenosos abaixo do nível freático pode implicar a passagem da água para o interior da escavação contornando inferiormente a cortina impermeável. Este fenómeno pode originar "piping" ou levantamento hidráulico e a conseqüente rotura do fundo de escavações.

O "piping" ou erosão interna está associado a elevados gradientes hidráulicos de saída junto à base da escavação e manifesta-se por um arraste progressivo das partículas do solo, sempre que as forças de percolação que se exercem ao nível das partículas ultrapassam o seu peso submerso e as forças de atrito mobilizadas nos contactos com as partículas vizinhas. Este arraste pode criar verdadeiras cavernas no solo, que se desenvolvem desde o ponto de saída das linhas de fluxo, em sentido contrário ao do movimento da água, causando importantes assentamentos em pontos da superfície em alguns casos consideravelmente afastados da escavação (Terzaghi et al., 1967).

O levantamento hidráulico verifica-se quando as forças de percolação associadas ao fluxo ascendente no solo do lado da escavação anulam as tensões efectivas numa dada secção e manifesta-se pela invasão do fundo da escavação pela massa de solo situada acima da referida secção (Matos Fernandes, 1983).

O cálculo da estabilidade do fundo relativamente aos dois fenómenos descritos é feito a partir do conhecimento da rede de fluxo. O conhecimento desta permite determinar o máximo gradiente de saída,  $i_s$ , sendo o coeficiente de segurança ao "piping" dado pela relação:

$$F = \frac{i_c}{i_s} \quad (2.11)$$

sendo  $i_c$  o gradiente crítico, ou seja, o gradiente hidráulico para o qual as forças de percolação ultrapassam o peso submerso do solo, dado por:

$$i_c = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (2.12)$$

Quanto à segurança ao levantamento hidráulico, Terzaghi et al. (1967) concluiu, por meio de ensaios em modelo reduzido, que este se verifica numa zona imediatamente adjacente à cortina, no interior da escavação, de largura aproximadamente igual a metade da altura enterrada da mesma, como se pode observar na figura 2.8. Assim, propôs que se determine o coeficiente de segurança respectivo comparando o peso submerso do prisma indicado na figura 2.8 com a força de percolação que a água exerce na sua base, sendo esta força determinada a partir da rede de fluxo.

A hipótese assumida é a de que, no momento da rotura, a pressão vertical efectiva em

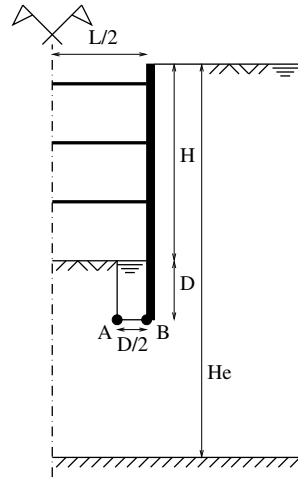


Figura 2.8: Bloco para a análise da segurança quanto ao levantamento hidráulico

qualquer secção horizontal através do prisma é aproximadamente igual a zero. No mesmo momento, a pressão lateral efectiva nos lados do prisma é também aproximadamente zero. Desta forma, o levantamento hidráulico ocorre logo que a pressão de percolação, na base do prisma, se torna igual ao peso efectivo da areia sobrejacente (Terzaghi et al., 1967).

Assim, é possível apresentar-se a seguinte análise:

Em AB (figura 2.8), a pressão de percolação média na base do prisma tem valor:

$$\bar{u}_{\text{perc}} = \bar{u} - \gamma_w D \quad (2.13)$$

em que  $\bar{u}$  é a pressão intersticial média na base do prisma. A força de percolação total na base é:

$$U = \frac{D}{2} \bar{u}_{\text{perc}} = \frac{D}{2} (\bar{u} - \gamma_w D) \quad (2.14)$$

A rotura por levantamento hidráulico ocorre assim que  $U$  se torna igual ao peso efectivo do prisma de areia, isto é, o seu peso submerso:

$$W' = \frac{1}{2} D^2 \gamma' \quad (2.15)$$

Desta forma, o factor de segurança em relação ao levantamento hidráulico é dado por:

$$FS = \frac{W'}{U} = \frac{D \gamma'}{\bar{u}_{\text{perc}}} = \frac{D \gamma'}{\bar{u} - \gamma_w D} \quad (2.16)$$

## 2.5 Considerações Finais

Constata-se que não há um acordo universal acerca de propostas práticas a respeito das pressões sobre estruturas de contenção flexíveis multi-apoiadas em solos com nível freático elevado. De facto, nos casos em que se verifica níveis freáticos elevados, os diagramas aparentes, em especial quando dizem respeito a solos arenosos, foram obtidos em situações em que foi possível proceder ao rebaixamento do mesmo. Evidencia-se assim o interesse de um estudo em que se aborde tal assunto.

# Capítulo 3

## Caso Base

### 3.1 Procedimento

Conforme referido nos capítulos 1 e 2, os diagramas aparentes dos solos arenosos foram resultado do traçado de envolventes de pressões, obtidas a partir de observações de várias cortinas escoradas em casos sem água ou em que se foi possível proceder ao rebaixamento do nível freático, em que foram, essencialmente, realizadas medições dos esforços de compressão no escoramento. Não são, portanto, resultado de análises numéricas. De acordo com o exposto no capítulo 1, o objectivo deste trabalho é obter numericamente diagramas do tipo dos aparentes, para casos com nível freático elevado, apresentando assim, uma proposta para a consideração das pressões em tais situações.

Para a abordagem inicial do problema decidiu-se partir de uma situação em que não se considerou a presença da água, procurando-se as características do sistema de contenção (em especial da rigidez das escoras) que conduzem a diagramas de pressões na cortina e pressões aparentes determinadas com base nas cargas nas escoras aproximadamente iguais aos diagramas aparentes de Terzaghi e Peck para areias, com tensão horizontal obtida a partir da equação 2.1. As características do sistema de contenção adoptadas para este caso foram também adoptadas nas situações em que se considerou a existência de água.

Foram estudados cinco cenários distintos que estão esquematizados na figura 3.1:

- Cenário 1: admite-se o solo húmido e que a cortina não alcança o substrato competente e impermeável, não ficando encastrada.
- Cenário 2: admite-se o solo saturado, que a cortina não alcança o substrato competente e impermeável, não ficando encastrada, e ainda uma situação teórica com

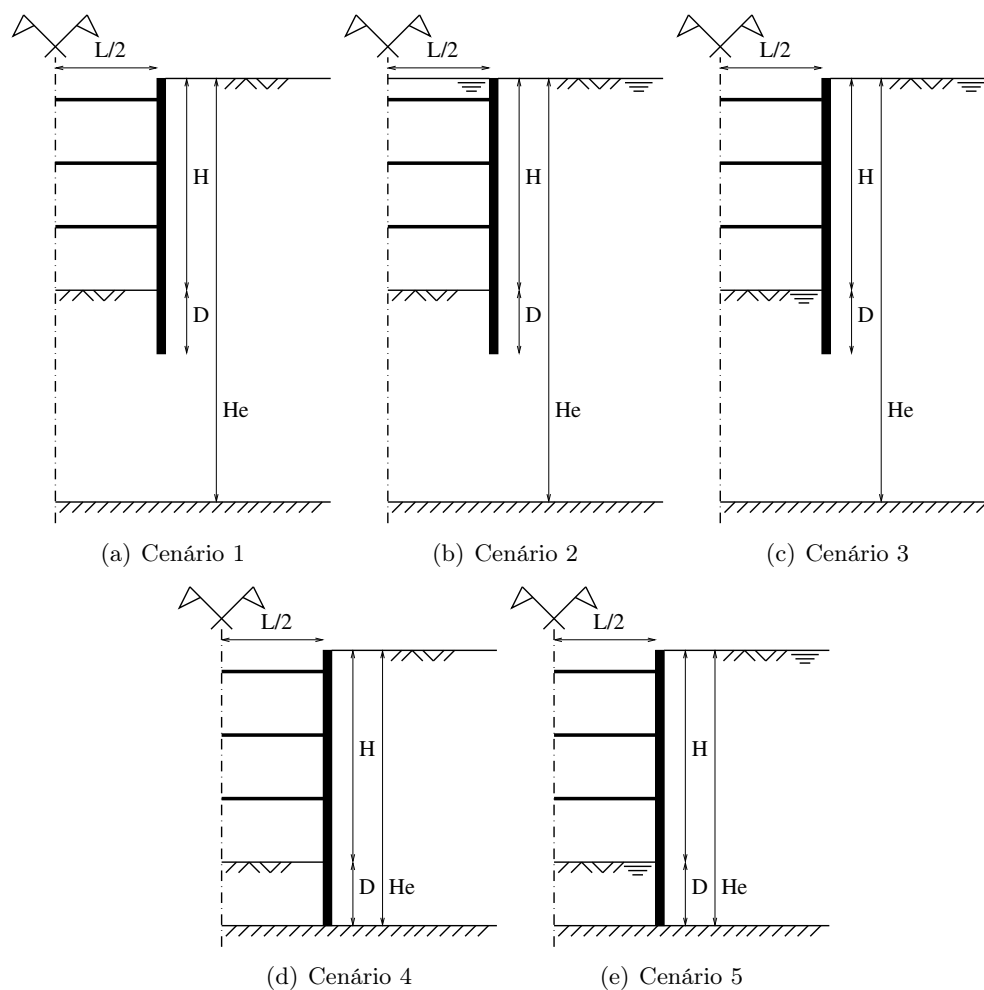


Figura 3.1: Representação esquemática dos diferentes cenários considerados

a manutenção do nível da água no interior da escavação; considera-se portanto a inexistência de escoamento.

- Cenário 3: admite-se o solo saturado, que a cortina não alcança o substrato competente e impermeável e ainda a expulsão da água do interior da escavação através de bombagem contínua, considera-se portanto a modelação do escoamento.
- Cenário 4: admite-se o solo húmido e que a cortina alcança o substrato competente e impermeável, ficando encastrada.
- Cenário 5: admite-se o solo saturado, que a cortina alcança o substrato competente e impermeável, ficando encastrada; considera-se portanto a inexistência de escoamento.

## 3.2 Considerações Gerais

A modelação tensão-deformação realizada recorreu ao programa de cálculo automático Plaxis (2014) e considerou um estado plano de deformações. Por simplificação, uma vez que se trata de um problema simétrico, modela-se apenas um dos lados da escavação. Para minimizar erros de cálculo, na modelação é considerado um desenvolvimento horizontal do terreno de cinco vezes a altura de escavação a partir do tardo da estrutura de contenção. A representação esquemática do modelo utilizado é apresentada na figura 3.2.

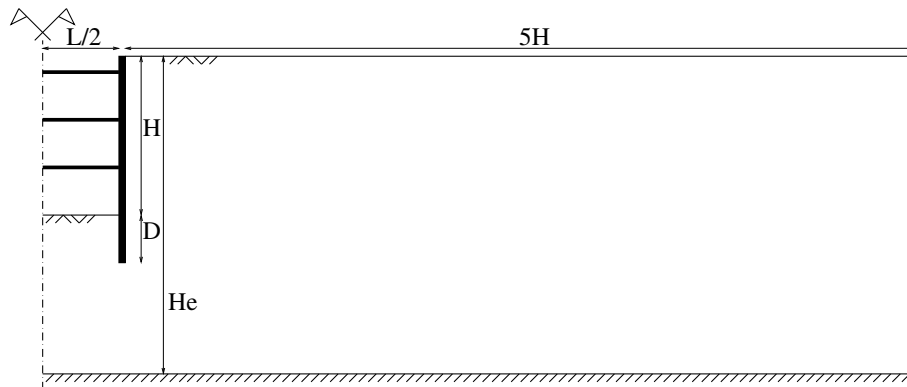


Figura 3.2: Representação esquemática do modelo utilizado

Não é possível atribuir um único valor para o módulo de deformabilidade para toda a camada de solo, uma vez que o solo não é um material elástico linear e isotrópico e esta grandeza varia com o estado de tensão do solo e conseqüentemente com a profundidade. Define-se então uma função que traduz a evolução do módulo de deformabilidade do solo em profundidade:

$$E = E_{\text{ref}} \left( \frac{\sigma'_{\text{med}}}{p'_{\text{ref}}} \right)^m \quad (3.1)$$

em que,

$$m = 0,5 \text{ (areias)}$$

$$p'_{\text{ref}} = 100\text{kPa} \text{ (valor adoptado por ser o valor padrão do Plaxis)}$$

$\sigma'_{\text{med}}$  é a tensão efectiva média dada pela equação:

$$\sigma'_{\text{med}} = \frac{(1 + 2K_0)\sigma'}{3} \quad (3.2)$$

Uma vez que se trata da modelação de uma escavação, torna-se essencial a distinção entre o módulo de deformabilidade de carga e o de descarga, o que leva ao recurso a um modelo

que considere o solo como elástico não linear.

De facto, os solos tendem a apresentar um comportamento não linear quando solicitados. Como bem expresso no tutorial do Plaxis, este comportamento não linear de tensão-deformação pode ser modelado em diversos níveis de sofisticação e este mesmo programa (Plaxis) suporta diferentes tipos de modelos para simular o comportamento do solo. Segundo o mesmo, o Hardening Soil Model (HSM) é um modelo avançado para a simulação do comportamento do solo. O HSM é um tipo elasto-plástico de modelo hiperbólico, formulado no âmbito da plasticidade por endurecimento por corte. Além disso, o modelo integra o endurecimento por compressão para simular a diminuição de volume irreversível do solo sob a compressão primária.

Os estados limites de tensão são descritos por meio do ângulo de atrito, da coesão e do ângulo de dilatância. A rigidez do solo é descrita com mais precisão por meio de três rigidezes de entrada distintas: a rigidez triaxial de carga,  $E_{50}$ , a rigidez triaxial de descarga e recarga,  $E_{ur}$ , e a rigidez edométrica de carga,  $E_{oed}$ . Como valores médios para diferentes tipos de solo  $E_{ur} \approx 3E_{50}$  e  $E_{oed} \approx E_{50}$  são sugeridos como configuração padrão.

O HSM tem também em consideração a dependência do módulo de rigidez com o estado de tensão. Isto significa que todas as rigidezes variam com o estado de tensão. Assim, as três rigidezes de entrada relacionam-se com uma tensão de referência, usualmente tomada como 100 kPa por ser o valor padrão no programa (equação 3.1).

Diante do exposto, utilizou-se o Hardening Soil Model, sendo portanto necessário o estabelecimento do módulo de deformabilidade secante de referência  $E_{50,ref}$ , ficando automaticamente definido os outros dois módulos de deformabilidade,  $E_{ur,ref}$  e  $E_{oed,ref}$ .

Para que a convergência fosse alcançada em algumas situações, nomeadamente no cenário 3, foi necessária a manipulação de alguns parâmetros de controle numérico. Tal como bem apresentado no tutorial do Plaxis, os procedimentos iterativos, em particular os procedimentos de avanço de carga, são influenciados por alguns parâmetros de controle. O Plaxis tem a opção de adotar um procedimento iterativo padrão, que na maioria dos casos leva a um bom desempenho. Contudo, em algumas situações pode ser desejado, ou mesmo necessário, mudar a configuração padrão.

Os parâmetros que, nos cálculos realizados, sofreram alterações foram os seguintes: o número máximo de passos; o número máximo de iterações; o número mínimo desejado de iterações; o número máximo desejado de iterações; o controlo de comprimento do arco e o número máximo de passos de descarga.

### 3.3 Definição do Caso Base

O caso base consiste na análise dos cenários 1 a 5 da situação correspondente a uma escavação escorada simétrica e realizada em solo arenoso com características hidráulicas de percolação homogêneas. As representações esquemáticas dos diferentes cenários tal como são abordados no Caso Base são apresentadas na figura 3.3.

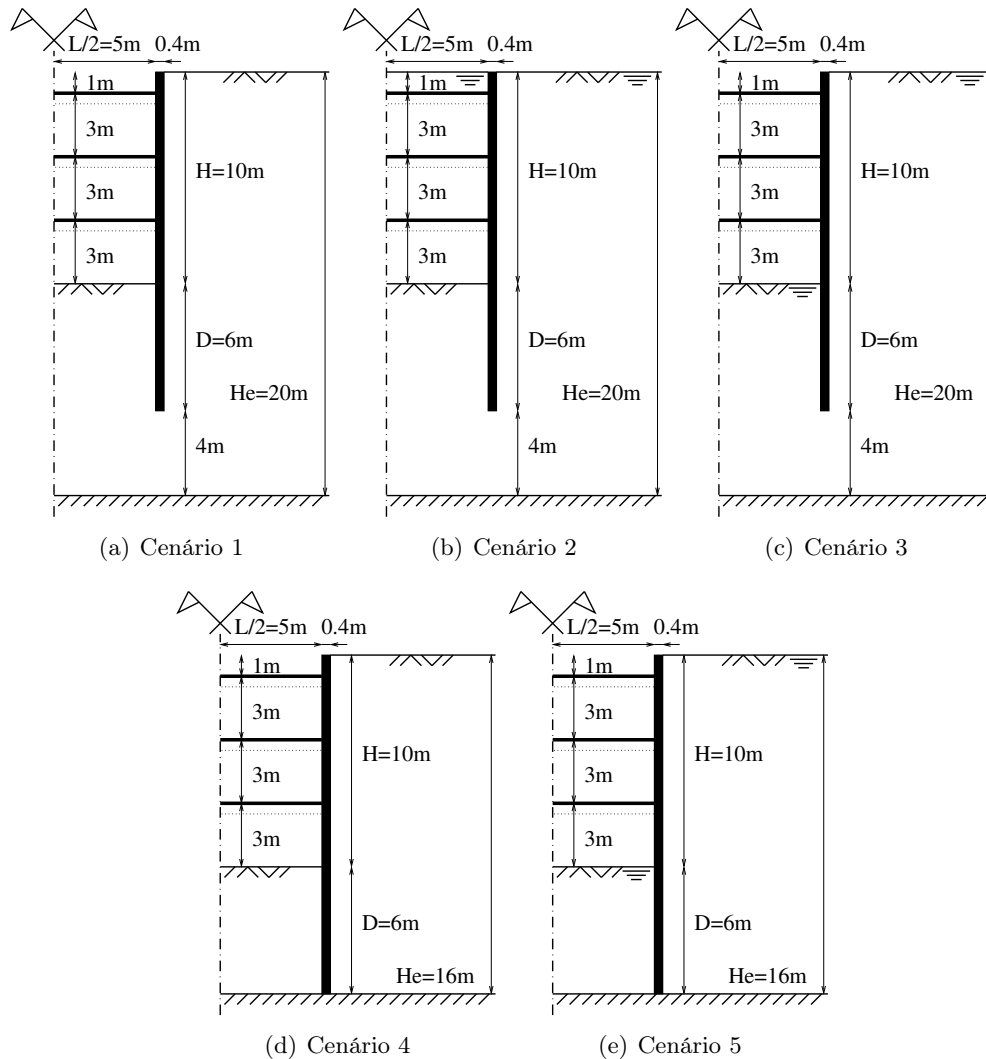


Figura 3.3: Representação esquemática dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 tal como são abordados no Caso Base

Um exemplo do modelo utilizado no programa de elementos finitos Plaxis, correspondendo neste caso ao cenário 3, é apresentado na figura 3.4. As interfaces solo-estrutura estão representadas por elementos de junta e as propriedades de resistência são definidas a partir do parâmetro  $R_{inter}$ , para o qual se admitiu o valor de 0.67.



Figura 3.4: Modelo utilizado no programa de elementos finitos Plaxis

Para esta análise adoptou-se os seguintes valores:

- Profundidade do estrato rijo:  
Considerou-se constante a profundidade do estrato rijo e com o valor de 20m para os cenários C1, C2 e C3 e com o valor de 16m para os cenários C4 e C5.
- Profundidade da escavação:  
Considerou-se constante a profundidade da escavação e com o valor de 10m.
- Largura da escavação:  
Considerou-se constante a largura da escavação e com o valor de 10m. Note-se ainda que é nesta direcção que estão instaladas as escoras.
- Altura de cada nível de escavação e profundidade de instalação das escoras:  
Considerou-se 4 níveis de escavação. O primeiro nível com 1,5m, permitindo a instalação do primeiro nível de escoras a 1m de profundidade. O segundo e o terceiro nível com 3m e o quarto nível com 2,5m, permitindo a instalação dos segundo e terceiro nível de escoras a 4m e 7m de profundidade.
- Altura enterrada da cortina:  
Considerou-se para a altura enterrada da cortina o valor de 6m.
- Propriedades e parâmetros do solo:  
Considerou-se um solo arenoso, para o qual foram feitas análises drenadas. As demais características do solo e das interfaces solo-parede são apresentadas na tabela 3.1.
- Parâmetros da cortina:

Tabela 3.1: Propriedades e parâmetros adoptados para o solo

Geral			
Material		Propriedades gerais	
Modelo do material	Tipo de comportamento	$\gamma_h$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Hardening Soil Model	Drenado	20	20

Parâmetros						
Rigidez				Resistência		
$E_{50,ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{oed,ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{ur,ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	m	$c'_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi'$ [°]	$\psi$ [°]
25000	25000	75000	0,5	1	30	1

Parâmetros de escoamento		Interfaces	
Parâmetros		Resistência	
kx [m/s]	ky [m/s]	Resistência	$R_{inter}$
0,001	0,001	Manual	0,67

Coeficientes de impulso		
$K_0$	$K_a$	$K_p$
0,5	0,33	3,0

Considerou-se uma parede executada previamente à escavação, com as características elásticas de uma parede de betão armado com 0.4m de espessura, correspondendo assim a uma rigidez axial igual a  $EA = 12000000\text{kN/m}$  e uma rigidez a flexão igual a  $EI = 160000\text{kNm}^2/\text{m}$ . Poderia, portanto, tratar-se de uma parede moldada de betão armado, com 0.4m de espessura. Adopta-se para o coeficiente de Poisson,  $\nu$ , o valor de 0 uma vez que se trata de estado plano de deformações, parede “infinita”. O peso por metro por metro,  $w$ , é obtido a partir da multiplicação do peso volúmico do betão pela espessura da parede. Ver tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros adoptados para a cortina

Material	Propriedades			
Tipo de material	$EA_1$ [kN/m]	$EI$ [kN.m <sup>2</sup> /m]	$w$ [kN/m/m]	$\nu$
Elástico	12000000	160000	10	0

- Parâmetros das escoras:

Admitiu-se que as escoras apresentam um comportamento elástico linear, desta forma, o comportamento destes elementos é controlado apenas pela área. Adoptou-se uma rigidez axial igual a  $EA = 120000\text{kN/m}$  e um comprimento de 10m, valor igual ao da largura da escavação. Admitiu-se três níveis de escoramento. Ver tabela 3.3.

Tabela 3.3: Parâmetros adoptados para as escoras

Material	Propriedades
Tipo de material	EA [kN/m]
Elástico	120000

Para o estudo que se segue considerou-se escavação faseada. No total foram consideradas nove fases: fase inicial; instalação da parede; realização da 1<sup>a</sup> escavação; instalação da 1<sup>a</sup> Escora; realização da 2<sup>a</sup> escavação; instalação da 2<sup>a</sup> Escora; realização da 3<sup>a</sup> escavação; instalação da 3<sup>a</sup> Escora; realização da 4<sup>a</sup> escavação. As fases de escavação incluem o rebaixamento do nível de água no interior da escavação (cenários C3 e C5) e o cálculo da percolação associada (cenário C3).

A análise realizada apresenta destaque para as pressões na cortina e as pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras, bem como os deslocamentos da cortina e os deslocamentos do solo no tardo de desta.

### 3.4 Resultados Obtidos - C1-C2-C3

A seguir, apresentam-se os seguintes resultados:

- cenários C1, C2 e C3: pressões na cortina ao longo do faseamento construtivo e pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras;
- cenários C1, C2 e C3: deslocamentos da cortina e do solo no tardo de desta ao longo do faseamento construtivo;
- cenários C1, C2 e C3: forças nas escoras ao longo do faseamento construtivo;
- cenário C3: análise da estabilidade hidráulica após a última escavação;
- cenários C1, C2 e C3: pontos plásticos ao longo do faseamento construtivo;
- cenários C1, C2 e C3: tensões de corte relativas ao longo do faseamento construtivo;
- cenários C1, C2 e C3: deslocamentos totais ao longo do faseamento construtivo;
- cenários C1, C2 e C3: esforços na cortina ao longo do faseamento construtivo.

### 3.4.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para as pressões na cortina nos cenários 1, 2 e 3 são apresentados nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7.

O diagrama aparente de Terzaghi e Peck (equação 2.1) e o diagrama aparente para a situação com nível freático elevado apresentado na figura 2.6, dado pela equação 2.10, são apresentados nas figuras como um termo de comparação com os resultados obtidos.

A análise dos resultados apresentados nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7 permite constatar o seguinte:

- fase inicial: as tensões são as esperadas, isto é, apresentam evolução linear de acordo com os valores de  $K_0$ ,  $\gamma$  e  $\gamma_w$ ;
- as primeiras fases apresentam pequenas alterações aos diagramas iniciais;
- cenário C1: as tensões totais e as tensões efectivas são iguais e as pressões intersticiais são nulas, não há nível freático elevado;
- cenário C2: as pressões intersticiais são constantes e iguais às pressões hidrostáticas;
- cenário C3: as pressões intersticiais afastam-se progressivamente em relação às pressões hidrostáticas;
- cenário C1 (após a 4<sup>a</sup> escavação): a distribuição de tensões totais na cortina aproxima-se dos diagramas aparentes de Terzaghi e Peck. Com efeito, a rigidez axial adoptada para as escoras foi escolhida de forma a que, para uma dada rigidez da parede e uma vez atribuídos e fixados os valores para os parâmetros do solo, no cenário 1 a distribuição de pressões na cortina fosse aproximadamente constante em profundidade e igual ao valor obtido a partir da equação 2.1;
- cenário C2 (após a 4<sup>a</sup> escavação): a distribuição de tensões totais na cortina aproxima-se do diagrama aparente para a situação com nível freático elevado apresentado na figura 2.6. Contudo, não se pode deixar de ter em atenção que o cenário 2 corresponde à uma situação teórica com a manutenção do nível de água no interior da escavação. Refere-se, assim, o facto de o diagrama aparente para a situação com nível freático elevado ser proposto para uma situação distinta da admitida neste cenário. E a consideração da permanência de água no interior da escavação resulta, portanto, em que haja efeitos contrários da pressão da água no interior da escavação que estão a camuflar a real distribuição das pressões na cortina no tardoz da escavação. No entanto, visto o diagrama apresentado na figura 2.6 ser o resultado do diagrama aparente de Terzaghi e Peck agregado a um impulso hidrostático, e no cenário 2 não

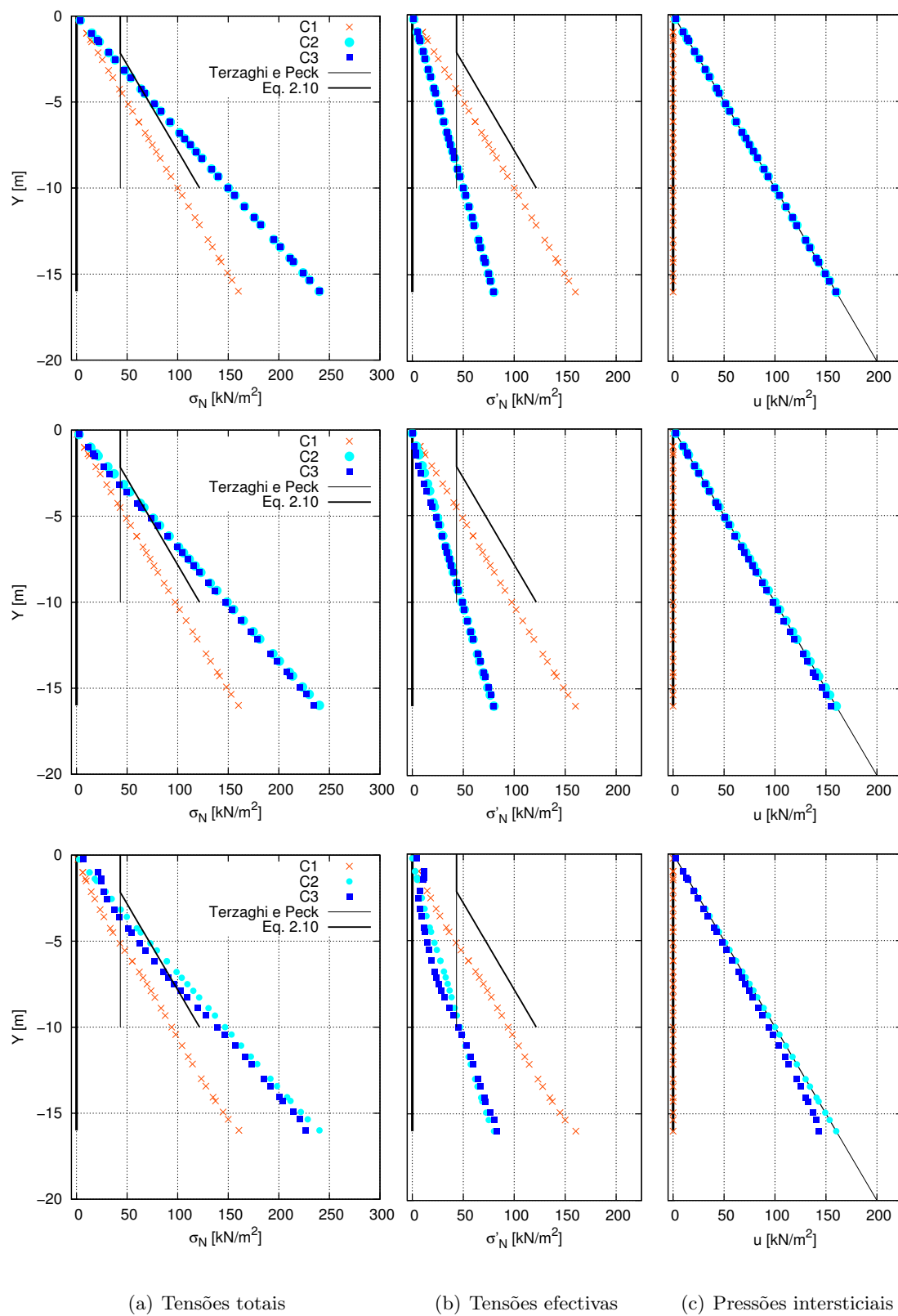


Figura 3.5: Cenários C1, C2 e C3: Pressões na cortina após a instalação da parede (em cima), após a 1<sup>a</sup> escavação (ao centro), e após a 2<sup>a</sup> escavação (em baixo)

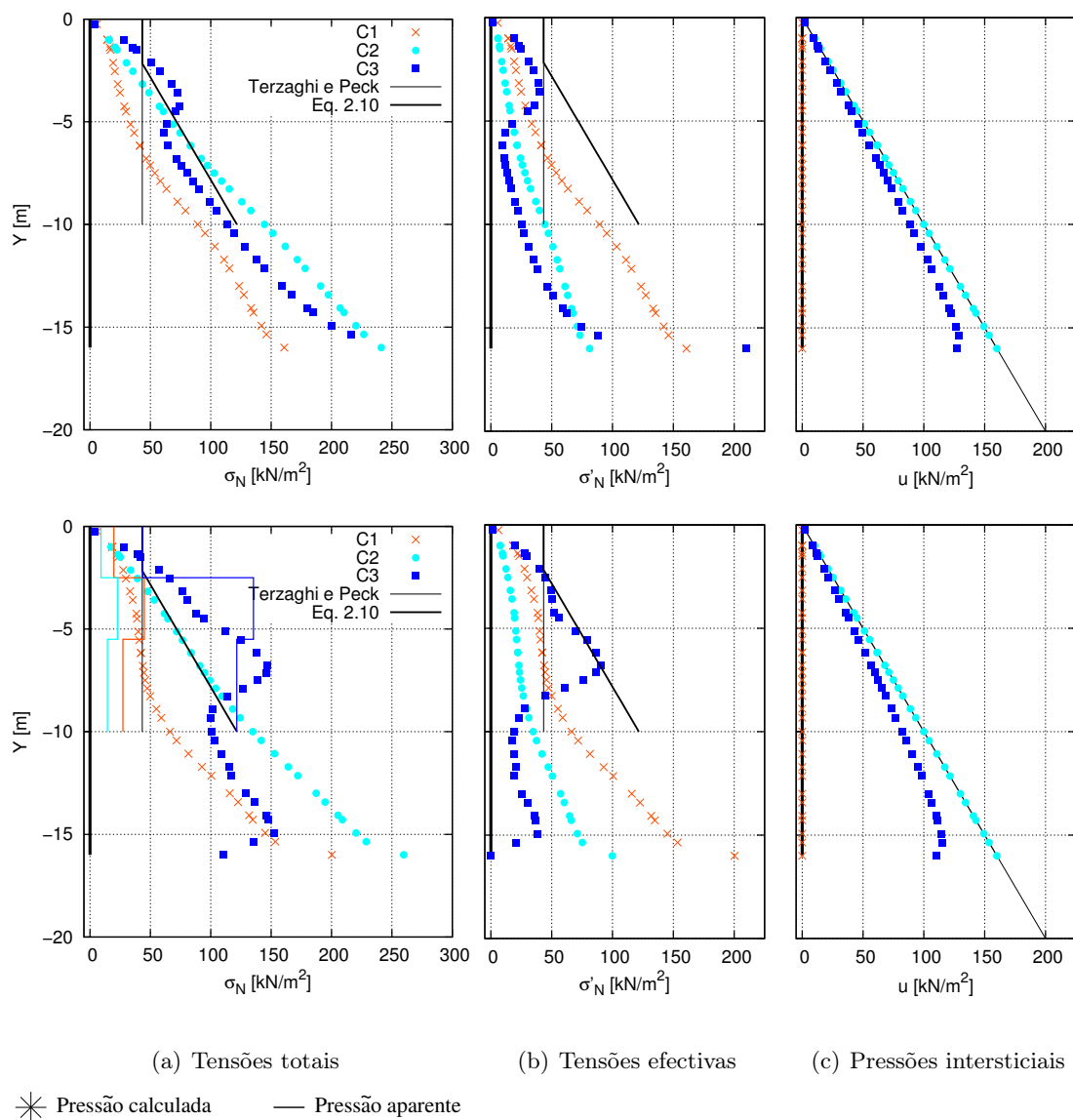


Figura 3.6: Cenários C1, C2 e C3: Pressões na cortina após a 3<sup>a</sup> escavação (em cima) e após a 4<sup>a</sup> escavação (em baixo); na figura de baixo inclui-se igualmente as pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras que serão abordadas na secção 3.4.3

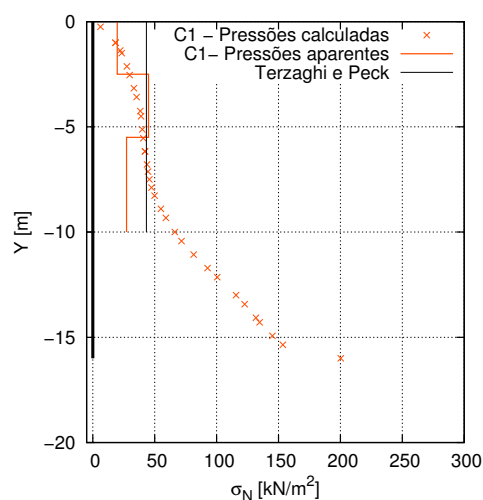


Figura 3.7: Cenário C1: Pressões na cortina após a 4ª escavação e pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras

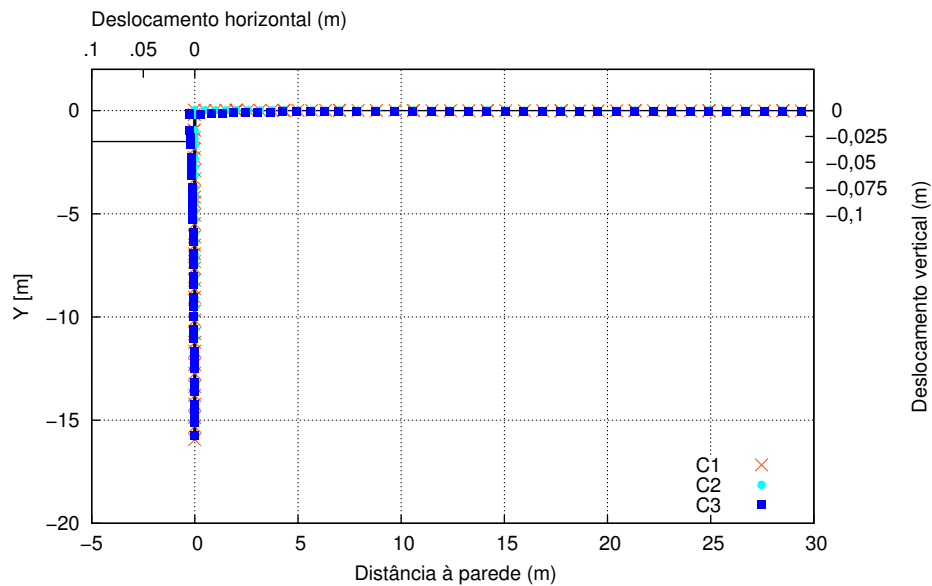
haver percolação, estando-se, portanto, também diante de um impulso hidrostático, o facto de a distribuição de tensões totais na cortina para o cenário 2 se aproximar do diagrama aparente para a situação com nível freático elevado apresentado na figura 2.6 parece de certa forma coerente;

- cenário C3 (após a 4ª escavação): a distribuição de tensões totais na cortina é maior que o diagrama aparente para a situação com nível freático elevado apresentado na figura 2.6. Nota-se ainda que a distribuição de tensões efectivas aproxima-se bem do diagrama aparente para a situação com nível freático elevado, ainda que este diagrama aparente seja em termos de tensões totais. O que se pode concluir até então é que há, portanto, um efeito das forças de percolação (cenário C3), que deve ser ajustado ao diagrama aparente proposto.

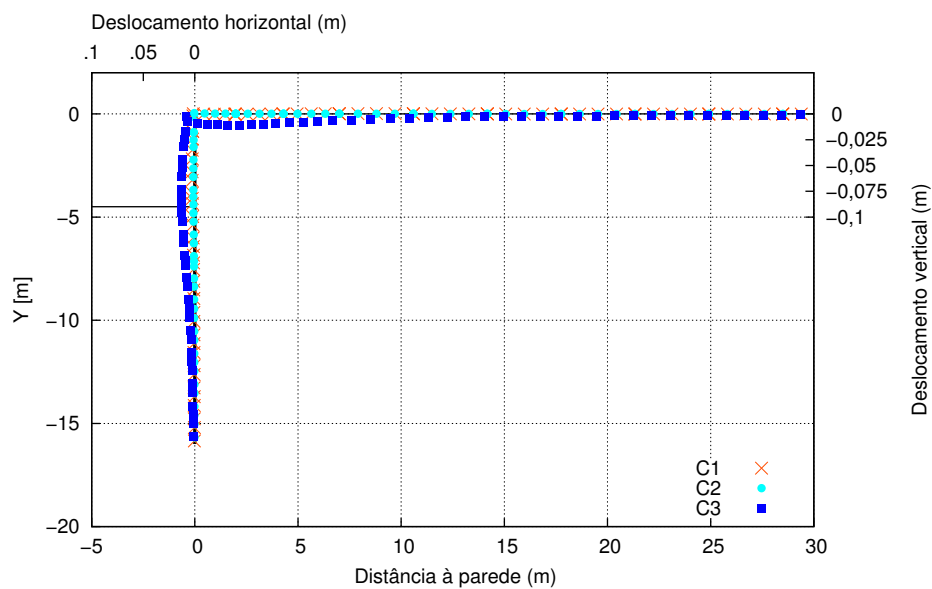
### 3.4.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários 1, 2 e 3 são apresentados nas figuras 3.8 e 3.9.

A partir da análise das figuras 3.8 e 3.9, em especial da figura 3.9(b) é possível constatar que os deslocamentos sofridos pela cortina e pelo solo no tardoz desta são substancialmente superiores no cenário C3 quando comparados aos cenários C1 e C2, sendo nestes últimos cenários bastante semelhantes. Resultados expectáveis, uma vez que no cenário C3 para

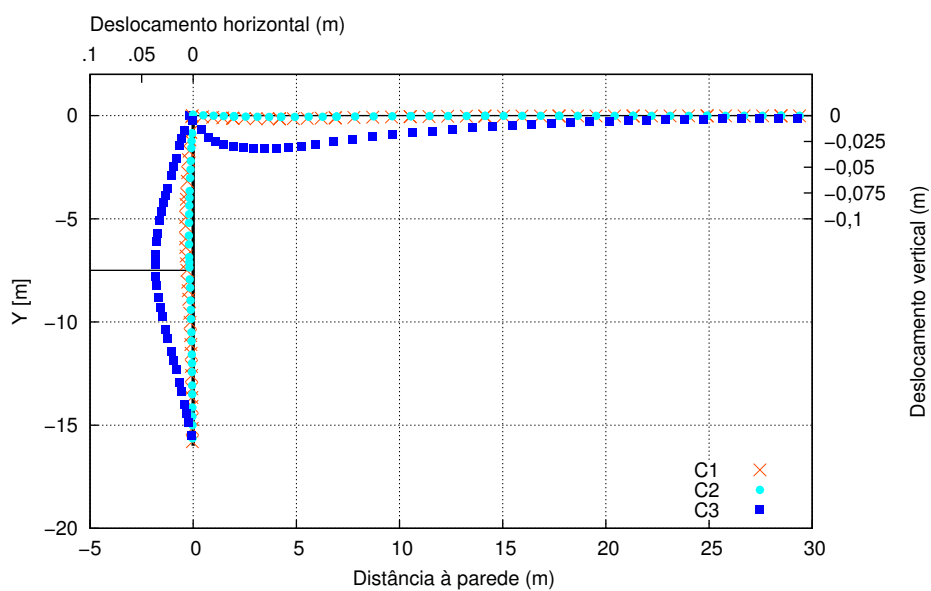


(a) 1ª Escavação

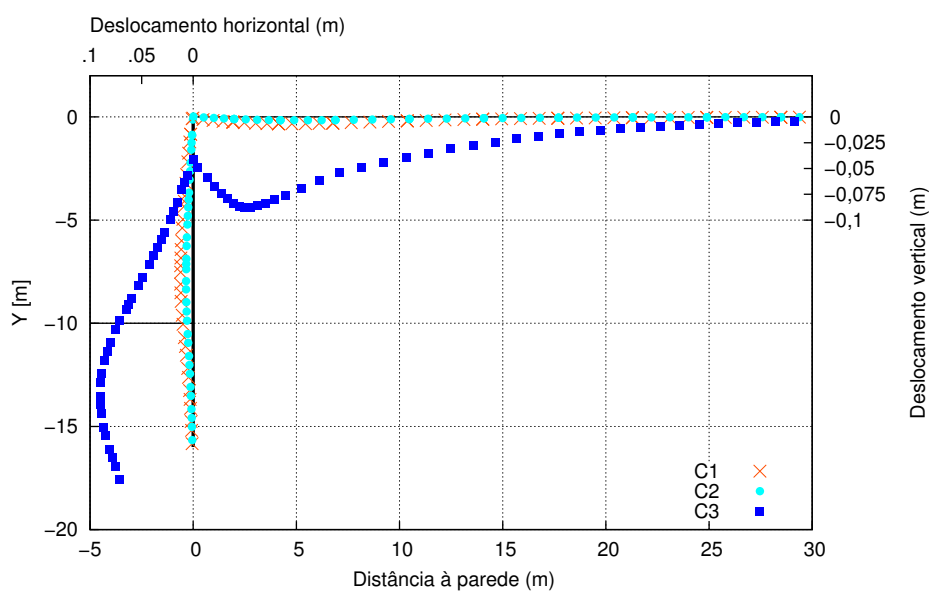


(b) 2ª Escavação

Figura 3.8: Cenários C1, C2 e C3: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta após a 1ª escavação e após a 2ª escavação



(a) 3ª Escavação



(b) 4ª Escavação

Figura 3.9: Cenários C1, C2 e C3: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta após a 3ª escavação e após a 4ª escavação

além das pressões de terras estão ainda presentes forças de percolação; e o cenário C2 embora considere a existência de água (em contraste com o cenário C1, em que isto não se verifica), a presença desta é considerada nos dois lados da escavação, podendo-se assim considerar que os efeitos em cada lado se anulam.

### 3.4.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para as forças nas escoras para os cenários 1, 2 e 3 são apresentados na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Cenários C1, C2 e C3: Forças nas Escoras

	Escora	Forças nas escoras [kN/m]			
		2 <sup>a</sup> Escavação	3 <sup>a</sup> Escavação	4 <sup>a</sup> Escavação	Max
C1	1 <sup>a</sup>	38,63	49,28	48,78	49,28
	2 <sup>a</sup>	-	92,97	134,98	134,98
	3 <sup>a</sup>	-	-	122,58	122,58
	Σ	38,63	142,24	306,33	-
C2	1 <sup>a</sup>	19,46	22,70	20,54	22,70
	2 <sup>a</sup>	-	48,79	68,99	68,99
	3 <sup>a</sup>	-	-	64,86	64,86
	Σ	19,46	71,49	154,39	-
C3	1 <sup>a</sup>	107,94	88,50	13,17	107,94
	2 <sup>a</sup>	-	307,76	393,07	393,07
	3 <sup>a</sup>	-	-	547,04	547,04
	Σ	107,94	396,26	953,27	-

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C1, C2 e C3 são apresentadas no gráfico em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figura 3.6(a) (em baixo)).

A análise dos resultados apresentados na tabela 3.4 e na figura 3.6(a) (em baixo) permite constatar o seguinte:

- a 1<sup>a</sup> escora é a que fica menos solicitada;
- para a 1<sup>a</sup> escora a carga máxima ocorre na 3<sup>a</sup> escavação nos cenários C1 e C2 e na 2<sup>a</sup> escavação no cenário C3 ; para as 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> escoras a carga máxima ocorre na 4<sup>a</sup> escavação (última fase) nos três cenários;
- as pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C1 e C3 aproximam-se da distribuição de pressões na cortina, enquanto que no cenário C2 são consideravelmente inferiores a estas;

- as pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras no cenário C2 são bastante inferiores à distribuição de tensões totais na cortina, o que é compreensível dado o facto de haver água no interior da escavação. Estas são, no entanto, semelhantes às tensões efectivas na cort

### 3.4.4 Análise da Estabilidade Hidráulica

No que toca a estabilidade o cenário 3 é o condicionante, uma vez que, para além das pressões de terras estão ainda presentes forças de percolação que podem provocar a rotura do fundo da escavação por instabilidade hidráulica oriunda do levantamento hidráulico ou “piping”. A análise quanto ao “piping” foge ao domínio do estudo efectuado, uma vez que este fenómeno não pode ser traduzido pela modelação realizada. Desta forma, procede-se apenas a análise quanto ao levantamento hidráulico.

Como já apresentado anteriormente, a instabilidade hidráulica oriunda do levantamento hidráulico é atingida quando as forças de percolação associadas ao fluxo ascendente anulam as tensões verticais efectivas numa dada secção, ou seja, quando as pressões intersticiais se igualam (ou são superiores) às tensões totais. A verificação da segurança quanto ao levantamento hidráulico deve ser realizada numa zona do solo imediatamente adjacente à cortina, no interior da escavação, e com largura igual a metade da ficha da cortina, como contemplado na figura 2.8. A verificação deve ser feita com base na relação entre o peso submerso do bloco em análise e as forças de percolação.

Como referido anteriormente no capítulo 2, para que não se esteja diante de um cenário de instabilidade hidráulica é necessário que:

$$W' \geq U \quad (3.3)$$

sendo  $W'$  o peso submerso, obtido pela equação 2.15, e  $U$  a força vertical de percolação, obtida pela equação 2.14.

Para a concretização do cálculo, a pressão de percolação média na base do prisma,  $\bar{u}_{\text{perc}}$ , é obtida da seguinte maneira:

$$\bar{u}_{\text{perc}} = \left( \frac{u_{\text{perc},A} + u_{\text{perc},B}}{2} \right) \quad (3.4)$$

em que A e B são pontos das extremidades da base do bloco em análise (ver figura 2.8) e  $u_{\text{perc},A}$  e  $u_{\text{perc},B}$  são obtidos por:

$$u_{\text{perc},A} = u_A - \gamma_w \times D \quad (3.5)$$

$$u_{\text{perc},B} = u_B - \gamma_w \times D \quad (3.6)$$

os resultados de  $u_A$  e  $u_B$  são obtidos directamente do cálculo de percolação realizado no Plaxis.

Desta forma, a força vertical de percolação,  $U$ , é obtida pela seguinte equação:

$$U = \left( \frac{u_{\text{perc},A} + u_{\text{perc},B}}{2} \right) \left( \frac{D}{2} \right) \quad (3.7)$$

Apresenta-se assim a tabela 3.5 na qual estão apresentados os valores obtidos na análise da estabilidade hidráulica do cenário 3 tal como foi abordado no caso base.

Tabela 3.5: Análise da estabilidade hidráulica

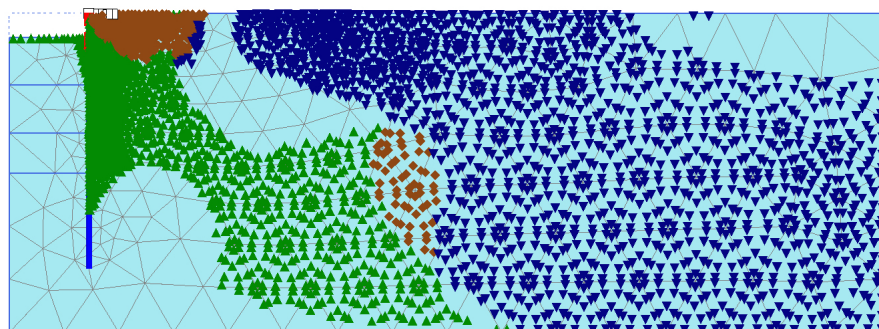
H (m)	D (m)	$u_A$ (kPa)	$u_B$ (kPa)	$u_{A,\text{perc}}$ (kPa)	$u_{B,\text{perc}}$ (kPa)	U (kN/m)	W' (kN/m)	FS
10	6	93,91	110,1	33,91	50,1	126,02	180	1,43

### 3.4.5 Pontos Plásticos

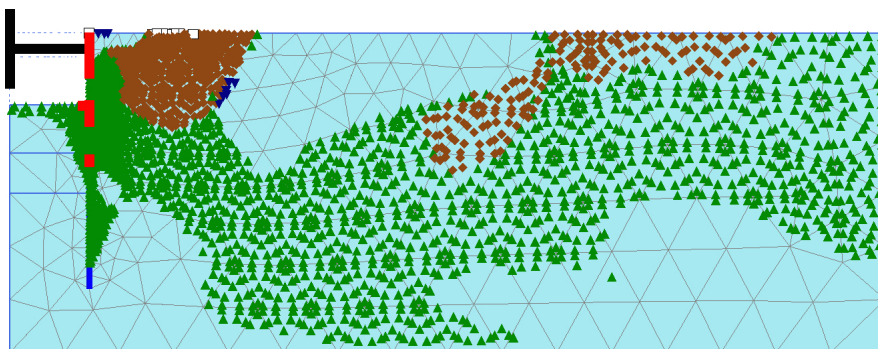
Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para os pontos onde se verifica plasticidade são apresentados nas figuras 3.10, 3.11 e 3.12 para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente.

A partir da análise das figuras 3.10, 3.11 e 3.12 é possível perceber que:

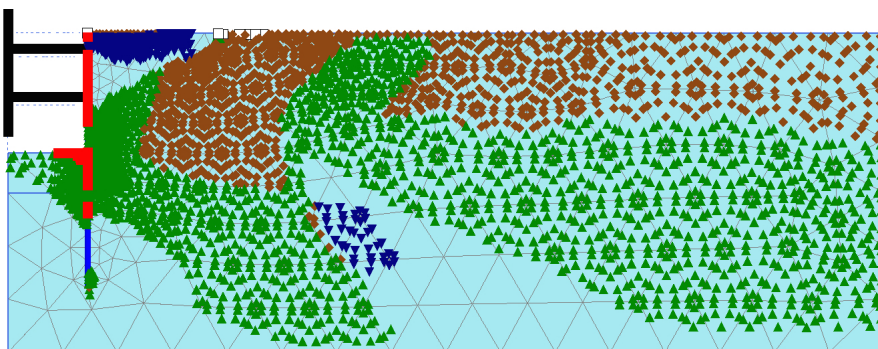
- cenários C1 e C2: os pontos plásticos ocorrem especialmente na interface solo-estrutura, inclusive após a última escavação, indicando simplesmente pontos em que se atingiu o ângulo de atrito solo-estrutura devido aos deslocamentos relativos naquela zona;
- cenário C3: os pontos plásticos, para além de ocorrerem na interface solo-estrutura, devendo-se ao mesmo motivo já apresentado, ocorrem também no maciço de solo. Após a 3<sup>a</sup> escavação verifica-se a ocorrência de pontos plásticos numa faixa de solo no interior da escavação. Após a 4<sup>a</sup> escavação verifica-se um aumento da zona abrangida pelos pontos onde se verifica plastificação, evidenciando-se claramente o início da formação de uma potencial superfície de rotura; é de notar que tal se verifica apesar de o coeficiente de segurança ao levantamento hidráulico ser relativamente elevado.



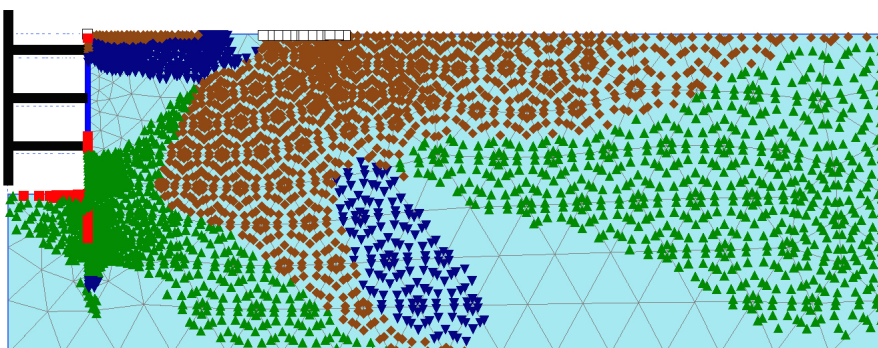
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação



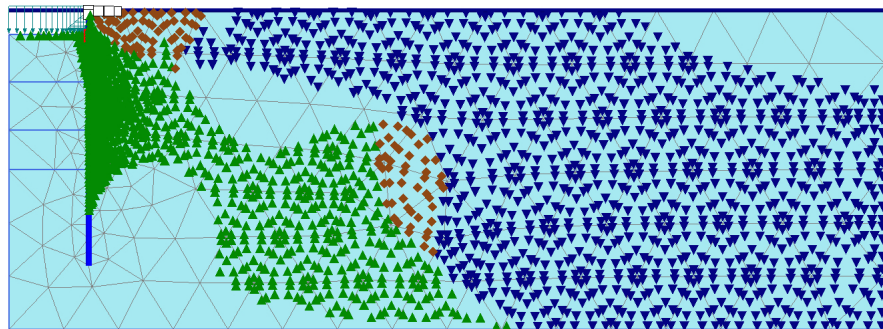
(c) 3ª escavação



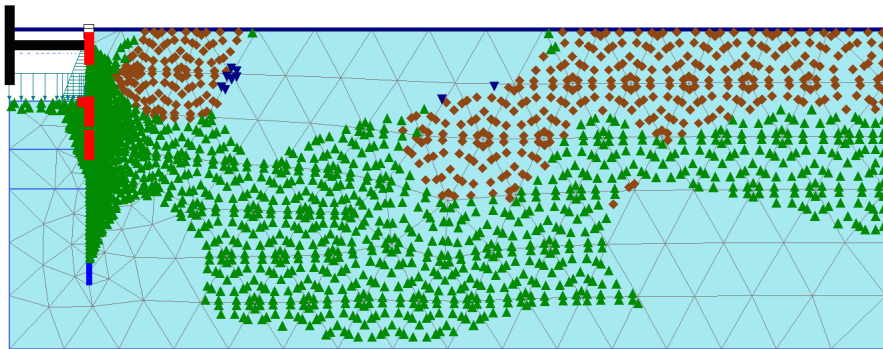
(d) 4ª escavação



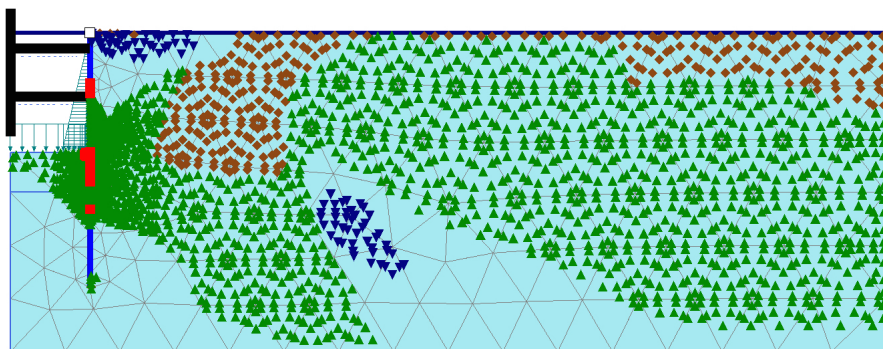
Figura 3.10: Cenário 1: Pontos plásticos em cada fase de escavação



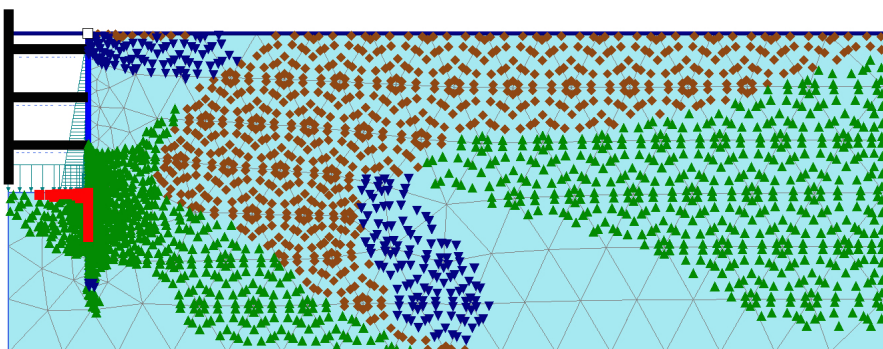
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação



(c) 3ª escavação

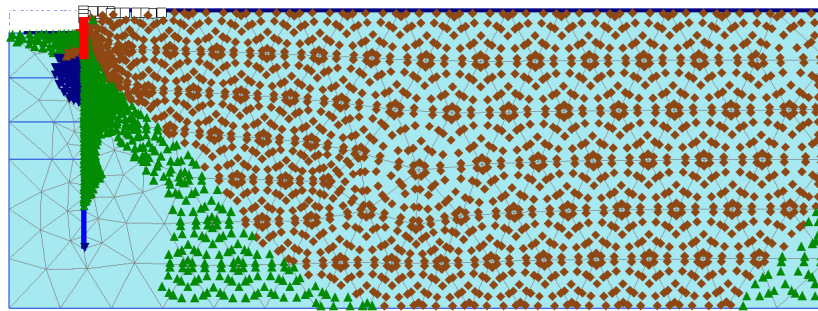


(d) 4ª escavação

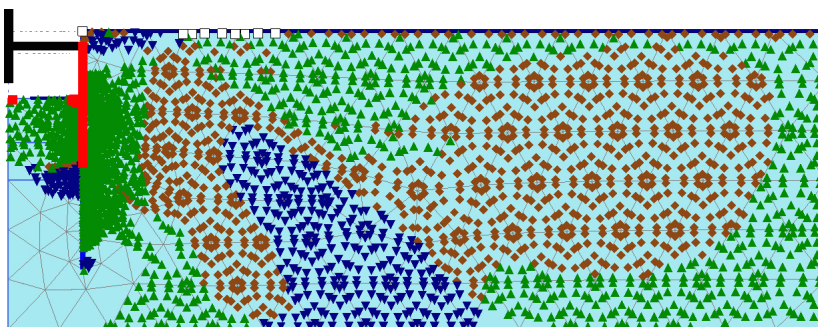
Plastic points

- |                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| ■ Failure point   | □ Tension cut-off point |
| ▼ Cap point       | ◆ Cap + hardening point |
| ▲ Hardening point |                         |

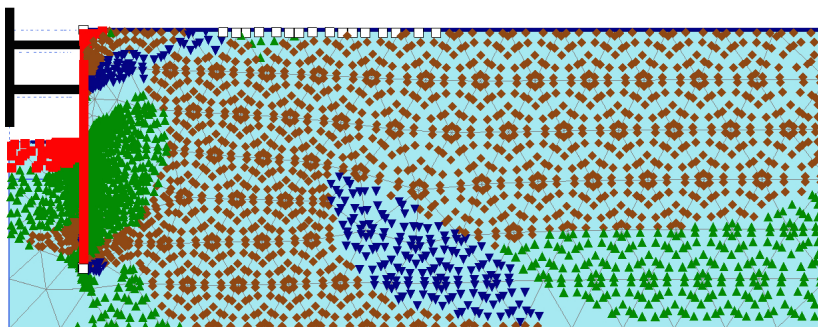
Figura 3.11: Cenário 2: Pontos plásticos em cada fase de escavação



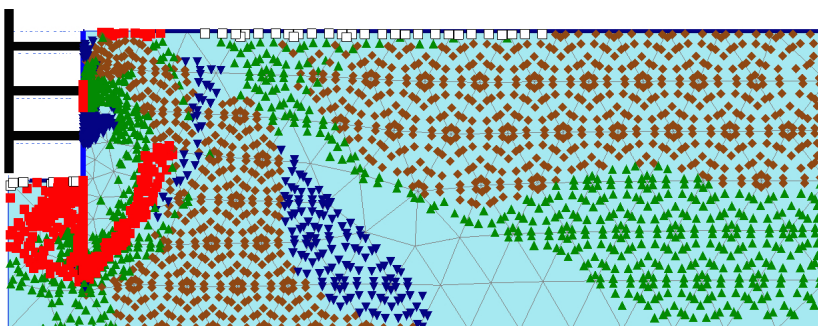
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação



(c) 3ª escavação



(d) 4ª escavação

Plastic points

- |                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| ■ Failure point   | □ Tension cut-off point |
| ▼ Cap point       | ◆ Cap + hardening point |
| ▲ Hardening point |                         |

Figura 3.12: Cenário 3: Pontos plásticos em cada fase de escavação

### 3.4.6 Tensões de Corte Relativas

Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para as tensões de corte relativas (sendo estas a relação entre a tensão de corte solicitada e a tensão de corte resistente) são apresentados nas figuras 3.13, 3.14 e 3.15 para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente.

A partir da análise das figuras 3.13, 3.14 e 3.15 é possível perceber que:

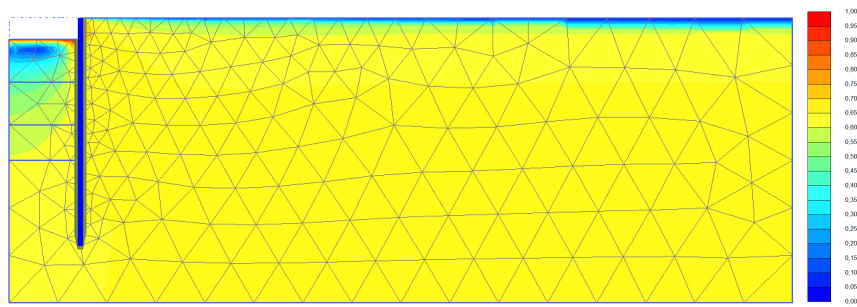
- cenários C1 e C2: as zonas que apresentam tensões de corte relativas elevadas situam-se sobretudo no interior da escavação e no maciço no tardoiz numa zona relativamente reduzida quando comparada ao que se verifica no cenário C3.
- cenário C3: as zonas que apresentam tensões de corte relativas elevadas começam a sugerir uma potencial superfície de rotura a partir da 3<sup>a</sup> escavação, tornando-se ainda mais claro após a 4<sup>a</sup> escavação.

### 3.4.7 Deslocamentos Totais

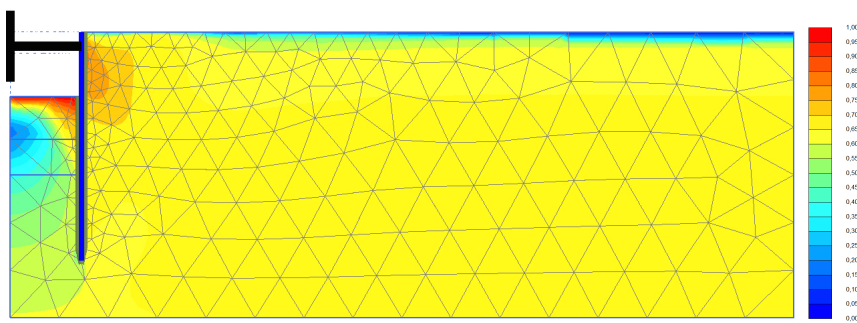
Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para os deslocamentos totais são apresentados nas figuras 3.16, 3.17 e 3.18 para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente.

A partir da análise das figuras 3.16, 3.17 e 3.18 é possível perceber que:

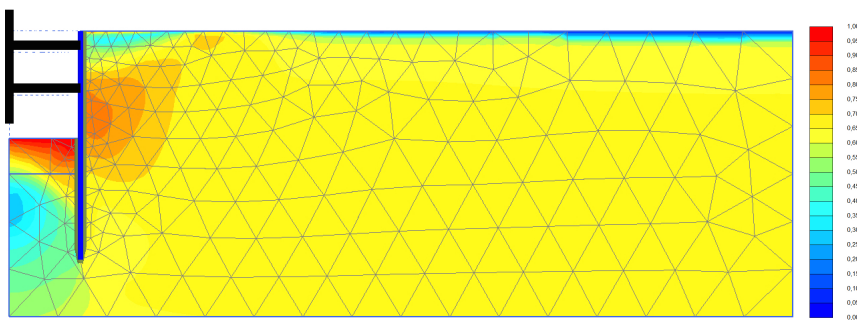
- cenários C1 e C2: as zonas que apresentam deslocamentos totais mais elevados situam-se sobretudo no interior da escavação, indicando os deslocamentos habitualmente associados a esse tipo de estruturas (escavações), empolamento. É ainda possível verificar alguns deslocamentos no maciço no tardoiz mesmo que com valores inferiores e numa zona relativamente inferior quando comparados com o observado no cenário C3. Nota-se que os deslocamentos sofridos no cenário C1 são superiores aos observados no cenário C2.
- cenário C3: as zonas que apresentam deslocamentos totais mais elevados situam-se sobretudo no interior da escavação, devendo-se ao mesmo motivo já apresentado, para além das zonas no maciço no tardoiz. É possível verificar que no cenário C3 os deslocamentos no maciço no tardoiz são substancialmente superiores aos verificados nesta mesma zona nos cenários C1 e C2, devendo-se sobretudo aos deslocamentos horizontais, formando inclusive uma cunha que se desenvolve a partir da base da cortina até à superfície do terreno. O facto é, que tal como é possível observar na figura 3.9(b), no cenário C3 os deslocamentos sofridos são consideravelmente superiores aos observados nos cenários C1 e C2.



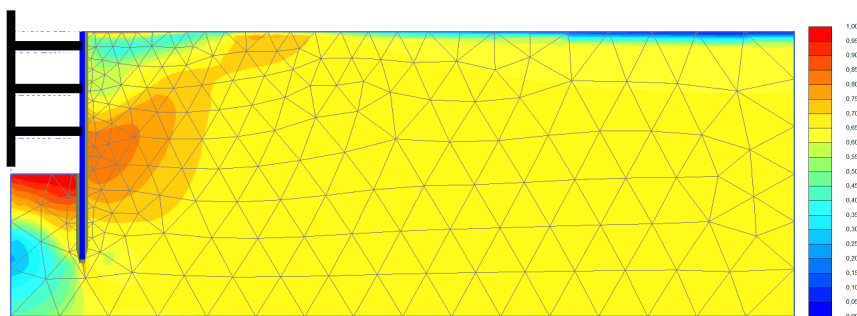
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação

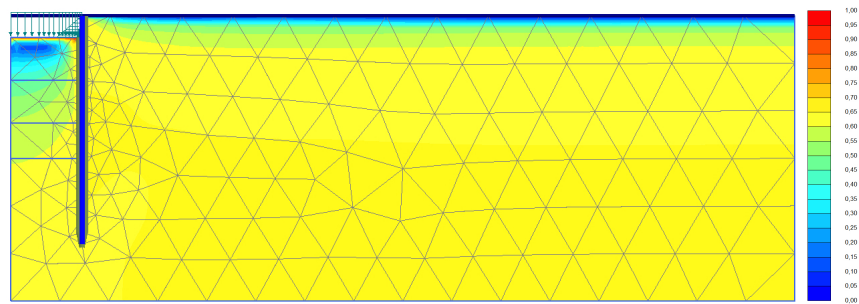


(c) 3ª escavação

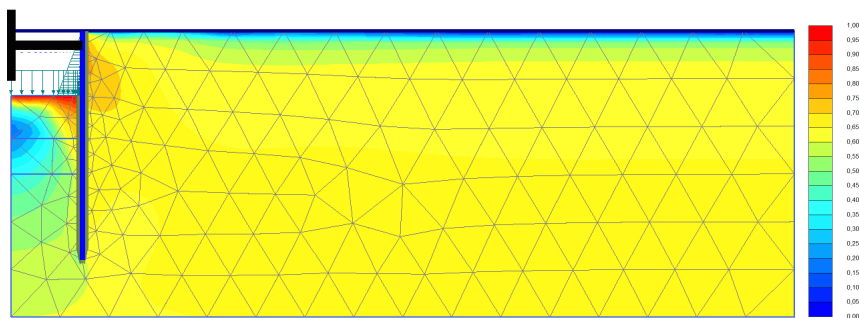


(d) 4ª escavação

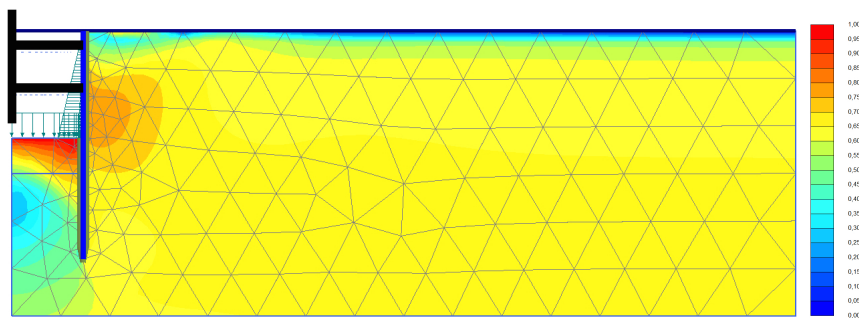
Figura 3.13: Cenário 1: Tensões de corte relativas em cada fase de escavação



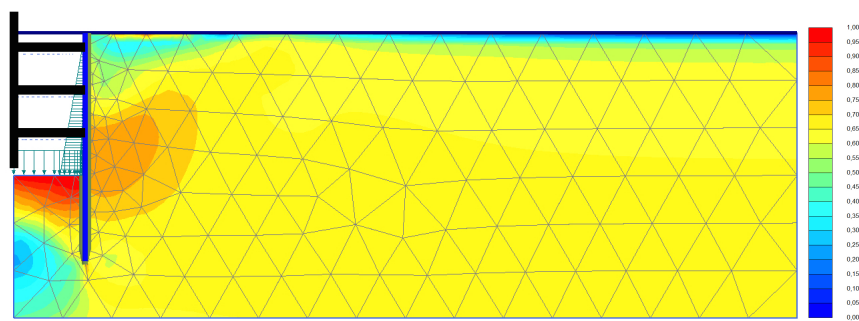
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação

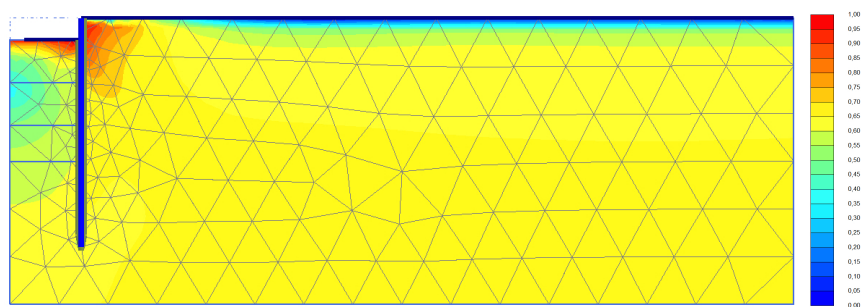


(c) 3ª escavação

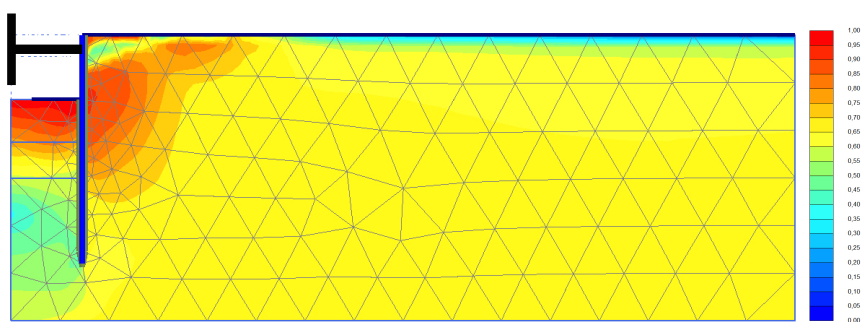


(d) 4ª escavação

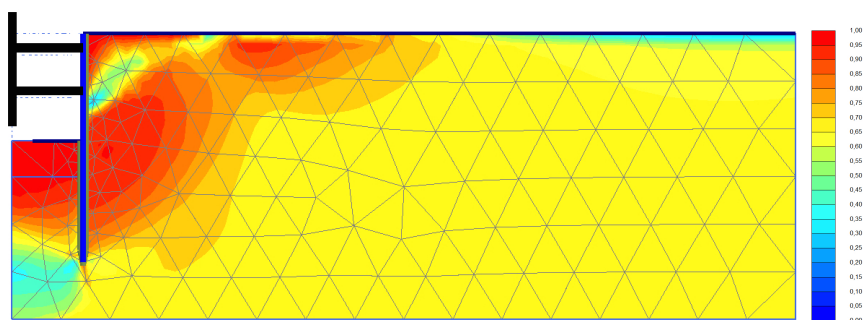
Figura 3.14: Cenário 2: Tensões de corte relativas em cada fase de escavação



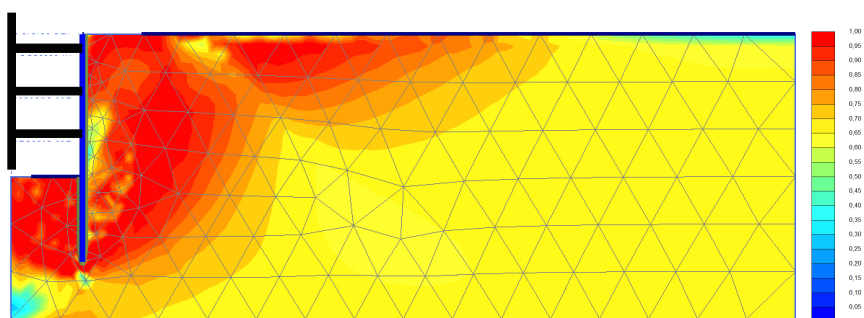
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação

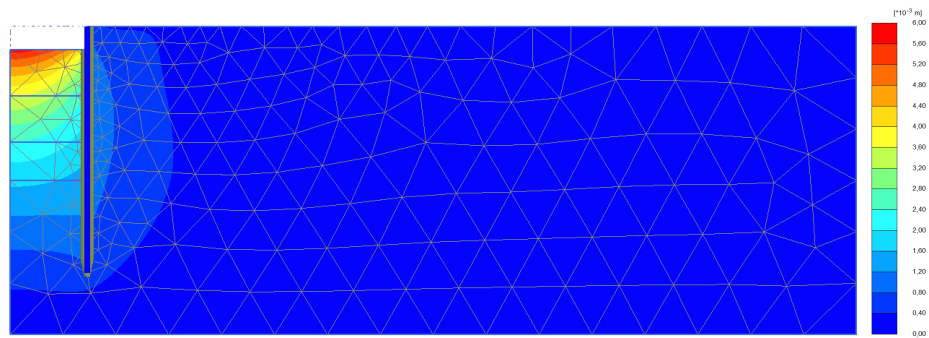


(c) 3ª escavação

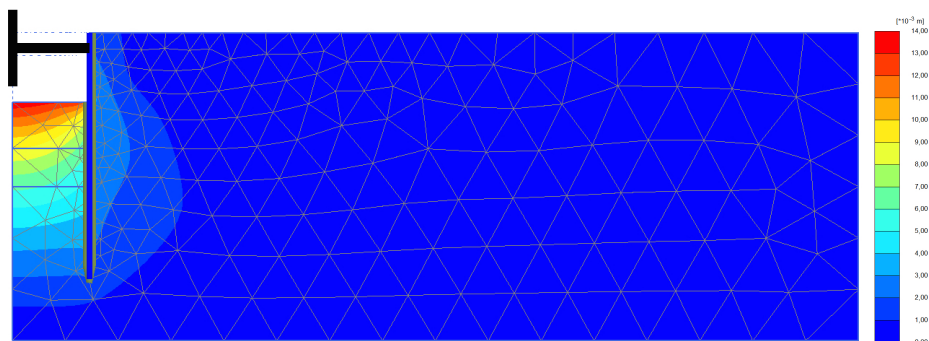


(d) 4ª escavação

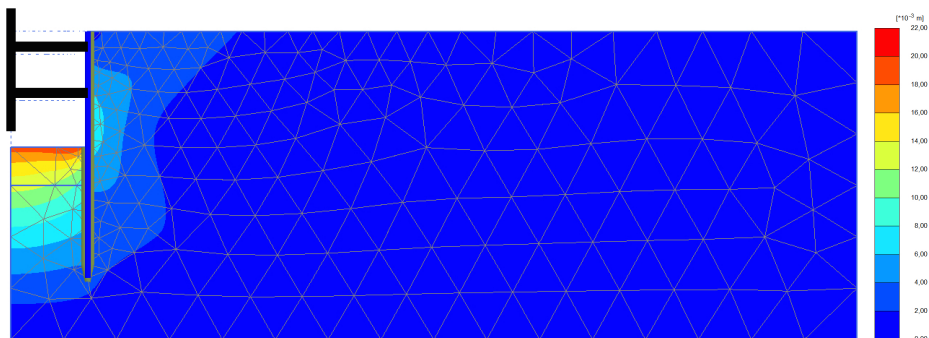
Figura 3.15: Cenário 3: Tensões de corte relativas em cada fase de escavação



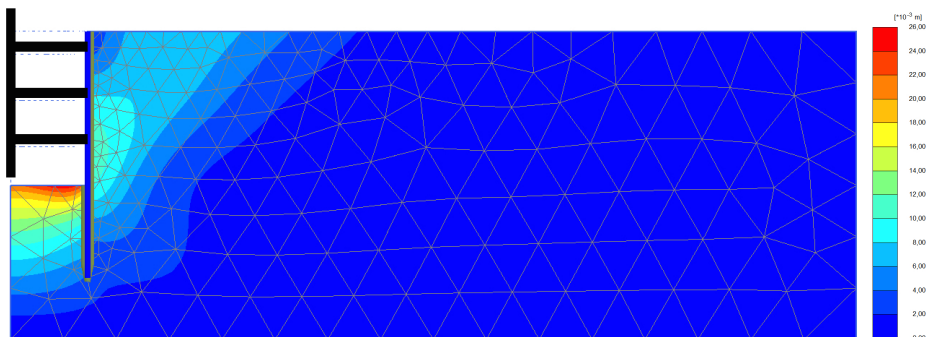
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação

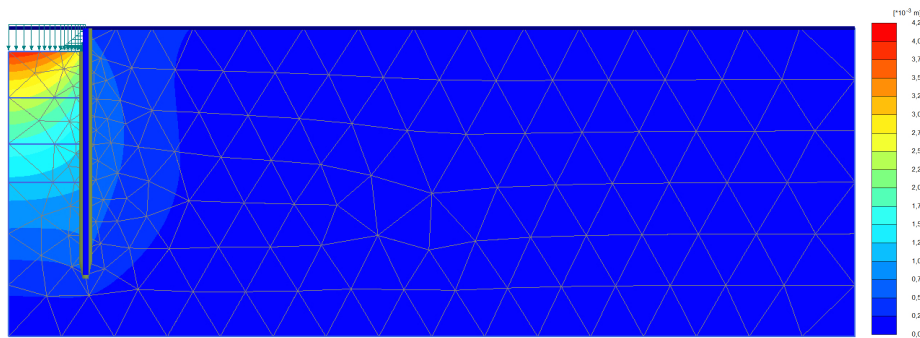


(c) 3ª escavação

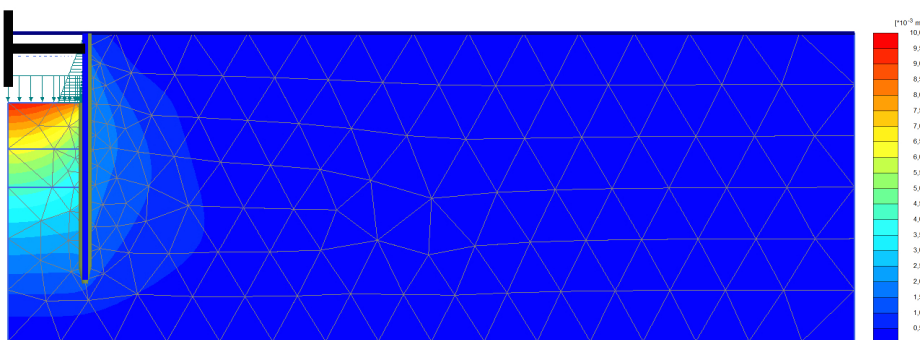


(d) 4ª escavação

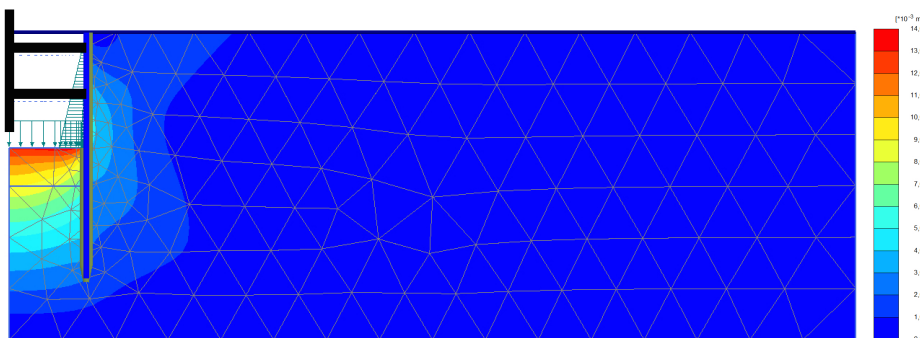
Figura 3.16: Cenário 1: Deslocamentos totais em cada fase de escavação



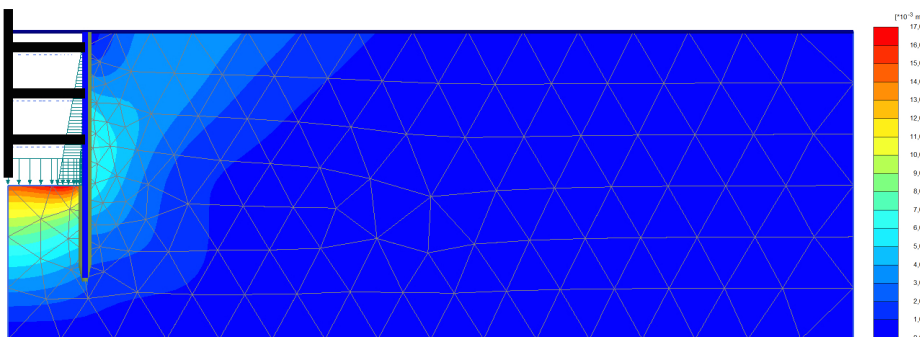
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação

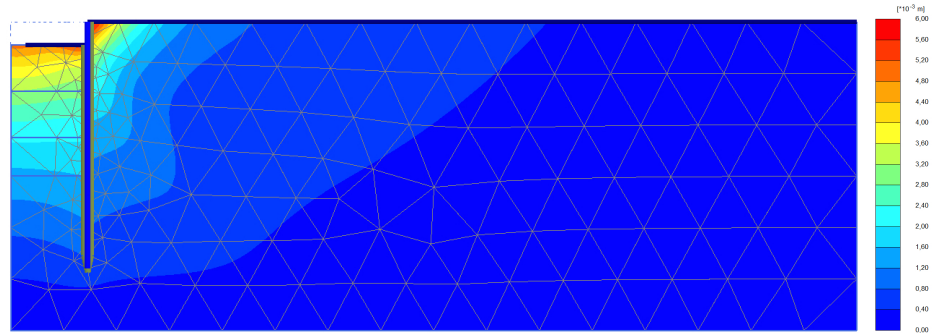


(c) 3ª escavação

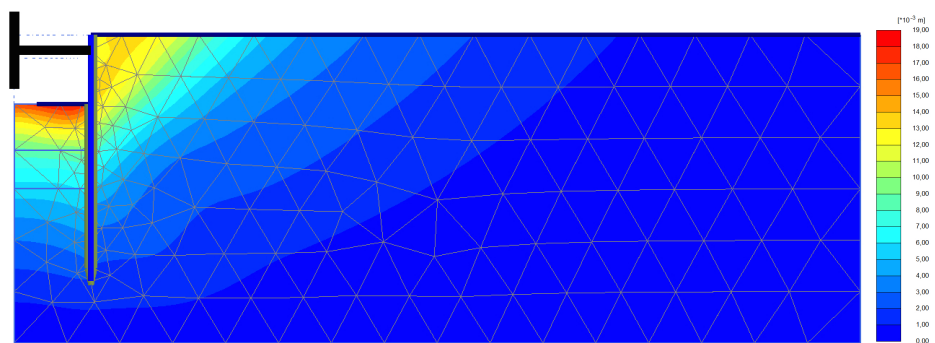


(d) 4ª escavação

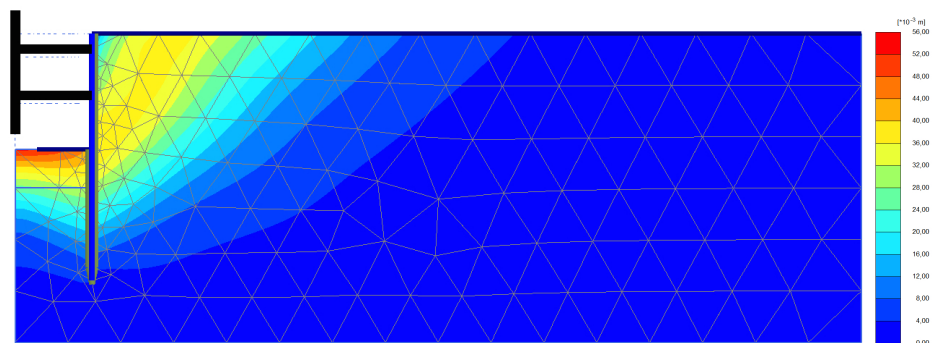
Figura 3.17: Cenário 2: Deslocamentos totais em cada fase de escavação



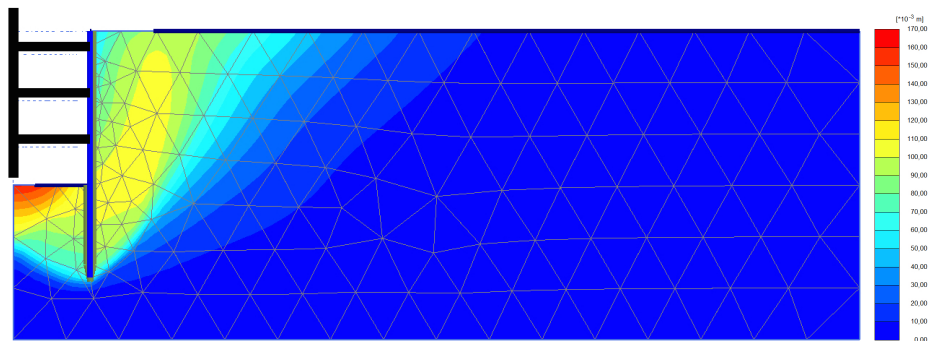
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação



(c) 3ª escavação



(d) 4ª escavação

Figura 3.18: Cenário 3: Deslocamentos totais em cada fase de escavação

### 3.4.8 Carga Hidráulica no Maciço

Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para a carga hidráulica no maciço no cenário 3 são apresentados na figura 3.19.

A partir da análise da figura 3.19 é possível constatar que:

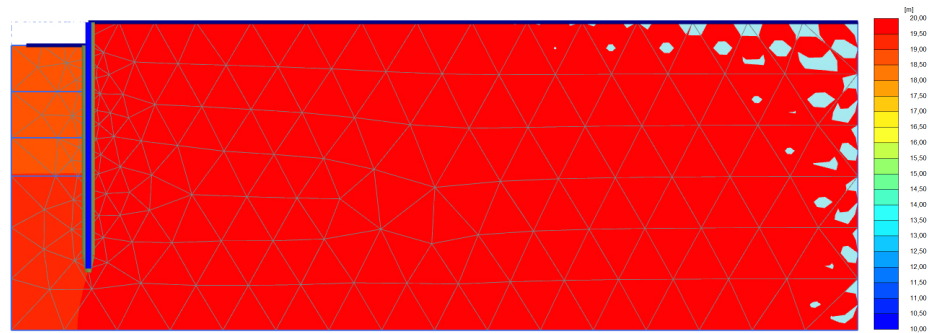
- como era de se esperar, de fase para fase de escavação, a carga hidráulica vai diminuindo na superfície do terreno no interior da escavação;
- uma vez que a diferença de carga hidráulica é cada vez maior, para saltos equipotenciais com o mesmo valor, passa a haver cada vez mais um maior número de saltos equipotenciais.

### 3.4.9 Esforços na Cortina

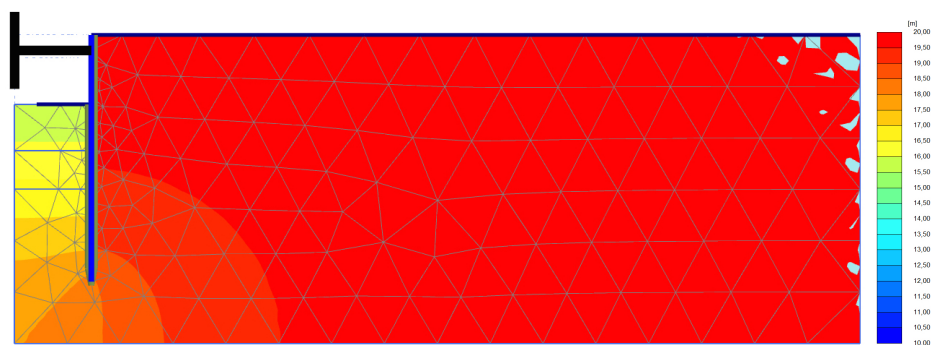
Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo em cada cenário para os esforços na cortina são apresentados na figura 3.20. Apresenta-se ainda a figura 3.21 na qual são apresentados os esforços na cortina para a última fase de escavação para os cenários C1, C2 e C3 em simultâneo.

A análise dos resultados apresentados nas figuras 3.20 e 3.21 permite constatar o seguinte:

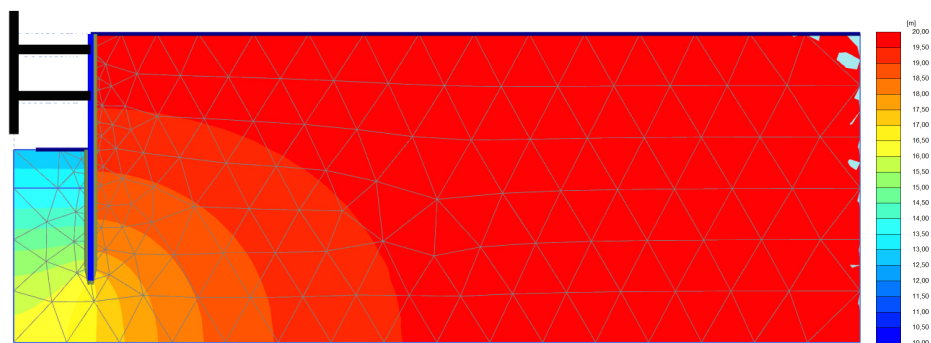
- os valores dos esforços para o cenário C3 são substancialmente superiores aos dos cenários C1 e C2; os momentos máximos são da ordem de 500 kN.m/m no cenário C3, que corresponde a cerca de 3,5 vezes os máximos do cenário C1; os esforços transversos máximos são da ordem de 400 kN/m no cenário C3, que corresponde a cerca de 4,5 vezes os máximos do cenário C1; as diferenças dos valores máximos dos esforços axiais não são tão significativas, sendo inclusive os valores de N para o cenário C1 ligeiramente superiores aos do cenário C3.
- estes resultados (em especial os momentos e os esforços transversos) estão em acordo com os valores obtidos para as cargas nas escoras e para as pressões na cortina.
- os resultados obtidos para o cenário C2 são cerca de metade dos resultados do cenário C1.
- as diferenças entre os resultados dos cenários C3 e C1 são significativas também na própria distribuição de momento e esforço transversal ao longo da cortina. Com efeito, para os momentos flectores, acima da profundidade de instalação da 3<sup>a</sup> escora



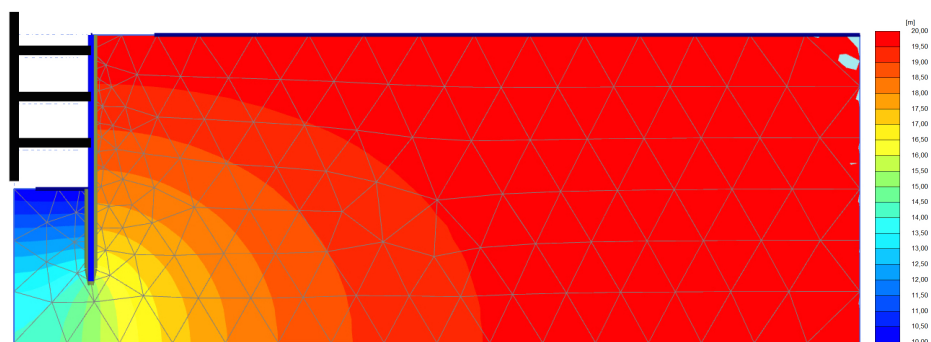
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação



(c) 3ª escavação



(d) 4ª escavação

Figura 3.19: Cenário 3: Equipotenciais em cada fase de escavação

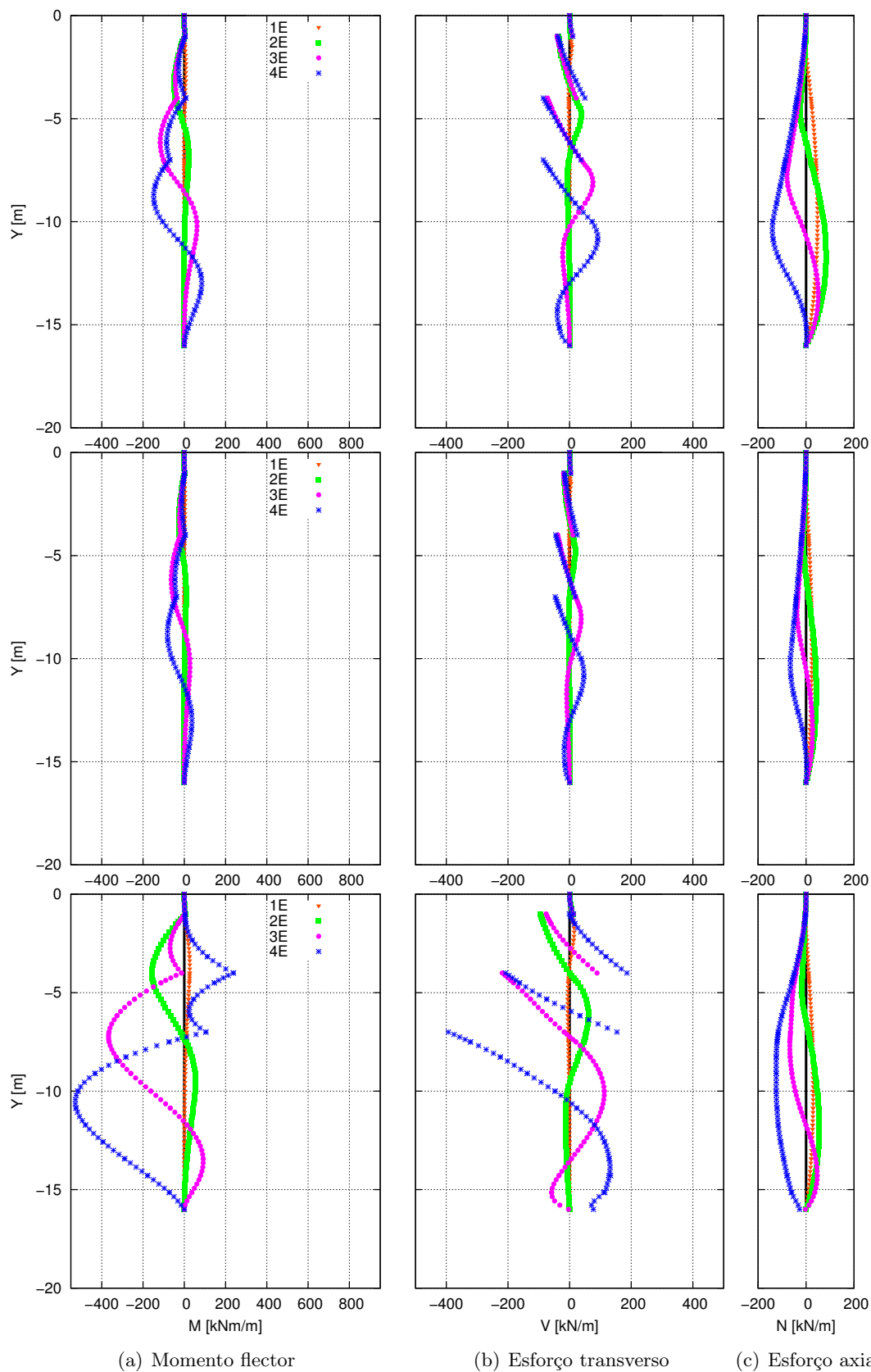


Figura 3.20: Cenários C1 (em cima), C2 (ao centro) e C3 (em baixo): Esforços na cortina em cada fase de escavação

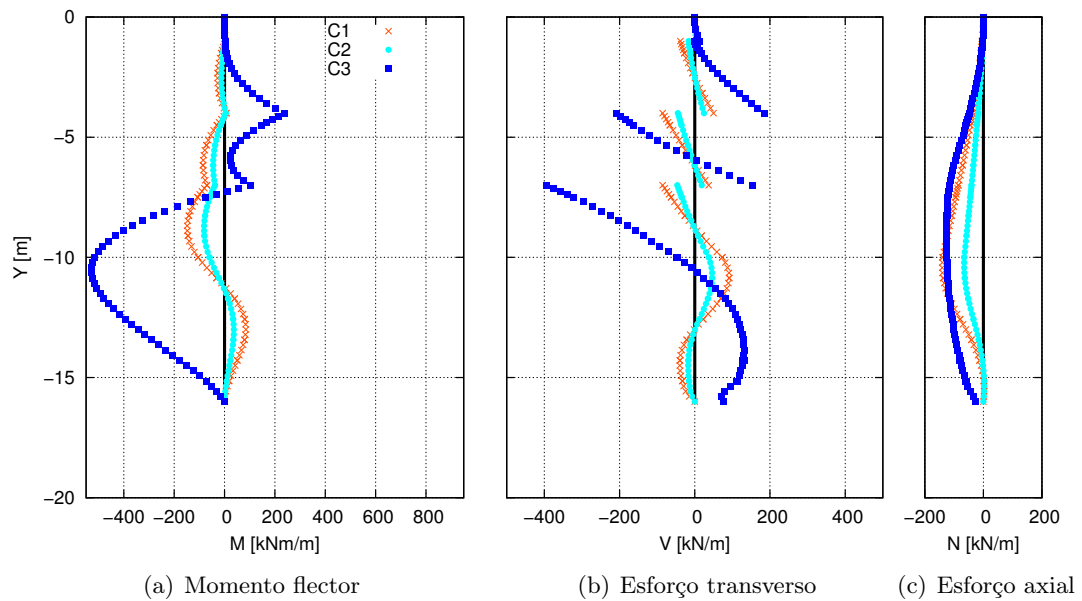


Figura 3.21: Cenários C1, C2 e C3: Esforços na cortina após a 4<sup>a</sup> escavação

os sinais chegam a ser opostos e abaixo da altura de escavação o cenário C3 não apresenta a inversão de sinal e concavidade observada nos cenários C2 e C3.

- as alterações de esforços (inclusive do seu sinal) são igualmente observáveis no mesmo cenário de fase para fase. Isso é mais evidente no cenário C3, apesar de se verificar também nos cenários C1 e C2. Estas alterações de esforços são, naturalmente, devidas ao procedimento construtivo, observando-se, como seria de esperar, que tanto nos diagramas de esforço transverso como nos diagramas de momentos é possível identificar a localização exacta das escoras, que é traduzida nos diagramas de esforço transverso pela inversão brusca de sinal e nos diagramas de momento flector por consequentes pontos de inflexão.

### 3.5 Resultados Obtidos - C4-C5

A seguir, apresentam-se os seguintes resultados:

- cenários C4 e C5: pressões na cortina ao longo do faseamento construtivo e pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras;
- cenários C4 e C5: deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta ao longo do faseamento construtivo;
- cenários C4 e C5: forças nas escoras ao longo do faseamento construtivo;
- cenários C4 e C5: pontos plásticos ao longo do faseamento construtivo;
- cenários C4 e C5: tensões de corte relativas ao longo do faseamento construtivo;
- cenários C4 e C5: deslocamentos totais ao longo do faseamento construtivo;
- cenários C4 e C5: esforços na cortina ao longo do faseamento construtivo.

#### 3.5.1 Pressões na Cortina

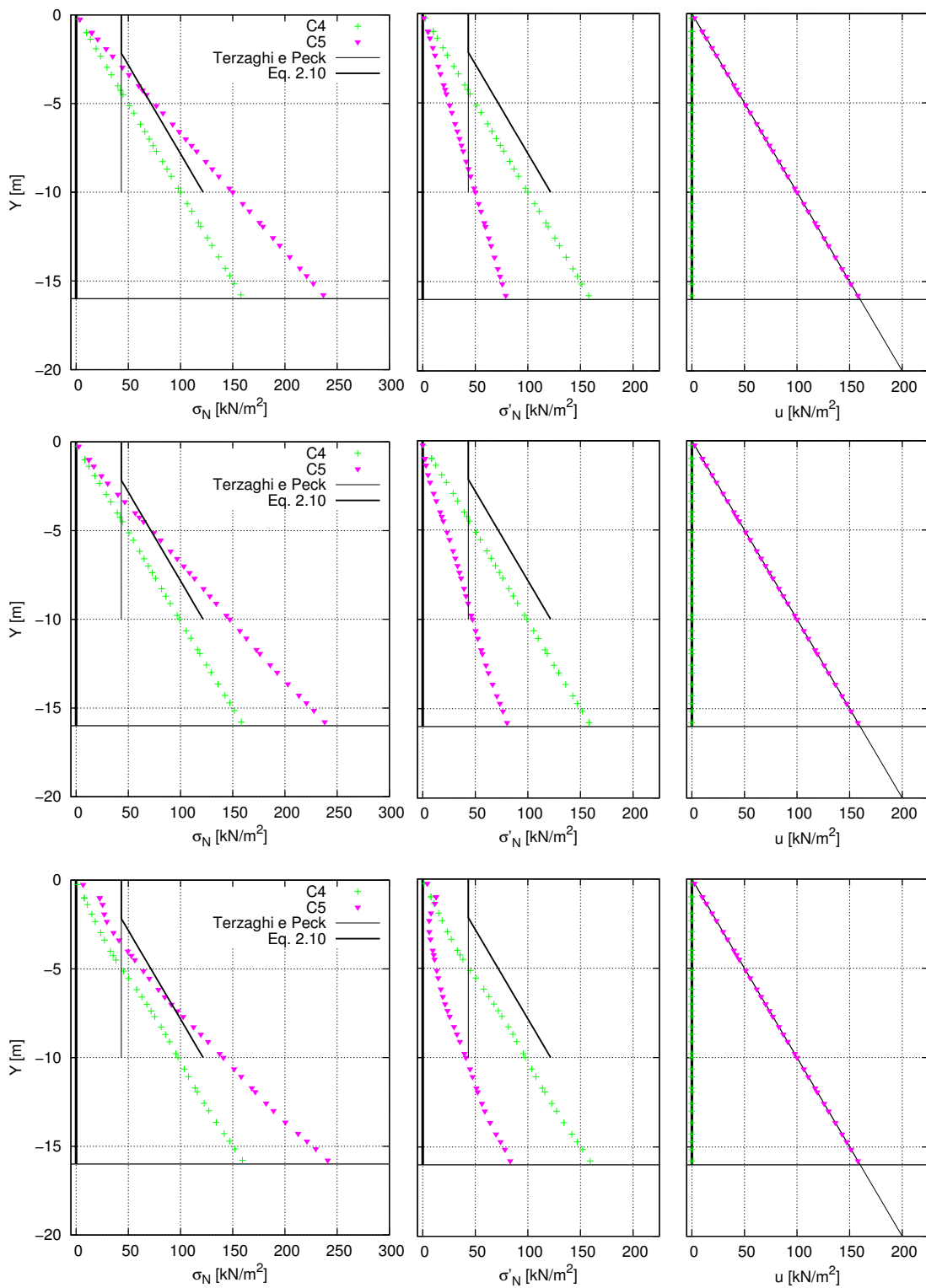
Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para as pressões na cortina nos cenários C4 e C5 são apresentados nas figuras 3.22 e 3.23.

Apresenta-se ainda a figura 3.24 na qual são apresentados os resultados obtidos após a última fase de escavação para os cenários C3 e C5.

Como já apresentado na secção 3.4.1, o diagrama aparente de Terzaghi e Peck (equação 2.1) e o diagrama aparente para a situação com nível freático elevado apresentado na figura 2.6, dado pela equação 2.10, são apresentados nas figuras como um termo de comparação com os resultados obtidos.

A análise dos resultados apresentados nas figuras 3.22, 3.23 e 3.24 permite constatar o seguinte:

- fase inicial: as tensões são as esperadas, isto é, apresentam evolução linear de acordo com os valores de  $K_0$ ,  $\gamma$  e  $\gamma_w$ .
- as primeiras fases apresentam pequenas alterações aos diagramas iniciais.
- cenário C4: as tensões totais e as tensões efectivas são iguais e as pressões intersticiais são nulas, não há nível freático elevado.



(a) Tensões totais

(b) Tensões efectivas

(c) Pressões intersticiais

Figura 3.22: Cenários C4 e C5: Pressões na cortina após a instalação da parede (em cima), após a 1ª escavação (ao centro), e após a 2ª escavação (em baixo)

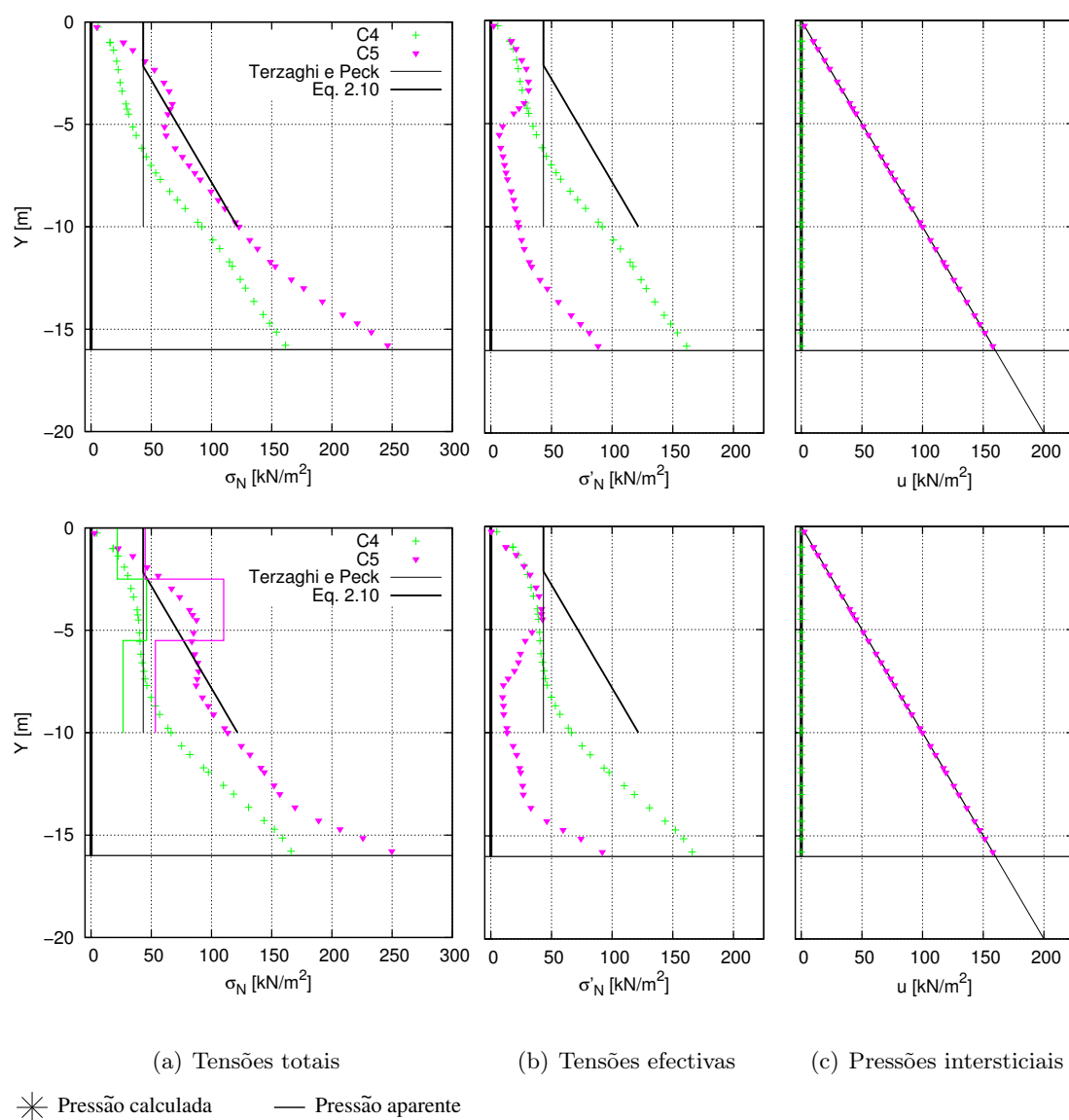


Figura 3.23: Cenários C4 e C5: Pressões na cortina após a 3<sup>a</sup> escavação (em cima) e após a 4<sup>a</sup> escavação (em baixo); na figura de baixo inclui-se igualmente as pressões aparentes que serão abordadas na secção 3.5.3

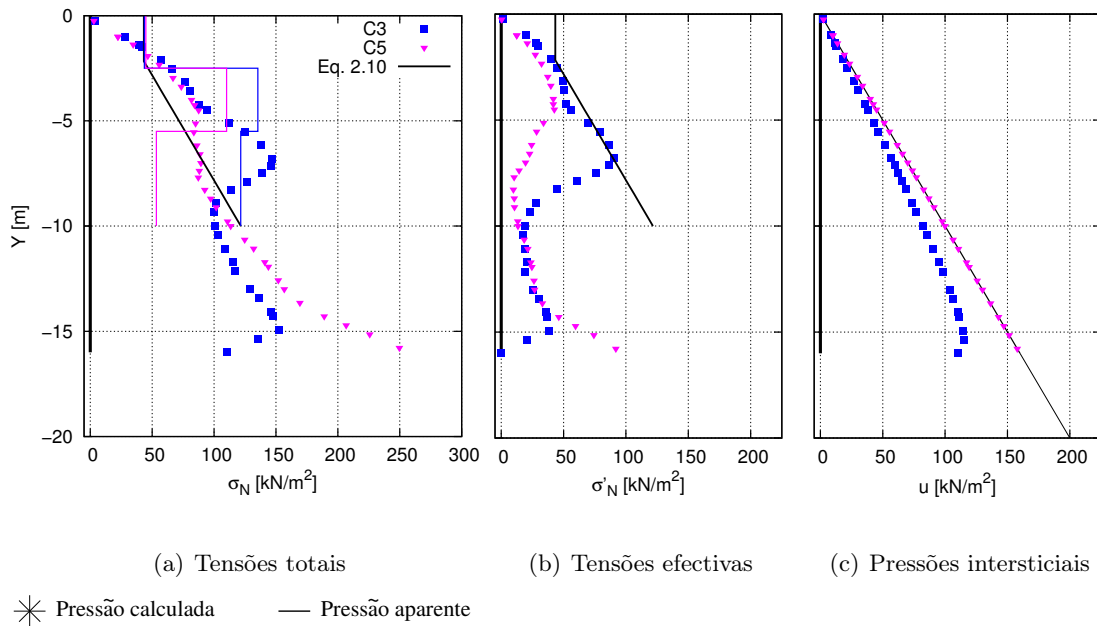


Figura 3.24: Cenários C3 e C5: Pressões na cortina após a 4<sup>a</sup> escavação; na figura 3.24(a) inclui-se igualmente as pressões aparentes que serão abordadas na secção 3.5.3

- cenário C5: as pressões intersticiais são iguais às pressões hidrostáticas.
- cenário C4 (após a 4<sup>a</sup> escavação): tal como para o cenário C1, a distribuição de tensões totais na cortina aproxima-se dos diagramas aparentes de Terzaghi e Peck. De facto os resultados obtidos são semelhantes. A distinção entre os cenários C1 e C4, ou seja, o facto de no cenário C4 a cortina estar encastrada devido à existência de substrato rijo logo na base da cortina, não se faz notar.
- cenário C5 (após a 4<sup>a</sup> escavação): tal como para o cenário C3, a distribuição de tensões totais na cortina é maior que o diagrama aparente para a situação com nível freático elevado apresentado na figura 2.6. No entanto, a partir da análise da figura 3.24, nota-se que no cenário C5 a distribuição de tensões totais na cortina aproxima-se mais dos diagramas aparentes do que no cenário C3. Assim, ao contrário do que se verifica para a situação em que não se considera a existência de nível freático elevado, a existência de um substrato rijo e impermeável mostra ter bastante influência na distribuição de pressões totais na cortina. No entanto, esta diferença parece ser bem óbvia, uma vez que a distinção entre os cenários C3 e C5 para além da diferença de rigidez do sistema de contenção (verificada entre os cenários C1 e C4), consiste também numa diferença fundamental entre as pressões exercidas pela água em cada um dos cenários. O facto é, que a existência de um substrato impermeável no pé da cortina no cenário C5 implica que não haja escoamento, em contraste ao

que se verifica no cenário C3. Ao contrário do que se poderia esperar (ver secção 2.3 e figura 2.2), a distribuição de tensões totais no cenário C3 é superior à verificada no cenário C5. Desta forma, é possível perceber que a existência de pressões devidas à água para o caso em que há escoamento (cenário C3) e para o caso hidrostático (cenário C5) deve ser realmente considerada de forma distinta. Ou seja, confirma-se a necessidade de se analisar caso a caso a acção global dos efeitos das forças de percolação.

### 3.5.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários 4 e 5 são apresentados nas figuras 3.25 e 3.26.

Apresenta-se ainda a figura 3.27 na qual são apresentados os resultados obtidos após a última fase de escavação para os cenários C3 e C5.

A partir da análise das figuras 3.25, 3.26 e 3.27 é possível constatar o seguinte:

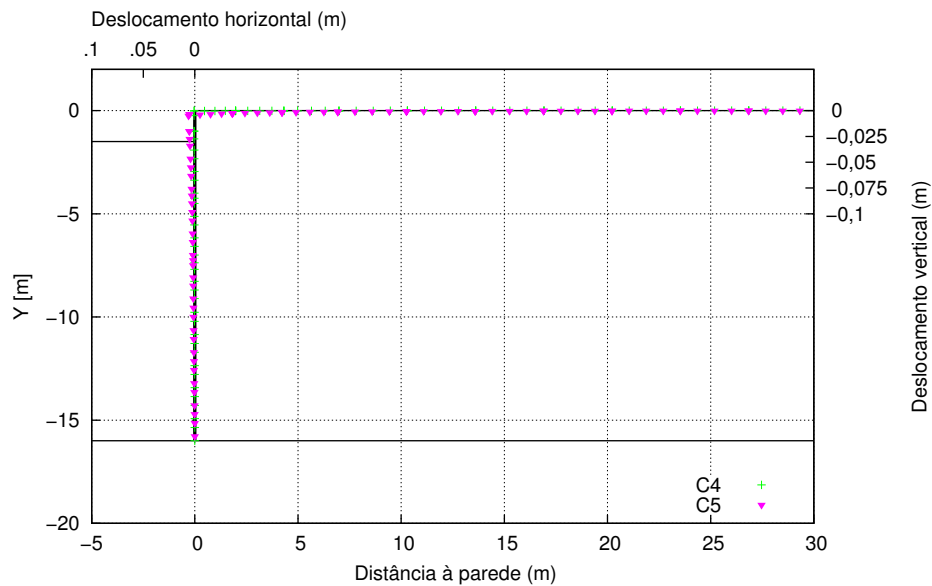
- os deslocamentos sofridos pela cortina e pelo solo no tardoz desta são superiores no cenário C5 quando comparados ao cenário C4;
- a partir da comparação das figuras 3.9 e 3.26 é possível constatar que até após a 3<sup>a</sup> escavação os deslocamentos no cenário C3 e C5 são parecidos. No entanto, após a 4<sup>a</sup> escavação é possível observar que enquanto no cenário C5 os deslocamentos aumentam pouco mais em relação à 3<sup>a</sup> escavação, no cenário C3 esses deslocamentos evoluem bastante.

### 3.5.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

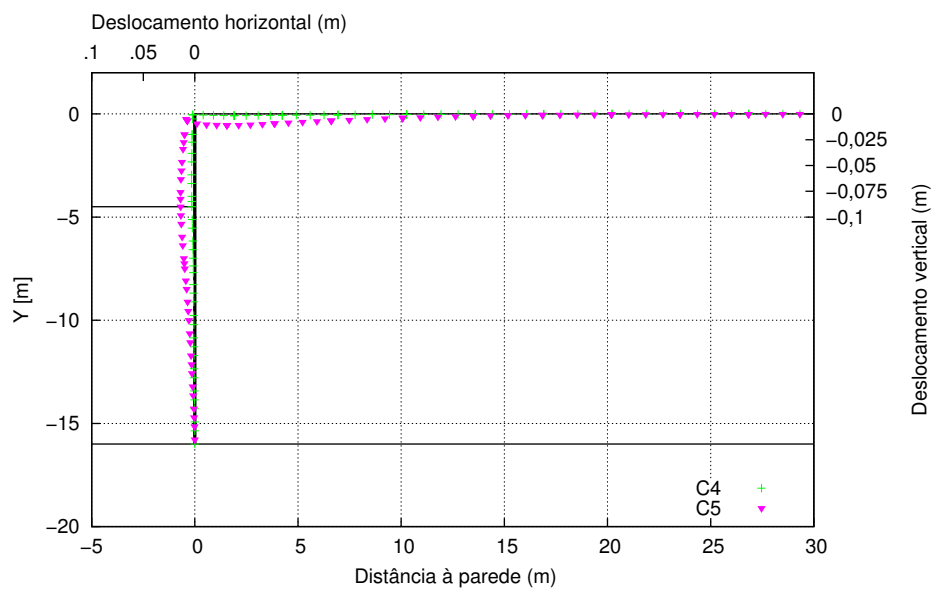
Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para as forças nas escoras para os cenários 4 e 5 são apresentados na tabela 3.6.

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C4 e C5 são apresentadas no gráfico em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figura 3.23(a) (em baixo)). Apresenta-se ainda a figura 3.24 na qual são apresentados em simultâneo os resultados obtidos para os cenários C3 e C5.

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

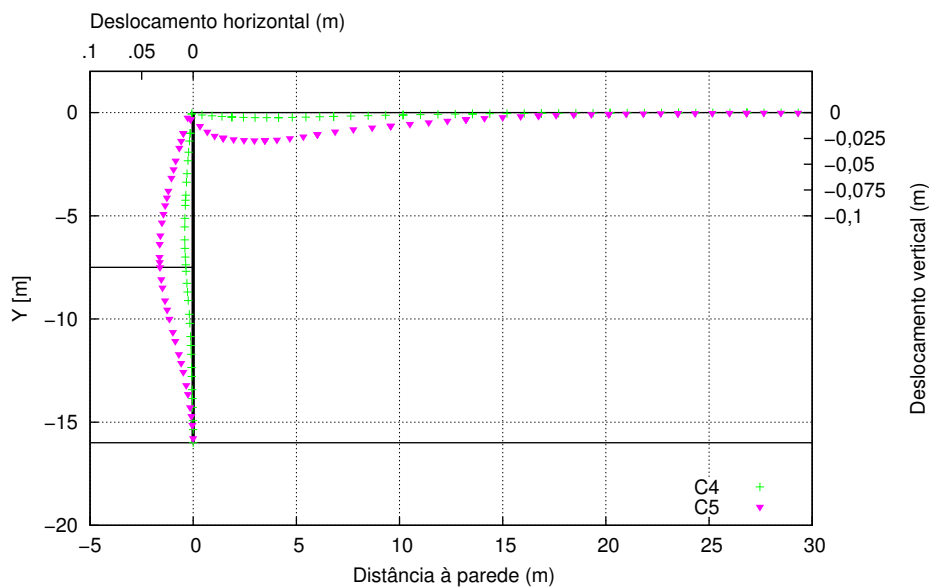


(a) 1ª Escavação

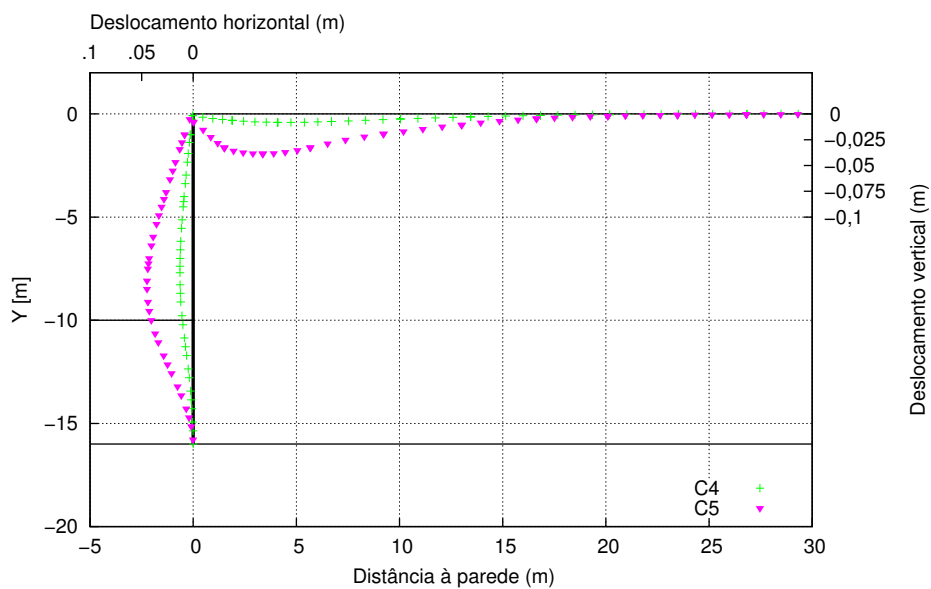


(b) 2ª Escavação

Figura 3.25: Cenários C4 e C5: Deslocamentos da cortina e do solo no tardez desta após a 1ª escavação e após a 2ª escavação



(a) 3ª Escavação



(b) 4ª Escavação

Figura 3.26: Cenários C4 e C5: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta após a 3ª escavação e após a 4ª escavação

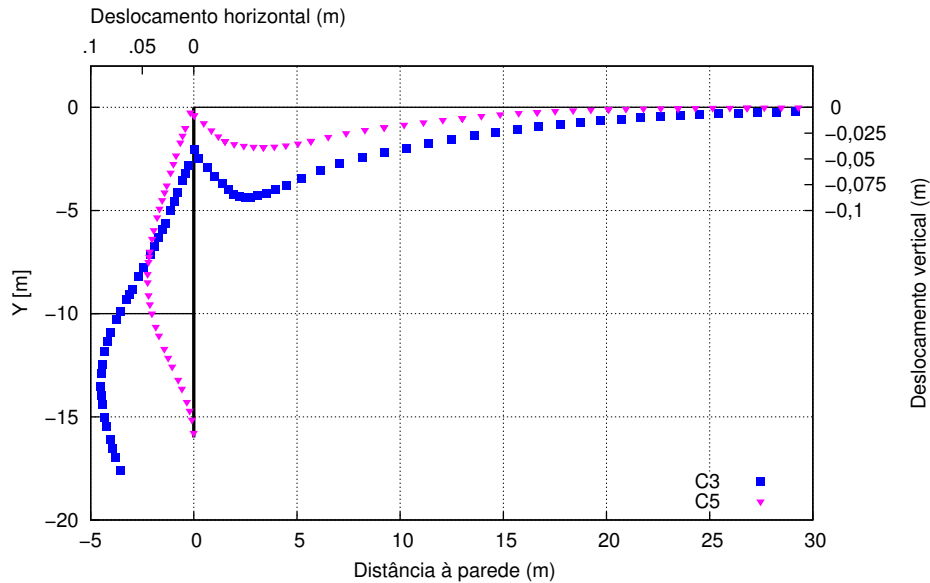


Figura 3.27: Cenários C3 e C5: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta após a 4ª escavação

Tabela 3.6: Cenários C4 e C5: Forças nas Escoras

		Forças nas escoras [kN/m]			
	Escora	2ª Escavação	3ª Escavação	4ª Escavação	Max
C4	1ª	43,98	54,27	50,25	54,27
	2ª	-	99,26	137,92	137,92
	3ª	-	-	119,41	119,41
	$\Sigma$	43,98	153,53	307,59	-
C5	1ª	109,83	99,59	71,38	109,83
	2ª	-	267,76	330,49	330,49
	3ª	-	-	240,44	240,44
	$\Sigma$	109,83	367,35	642,32	-

- a 1ª escora é a que fica menos solicitada;
- para a 1ª escora a carga máxima ocorre na 3ª escavação no cenário C4 e na 2ª escavação no cenário C5 ; para as 2ª e 3ª escoras a carga máxima ocorre na 4ª escavação (última fase) nos dois cenários;
- tal como no cenário C1, as pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras no cenário C4 aproximam-se da distribuição de pressões na cortina. No cenário C5 as pressões aparentes correspondentes ao último nível de escoramento são bastante inferiores à distribuição de pressões na cortina, o que pode ser explicado pelo facto de boa parte das cargas ser encaminhada, através do pé da cortina, para o solo rijo que é admitido à profundidade da base da cortina. As pressões aparentes nos cenários C3 e C5 são bastante semelhantes no primeiro nível de escoramento e

distanciam-se em profundidade, podendo ter a mesma razão anteriormente apresentada.

### 3.5.4 Pontos Plásticos

Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para os pontos onde se verifica plasticidade são apresentados nas figuras 3.28 e 3.29 para os cenários 4 e 5, respectivamente.

A partir da análise das figuras 3.28 e 3.29 é possível perceber que:

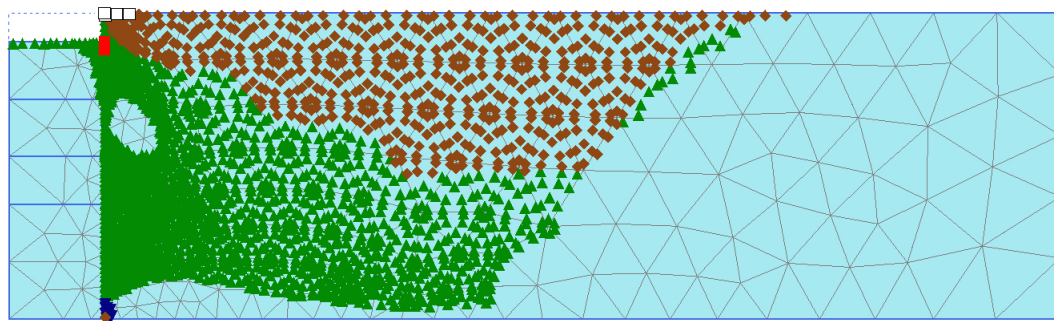
- cenário C4: são poucos os pontos plásticos e estes ocorrem especialmente na interface solo-estrutura, indicando simplesmente pontos em que se atingiu o ângulo de atrito solo-estrutura devido aos deslocamentos relativos naquela zona, e também no interior da escavação, sobretudo após às 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> escavações;
- cenário C5: os pontos plásticos ocorrem especialmente na interface solo-estrutura, devendo-se ao mesmo motivo já apresentado, e numa faixa de solo no interior da escavação. Após a 4<sup>a</sup> escavação verifica-se, naturalmente, um aumento da zona abrangida pelos pontos onde se verifica plastificação. No entanto, ao contrário do que se pode observar para o cenário C3 na figura 3.12, para o cenário C5, figura 3.29, os pontos plásticos não chegam a sugerir o início da formação de uma potencial superfície de rotura.

### 3.5.5 Tensões de Corte Relativas

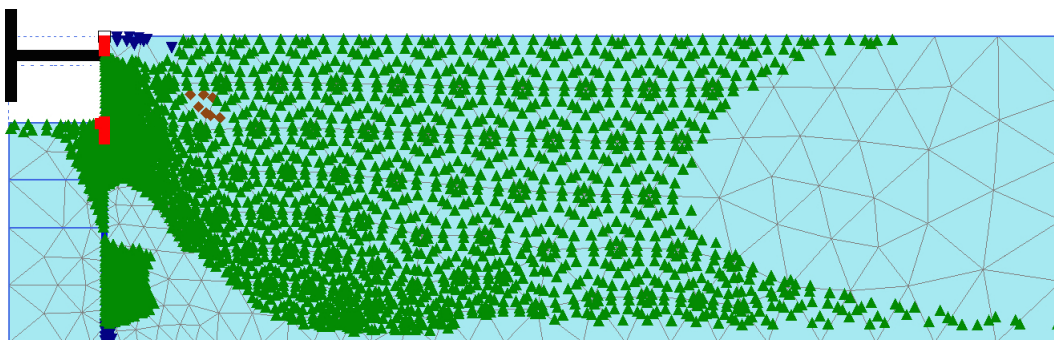
Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para as tensões de corte relativas são apresentados nas figuras 3.30 e 3.31 para os cenários 4 e 5, respectivamente.

A partir da análise das figuras 3.30 e 3.31 é possível perceber que:

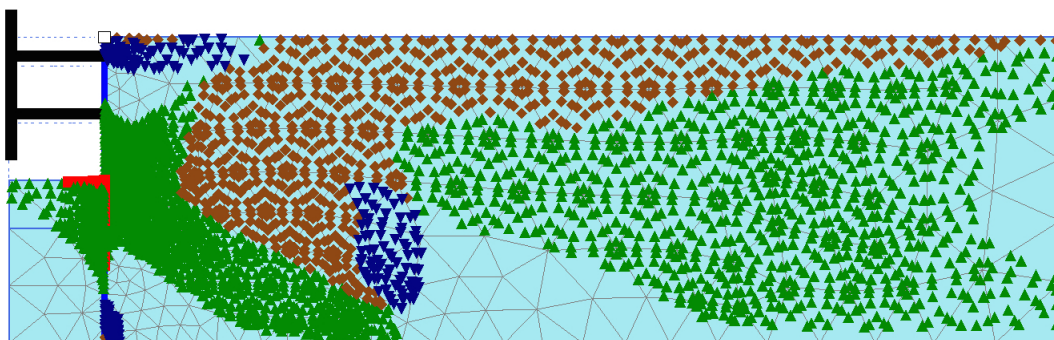
- cenário C4: as zonas que apresentam tensões de corte relativas elevadas situam-se sobretudo no interior da escavação e no maciço no tardo numa zona relativamente reduzida quando comparada ao que se verifica no cenário C5.
- cenário C5: as zonas que apresentam tensões de corte relativas elevadas começam a sugerir uma potencial superfície de rotura já a partir da 2<sup>a</sup> escavação, tornando-se ainda mais claro após as 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> escavações. É ainda possível constatar, a partir da comparação das figuras 3.15 e 3.31, que as zonas com tensões de corte relativas elevadas são mais intensas no cenário C5 do que no cenário C3.



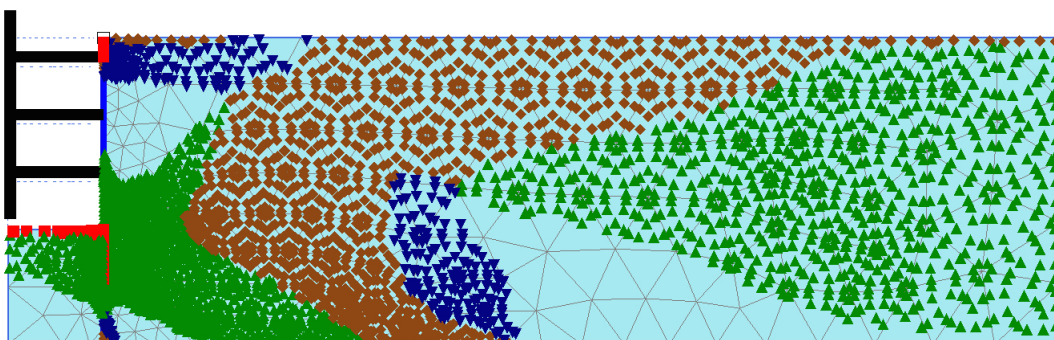
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação



(c) 3ª escavação

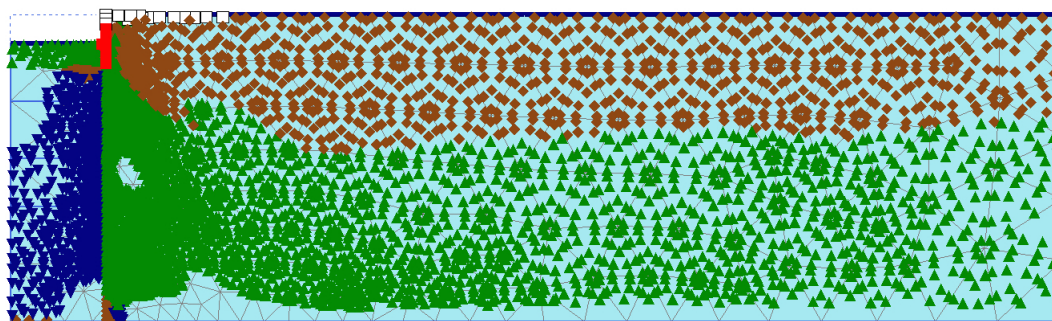


(d) 4ª escavação

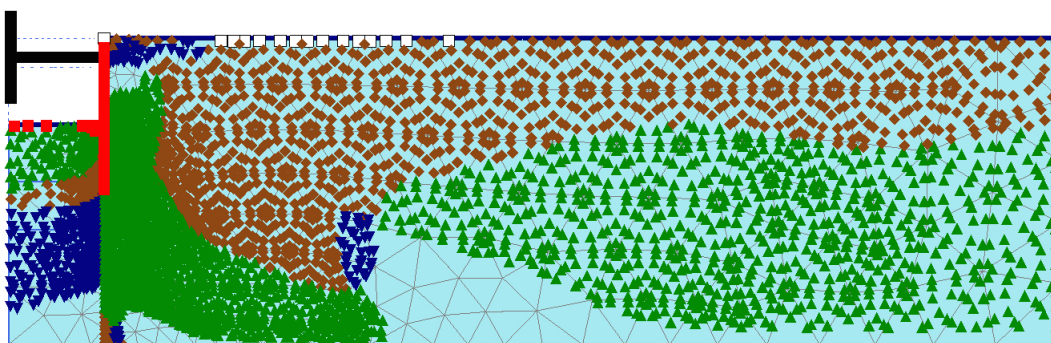
Plastic points

- |                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| ■ Failure point   | □ Tension cut-off point |
| ▼ Cap point       | ◆ Cap + hardening point |
| ▲ Hardening point |                         |

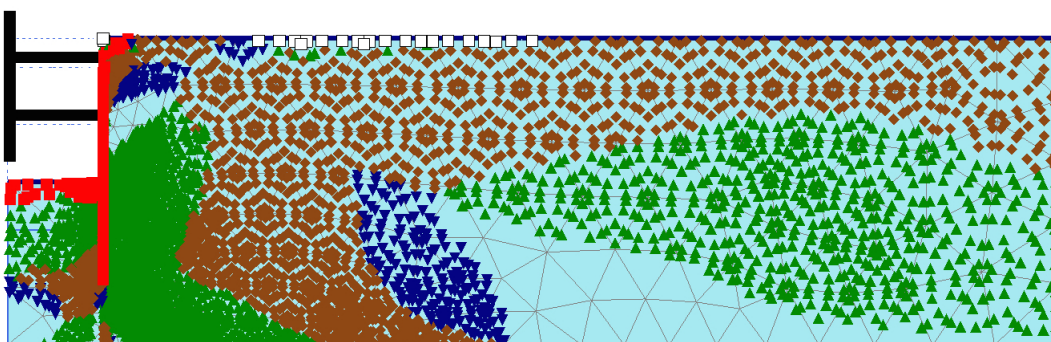
Figura 3.28: Cenário 4: Pontos plásticos em cada fase de escavação



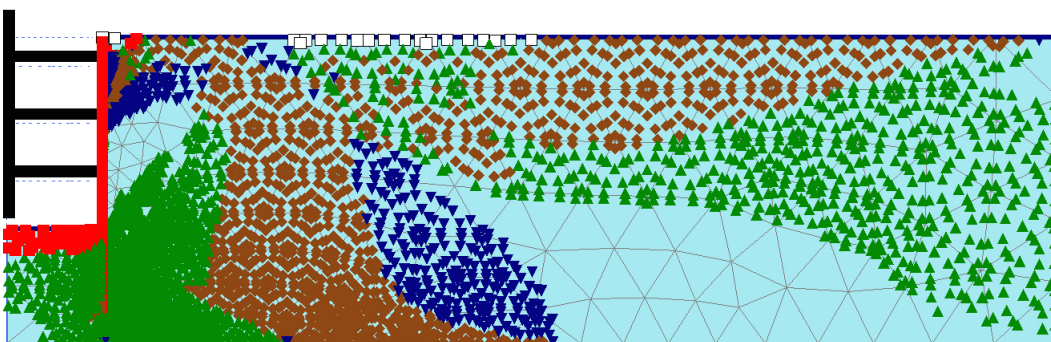
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação



(c) 3ª escavação



(d) 4ª escavação

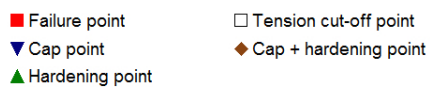
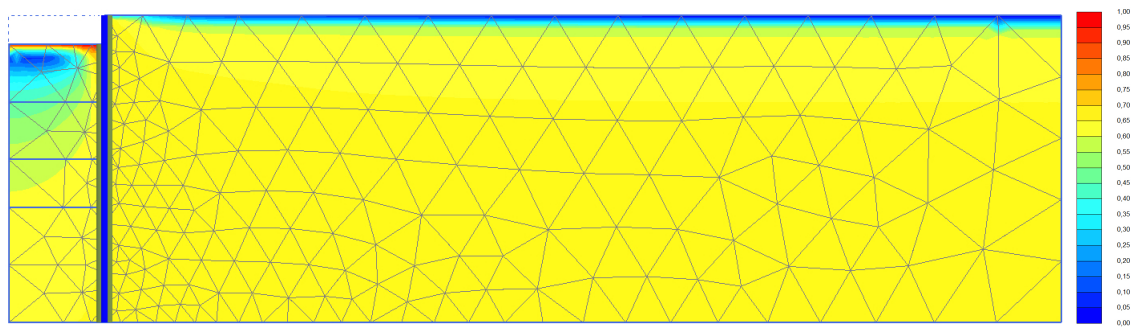
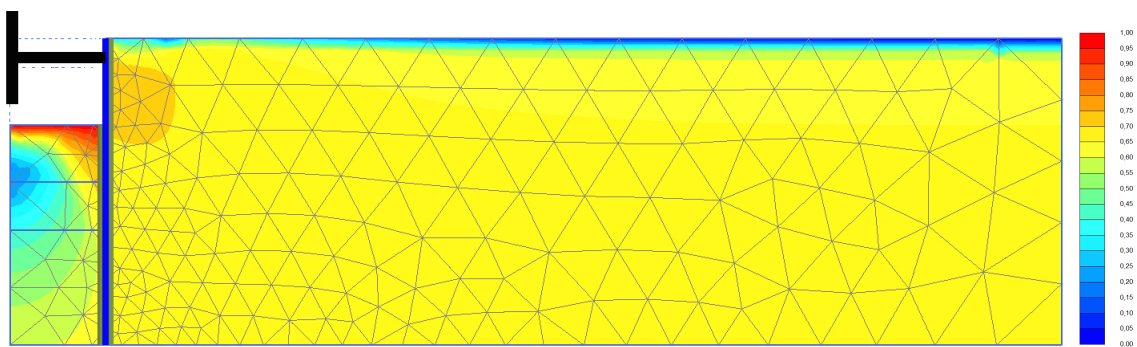


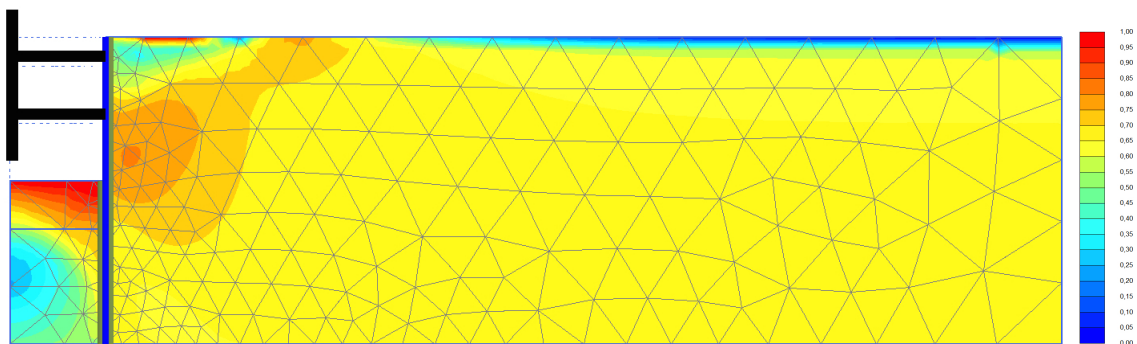
Figura 3.29: Cenário 5: Pontos plásticos em cada fase de escavação



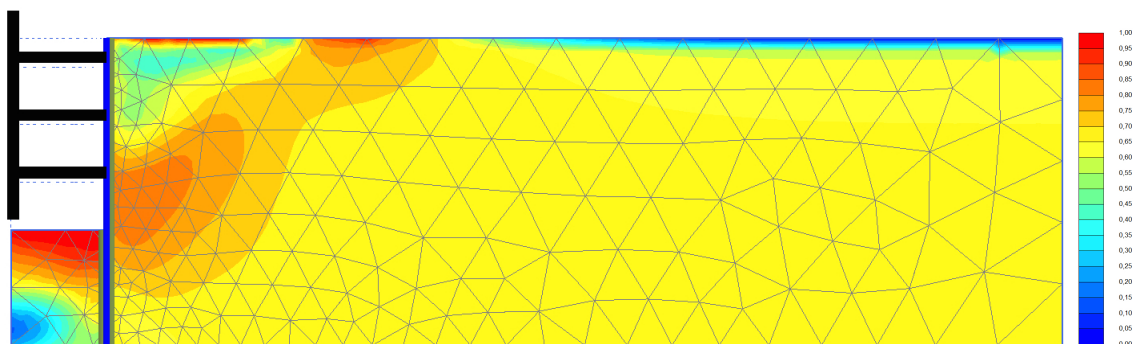
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação

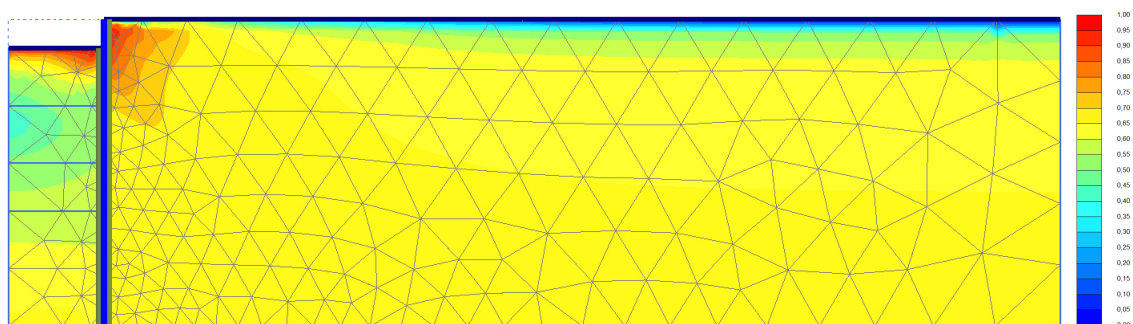


(c) 3ª escavação

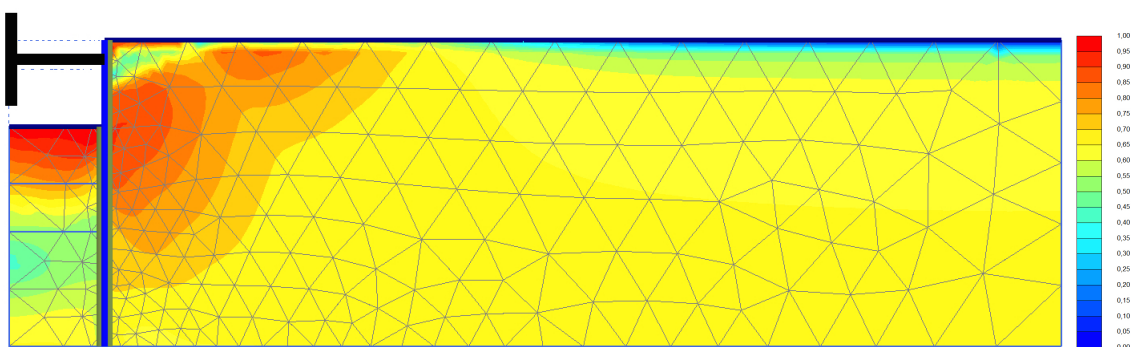


(d) 4ª escavação

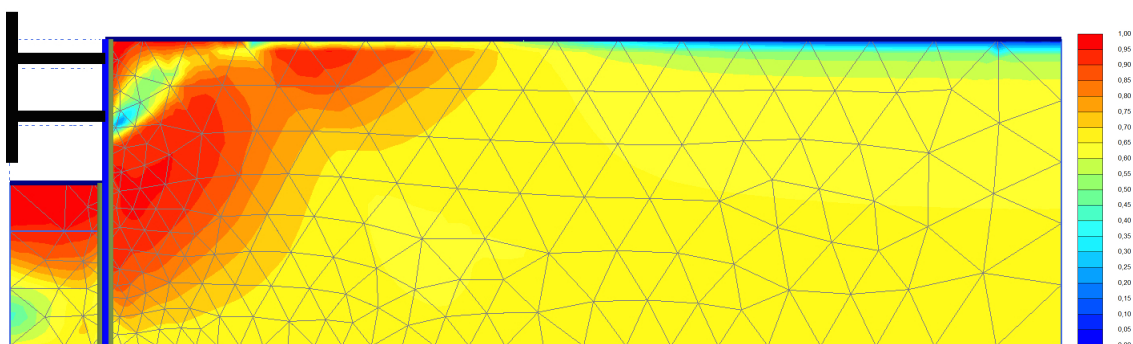
Figura 3.30: Cenário 4: Tensões de corte relativas em cada fase de escavação



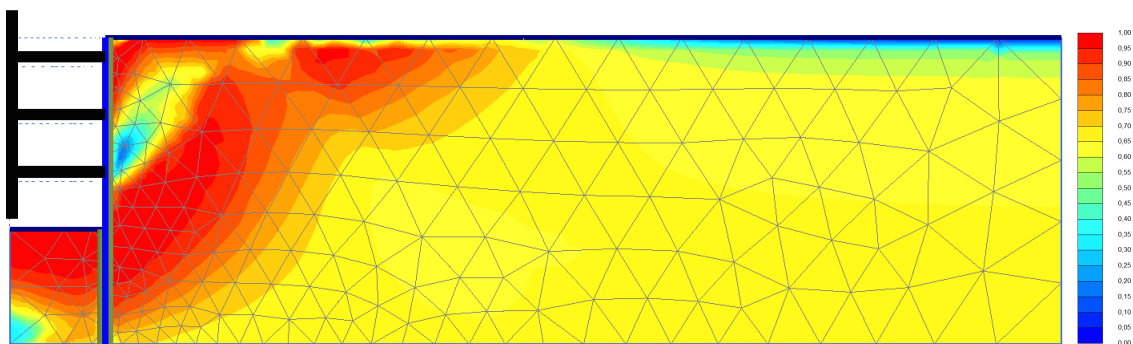
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação



(c) 3ª escavação



(d) 4ª escavação

Figura 3.31: Cenário 5: Tensões de corte relativas em cada fase de escavação

### 3.5.6 Deslocamentos Totais

Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo para os deslocamentos totais são apresentados nas figuras 3.32 e 3.33 para os cenários 4 e 5, respectivamente.

A partir da análise das figuras 3.32 e 3.33 é possível perceber que:

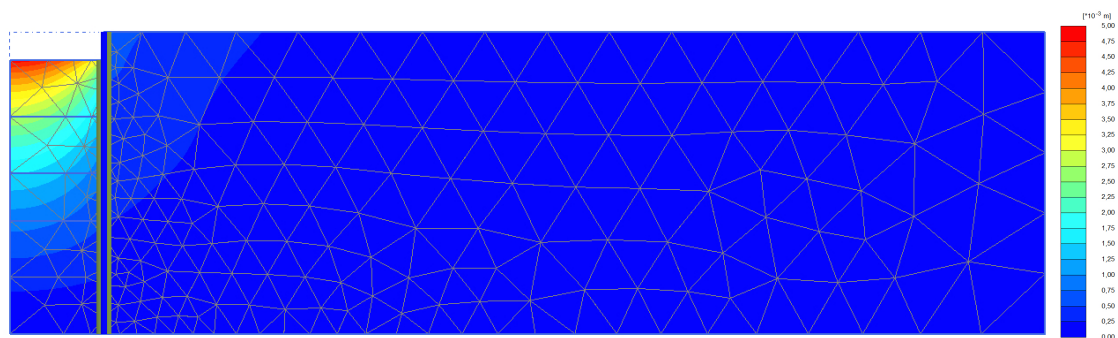
- cenário C4: as zonas que apresentam deslocamentos totais mais elevados situam-se sobretudo no interior da escavação, indicando os deslocamentos habitualmente associados a esse tipo de estruturas (escavações), empolamento. É possível verificar deslocamentos no maciço no tardoiz mesmo que com valores inferiores quando comparados com o observado no cenário C5.
- cenário C5: as zonas que apresentam deslocamentos totais mais elevados situam-se no interior da escavação e especialmente no maciço de solo no tardoiz, devendo-se aos mesmos motivos já apresentados. É possível constatar que a diferença entre os deslocamentos nos cenários C1 e C3 é consideravelmente maior que a diferença entre os deslocamentos nos cenários C4 e C5. De facto, os deslocamentos sofridos no cenário C3 são muito maiores que no cenário C5, o que já tinha sido possível constatar a partir da análise feita quanto aos deslocamentos da cortina e do solo no tardoiz desta.

### 3.5.7 Esforços na Cortina

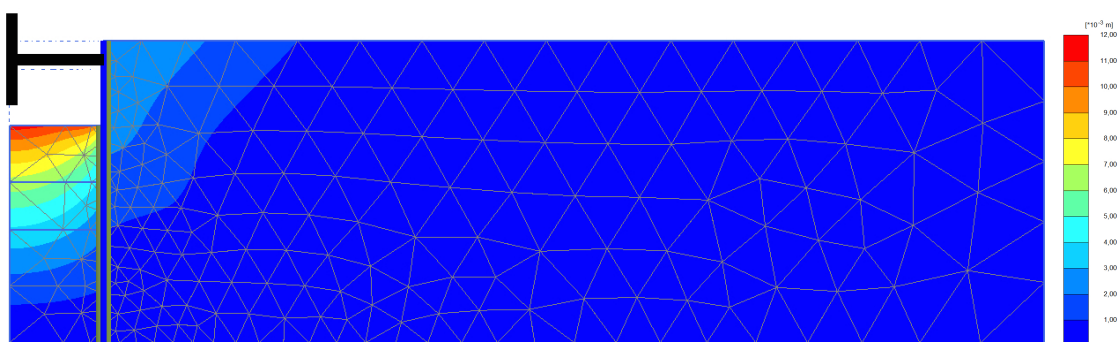
Os resultados obtidos ao longo do faseamento construtivo em cada cenário para os esforços na cortina são apresentados na figura 3.34. Apresenta-se ainda a figura 3.35 na qual são apresentados os esforços na cortina para a última fase de escavação para os cenários C4 e C5 em simultâneo.

A análise dos resultados apresentados nas figuras 3.34 e 3.35 permite constatar o seguinte:

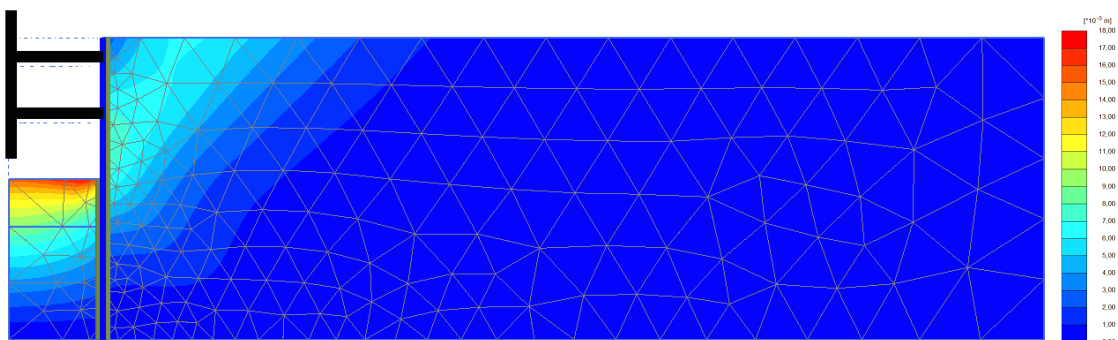
- os momentos no pé da cortina, tanto no cenário C4 como no cenário C5, são diferentes de zero e com valores muito significativos. Tal deve-se ao facto de se considerar o pé da cortina encastrado no estrato rijo.
- a forma dos diagramas de esforço transversal e momento flector é semelhante nos cenários C4 e C5, tendo-se que no cenário C5 os valores são bastante superiores, atingindo o momento e o esforço transversal no pé da cortina valores mais do que quatro vezes superiores ao observado em C4.



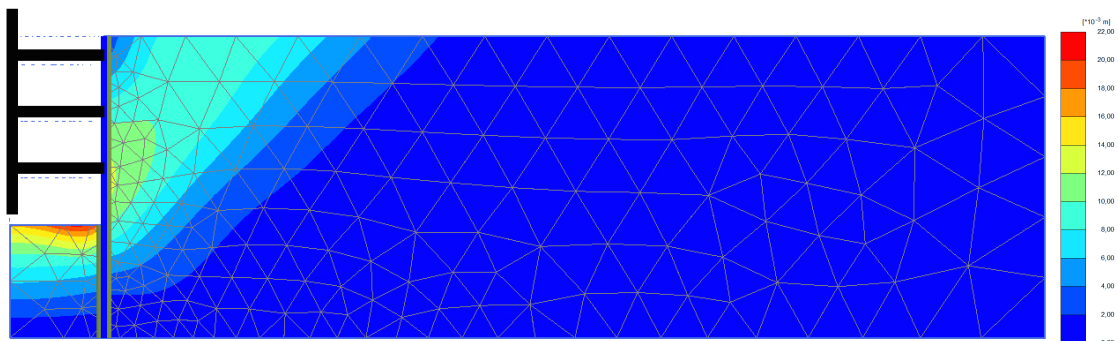
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação

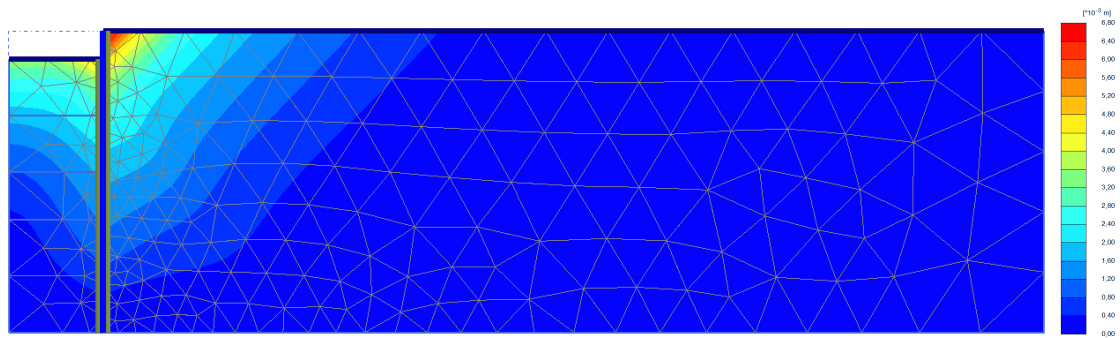


(c) 3ª escavação

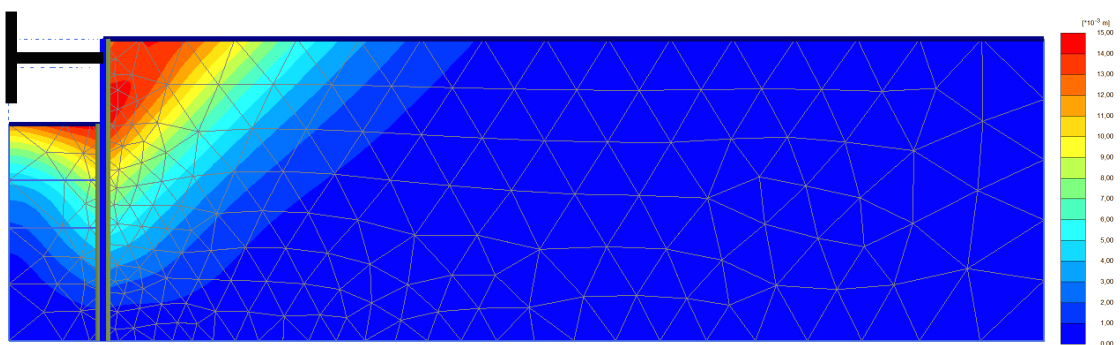


(d) 4ª escavação

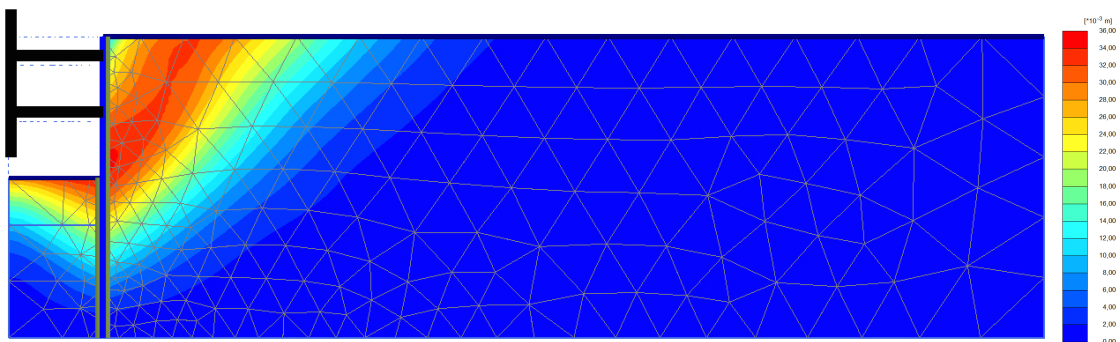
Figura 3.32: Cenário 4: Deslocamentos totais em cada fase de escavação



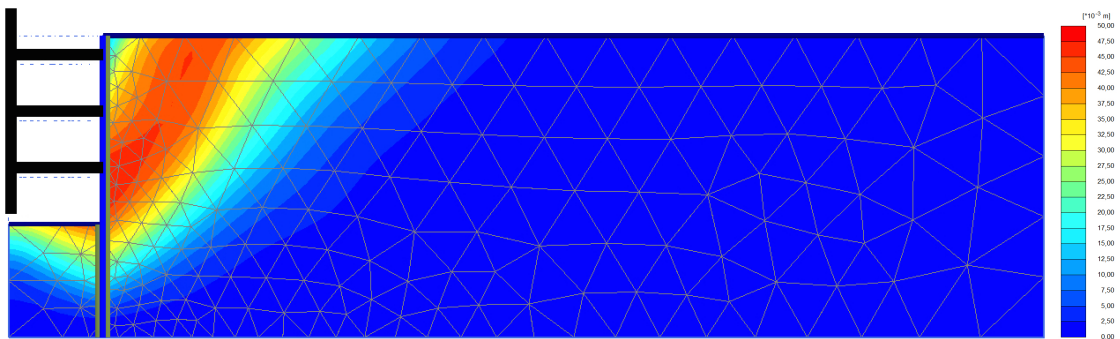
(a) 1ª escavação



(b) 2ª escavação



(c) 3ª escavação



(d) 4ª escavação

Figura 3.33: Cenário 5: Deslocamentos totais em cada fase de escavação

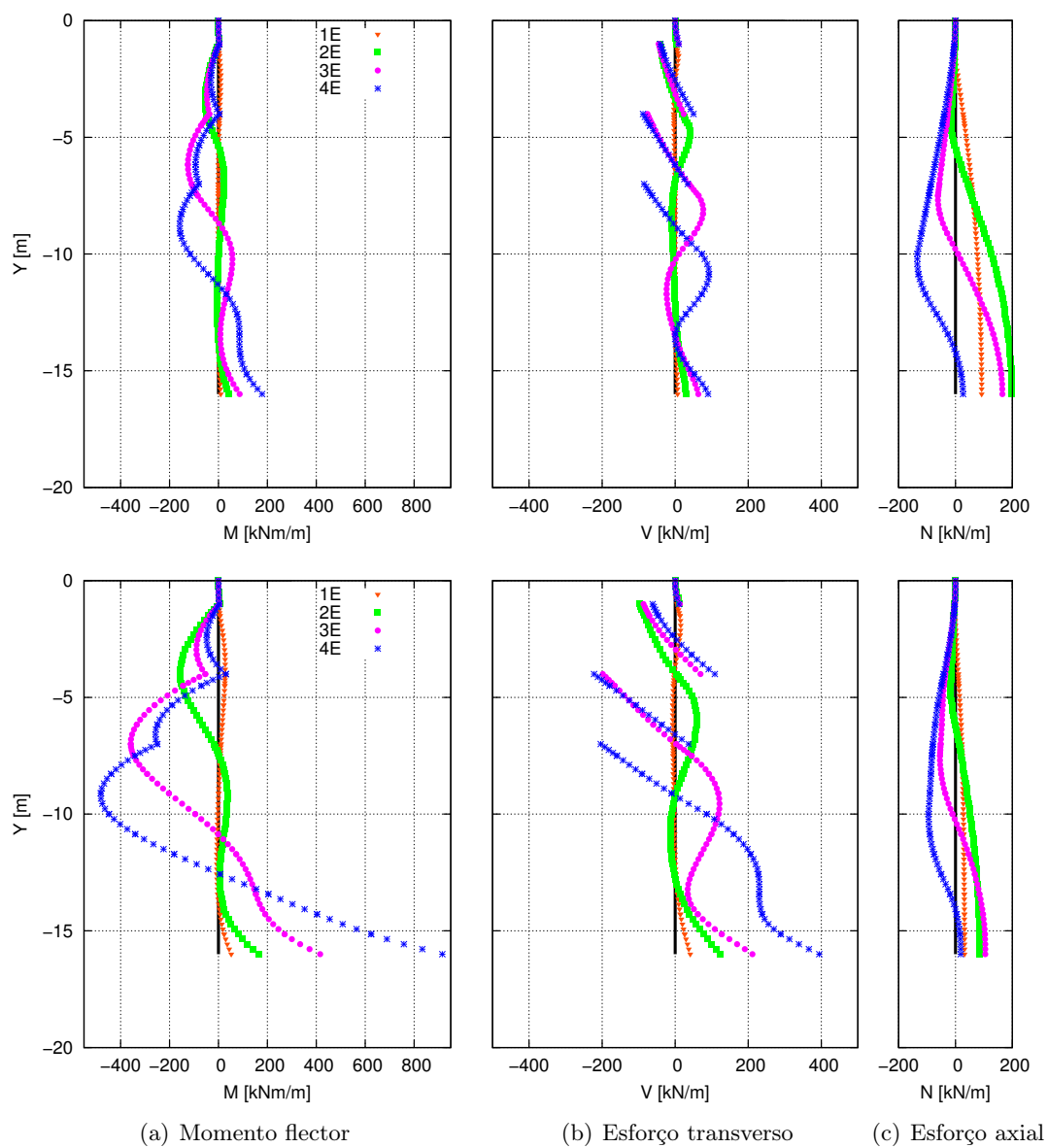


Figura 3.34: Cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Esforços na cortina em cada fase de escavação

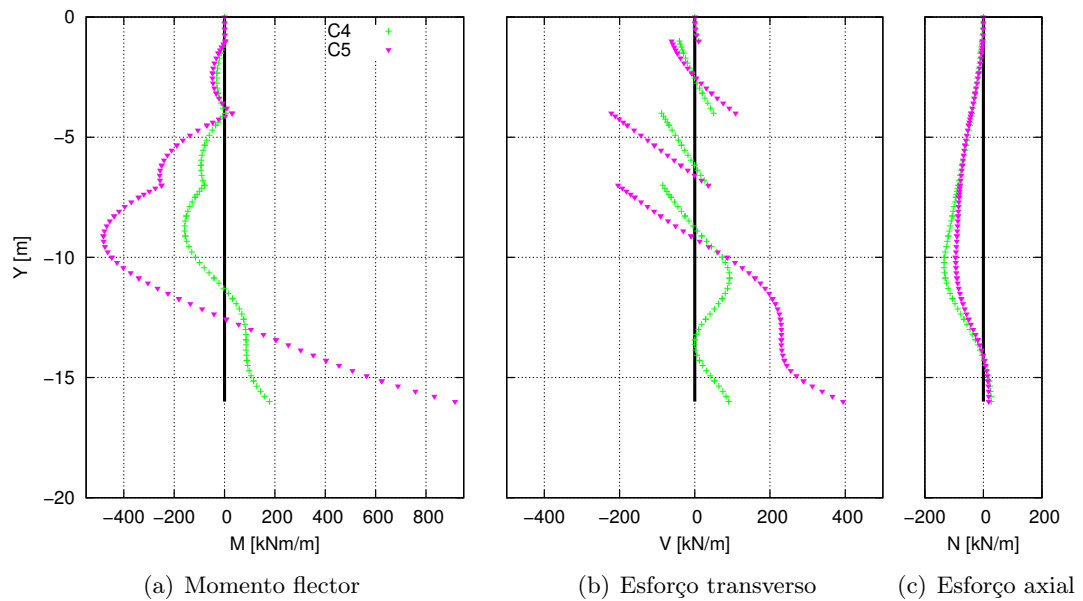


Figura 3.35: Cenários C4 e C5: Esforços na cortina após a 4<sup>a</sup> escavação

- após a última fase de escavação, os esforços axiais observados são bastante semelhantes em ambos os cenários.
- o faseamento construtivo é (tal como nos cenários C1 a C3) claramente observável nos esforços na cortina, sendo que as alterações de fase para fase são menos bruscas do que as observadas naqueles cenários.



## Capítulo 4

# Análise Paramétrica para o Caso de Escoamento em Regime Estacionário

### 4.1 Introdução

A análise paramétrica relativa à percolação da água resulta da apreciação de resultados obtidos para o cenário C3. Para termo de comparação, apresentam-se também, para os casos analisados, os resultados obtidos para o cenário C1.

O diagrama aparente para a situação com nível freático elevado apresentado na figura 2.6 e dado pela equação 2.10 não é adequado pelos resultados apresentados no capítulo 3 e os que os capítulos 4 e 5 confirmarão. Contudo, tal como o diagrama aparente de Terzaghi e Peck (equação 2.1), esse diagrama é ainda apresentado nas figuras como uma referência.

### 4.2 Influência da Ficha

Com o intuito de se analisar a influência da altura enterrada da cortina de contenção sobre as pressões na cortina, bem como os deslocamentos da cortina e os deslocamentos do solo no tardo desta, fez-se, a partir do caso base, a variação da altura enterrada, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C1 e C3 (figura 4.1).

Para a altura enterrada da cortina (ficha) adoptou-se os valores de 3m, 4m, 5m, 6m (caso base) e 8m. O valor mínimo adoptado para a ficha ( $D=3m$ ) corresponde à situação limite de estabilidade para o cenário C3. Ou seja, é este o menor valor para a ficha para o qual se conseguiu convergência no Plaxis. Com efeito, o factor de segurança ao levantamento

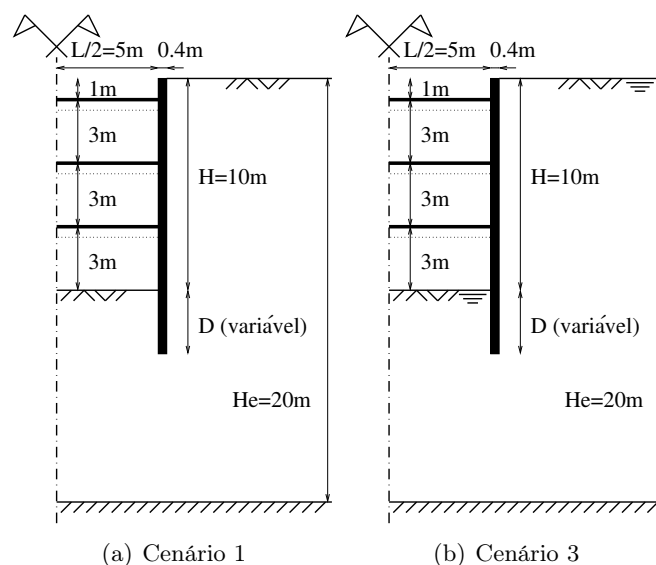


Figura 4.1: Representação esquemática dos cenários C1 e C3 tal como são abordados na análise da influência da variação da ficha

hidráulico para esta situação é, como se verá mais adiante, bastante baixo. Para o cenário C1 seria ainda possível apresentar situações correspondentes a fichas com valores inferiores, inclusive a situação em que  $D=0\text{m}$ .

#### 4.2.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C1 e C3 são apresentados nas figuras 4.2 e 4.3, para fichas com valores de 3m, 4m, 5m, 6m e 8m.

Apresenta-se ainda a figura 4.4 na qual são apresentados os resultados obtidos para os cenários C1 e C3 após a última fase de escavação para os diferentes valores adoptados para a ficha. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4 e serão abordadas na secção 4.2.3.

A análise dos resultados apresentados nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4 permite constatar o seguinte:

- cenário C1: as tensões totais e as tensões efectivas são iguais e as pressões intersticiais são nulas dado que não há nível freático elevado. A distribuição de tensões totais na cortina não apresenta diferenças apreciáveis entre os resultados obtidos para cada valor adoptado para a ficha.
- cenário C3: as pressões intersticiais afastam-se progressivamente (em profundidade)

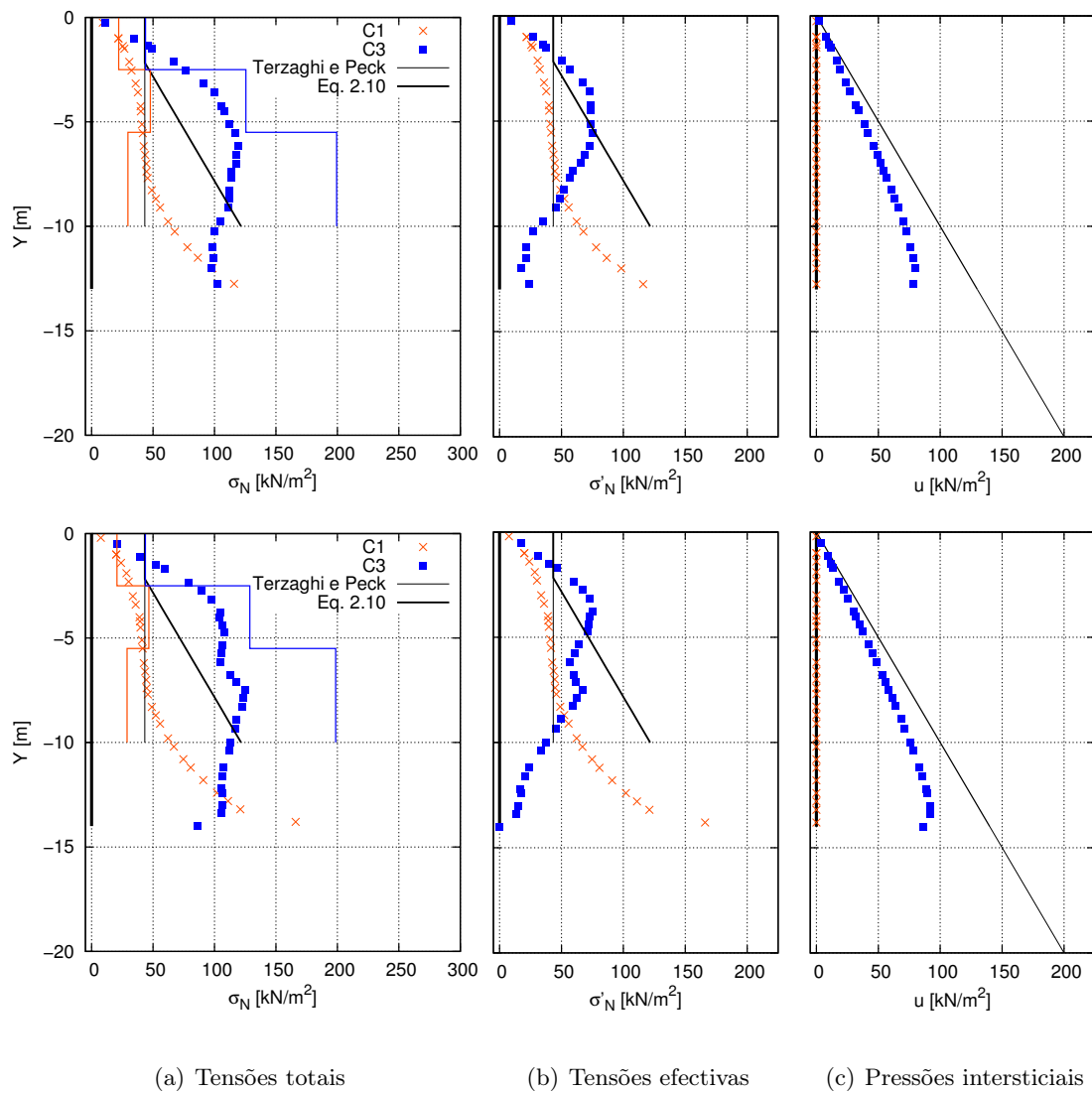
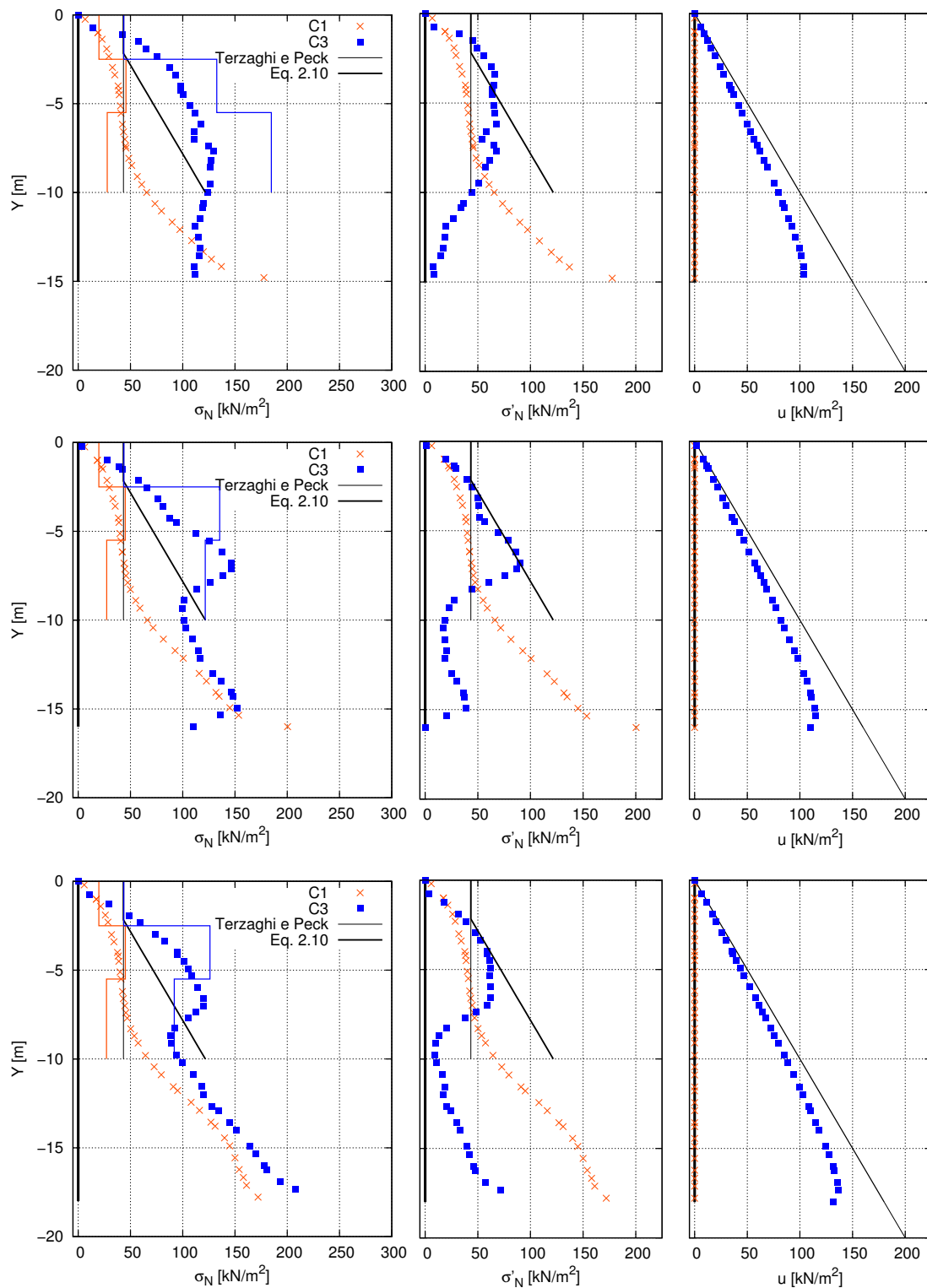


Figura 4.2: Pressões na cortina para  $D=3\text{m}$  (em cima) e  $D=4\text{m}$  (em baixo): Comparação entre os cenários C1 e C3



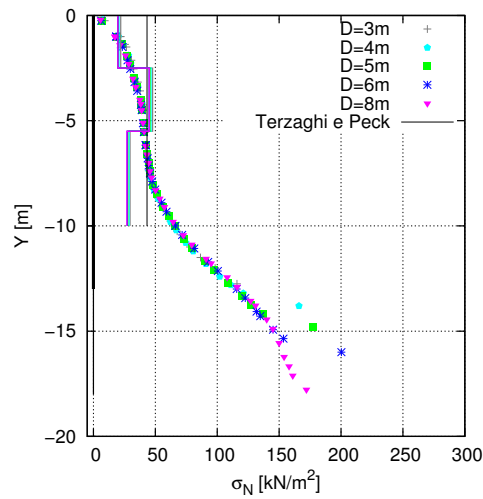
(a) Tensões totais

(b) Tensões efectivas

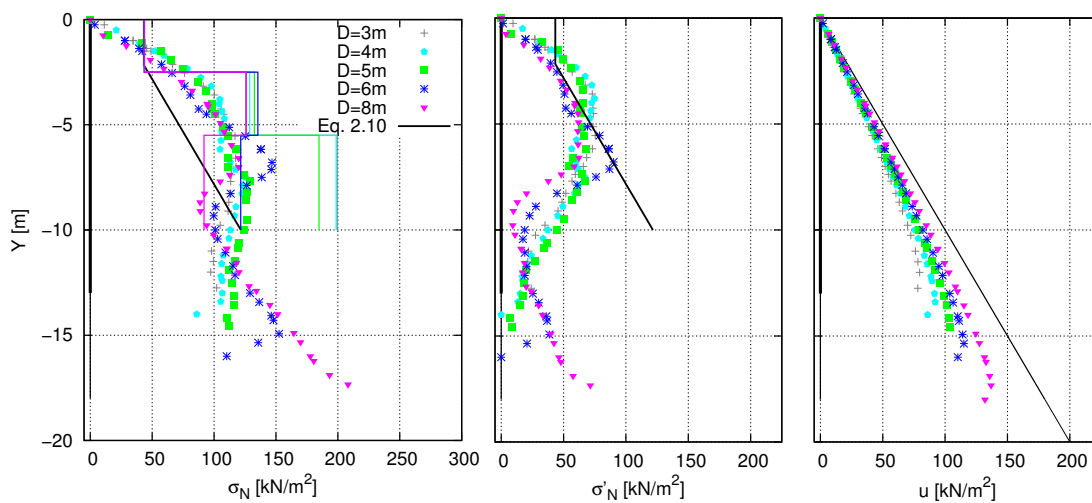
(c) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada — Pressão aparente

Figura 4.3: Pressões na cortina para D=5m (em cima), D=6m (ao centro) e D=8m (em baixo): Comparação entre os cenários C1 e C3



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 4.4: Pressões na cortina para o cenário C1 (em cima) e para o cenário C3 (em baixo): Influência da variação da ficha da cortina

em relação às pressões hidrostáticas; quanto menor o D mais afastadas são. Para os valores adoptados para a ficha, a distribuição de tensões totais na cortina não apresenta uma evolução contínua.

#### 4.2.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C1 e C3 são apresentados nas figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, para fichas com valores de 3m, 4m, 5m, 6m e 8m, respectivamente.

Apresenta-se ainda a figura 4.10 na qual são apresentados os resultados obtidos para os cenários C1 e C3 após a última fase de escavação para os diferentes valores adoptados para a ficha.

A partir da análise das figuras 4.5 a 4.10, é possível constatar o seguinte:

- os deslocamentos sofridos pela cortina e pelo solo no tardoz desta são sempre substancialmente superiores no cenário C3 quando comparados ao cenário C1;
- para o cenário C1 os deslocamentos observados não apresentam diferenças apreciáveis entre os diferentes valores adoptados para a ficha;

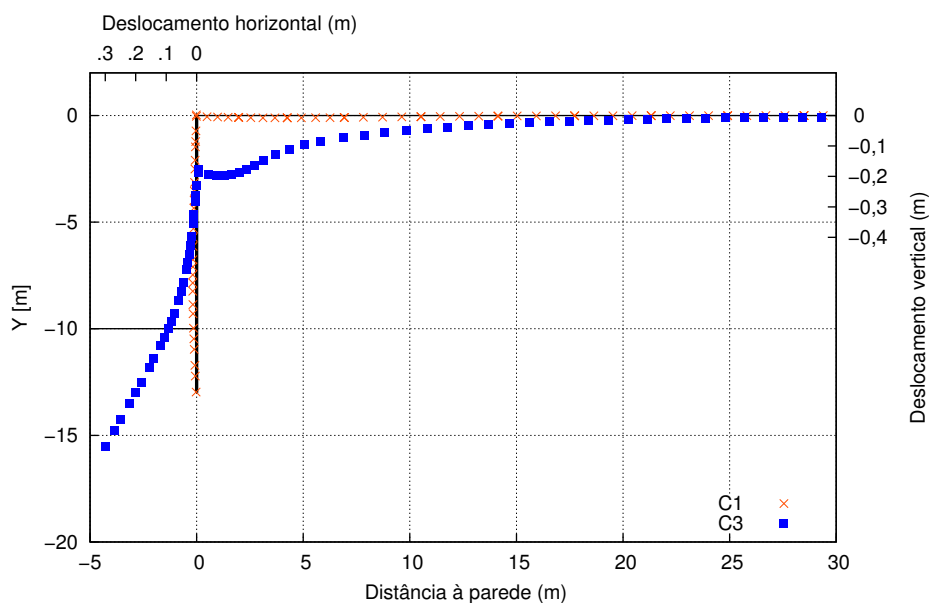


Figura 4.5: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para D=3m: Comparação entre os cenários C1 e C3

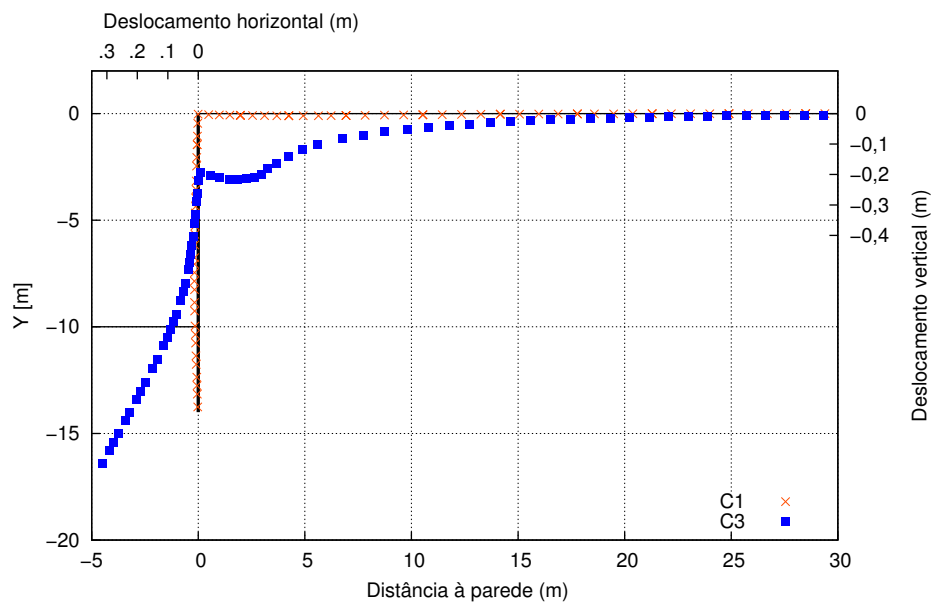


Figura 4.6: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para D=4m: Comparação entre os cenários C1 e C3

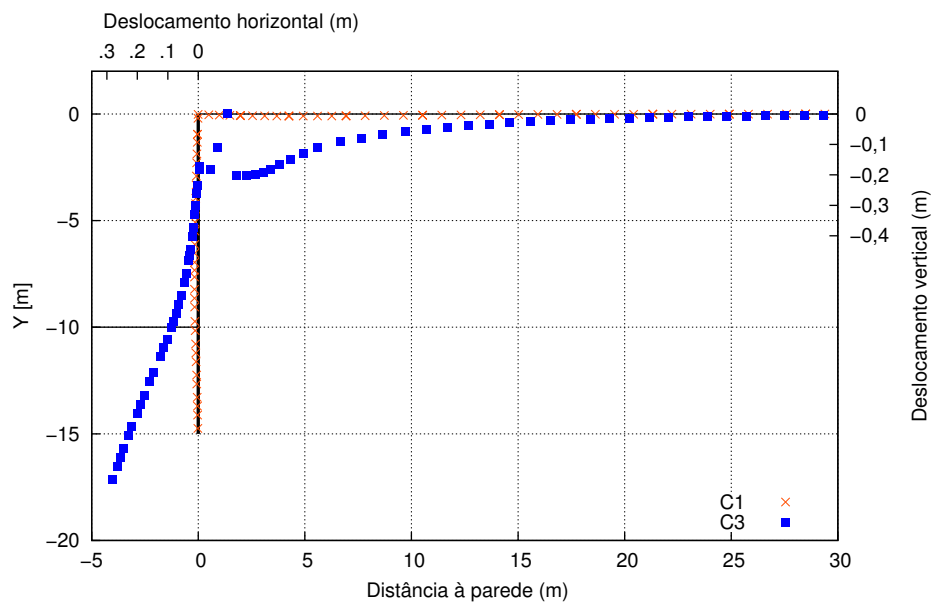


Figura 4.7: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para D=5m: Comparação entre os cenários C1 e C3

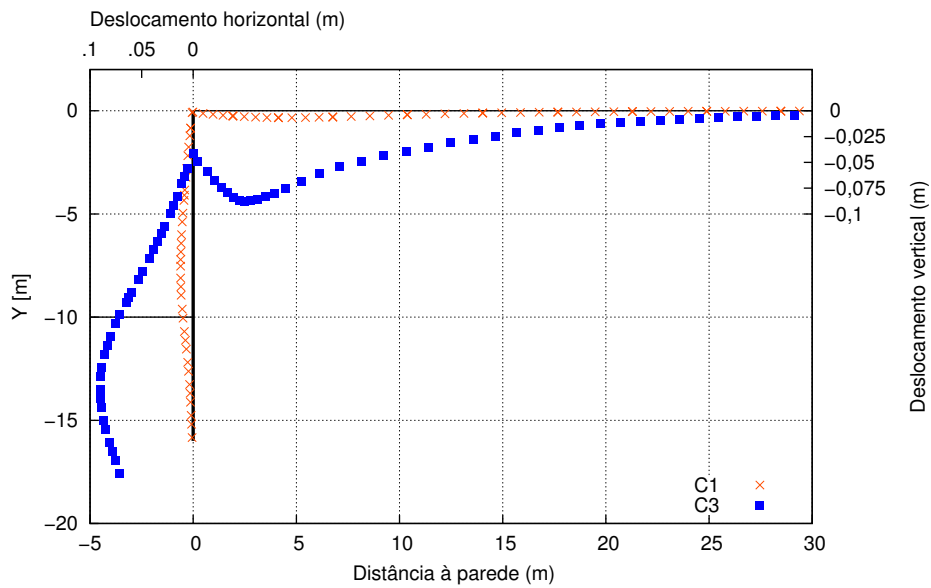


Figura 4.8: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para  $D=6\text{m}$ : Comparação entre os cenários C1 e C3 (notar a alteração de escala relativamente às figuras 4.5 a 4.7)

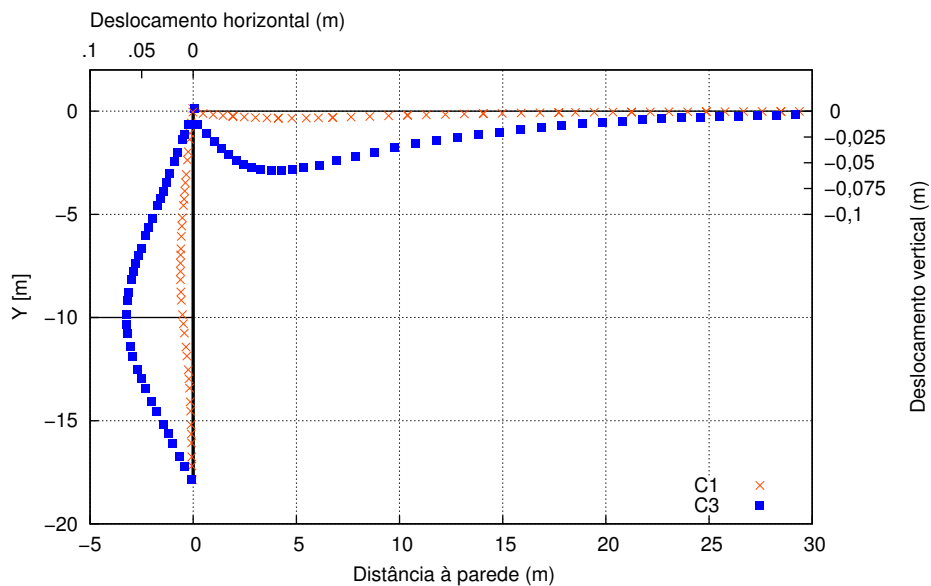


Figura 4.9: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para  $D=8\text{m}$ : Comparação entre os cenários C1 e C3

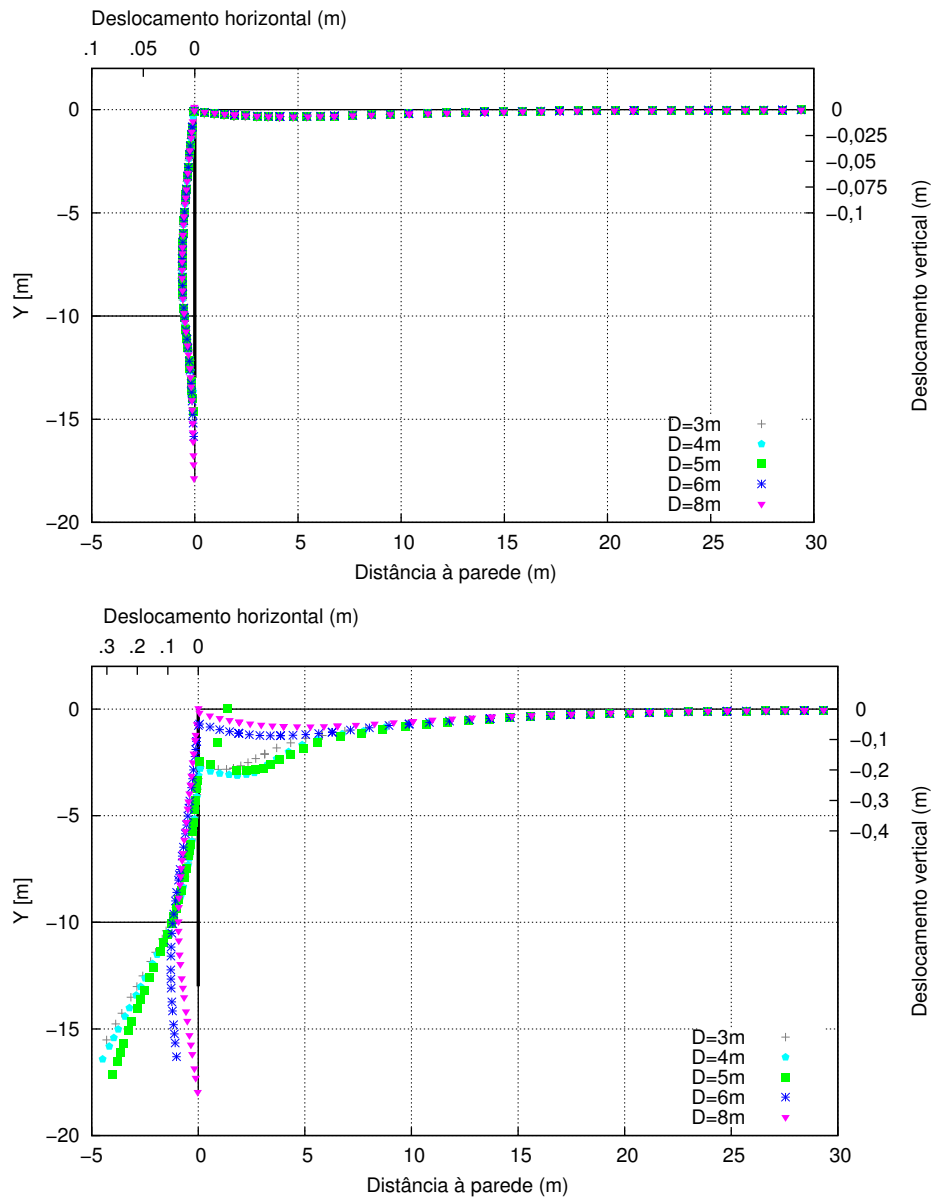


Figura 4.10: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C1 (em cima) e para o cenário C3 (em baixo): Influência da variação da ficha da cortina

- para o cenário C3 os deslocamentos são tanto maiores quanto menor for o valor adoptado para a ficha. Com efeito, os deslocamentos são consideravelmente superiores para fichas com valores inferiores a 6m. Enquanto que para valores da ficha até 5m os maiores deslocamentos se verificam sobretudo na base da cortina, a partir de  $D=6m$  a tendência é que os maiores deslocamentos sejam aproximadamente a meio da cortina.

### 4.2.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C1 e C3, para fichas com valores de 3m, 4m, 5m, 6m e 8m, são apresentados na tabela 4.1. Apresenta-se ainda a tabela 4.2 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a ficha.

Tabela 4.1: Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da ficha da cortina

		Forças nas escoras [kN/m]				
		D=3m	D=4m	D=5m	D=6m	D=8m
Escora		4 <sup>a</sup> Escavação				
C1	1 <sup>a</sup>	55,11	51,53	49,61	48,78	47,40
	2 <sup>a</sup>	143,40	139,95	137,13	134,98	135,25
	3 <sup>a</sup>	132,95	129,93	125,08	122,58	121,93
	$\Sigma$	331,47	321,42	311,83	306,33	304,58
C3	1 <sup>a</sup>	-86,67	-70,54	-52,90	13,17	37,40
	2 <sup>a</sup>	284,38	281,17	313,33	393,07	378,10
	3 <sup>a</sup>	897,17	893,86	831,37	547,04	413,62
	$\Sigma$	1094,88	1104,49	1091,80	953,27	829,13

Tabela 4.2: Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da ficha da cortina

		Forças nas escoras [kN/m]				
		D=3m	D=4m	D=5m	D=6m	D=8m
Escora		Max				
C1	1 <sup>a</sup>	55,11	51,53	49,61	49,32	49,27
	2 <sup>a</sup>	143,40	139,95	137,13	134,98	135,25
	3 <sup>a</sup>	132,95	129,93	125,08	122,58	121,93
	$\Sigma$	331,47	321,42	311,83	306,88	306,45
C3	1 <sup>a</sup>	109,77	109,39	109,10	109,20	109,04
	2 <sup>a</sup>	376,79	386,41	397,85	406,00	378,10
	3 <sup>a</sup>	897,17	893,86	831,37	547,04	413,62
	$\Sigma$	1383,73	1389,66	1338,32	1062,24	900,77

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C1 e C3 para fichas com valores de 3m, 4m, 5m, 6m e 8m são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 4.2(a), 4.3(a), 4.4(a) e 4.4(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- para o cenário C1 a influência da variação da ficha sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é pouco significativa, sendo as variações de carga pequenas; enquanto que para o cenário C3 esta influência manifesta maior relevância, sendo as variações de carga muito significativas.
- de uma forma global, tanto para o cenário C1, como para o cenário C3, quanto menor o valor adoptado para a ficha, maiores são as forças instaladas nas escoras; sendo as maiores diferenças observadas no último nível de escoras.
- para o cenário C1 a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras, excepto para  $D=6\text{m}$  e  $D=8\text{m}$  para 1<sup>a</sup> escora; enquanto que para o cenário C3 a carga máxima não ocorre na última fase de escavação, excepto, naturalmente, para a 3<sup>a</sup> escora.

#### 4.2.4 Análise da Estabilidade Hidráulica

Os resultados obtidos para o cenário 3, especialmente nas situações em que se adoptou valores inferiores a 6m para a ficha, despertaram o interesse para que se fosse realizado um estudo semelhante ao apresentado no caso base na secção 3.4.4.

Apresenta-se assim a tabela 4.3 na qual estão apresentados os valores obtidos na análise da estabilidade hidráulica para os diferentes valores para a altura enterrada da cortina.

Tabela 4.3: Análise da estabilidade hidráulica: Influência da variação da ficha da cortina

H (m)	D (m)	$u_A$ (kPa)	$u_B$ (kPa)	$u_{A,perc}$ (kPa)	$u_{B,perc}$ (kPa)	U (kN/m)	W' (kN/m)	FS
10	3	57,79	71,18	27,79	41,18	51,73	45	0,87
10	4	70,54	86,12	30,54	46,12	76,66	80	1,04
10	5	82,63	98,32	32,63	48,32	101,19	125	1,24
10	6	93,91	110,10	33,91	50,10	126,02	180	1,43
10	8	113,10	131,40	33,10	51,40	169,00	320	1,89

Para  $D=3\text{m}$ , os valores obtidos através do Plaxis para  $u_A$  e  $u_B$ , que permitem a concretização dos cálculos em tal estudo, conduzem a uma resposta correspondente a um cenário de instabilidade hidráulica. Este resultado é possivelmente justificado pelo facto de não ser contabilizada a resultante do atrito entre o solo e a parede (ao longo da ficha, no lado interior da escavação) que contraria o efeito das forças de percolação, uma vez que, é direccionada para baixo, visto o solo no interior da escavação apresentar um deslocamento para cima como resultado da descompressão.

Desta forma, é possível perceber que se, no cenário 3, se adoptar uma ficha inferior a 3m estar-se-á de facto diante de um cenário de instabilidade hidráulica. Ou seja, as circunstâncias inerentes ao cenário 3 não permitem que a convergência seja alcançada no modelo trabalhado para fichas inferiores a 3m, mesmo que os parâmetros de convergência sejam manipulados no programa de cálculo automático Plaxis. Trata-se de um problema de estabilidade próprio do modelo. Constata-se assim, que a situação limite para a verificação da estabilidade hidráulica no caso em questão corresponde a D aproximadamente igual a 3m. Com efeito, os deslocamentos obtidos para D=3m, e mesmo para D=4m e D=5m, são bastante elevados. Os coeficientes de segurança sendo baixos, conduzem a deslocamentos elevados.

### 4.2.5 Pontos Plásticos

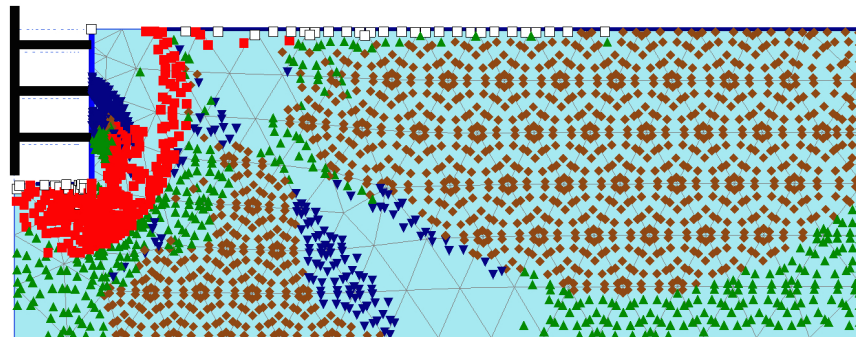
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os pontos onde se verifica plasticidade são apresentados nas figuras 4.11 e 4.12 para o cenário 3, para fichas com valores de 3m, 4m, 5m, 6m e 8m.

A análise dos resultados apresentados nas figuras 4.11, e 4.12 permite constatar o seguinte:

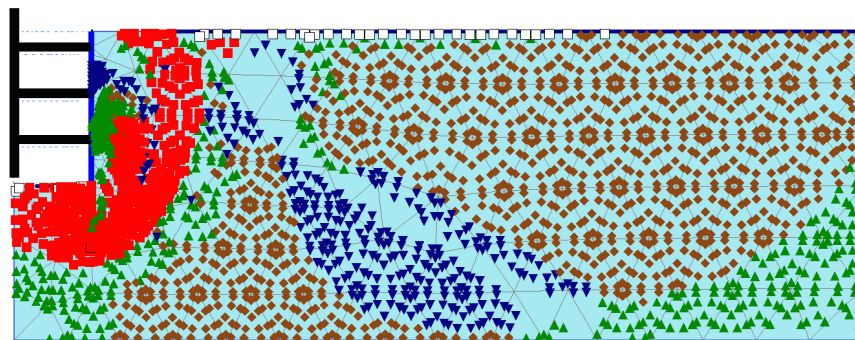
- quanto menor o valor adoptado para a ficha, mais evidente se torna o início de uma potencial superfície de rotura. Isto assume particular importância para os casos de D igual à 3, 4 e 5m, em que a localização dos pontos plásticos parece formar uma superfície que abrange parte substancial do maciço em redor da cortina, envolvendo-a. É também para estes casos que os coeficientes de segurança ao levantamento hidráulico são menores (0,87 a 1,24) e que os deslocamentos da cortina, sobretudo no seu pé, são particularmente elevados, tornando-se, num caso prático, inaceitáveis.

Conforme já se viu a propósito do caso base, também para este (D=6m) os deslocamentos são elevados, apesar de substancialmente menores do que ocorre para valores menores de D. Esta constatação tem correspondência na distribuição dos pontos plásticos para este caso (figura 4.12(a)), no qual se verifica a formação de uma superfície parcial, não abrangendo a totalidade do maciço em redor da cortina.

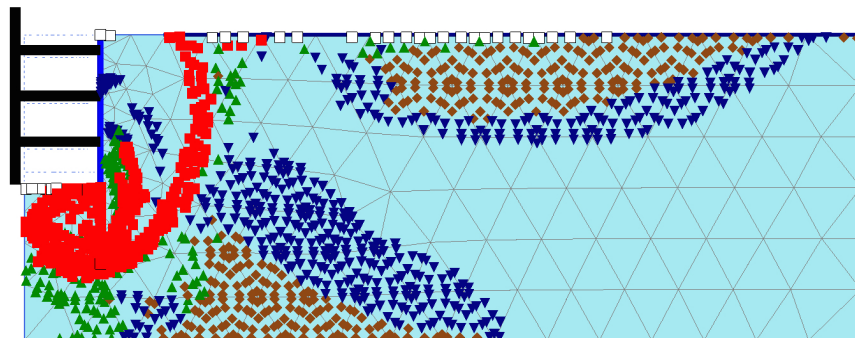
- para D=8m os pontos plásticos ocorrem especialmente na interface solo-estrutura, indicando simplesmente pontos em que se atingiu o ângulo de atrito solo-estrutura devido aos deslocamentos relativos naquela zona, e verifica-se ainda a ocorrência de pontos plásticos numa faixa de solo no interior da escavação.



(a) D=3m



(b) D=4m

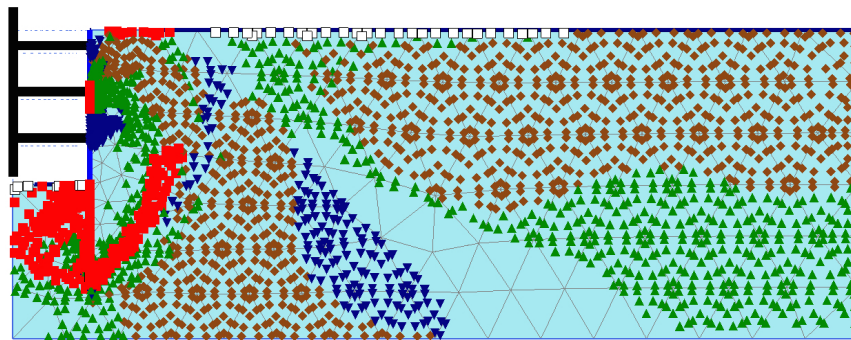


(c) D=5m

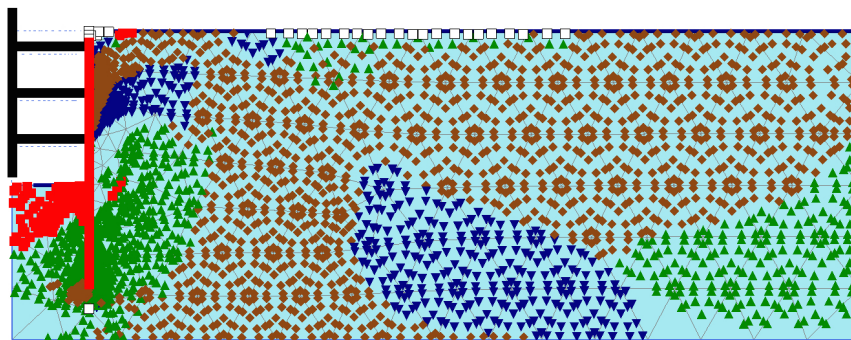
**Plastic points**

- |                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| ■ Failure point   | □ Tension cut-off point |
| ▼ Cap point       | ◆ Cap + hardening point |
| ▲ Hardening point |                         |

Figura 4.11: Pontos plásticos na última fase de escavação para o cenário C3: Influência da variação da ficha da cortina (D=3m; D=4m e D=5m)



(a) D=6m



(b) D=8m

**Plastic points**

- Failure point
- ▼ Cap point
- ▲ Hardening point
- Tension cut-off point
- ◆ Cap + hardening point

Figura 4.12: Pontos plásticos na última fase de escavação para o cenário C3: Influência da variação da ficha da cortina (D=6m e D=8m)

### 4.3 Influência da Rigidez Axial das Escoras

Com o intuito de se analisar a influência da rigidez axial das escoras sobre as pressões na cortina, bem como os deslocamentos da cortina e os assentamentos da superfície do maciço suportado, fez-se, a partir do caso base, a variação da rigidez axial das escoras, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C1 e C3 (figuras 3.3(a) e 3.3(c)).

Adoptou-se para a rigidez axial das escoras três valores distintos:  $EA = 25000\text{kN/m}$ ,  $EA = 120000\text{kN/m}$  (caso base) e  $EA = 600000\text{kN/m}$ . Note-se que o afastamento, o comprimento e a profundidade de instalação das escoras mantêm-se iguais aos do caso base.

#### 4.3.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a rigidez axial das escoras são apresentados na figura 4.13. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 4.13 e serão abordadas na secção 4.3.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 4.13 permite constatar o seguinte:

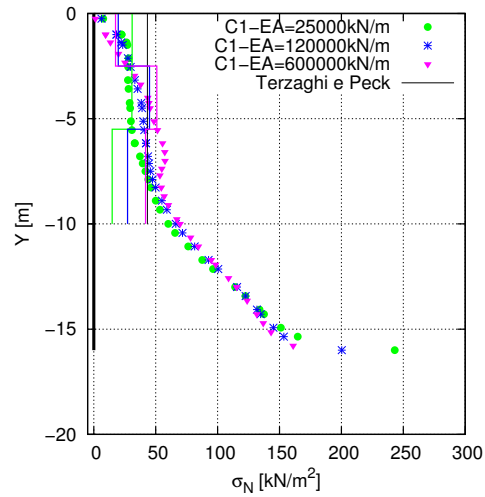
- cenário C1: genericamente falando, as pressões na fase final são tanto maiores quanto maior for a rigidez axial das escoras, o que corresponde ao esperado, dado que maior rigidez implica menor deslocamento e, portanto, maiores pressões na cortina. A excepção parece ocorrer para pequenas profundidades, em que, para a última fase, se verifica o inverso.
- cenário C3: para as situações analisadas a distribuição de tensões totais na cortina não parece depender substancialmente da rigidez axial das escoras.

#### 4.3.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

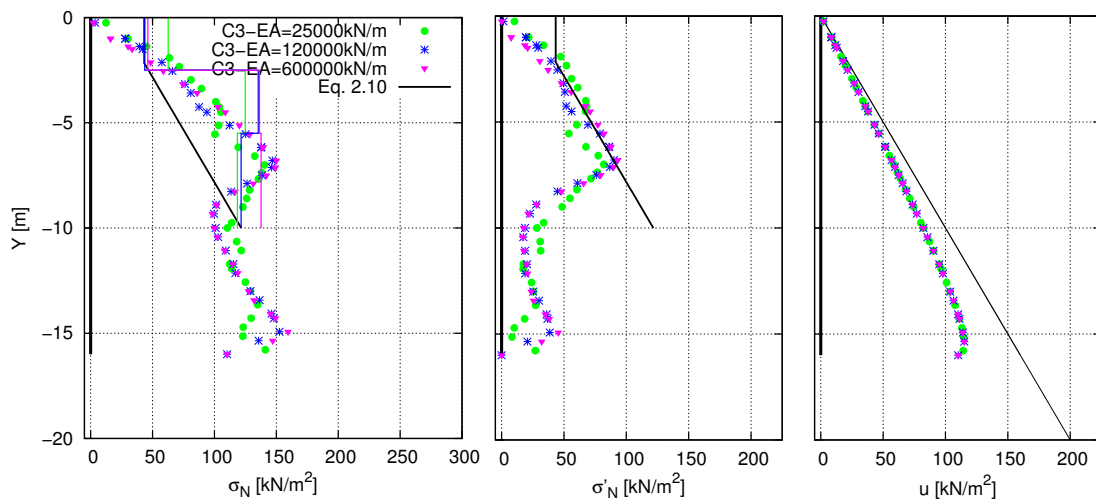
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a rigidez axial das escoras são apresentados nas figuras 4.14 e 4.15.

A partir da análise das figuras 4.14 e 4.15, é possível constatar o seguinte:

- para o cenário C1 quanto menor o valor adoptado para a rigidez axial das escoras,



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 4.13: Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação da rigidez das escoras

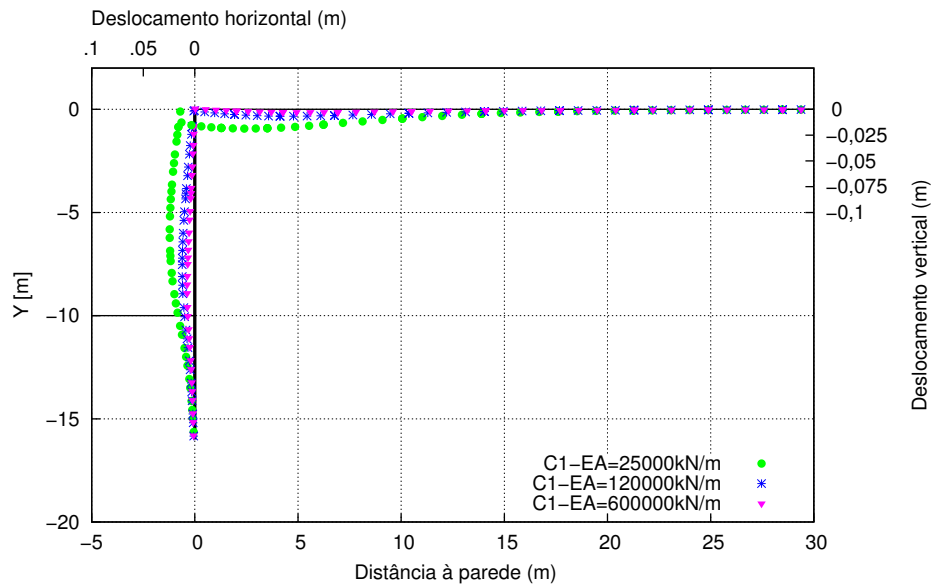


Figura 4.14: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C1: Influência da variação da rigidez das escoras

maiores são os deslocamentos observados. Esta influência é mais significativa, nos deslocamentos calculados, quando a rigidez passa de  $120000\text{kN/m}$  para  $25000\text{kN/m}$  do que de  $600000\text{kN/m}$  para  $120000\text{kN/m}$ ;

- para o cenário C3 os deslocamentos são tanto maiores quanto menor for o valor adoptado para a rigidez axial das escoras. Com efeito, os deslocamentos são consideravelmente superiores para o caso em que  $EA = 25000\text{kN/m}$ .

### 4.3.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a rigidez axial das escoras são apresentados na tabela 4.4. Apresenta-se ainda a tabela 4.5 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a rigidez axial das escoras.

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a rigidez axial das escoras são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 4.13(a) e 4.13(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

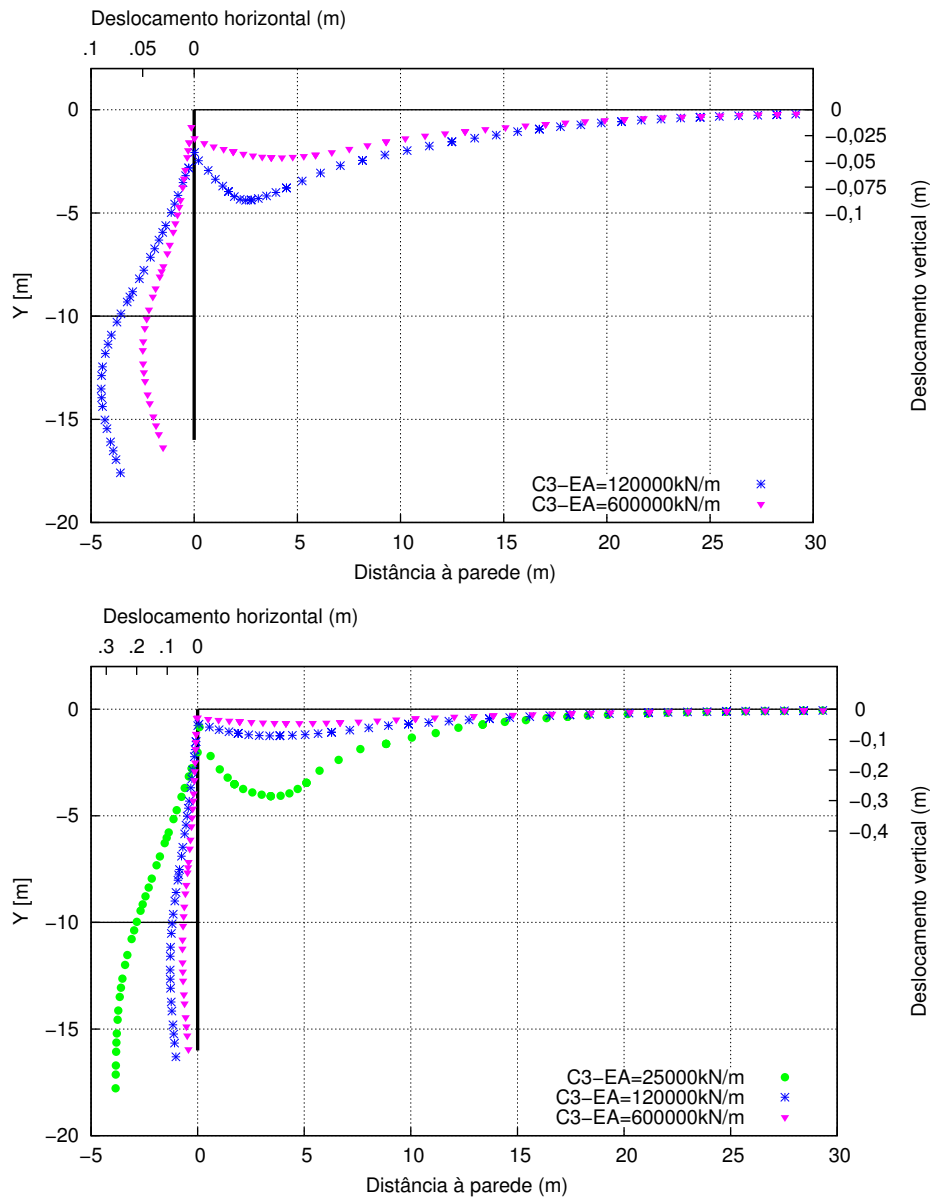


Figura 4.15: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C3: Influência da variação da rigidez das escoras. O gráfico de baixo corresponde ao mesmo caso do gráfico de cima com, no entanto, uma diferente escala de deslocamentos que permite ver os deslocamentos para EA=25000kN/m

Tabela 4.4: Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da rigidez das escoras

		Forças nas escoras [kN/m]		
		EA=25000kN/m	EA=120000kN/m	EA=600000kN/m
Escora		4 <sup>a</sup> Escavação		
C1	1 <sup>a</sup>	77,42	48,78	19,34
	2 <sup>a</sup>	92,36	134,98	152,67
	3 <sup>a</sup>	66,56	122,58	187,86
	Σ	236,34	306,33	359,87
C3	1 <sup>a</sup>	71,94	13,17	1,70
	2 <sup>a</sup>	373,95	393,07	349,62
	3 <sup>a</sup>	533,27	547,04	619,52
	Σ	979,16	953,27	970,84

Tabela 4.5: Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da rigidez das escoras

		Forças nas escoras [kN/m]		
		EA=25000kN/m	EA=120000kN/m	EA=600000kN/m
Escora		Max		
C1	1 <sup>a</sup>	77,42	49,32	43,87
	2 <sup>a</sup>	92,36	134,98	152,67
	3 <sup>a</sup>	66,56	122,58	187,86
	Σ	236,34	306,88	384,40
C3	1 <sup>a</sup>	156,55	109,20	115,42
	2 <sup>a</sup>	374,47	406,00	409,08
	3 <sup>a</sup>	533,44	547,04	619,52
	Σ	1064,46	1062,24	1144,03

- para o cenário C1 a influência da variação da rigidez axial das escoras sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é muito significativa, sendo as variações de carga um tanto expressivas; enquanto que para o cenário C3 esta influência manifesta menor relevância.
- para o cenário C1 as forças são tanto maiores quanto maior é a rigidez das escoras; para o cenário C3 as forças são praticamente iguais.
- para o cenário C1 a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras, excepto para EA = 120000kN/m (caso base) e EA = 600000kN/m para a 1<sup>a</sup> escora; enquanto que para o cenário C3 a carga máxima não ocorre na última fase de escavação, excepto, naturalmente, para a 3<sup>a</sup> escora.

## 4.4 Influência da Rigidez da Parede

Com o intuito de se analisar a influência da rigidez da parede sobre as pressões na cortina, bem como os deslocamentos da cortina e os assentamentos da superfície do maciço suportado, fez-se, a partir do caso base, a variação da rigidez da parede, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C1 e C3 (figuras 3.3(a) e 3.3(c)).

Adoptou-se diferentes valores para a espessura da parede, traduzindo-se portanto em diferentes valores tanto para a rigidez axial, como para a rigidez a flexão da parede, e ainda para o peso por metro por metro. Ver tabela 4.6. Note-se que os restantes parâmetros, tais como a altura da parede e o coeficiente de Poisson, mantêm-se iguais aos do caso base.

Tabela 4.6: Variação dos parâmetros da cortina

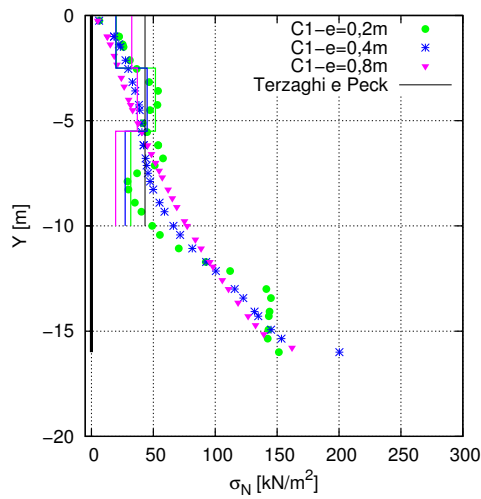
Espessura [m]	$EA_1$ [kN/m]	EI [kN.m <sup>2</sup> /m]	w [kN/m/m]
0,2	6000000	20000	5
0,4	12000000	160000	10
0,8	24000000	1280000	20

### 4.4.1 Pressões na Cortina

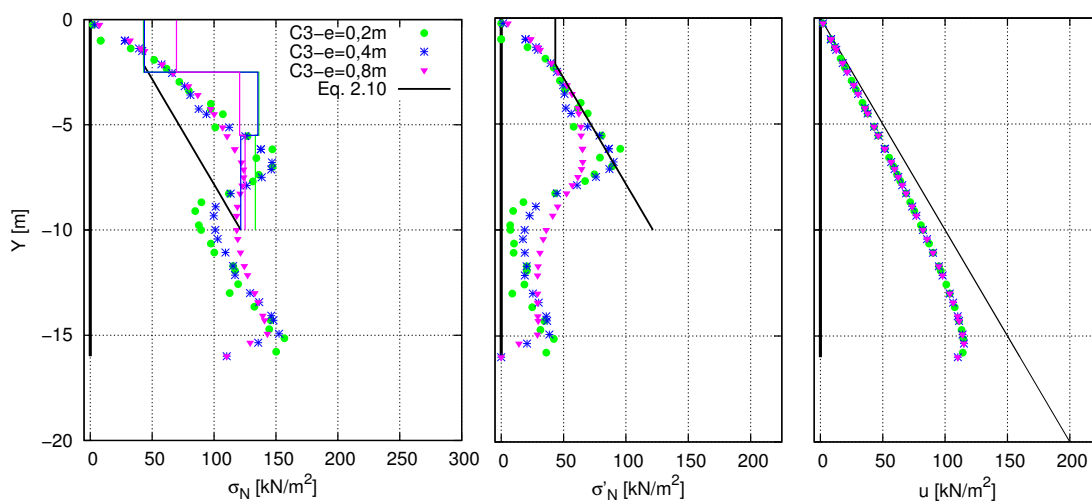
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina são apresentados na figura 4.16. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 4.16 e serão abordadas na secção 4.4.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 4.16 permite constatar o seguinte:

- cenário C1: para a parede muito flexível ( $e=0,2\text{m}$  -  $EI = 20000\text{kN.m}^2/\text{m}$ ), há grande irregularidade na distribuição de pressões após a última fase de escavação; para os dois outros valores a distribuição é mais regular, constatando-se que para a maior rigidez ( $e=0,8\text{m}$  -  $EI = 1280000\text{kN.m}^2/\text{m}$ ) se tem, em profundidade, mais pressão do que para  $e=0,4\text{m}$  ( $EI = 160000\text{kN.m}^2/\text{m}$ ) e que o inverso se verifica mais superficialmente.
- cenário C3: a rigidez da parede não afecta significativamente a distribuição de pressões, podendo afirmar-se que a excepção ocorre para  $z > 0.5H$  no caso  $e=0,8\text{m}$  ( $EI = 1280000\text{kN.m}^2/\text{m}$ ), em que se verifica que a distribuição de pressões é mais constante do que nos restantes casos.



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 4.16: Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação da rigidez da parede

#### 4.4.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina são apresentados nas figuras 4.17 e 4.18.

A partir da análise das figuras 4.17 e 4.18, é possível constatar o seguinte:

- para o cenário C1 os deslocamentos observados não apresentam grandes diferenças entre os diferentes valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina. Contudo, quanto menor o valor adoptado para a rigidez à flexão da cortina, maiores são os deslocamentos observados;
- para o cenário C3 os deslocamentos são tanto maiores quanto menor for o valor adoptado para a rigidez à flexão da cortina. Com efeito, os deslocamentos são consideravelmente superiores para o caso em que  $e=0,2\text{m}$  ( $EI = 20000\text{kN.m}^2/\text{m}$ ). Para o caso em que  $e=0,8\text{m}$  ( $EI = 1280000\text{kN.m}^2/\text{m}$ ) é possível observar que os deslocamentos sofridos pela parede são muito próximos aos verificados em uma estrutura rígida, sendo o deslocamento semelhante a uma rotação em torno do topo.

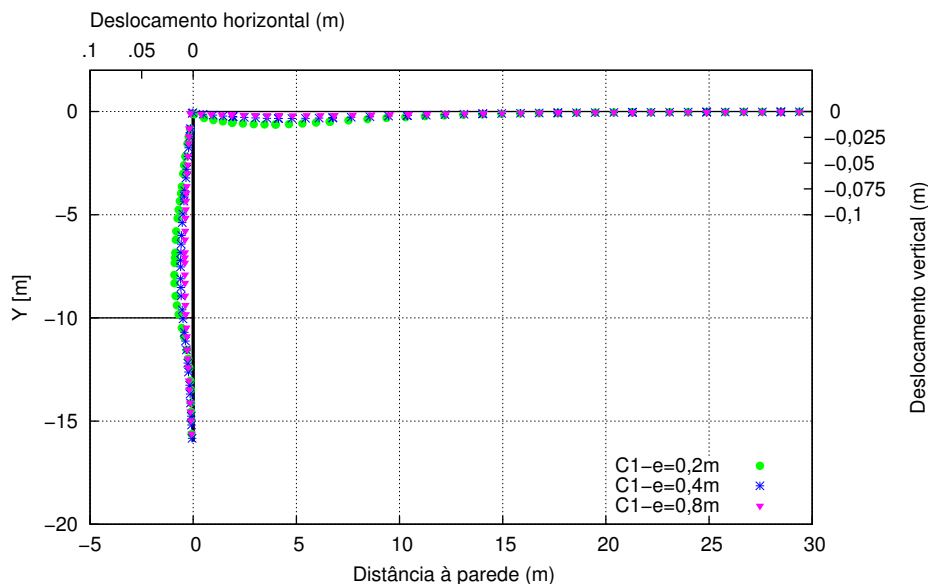


Figura 4.17: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C1: Influência da variação da rigidez da parede

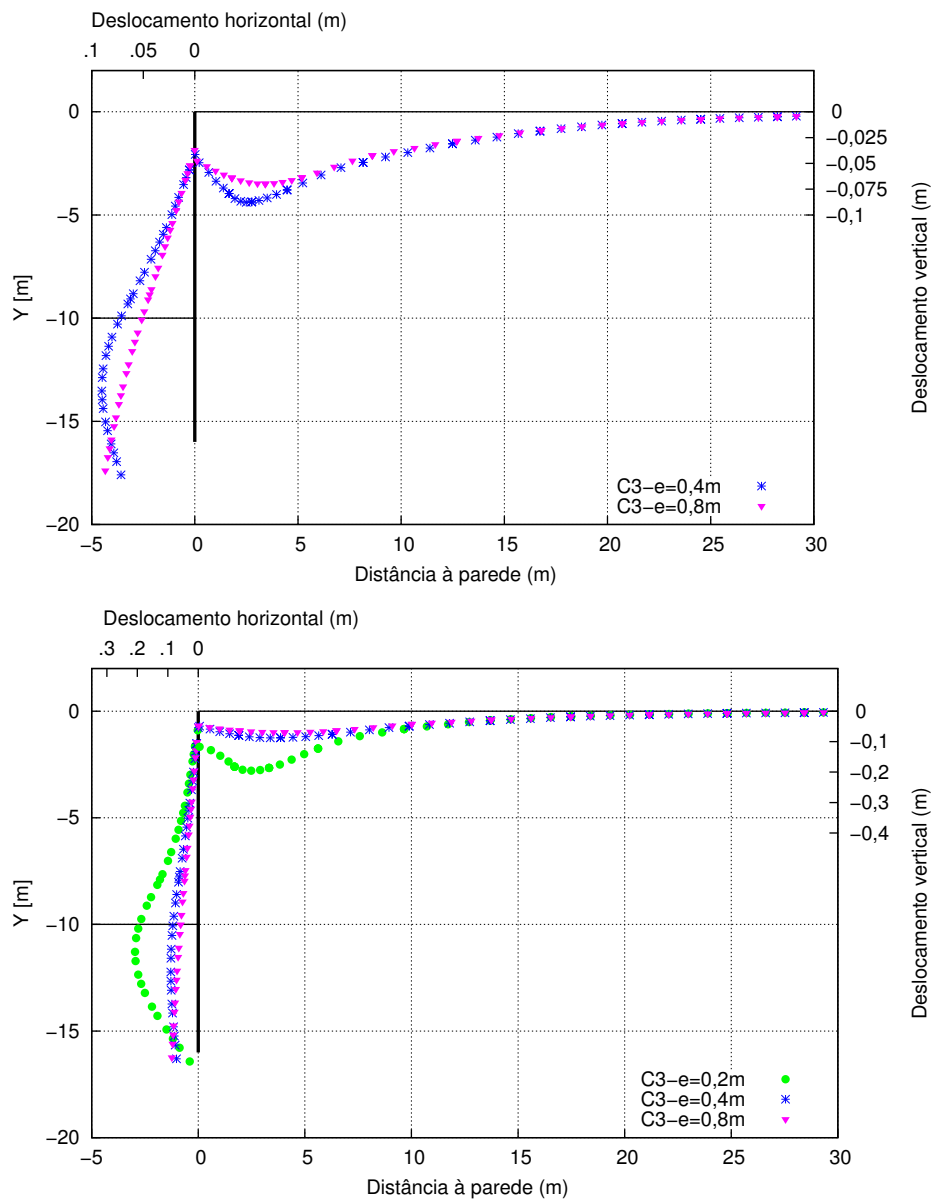


Figura 4.18: Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C3: Influência da variação da rigidez da parede. O gráfico de baixo corresponde ao mesmo caso do gráfico de cima com, no entanto, uma diferente escala de deslocamentos que permite ver os deslocamentos para  $e=0,2\text{m}$ .

### 4.4.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina são apresentados na tabela 4.7. Apresenta-se ainda a tabela 4.8 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina.

Tabela 4.7: Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da rigidez da parede

		Forças nas escoras [kN/m]		
		e=0,2m	e=0,4m	e=0,8m
Escora		4ª Escavação		
C1	1ª	50,14	48,78	81,43
	2ª	155,04	134,98	111,38
	3ª	142,79	122,58	87,81
	Σ	347,97	306,33	280,62
C3	1ª	26,29	13,17	33,89
	2ª	305,48	393,07	361,84
	3ª	600,09	547,04	562,90
	Σ	931,86	953,27	958,63

Tabela 4.8: Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da rigidez da parede

		Forças nas escoras [kN/m]		
		e=0,2m	e=0,4m	e=0,8m
Escora		Max		
C1	1ª	50,14	49,32	81,43
	2ª	155,04	134,98	111,38
	3ª	142,79	122,58	87,81
	Σ	347,97	306,88	280,62
C3	1ª	107,91	109,20	174,03
	2ª	408,67	406,00	361,84
	3ª	600,09	547,04	562,90
	Σ	1116,67	1062,24	1098,77

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 4.16(a) e 4.16(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- tanto para o cenário C1 como para o cenário C3, a influência da variação da rigidez da cortina sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é moderada.

- para o cenário C1 as forças são tanto maiores quanto menor é a rigidez da cortina; para o cenário C3 as forças são bastante semelhantes.
- de um modo geral, para o cenário C1 a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras, enquanto que para o cenário C3 a carga máxima não ocorre na última fase de escavação, excepto, naturalmente, para a 3<sup>a</sup> escora.

## 4.5 Influência da Largura de Escavação

Com o intuito de se analisar a influência da largura de escavação sobre as pressões na cortina, bem como os deslocamentos da cortina e os assentamentos da superfície do maciço suportado, fez-se, a partir do caso base, a variação da largura de escavação, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C1 e C3 (figuras 3.3(a) e 3.3(c)).

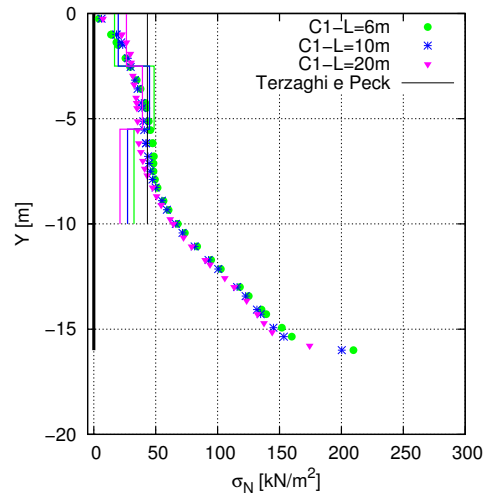
Adoptou-se alguns valores distintos para a largura de escavação:  $L=6\text{m}$ ,  $L=10\text{m}$  (caso base) e  $L=20\text{m}$ . Para o cenário C3 foi ainda estudada a situação em que  $L=5\text{m}$ . Note-se que o afastamento e a profundidade de instalação das escoras mantêm-se iguais aos do caso base, alterando-se apenas o comprimento.

### 4.5.1 Pressões na Cortina

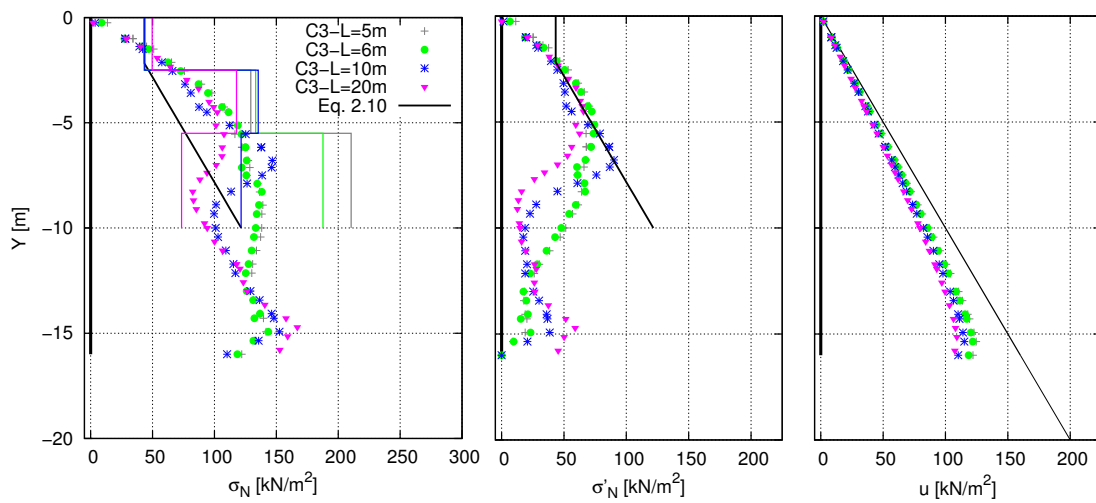
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação são apresentados na figura 4.19. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 4.19 e serão abordadas na secção 4.5.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 4.19 permite constatar o seguinte:

- cenário C1: as pressões são praticamente as mesmas, com uma ligeira tendência para menor pressão em profundidade e maior à superfície para os maiores valores de  $L$ .
- cenário C3: comparando os casos  $L=20\text{m}$  e  $L=10\text{m}$ , verifica-se que há maiores pressões para  $L=10\text{m}$  do que para  $L=20\text{m}$  para maiores profundidades e o inverso mais superficialmente; no entanto, os casos de  $L=5\text{m}$  e  $L=6\text{m}$  não apresentam a mesma tendência, parecendo ter uma distribuição diferente, em profundidade, apesar de os seus valores não se alterarem muito.



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 4.19: Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação da largura de escavação

## 4.5.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação são apresentados nas figuras 4.20 e 4.21.

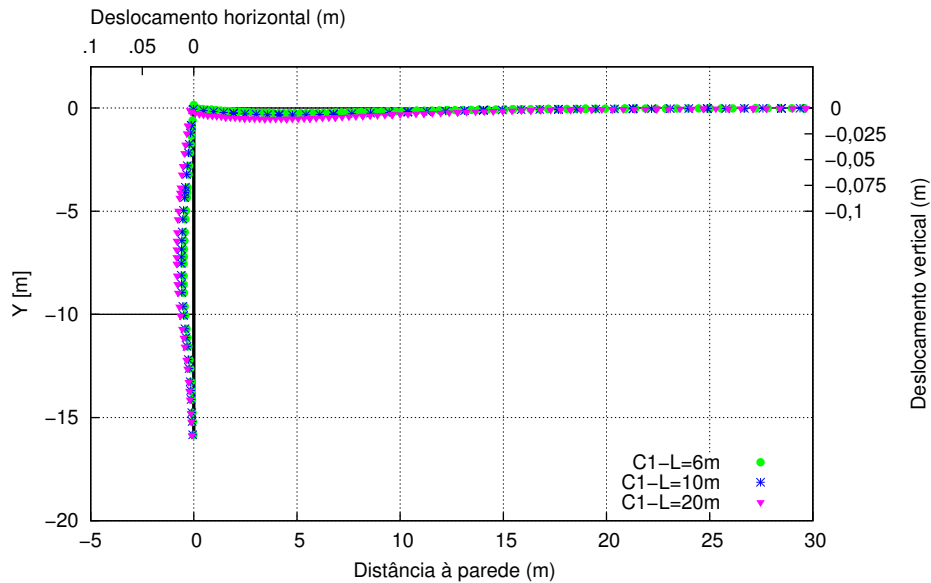


Figura 4.20: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C1: Influência da variação da largura de escavação

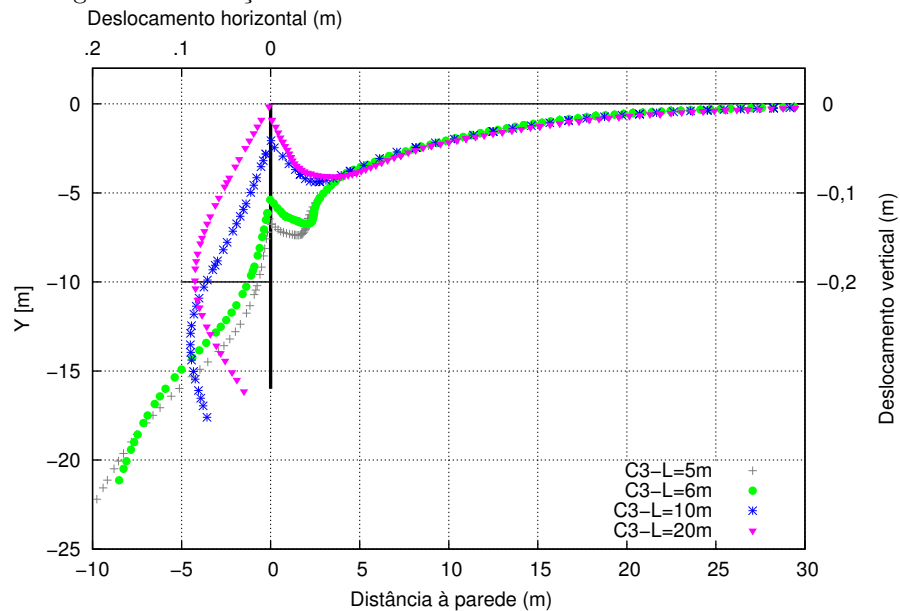


Figura 4.21: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C3: Influência da variação da largura de escavação

A partir da análise das figuras 4.20 e 4.21, é possível constatar o seguinte:

- para o cenário C1 os deslocamentos observados não apresentam grandes diferenças entre os diferentes valores adoptados para a largura de escavação. Contudo, quanto maior o valor adoptado para a largura de escavação, maiores são os deslocamentos observados;
- para o cenário C3 os deslocamentos são tanto maiores quanto menor for o valor adoptado para a largura de escavação, sendo particularmente mais elevados, atingindo valores muito significativos, para  $L=5\text{m}$  e  $L=6\text{m}$ .

### 4.5.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação são apresentados na tabela 4.9. Apresenta-se ainda a tabela 4.10 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação.

Tabela 4.9: Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da largura de escavação

		Forças nas escoras [kN/m]			
		L=5m	L=6m	L=10m	L=20m
	Escora	4ª Escavação			
C1	1ª	-	35,48	48,78	65,84
	2ª	-	146,18	134,98	117,97
	3ª	-	146,07	122,58	95,14
	$\Sigma$	-	327,73	306,33	278,95
C3	1ª	-15,67	-23,37	13,17	89,41
	2ª	248,74	305,70	393,07	353,43
	3ª	947,12	844,71	547,04	330,75
	$\Sigma$	1180,19	1127,05	953,27	773,59

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 4.19(a) e 4.19(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- para o cenário C1 a influência da variação da largura de escavação sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é bem menos significativa que no cenário C3.

Tabela 4.10: Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da largura de escavação

		Forças nas escoras [kN/m]			
		L=5m	L=6m	L=10m	L=20m
	Escora	Max			
C1	1ª	-	41,86	49,32	65,84
	2ª	-	146,18	134,98	117,97
	3ª	-	146,07	122,58	95,14
	$\Sigma$	-	334,11	306,88	278,95
C3	1ª	108,25	108,32	109,20	124,31
	2ª	388,16	399,93	406,00	353,43
	3ª	947,12	844,71	547,04	330,75
	$\Sigma$	1443,53	1352,96	1062,24	808,50

- de uma forma global, tanto para o cenário C1 como para o cenário C3, quanto menor é a largura de escavação, maiores são as forças instaladas nas escoras.
- para o cenário C3, o último nível de escoras é particularmente solicitado para os casos L=5m e L=6m, o que parece concordar com o que se observa a propósito dos deslocamentos da cortina.
- de um modo geral, para o cenário C1 a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras, enquanto que para o cenário C3 a carga máxima não ocorre na última fase de escavação, excepto, naturalmente, para a 3ª escora.

#### 4.5.4 Análise da Estabilidade Hidráulica

Os resultados obtidos para o cenário 3, especialmente para L=5m e L=6m, despertaram o interesse para que se fosse realizado um estudo semelhante ao apresentado no caso base na secção 3.4.4.

Apresenta-se assim a tabela 4.11 na qual estão apresentados os valores obtidos na análise da estabilidade hidráulica para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação.

Tabela 4.11: Análise da estabilidade hidráulica: Influência da variação da largura de escavação

L (m)	$u_A$ (kPa)	$u_B$ (kPa)	$u_{A,perc}$ (kPa)	$u_{B,perc}$ (kPa)	U (kN/m)	W' (kN/m)	FS
5	111,20	122,40	51,20	62,40	142,00	150	1,06
5	111,70	122,40	51,70	62,40	171,15	180	1,05
6	106,30	118,50	46,30	58,50	157,20	180	1,15
10	93,91	110,10	33,91	50,10	126,015	180	1,43
20	83,56	103,20	23,56	43,20	100,14	180	1,80

A análise dos resultados apresentados na tabela 4.11 permite constatar que quanto menor o valor adoptado para a largura de escavação, menor é o coeficiente de segurança obtido.

Para  $L=5\text{m}$  apresenta-se duas abordagens possíveis para a concretização do cálculo para a análise da segurança ao levantamento hidráulico. O facto é que para esta situação  $D/2=3\text{m}$  que é superior à  $L/2=2,5\text{m}$ . Assim, apresenta-se os cálculos para o caso em que se considera o prisma de solo com largura igual à  $L/2=2,5\text{m}$  e para o caso em que se considera o prisma de solo com largura igual à  $D/2=3\text{m}$  (ver figura 2.8). Com efeito, os resultados obtidos a partir das duas abordagens são muito semelhantes.

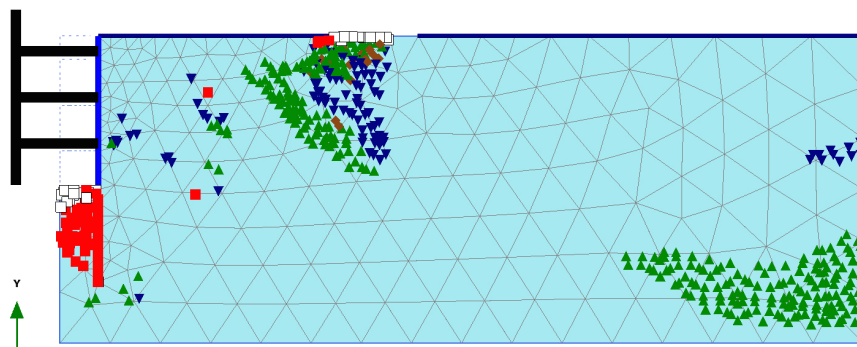
Os resultados obtidos mostram uma situação de colapso iminente, quanto ao levantamento hidráulico, para  $L=5\text{m}$ , sendo o coeficiente de segurança para  $L=6\text{m}$  também muito baixo. Estes resultados confirmam a análise feita a partir dos deslocamentos, das pressões na cortina e das cargas nas escoras.

### 4.5.5 Pontos Plásticos

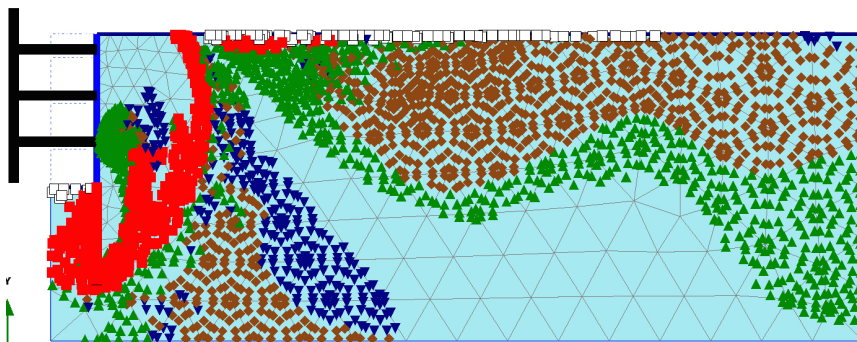
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os pontos onde se verifica plasticidade para o cenário 3 para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação são apresentados na figura 4.22.

A análise dos resultados apresentados na figura 4.22 permite constatar o seguinte:

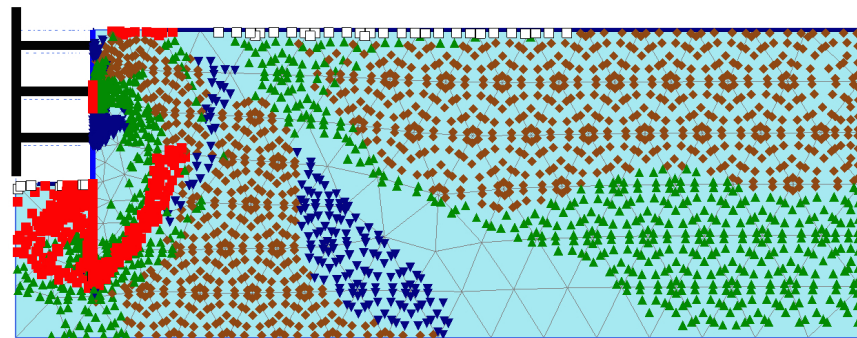
- globalmente, há um aumento do número de pontos plásticos à medida que  $L$  diminui, com a sucessiva formação de uma superfície de colapso que parece estar completa para  $L=6\text{m}$ .
- o caso  $L=5\text{m}$  parece ser uma excepção, não se verificando a formação de superfície de colapso no tardo da parede, mas a plastificação da quase totalidade do solo em frente à parede, possivelmente indicativo do início de rotura por levantamento hidráulico. É, no entanto, de notar que para a obtenção de convergência do programa de elementos finitos foi, para este caso, necessário alterar diversos parâmetros que controlam a convergência. Tal alteração parece ter (por analogia com outros cálculos realizados e que não são apresentados) influência na formação de pontos plásticos, não sendo, assim, de excluir a hipótese de existir também para esta situação uma superfície de deslizamento semelhante à que ocorre para  $L=6\text{m}$ . Esta hipótese parece ser confirmada pelos resultados dos deslocamentos já apresentados, que são muito semelhantes para estas duas situações.



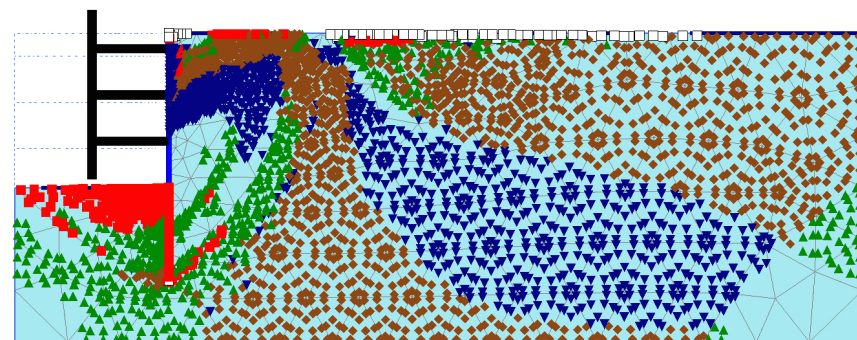
(a) L=5m



(b) L=6m



(c) L=10m



(d) L=20m

Plastic points

- Failure point
- Tension cut-off point
- ▼ Cap point
- ◆ Cap + hardening point
- ▲ Hardening point

Figura 4.22: Pontos plásticos na última fase de escavação para o cenário C3: Influência da variação da largura de escavação

## 4.6 Influência da Escala do Problema

Com o intuito de se analisar a influência da escala do problema sobre as pressões na cortina, bem como os deslocamentos da cortina e os assentamentos da superfície do maciço suportado, fez-se, a partir do caso base, a variação da escala geométrica do problema, mantendo-se todos os valores adoptados para os diferentes parâmetros, para o caso dos cenários C1 e C3 (figura 4.23). Os parâmetros que sofreram alterações e os valores adoptados constam na tabela 4.12. Note-se que se manteve sempre a relação entre as grandezas.

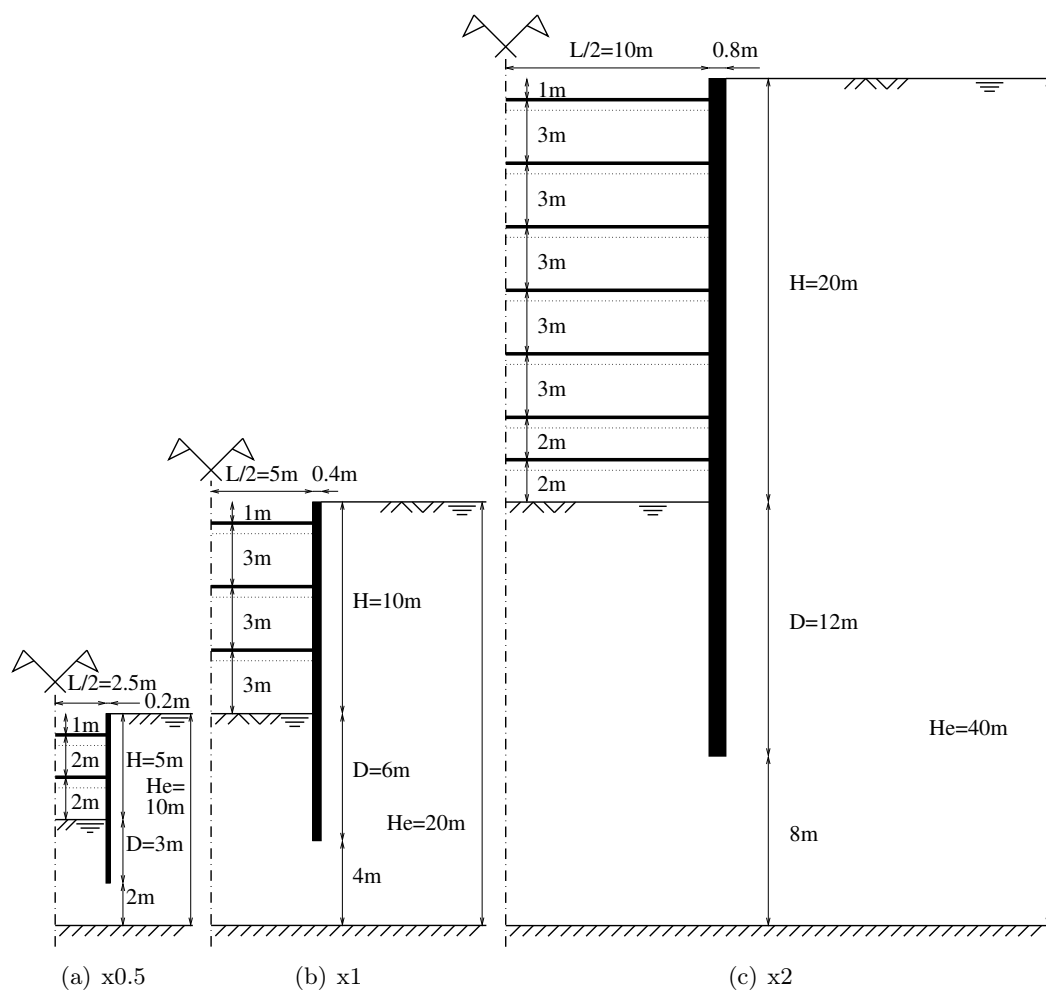


Figura 4.23: Representação esquemática do cenário C3 tal como é abordado na análise da influência da escala do problema

Tabela 4.12: Valores adoptados para a análise da influência da escala do problema

	Parede							Escoras
	H [m]	D [m]	L [m]	espessura [m]	EA1 [kN/m]	EI [kN.m <sup>2</sup> /m]	w [kN/m/m]	EA [kN/m]
metade	5	3	5	0,2	6000000	20000	5	30000
caso base	10	6	10	0,4	12000000	160000	10	120000
dobro	20	12	20	0,8	24000000	1280000	20	480000

#### 4.6.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C1 e C3 para as diferentes escalas adoptadas são apresentados na figura 4.24. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 4.24 e serão abordadas na secção 4.6.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 4.24 permite constatar o seguinte:

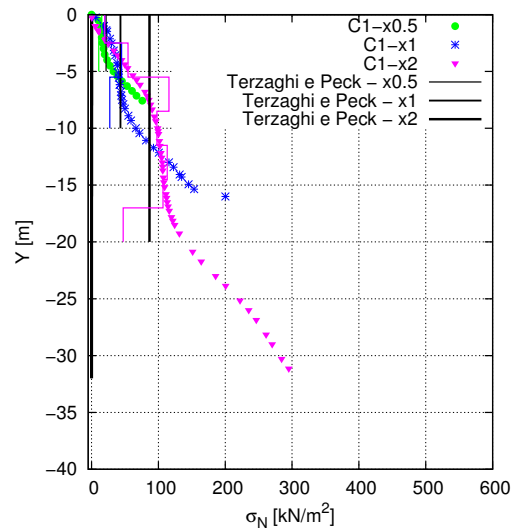
- tanto para o cenário C1 como para o cenário C3 as distribuições de pressões totais são bastante semelhantes ao longo da altura de escavação nos três casos, isto é, parecem ter uma relação directa com cada escala adoptada. Em suma, é possível notar que a variação da escala não tem grande influência na distribuição de pressões totais ao longo da altura de escavação.
- para o cenário C3, as pressões intersticiais são subtilmente maiores quanto maior a escala do problema.

#### 4.6.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

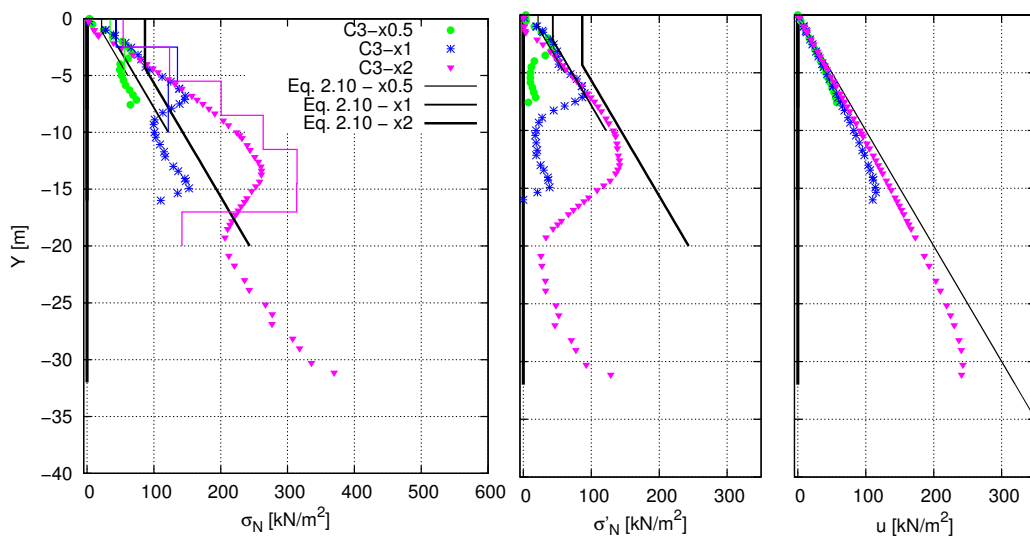
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C1 e C3 para as diferentes escalas adoptadas são apresentados nas figuras 4.25 e 4.26.

A partir da análise das figuras 4.25 e 4.26, é possível constatar o seguinte:

- tanto para o cenário C1 como para o C3 os deslocamentos observados parecem ser coerentes entre as três escalas adoptadas, isto é, ter uma relação directa com cada escala adoptada. Tal como para as pressões na cortina, é possível notar que a variação da escala não tem grande influência nos deslocamentos observados.



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 4.24: Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação da escala do problema

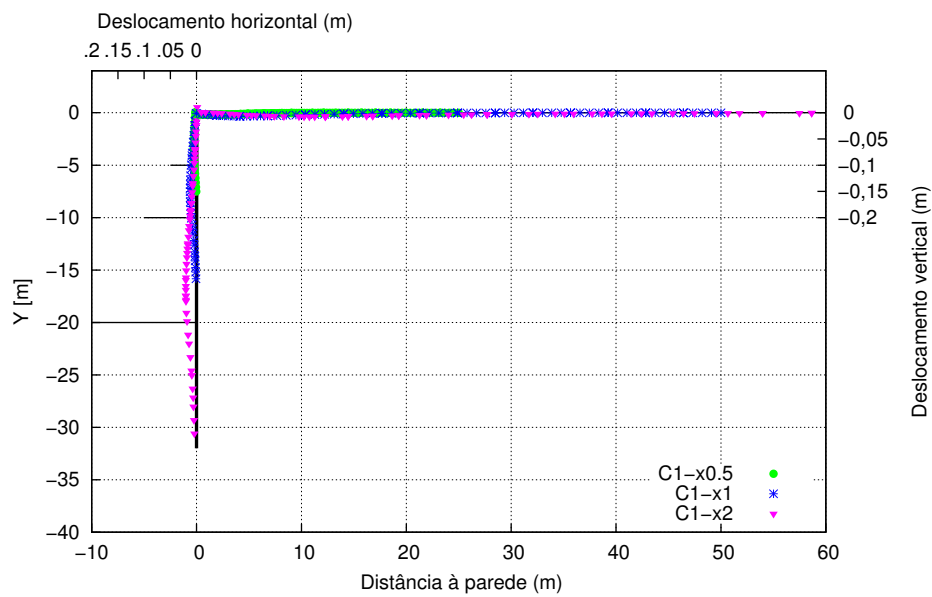


Figura 4.25: Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C1: Influência da variação da escala do problema

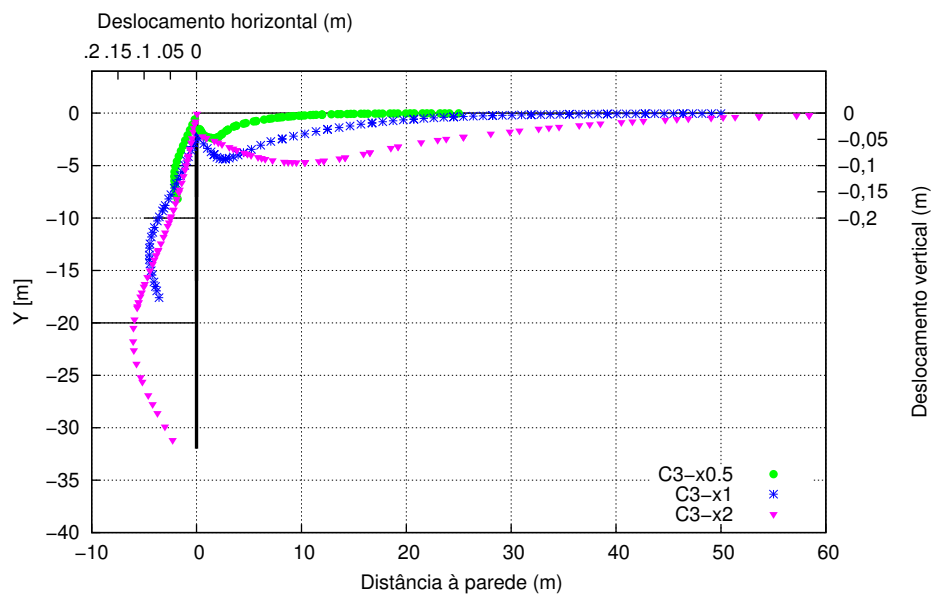


Figura 4.26: Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C3: Influência da variação da escala do problema

### 4.6.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C1 e C3 para as diferentes escalas adoptadas são apresentados na tabela 4.13. Apresenta-se ainda a tabela 4.14 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C1 e C3 para as diferentes escalas adoptadas.

Tabela 4.13: Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da escala do problema

		Forças nas escoras [kN/m]		
		x0.5	x1	x2
	Escora	3 <sup>a</sup> Escavação	4 <sup>a</sup> Escavação	8 <sup>a</sup> Escavação
C1	1 <sup>a</sup>	30,62	48,78	-31,79
	2 <sup>a</sup>	32,36	134,98	158,22
	3 <sup>a</sup>	-	122,58	347,34
	4 <sup>a</sup>	-	-	293,25
	5 <sup>a</sup>	-	-	339,90
	6 <sup>a</sup>	-	-	267,35
	7 <sup>a</sup>	-	-	142,25
	Σ	62,97	306,33	1516,51
C3	1 <sup>a</sup>	52,52	13,17	-89,65
	2 <sup>a</sup>	167,32	393,07	308,49
	3 <sup>a</sup>	-	547,04	580,22
	4 <sup>a</sup>	-	-	790,42
	5 <sup>a</sup>	-	-	942,65
	6 <sup>a</sup>	-	-	783,89
	7 <sup>a</sup>	-	-	426,08
	Σ	219,84	953,27	3742,08

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C1 e C3 para as diferentes escalas adoptadas são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 4.24(a) e 4.24(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- tanto para o cenário C1 como para o cenário C3, parece haver uma relação de cerca de 4 vezes no somatório das cargas nas escoras, ou seja, a carga total em x1 é cerca de 4 vezes a x0.5 e em x2 é 4 vezes a x1.
- de uma forma geral, tanto para o cenário C1, como para o cenário C3 a carga máxima ocorre na última fase de escavação para os últimos níveis de escoras.

Tabela 4.14: Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação da escala do problema

		Forças nas escoras [kN/m]		
		x0.5	x1	x2
Escora		Max		
C1	1 <sup>a</sup>	30,62	49,32	49,43
	2 <sup>a</sup>	32,36	134,98	163,69
	3 <sup>a</sup>	-	122,58	347,34
	4 <sup>a</sup>	-	-	293,25
	5 <sup>a</sup>	-	-	339,90
	6 <sup>a</sup>	-	-	267,35
	7 <sup>a</sup>	-	-	142,25
	Σ	62,97	306,88	1603,21
C3	1 <sup>a</sup>	69,05	109,20	135,01
	2 <sup>a</sup>	167,32	406,00	370,23
	3 <sup>a</sup>	-	547,04	601,69
	4 <sup>a</sup>	-	-	790,42
	5 <sup>a</sup>	-	-	942,65
	6 <sup>a</sup>	-	-	783,89
	7 <sup>a</sup>	-	-	426,08
	Σ	236,37	1062,24	4049,95

## 4.7 Influência das Características Mecânicas do Terreno

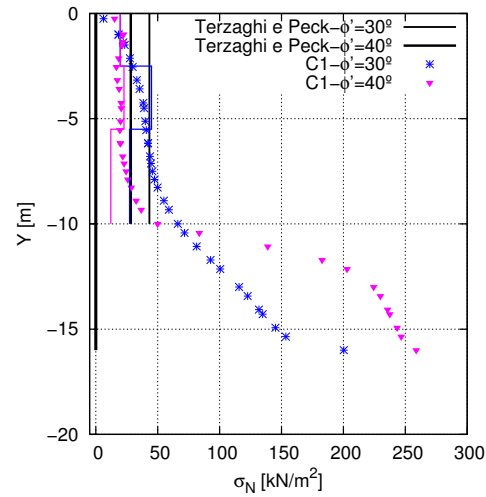
Com o intuito de se analisar a influência das características mecânicas do terreno sobre as pressões na cortina, bem como os deslocamentos da cortina e os assentamentos da superfície do maciço suportado, fez-se, a partir do caso base, a variação dos parâmetros de resistência e de deformabilidade do terreno, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C1 e C3 (figuras 3.3(a) e 3.3(c)). Desta forma, a análise consiste na comparação do solo considerado no caso base e de um novo solo cujos parâmetros que sofreram alterações e os valores adoptados constam na tabela 4.15.

### 4.7.1 Pressões na Cortina

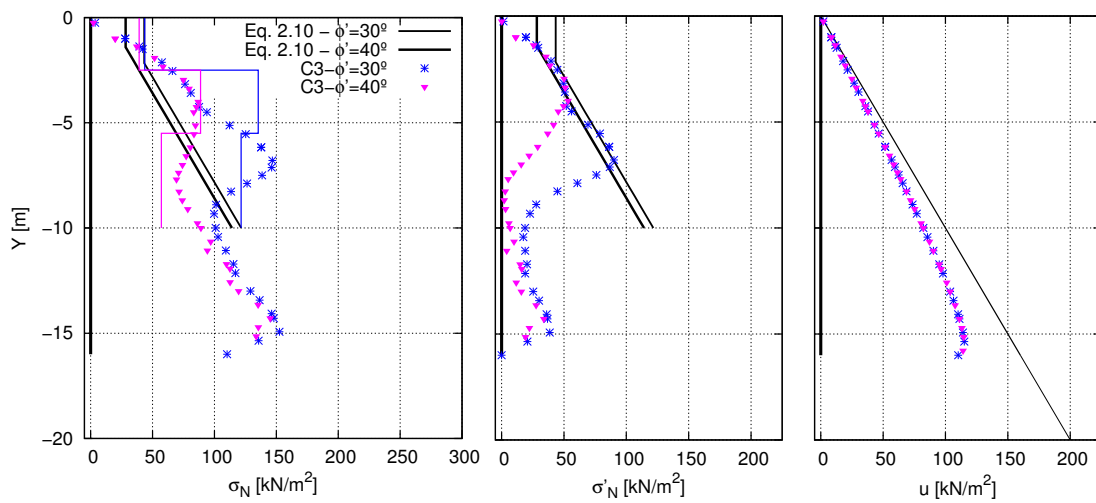
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C1 e C3 para os solos com diferentes características mecânicas são apresentados na figura 4.27. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 4.27 e serão abordadas na secção 4.7.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 4.27 permite constatar o seguinte:

- cenário C1: as distribuições não apresentam grande diferença ao longo da altura de escavação. As diferenças observadas são sobretudo na amplitude, o tipo de an-



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 4.27: Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação das características mecânicas do terreno

Tabela 4.15: Propriedades e parâmetros adotados para o solo 2

Geral			
Material		Propriedades Gerais	
Modelo do material	Tipo de comportamento	$\gamma_h$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Hardening Soil Model	Drenado	20	20

Parâmetros						
Rigidez				Resistência		
$E_{50,ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{oed,ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{ur,ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	m	$c'_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi'$ [°]	$\psi$ [°]
90000	90000	270000	0,5	1	40	8

Parâmetros de escoamento		Interfaces	
Parâmetros		Resistência	
kx	ky	Resistência	$R_{inter}$
[m/s]	[m/s]		
0,001	0,001	Manual	0,67

Coeficientes de impulso			
$K_0$	$K_{0,nc}$	$K_a$	$K_p$
0,8	0,357	0,217	4,599

damento verificado é bastante semelhante em ambos os casos. De um modo geral, quanto melhores as características mecânicas do terreno menores são as pressões na cortina.

- cenário C3: até uma profundidade aproximadamente igual à 0.5H as distribuições de pressões não apresentam diferenças apreciáveis. A partir de 0.5H há uma discrepância bastante evidente; no geral, quanto melhores as características mecânicas do terreno menores são as pressões na cortina.

#### 4.7.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C1 e C3 para os solos com diferentes características mecânicas são apresentados nas figuras 4.28 e 4.29.

A partir da análise das figuras 4.28 e 4.29, é possível constatar o seguinte:

- cenário C1: os deslocamentos observados não apresentam grandes diferenças entre os diferentes valores adotados para os parâmetros de resistência e de deformabilidade do terreno. No entanto, é possível perceber que quanto melhores as característi-

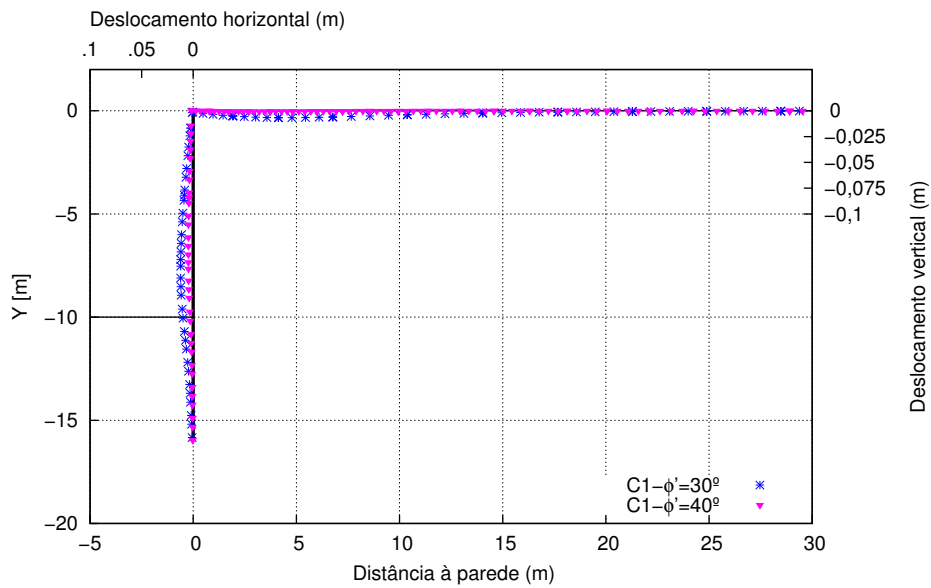


Figura 4.28: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C1: Influência da variação das características mecânicas do terreno

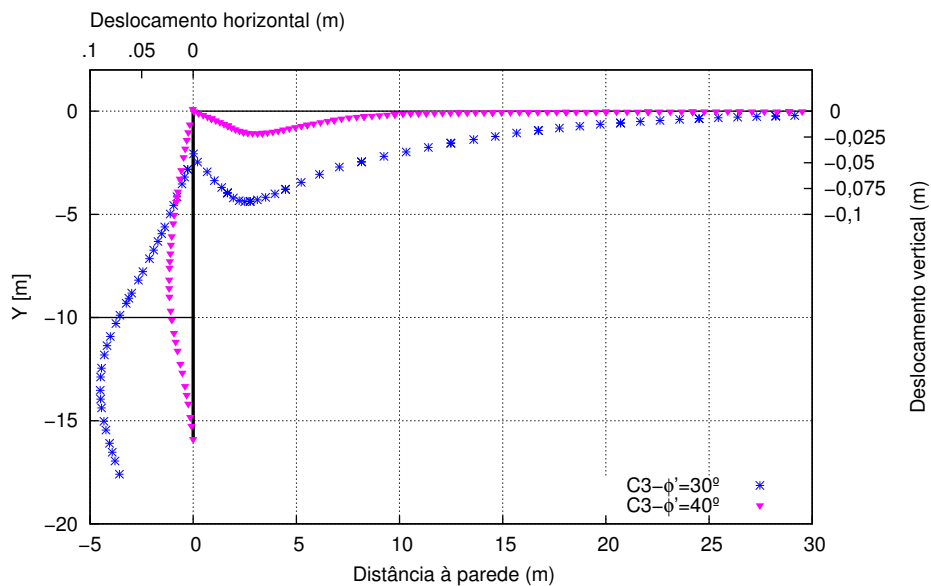


Figura 4.29: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C3: Influência da variação das características mecânicas do terreno

cas mecânicas do terreno, menores são os deslocamentos observados, ainda que a diferença seja muito subtil;

- cenário C3: os deslocamentos são tanto menores quanto melhores forem as características mecânicas do terreno. Com efeito, os deslocamentos são bastante menores para o solo com melhores características mecânicas.

### 4.7.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos após a última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C1 e C3 para os solos com diferentes características mecânicas são apresentados na tabela 4.16. Apresenta-se ainda a tabela 4.17 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C1 e C3 para os solos com diferentes características mecânicas.

Tabela 4.16: Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação das características mecânicas do terreno

		Forças nas escoras [kN/m]	
		$\phi' = 30^\circ$	$\phi' = 40^\circ$
	Escora	4 <sup>a</sup> Escavação	
C1	1 <sup>a</sup>	48,78	49,31
	2 <sup>a</sup>	134,98	68,19
	3 <sup>a</sup>	122,58	54,50
	$\Sigma$	306,33	172,00
C3	1 <sup>a</sup>	13,17	80,19
	2 <sup>a</sup>	393,07	266,35
	3 <sup>a</sup>	547,04	257,07
	$\Sigma$	953,27	603,61

Tabela 4.17: Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação das características mecânicas do terreno

		Forças nas escoras [kN/m]	
		$\phi' = 30^\circ$	$\phi' = 40^\circ$
	Escora	Max	
C1	1 <sup>a</sup>	49,32	49,31
	2 <sup>a</sup>	134,98	68,19
	3 <sup>a</sup>	122,58	54,50
	$\Sigma$	306,88	172,00
C3	1 <sup>a</sup>	109,20	98,07
	2 <sup>a</sup>	406,00	266,35
	3 <sup>a</sup>	547,04	257,07
	$\Sigma$	1062,24	621,49

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C1 e C3 para os solos com diferentes características mecânicas são apresentadas nos gráficos em

que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 4.27(a) e 4.27(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- tanto para o cenário C1 como para o cenário C3, a influência das características mecânicas do terreno sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é bastante significativa.
- em ambos os cenários as cargas nas escoras são tanto menores quanto melhores forem as características mecânicas do terreno.
- de um modo geral, para o cenário C1 a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras, enquanto que para o cenário C3 a carga máxima não ocorre na última fase de escavação, excepto, naturalmente, para a 3<sup>a</sup> escora.

### 4.8 Influência do Coeficiente de Impulso em Repouso ( $\phi' = 40^\circ$ )

Com o intuito de se analisar a influência do coeficiente de impulso em repouso do solo sobre as pressões na cortina, fez-se, a partir do caso base, a variação dos parâmetros de resistência do terreno, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso do cenário C3 (figura 3.3(c)). Para esta análise foi considerado o solo apresentado na tabela 4.15 e foram adoptados dois valores distintos para o coeficiente de impulso em repouso do solo,  $K_0 = 0.5$  e  $K_0 = 0.8$ , procedendo-se então a comparação dos resultados obtidos para estas duas situações.

#### 4.8.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina no cenário C3 para os diferentes valores adoptados para o coeficiente de impulso em repouso do solo são apresentados na figura 4.30. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 4.30 e serão abordadas na secção 4.8.2.

A análise dos resultados apresentados na figura 4.30 permite constatar o seguinte:

- não há diferenças apreciáveis entre os resultados obtidos para a distribuição de pressões para os diferentes valores adoptados para o coeficiente de impulso em repouso do solo.

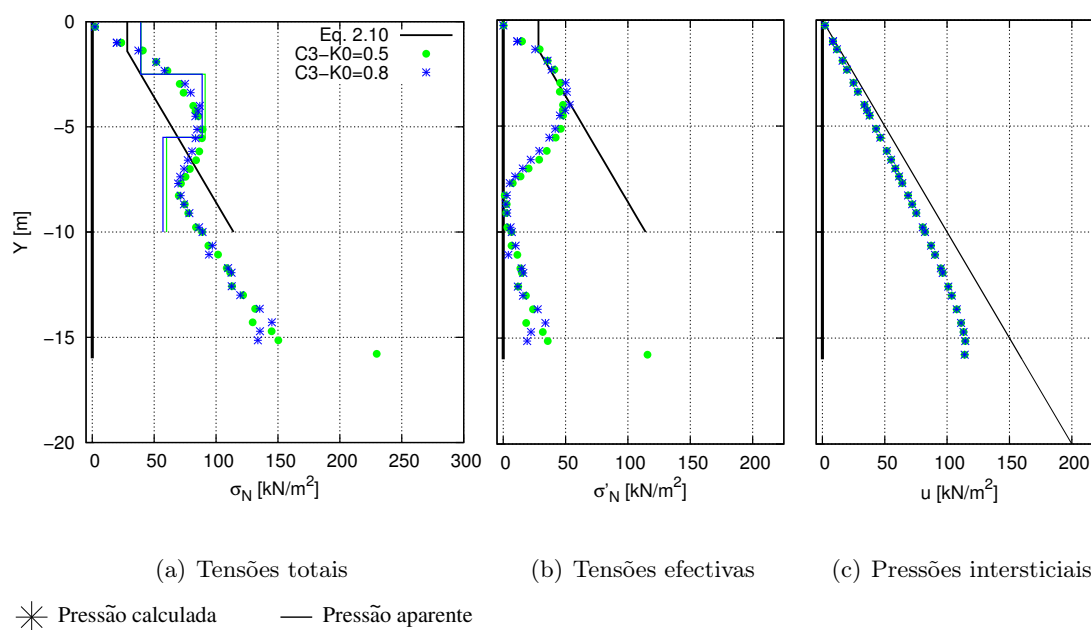


Figura 4.30: Pressões na cortina para o cenário C3: Influência da variação do coeficiente de impulso em repouso

#### 4.8.2 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras no cenário C3 para os diferentes valores adoptados para o coeficiente de impulso em repouso do solo são apresentados na tabela 4.18. Apresenta-se ainda a tabela 4.19 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para o cenário C3 para os diferentes valores adoptados para o coeficiente de impulso em repouso do solo.

Tabela 4.18: Forças nas escoras para o cenário C3: Influência da variação do coeficiente de impulso em repouso

		Forças nas escoras [kN/m]	
		$K_0 = 0,5$	$K_0 = 0,8$
C3	Escora	4 <sup>a</sup> Escavação	
	1 <sup>a</sup>	77,51	80,19
	2 <sup>a</sup>	273,51	266,35
	3 <sup>a</sup>	270,31	257,07
	$\Sigma$	621,34	603,61

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras no cenário C3 para os diferentes valores adoptados para o coeficiente de impulso em repouso do solo são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figura 4.30(a)).

Tabela 4.19: Forças máximas nas escoras para o cenário C3: Influência da variação do coeficiente de impulso em repouso

		Forças nas escoras [kN/m]	
		$K_0 = 0,5$	$K_0 = 0,8$
	Escora	Max	
C3	1 <sup>a</sup>	98,51	98,07
	2 <sup>a</sup>	273,51	266,35
	3 <sup>a</sup>	270,31	257,07
	$\Sigma$	642,34	621,49

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- tal como para as pressões na cortina, a influência do coeficiente de impulso em repouso do solo sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é praticamente insignificante.
- tanto para a última fase de escavação como para as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo, não há grande diferença entre os resultados obtidos para as cargas nas escoras para os diferentes valores adoptados para o coeficiente de impulso em repouso do solo. De um modo geral, a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras.

### 4.9 Influência do Peso Volúmico ( $\phi' = 30^\circ$ )

Com o intuito de se analisar a influência do peso volúmico do solo sobre as pressões na cortina, bem como os deslocamentos da cortina e os assentamentos da superfície do maciço suportado, fez-se, a partir do caso base, a variação do peso volúmico do solo, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C1 e C3 (figuras 3.3(a) e 3.3(c)).

Os valores adoptados para os parâmetros do solo mantêm-se, com excepção apenas do peso volúmico. Adoptou-se para o peso volúmico do solo:  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ ,  $\gamma = 20\text{kN/m}^3$  (caso base) e  $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ . A situação em que  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$  corresponde à situação limite em que se alcança a convergência para o cenário 3, cenário condicionante uma vez que, para além das pressões de terras, há ainda a presença de forças de percolação.

#### 4.9.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são

apresentados na figura 4.31. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 4.31 e serão abordadas na secção 4.9.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 4.31 permite constatar o seguinte:

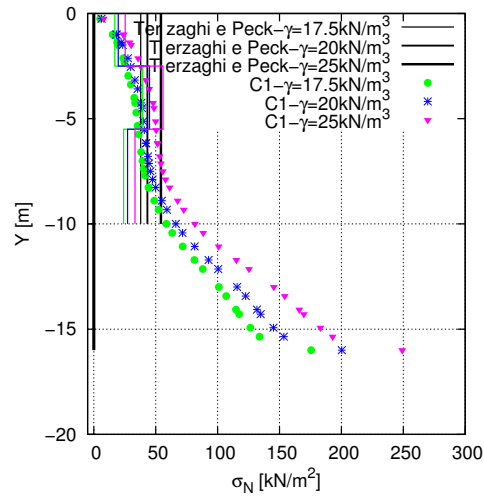
- cenário C1: as distribuições de tensões totais na cortina não apresentam grande diferença para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico. As diferenças observadas são sobretudo na amplitude, isto é, quanto maior o peso volúmico do solo maiores são as pressões na cortina, o tipo de andamento verificado é bastante semelhante em todos os casos.
- cenário C3: a distribuição de pressões evolui em profundidade de uma forma menos clara do que para o cenário C1; próximo à superfície do terreno as pressões são maiores para  $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ , mas em profundidade são maiores para  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ ; o caso  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$  apresenta, globalmente, menor pressão, apesar de todas elas serem da mesma ordem de grandeza.

#### 4.9.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

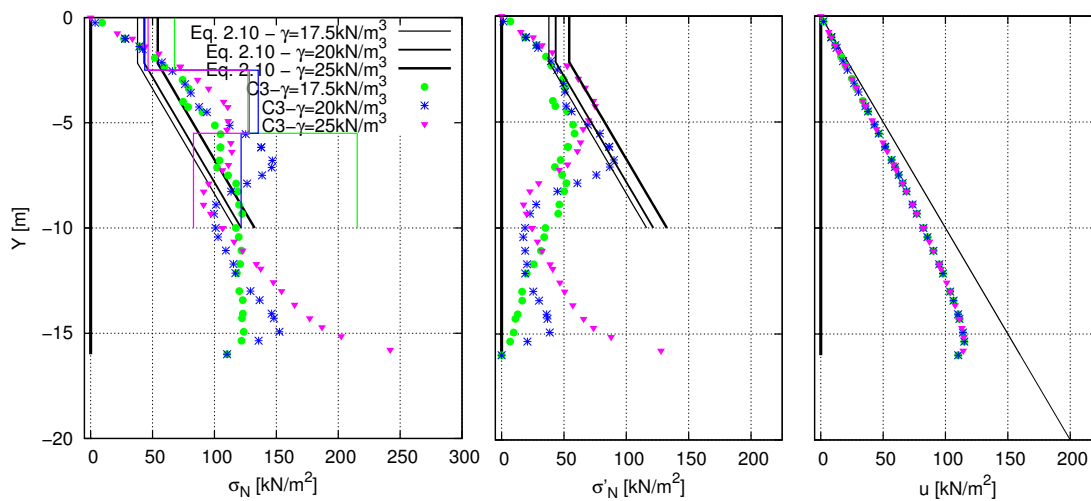
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentados nas figuras 4.32 e 4.33.

A partir da análise das figuras 4.32 e 4.33, é possível constatar o seguinte:

- cenário C1: os deslocamentos observados não apresentam diferenças apreciáveis entre os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo. No entanto, é possível perceber que quanto maior o peso volúmico, maiores são os deslocamentos observados, ainda que a diferença seja muito subtil;
- cenário C3: os deslocamentos são tanto maiores quanto menor for o valor adoptado para o peso volúmico do solo. Com efeito, os deslocamentos são consideravelmente superiores para o caso em que  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ , querendo, na prática, significar que há colapso. Enquanto que para  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$  os maiores deslocamentos se verificam sobretudo na base da cortina, para  $\gamma = 20\text{kN/m}^3$  e  $\gamma = 25\text{kN/m}^3$  os maiores deslocamentos são aproximadamente a meio da cortina.



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 4.31: Pressões na cortina para os cenários C1 (em cima) e C3 (em baixo): Influência da variação do peso volúmico

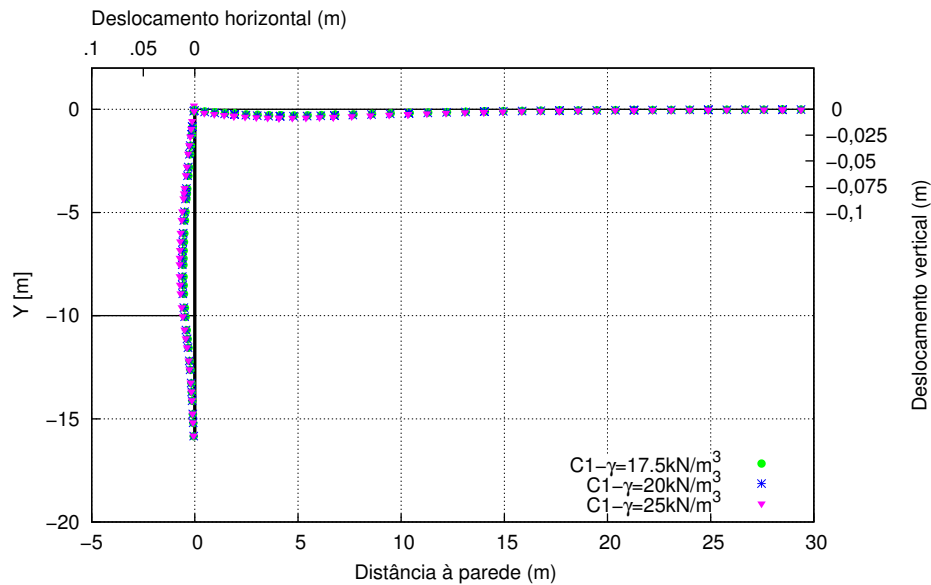


Figura 4.32: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C1: Influência da variação do peso volúmico

### 4.9.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentados na tabela 4.20. Apresenta-se ainda a tabela 4.21 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo.

Tabela 4.20: Forças nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação do peso volúmico

		Forças nas escoras [kN/m]		
		$\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$	$\gamma = 20\text{kN/m}^3$	$\gamma = 25\text{kN/m}^3$
	Escora	4 <sup>a</sup> Escavação		
C1	1 <sup>a</sup>	41,19	48,78	63,52
	2 <sup>a</sup>	118,54	134,98	167,87
	3 <sup>a</sup>	108,30	122,58	149,54
	$\Sigma$	268,04	306,33	380,93
C3	1 <sup>a</sup>	234,05	13,17	80,58
	2 <sup>a</sup>	381,14	393,07	384,53
	3 <sup>a</sup>	968,88	547,04	373,66
	$\Sigma$	1115,97	953,27	838,78

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C1 e C3 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a

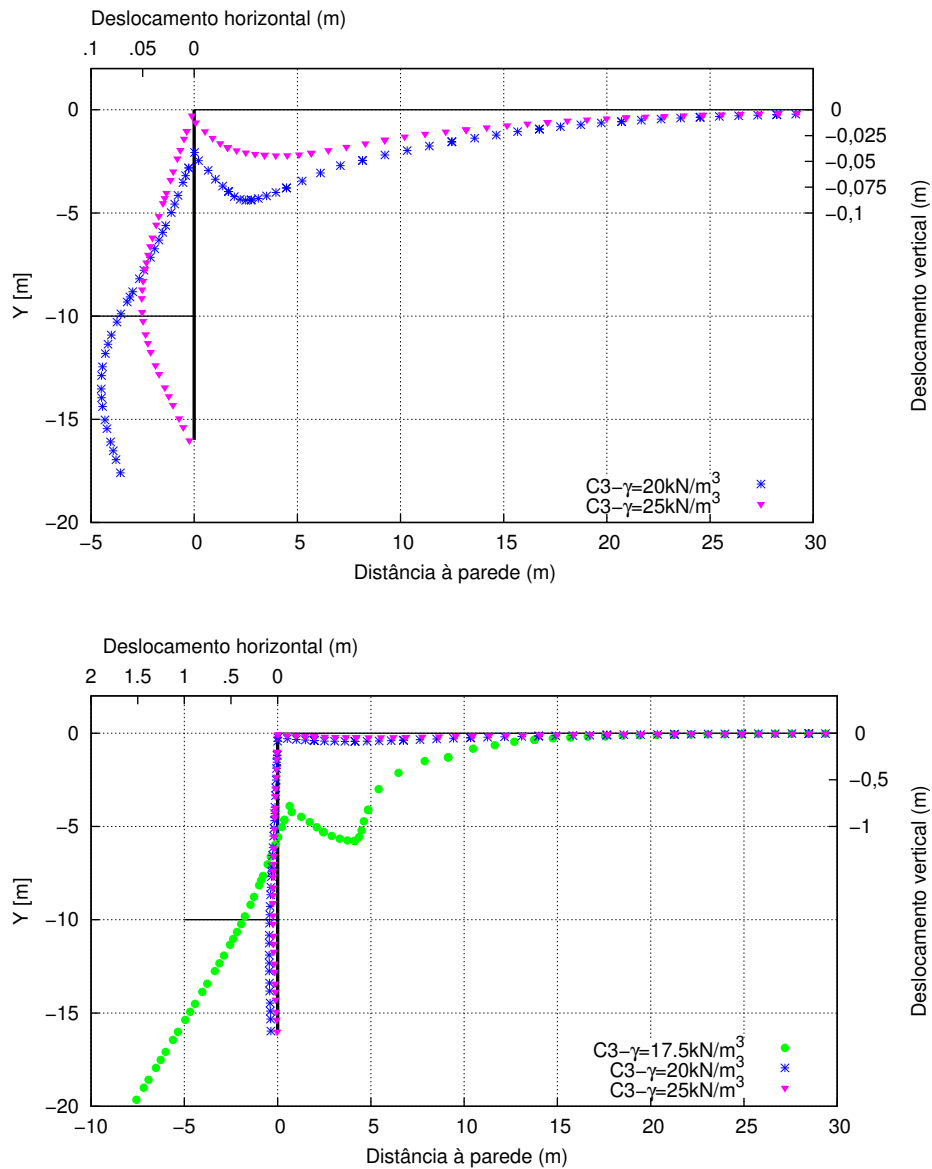


Figura 4.33: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico. O gráfico de baixo corresponde ao mesmo caso do gráfico de cima com, no entanto, uma diferente escala de deslocamentos que permite ver os deslocamentos para  $\gamma = 17.5 \text{ kN/m}^3$ .

Tabela 4.21: Forças máximas nas escoras para os cenários C1 e C3: Influência da variação do peso volúmico

		Forças nas escoras [kN/m]		
		$\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$	$\gamma = 20\text{kN/m}^3$	$\gamma = 25\text{kN/m}^3$
	Escora	Max		
C1	1 <sup>a</sup>	42,38	49,32	63,52
	2 <sup>a</sup>	118,54	134,98	167,87
	3 <sup>a</sup>	108,30	122,58	149,54
	$\Sigma$	269,22	306,88	380,93
C3	1 <sup>a</sup>	169,32	109,20	115,96
	2 <sup>a</sup>	381,22	406,00	384,53
	3 <sup>a</sup>	968,88	547,04	373,66
	$\Sigma$	1519,41	1062,24	874,15

última fase de escavação (figuras 4.31(a) e 4.31(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- a influência da variação do peso volúmico do solo sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é bem mais significativa no cenário C3 do que no cenário C1, principalmente no último nível de escoramento.
- para o cenário C1 quanto maior o peso volúmico do solo, maiores são as forças instaladas nas escoras; enquanto que para o cenário C3 quanto maior o peso volúmico do solo, menores são as forças instaladas nas escoras.
- de um modo geral, tanto para o cenário C1 como para o cenário C3, a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras.

#### 4.9.4 Análise da Estabilidade Hidráulica

Os resultados obtidos para o cenário 3, especialmente para  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ , despertaram o interesse para que se fosse realizado um estudo semelhante ao apresentado no caso base na secção 3.4.4.

Apresenta-se assim a tabela 4.22 na qual estão apresentados os valores obtidos na análise da estabilidade hidráulica para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo.

A análise dos resultados apresentados na tabela 4.22 permite constatar que quanto menor o valor adoptado para o peso volúmico do solo, menor é o coeficiente de segurança obtido. O valor obtido para  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$  indica colapso iminente, o que é confirmado pelos deslocamentos da cortina e do terreno para estas situações.

Tabela 4.22: Análise da estabilidade hidráulica: Influência da variação do peso volúmico

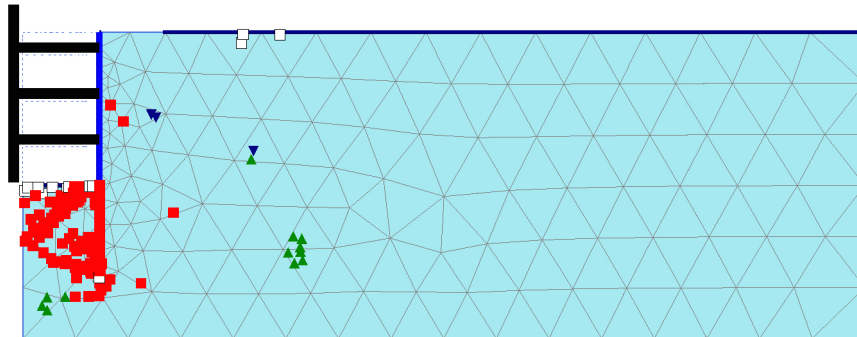
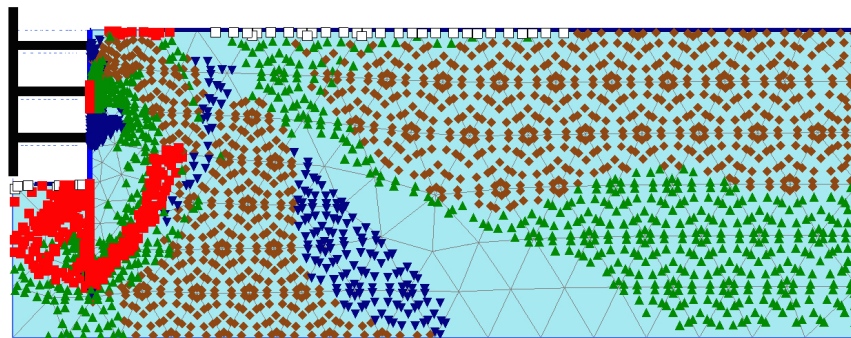
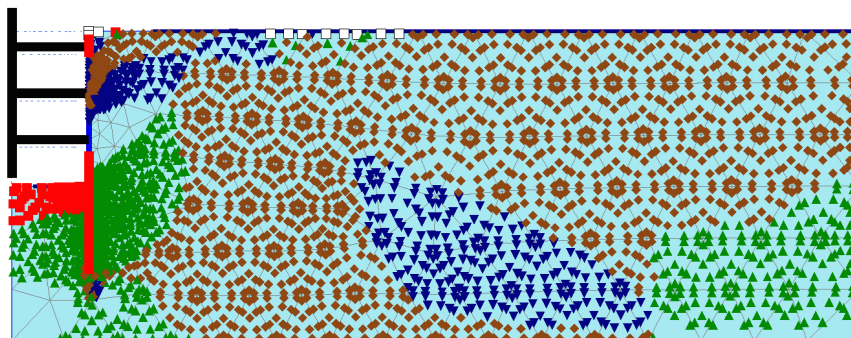
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$u_A$ (kPa)	$u_B$ (kPa)	$u_{A,perc}$ (kPa)	$u_{B,perc}$ (kPa)	U (kN/m)	W' (kN/m)	FS
17,5	93,91	110,1	33,91	50,1	126,015	135	1,07
20						180	1,43
25						270	2,14

#### 4.9.5 Pontos Plásticos

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os pontos onde se verifica plasticidade para o cenário 3 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentados na figura 4.34.

A análise dos resultados apresentados na figura 4.34 permite constatar o seguinte:

- $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ : os pontos plásticos ocorrem sobretudo no maciço de solo no lado interior da escavação. Tal como para o caso em que  $L=5\text{m}$ , o facto é que a convergência para esta situação já não é obtida muito facilmente. O que se pode constatar a partir dos cálculos realizados é que para esta situação se parece estar diante de um cenário de rotura iminente por levantamento hidráulico. De facto, o coeficiente de segurança correspondente é bastante baixo, sendo quase unitário.
- $\gamma = 20\text{kN/m}^3$  (caso base): conforme já referido, os pontos plásticos, para além de ocorrerem na interface solo-estrutura, indicando simplesmente pontos em que se atingiu o ângulo de atrito solo-estrutura devido aos deslocamentos relativos naquela zona, ocorrem também no maciço de solo. Verifica-se a ocorrência de pontos plásticos numa faixa de solo no interior da escavação e ainda no maciço de solo no tardoz, evidenciando-se claramente o início da formação de uma potencial superfície de rotura; mesmo apesar de o coeficiente de segurança ao levantamento hidráulico ser relativamente elevado.
- $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ : a distribuição dos pontos plásticos parece indicar que se está longe do colapso. Estes ocorrem especialmente na interface solo-estrutura, devendo-se ao mesmo motivo já apresentado, e ainda numa faixa de solo no interior da escavação.

(a)  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ (b)  $\gamma = 20\text{kN/m}^3$ (c)  $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ **Plastic points**

- |                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| ■ Failure point   | □ Tension cut-off point |
| ▼ Cap point       | ◆ Cap + hardening point |
| ▲ Hardening point |                         |

Figura 4.34: Pontos plásticos na última fase de escavação para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico

### 4.10 Influência do Peso Volúmico ( $\phi' = 40^\circ$ )

Os resultados obtidos na secção 4.9 para  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$  indicam uma situação de rotura iminente, querendo, na prática, significar que há colapso. A análise realizada na secção 4.9 permite ainda constatar que o peso volúmico do solo é um parâmetro com especial influência sobre o comportamento da cortina e do próprio maciço de solo. Desta forma, faz-se a análise quanto à influência do peso volúmico do solo a partir de um solo com melhores características mecânicas de resistência e deformabilidade.

Esta análise é semelhante à análise realizada em 4.9, onde os valores adoptados para os diferentes parâmetros mantêm-se os mesmos, com distinção apenas dos parâmetros de resistência do solo. Fez-se, a partir do caso base, a variação dos parâmetros de resistência e do peso volúmico do solo, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso do cenário C3 (figura 3.3(c)). Para esta análise foi considerado o solo apresentado na tabela 4.15 e foram adoptados três valores distintos para o peso volúmico do solo,  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ ,  $\gamma = 20\text{kN/m}^3$  e  $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ .

#### 4.10.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina no cenário C3 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentados na figura 4.35. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 4.35 e serão abordadas na secção 4.10.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 4.35 permite constatar o seguinte:

- a distribuição de pressões evolui em profundidade de uma forma aparentemente pouco clara; não há grandes diferenças entre as distribuições de pressões para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo, sendo todas elas da mesma ordem de grandeza.

#### 4.10.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz no cenário C3 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentados na figura 4.36.

A partir da análise da figura 4.36, é possível constatar o seguinte:

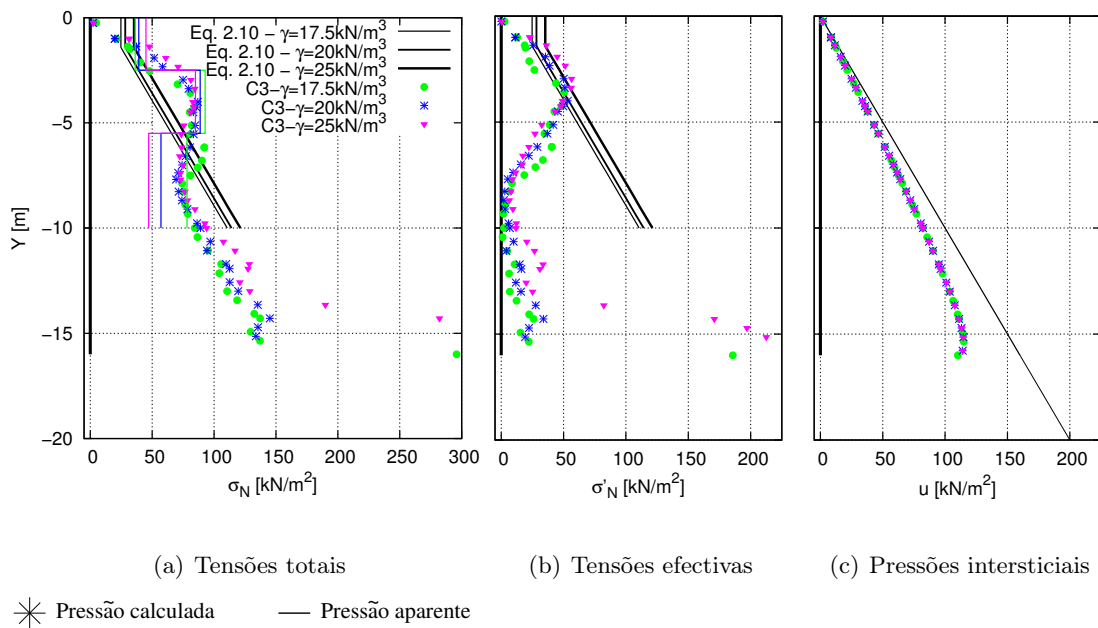


Figura 4.35: Pressões na cortina para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico

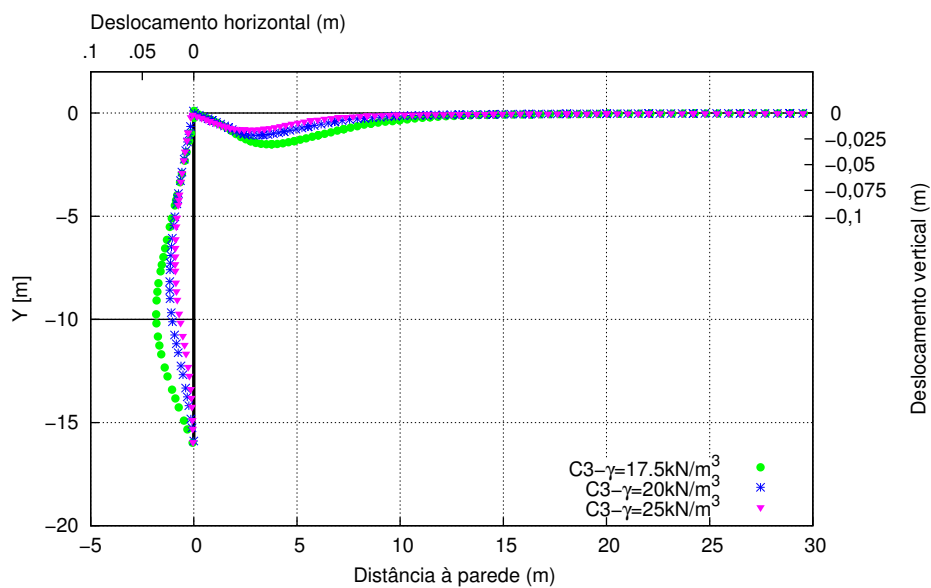


Figura 4.36: Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico

- os deslocamentos são tanto maiores quanto menor for o valor adoptado para o peso volúmico do solo.

### 4.10.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras no cenário C3 para os diferentes valores adotados para o peso volúmico do solo são apresentados na tabela 4.23. Apresenta-se ainda a tabela 4.24 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para o cenário C3 para os diferentes valores adotados para o peso volúmico do solo.

Tabela 4.23: Forças nas escoras para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico

		Forças nas escoras [kN/m]		
		$\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$	$\gamma = 20\text{kN/m}^3$	$\gamma = 25\text{kN/m}^3$
Escora		4ª Escavação		
C3	1ª	43,09	80,19	110,65
	2ª	278,03	266,35	254,98
	3ª	351,91	257,07	212,41
	$\Sigma$	673,02	603,61	578,04

Tabela 4.24: Forças máximas nas escoras para o cenário C3: Influência da variação do peso volúmico

		Forças nas escoras [kN/m]		
		$\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$	$\gamma = 20\text{kN/m}^3$	$\gamma = 25\text{kN/m}^3$
Escora		Max		
C3	1ª	90,75	98,07	112,48
	2ª	278,50	266,35	254,98
	3ª	351,91	257,07	212,41
	$\Sigma$	721,16	621,49	579,87

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras no cenário C3 para os diferentes valores adotados para o peso volúmico do solo são apresentadas no gráfico em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figura 4.35(a)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- a influência da variação do peso volúmico do solo sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é menos acentuada no solo com melhores características mecânicas de resistência e deformabilidade, solo 2.
- quanto menor o peso volúmico do solo, maiores são as forças instaladas nas escoras.
- de um modo geral, a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras.

## Capítulo 5

# Análise Paramétrica para o Caso de Pressões Hidrostáticas

### 5.1 Introdução

A análise paramétrica relativa à presença da água sem percolação resulta da apreciação de resultados obtidos para o cenário C5. Para termo de comparação, apresentam-se também, para os casos analisados, os resultados obtidos para o cenário C4.

Esta análise é semelhante à análise realizada no capítulo 4, mantendo-se os mesmos valores adoptados para os diferentes parâmetros, com distinção apenas da profundidade do estrato rijo e impermeável, o que aliás caracteriza a diferença entre os cenários C1 e C3 dos cenários C4 e C5, significando a inexistência de percolação.

Como já apresentado aquando da introdução do capítulo 4, o diagrama aparente para a situação com nível freático elevado apresentado na figura 2.6 e dado pela equação 2.10 não é adequado pelos resultados apresentados nos capítulos 3 e 4 e os que o capítulo 5 confirmará. Contudo, tal como o diagrama aparente de Terzaghi e Peck (equação 2.1), esse diagrama é ainda apresentado nas figuras como uma referência.

### 5.2 Influência da Ficha

Fez-se, a partir do caso base, a variação dos valores adoptados para a profundidade do estrato rijo e impermeável e para a profundidade das fichas, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C4 e C5 (figura 5.1).

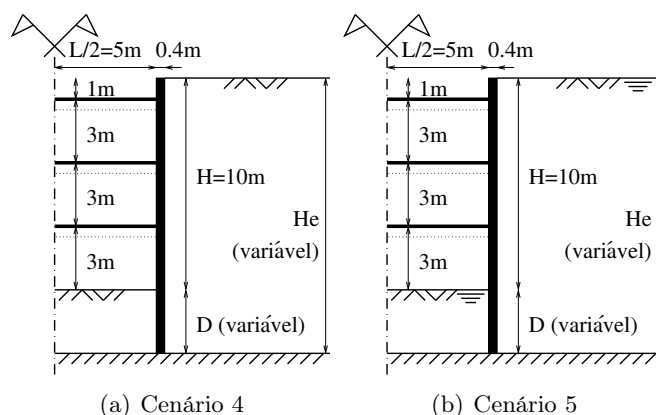


Figura 5.1: Representação esquemática dos cenários C4 e C5 tal como são abordados na análise da influência da variação da ficha

Para a altura enterrada da cortina (ficha) adoptou-se os valores de 0m, 2m, 4m, 6m (caso base), 8m e 10m. Considerou-se que a profundidade do estrato rijo varia consoante a profundidade da ficha, de forma a que a cortina esteja sempre encastrada.

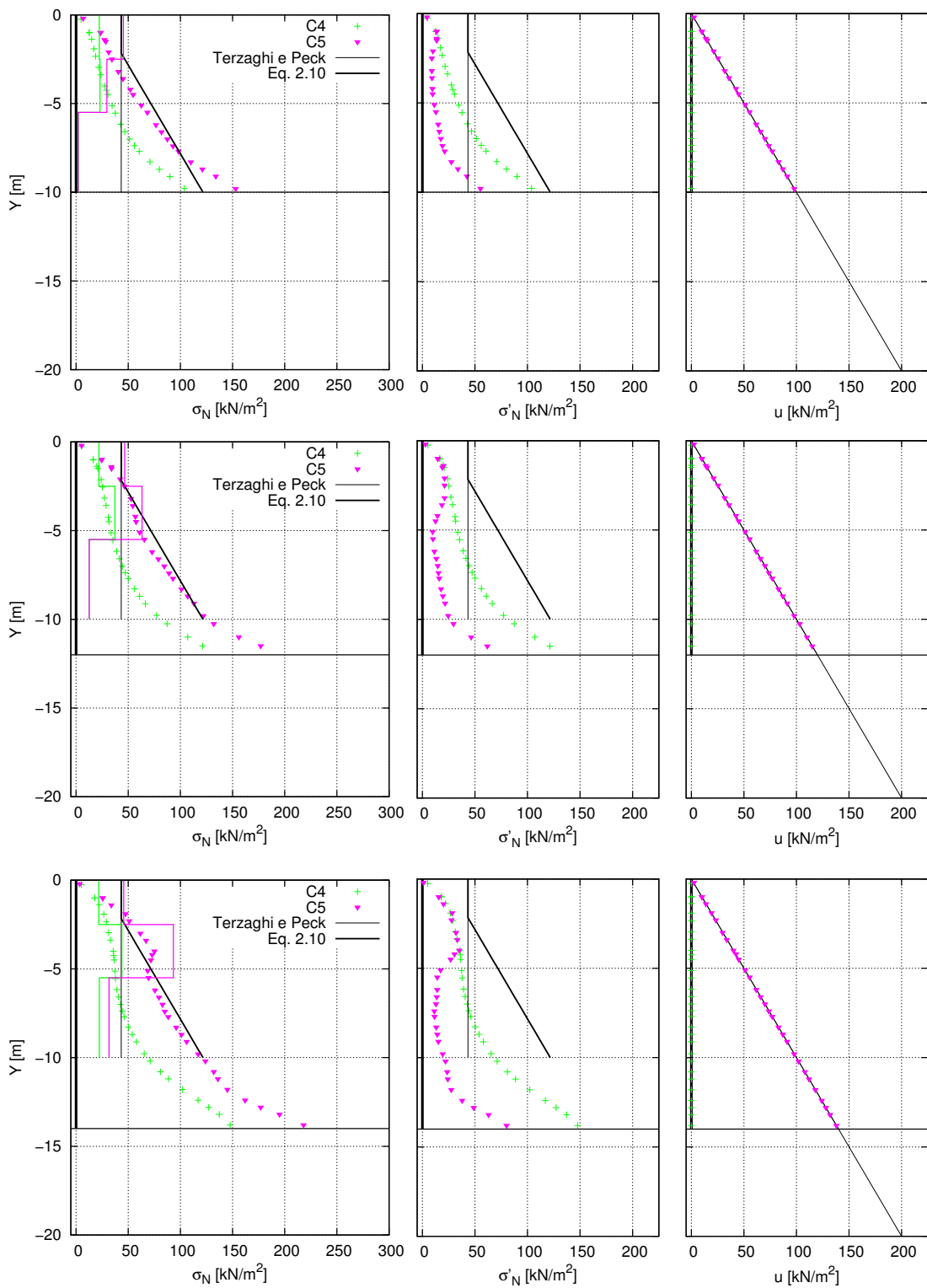
### 5.2.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C4 e C5 são apresentados nas figuras 5.2 e 5.3, para fichas com valores de 0m, 2m, 4m, 6m, 8m e 10m.

Apresenta-se ainda a figura 5.4 na qual são apresentados os resultados obtidos para os cenários C4 e C5 após a última fase de escavação para os diferentes valores adoptados para a ficha. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4 e serão abordadas na secção 5.2.3.

A análise dos resultados apresentados nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4 permite constatar o seguinte:

- cenário C4: as tensões totais e as tensões efectivas são iguais e as pressões intersticiais são nulas dado que não há nível freático elevado. Para todos os valores adoptados para a ficha a distribuição de tensões totais na cortina aproxima-se dos diagramas aparentes de Terzaghi e Peck, não havendo grandes diferenças entre os resultados obtidos para cada valor adoptado para a ficha. Contudo, é possível observar uma diferença nas distribuições de pressões para valores muito pequenos de  $D$ , nomeadamente 0 e 2m, permitindo perceber que há maior pressão para menores valores de  $D$  para maiores profundidades e o inverso mais superficialmente.



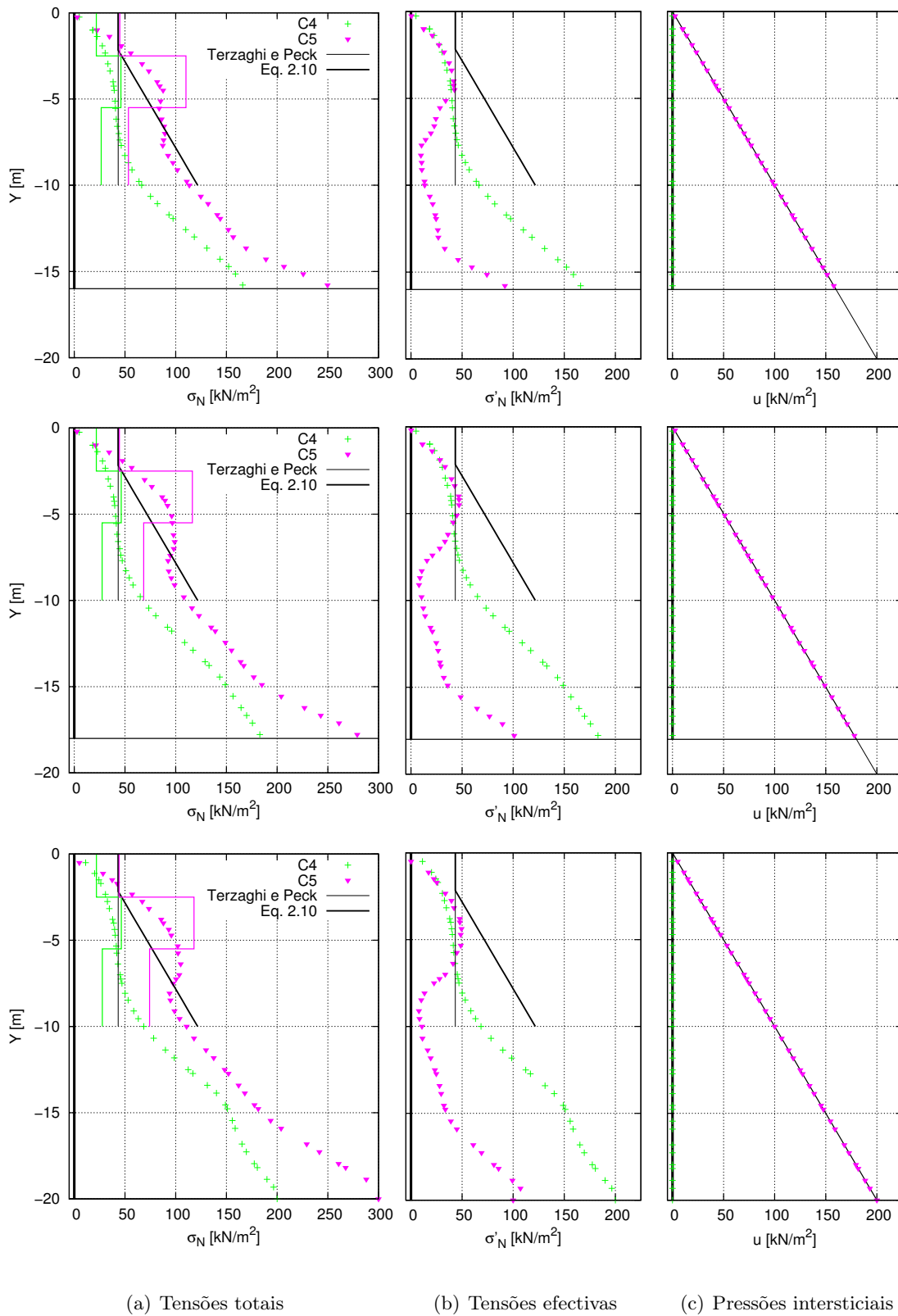
(a) Tensões totais

(b) Tensões efectivas

(c) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 5.2: Pressões na cortina para D=0m (em cima), D=2m (ao centro) e D=4m (em baixo): Comparação entre os cenários C4 e C5



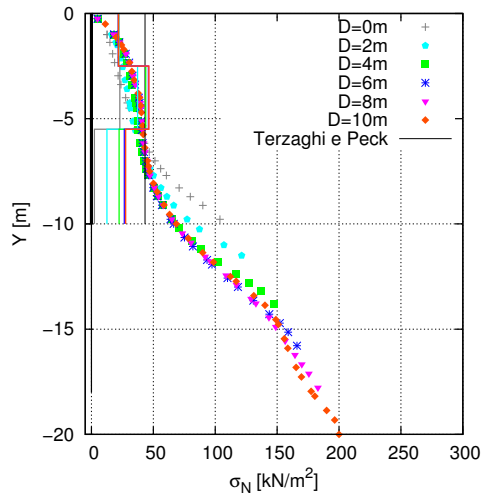
(a) Tensões totais

(b) Tensões efectivas

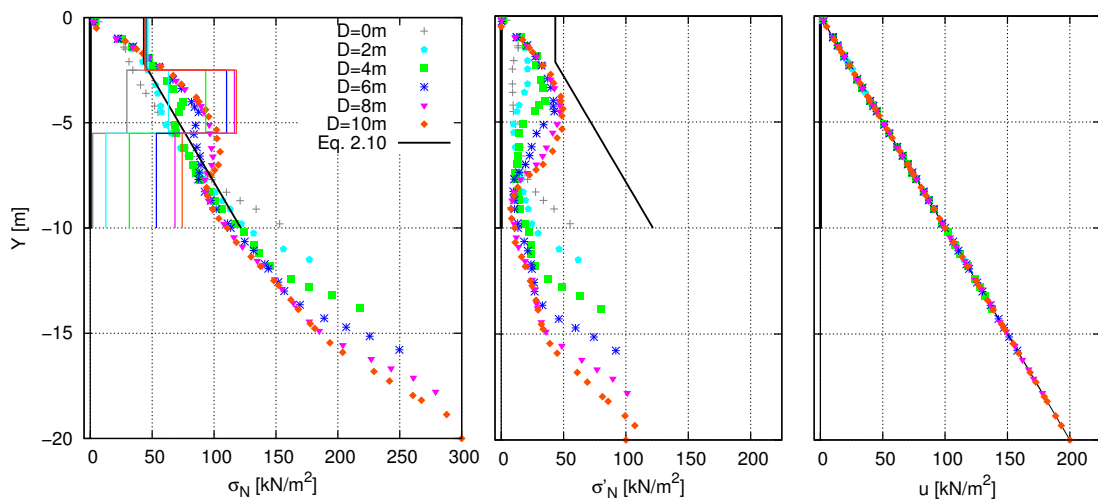
(c) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada — Pressão aparente

Figura 5.3: Pressões na cortina para D=6m (em cima), D=8m (ao centro) e D=10m (em baixo): Comparação entre os cenários C4 e C5



(a) Tensões totais



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 5.4: Pressões na cortina para o cenário C4 (em cima) e para o cenário C5 (em baixo): Influência da variação da ficha da cortina

- cenário C5: as pressões intersticiais são iguais às pressões hidrostáticas dado que não há percolação. Genericamente, as pressões são tanto maiores quanto maior é a ficha/profundidade do estrato rígido, o que implica também que as diferenças entre as pressões na cortina nos cenários C4 e C5 são tanto maiores quanto maior a ficha.

### 5.2.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C4 e C5 são apresentados nas figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, para fichas com valores de 0m, 2m, 4m, 6m, 8m e 10m, respectivamente.

Apresenta-se ainda a figura 5.11 na qual são apresentados os resultados obtidos para os cenários C4 e C5 após a última fase de escavação para os diferentes valores adoptados para a ficha.

A partir da análise das figuras 5.5 a 5.11, é possível constatar o seguinte:

- os deslocamentos sofridos pela cortina e pelo solo no tardoz desta são sempre substancialmente superiores no cenário C5 quando comparados ao cenário C4;
- para o cenário C4 os deslocamentos observados não apresentam grandes distinções entre os diferentes valores adoptados para a ficha;
- para o cenário C5 os deslocamentos são tanto maiores quanto maior for o valor adoptado para a ficha. O tipo de deformada é semelhante para todos os valores adoptados para a ficha.

### 5.2.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C4 e C5, para fichas com valores de 0m a 10m, são apresentados na tabela 5.1. Apresenta-se ainda a tabela 5.2 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a ficha.

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C4 e C5 para fichas com valores de 0m, 2m, 4m, 6m, 8m e 10m são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 5.2(a), 5.3(a), 5.4(a) e 5.4(b)).

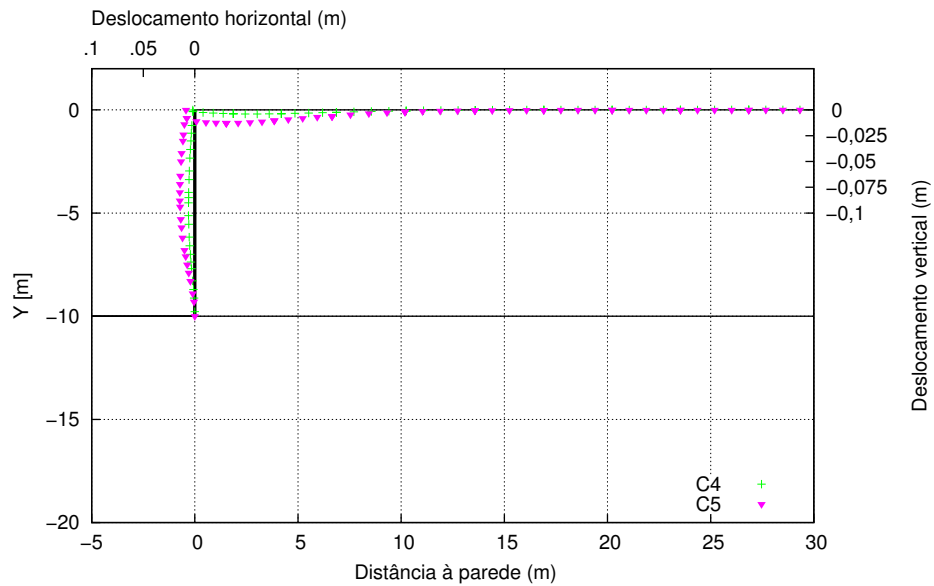


Figura 5.5: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para  $D=0\text{m}$ : Comparação entre os cenários C4 e C5

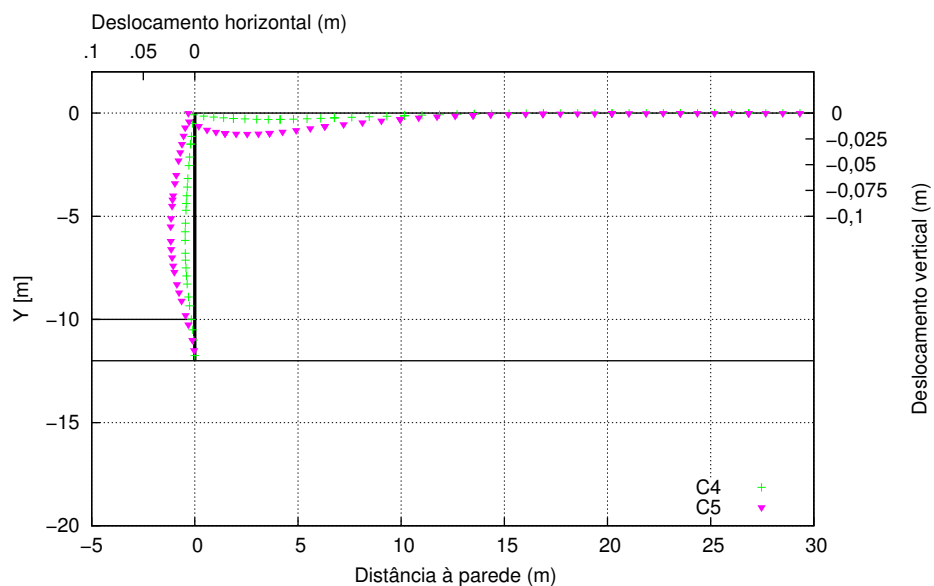


Figura 5.6: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para  $D=2\text{m}$ : Comparação entre os cenários C4 e C5

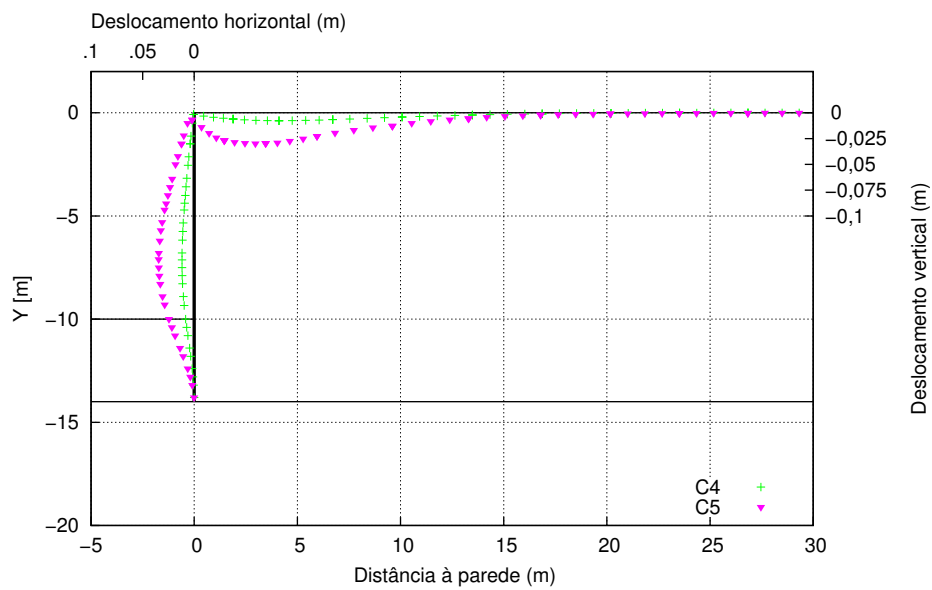


Figura 5.7: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para D=4m: Comparação entre os cenários C4 e C5

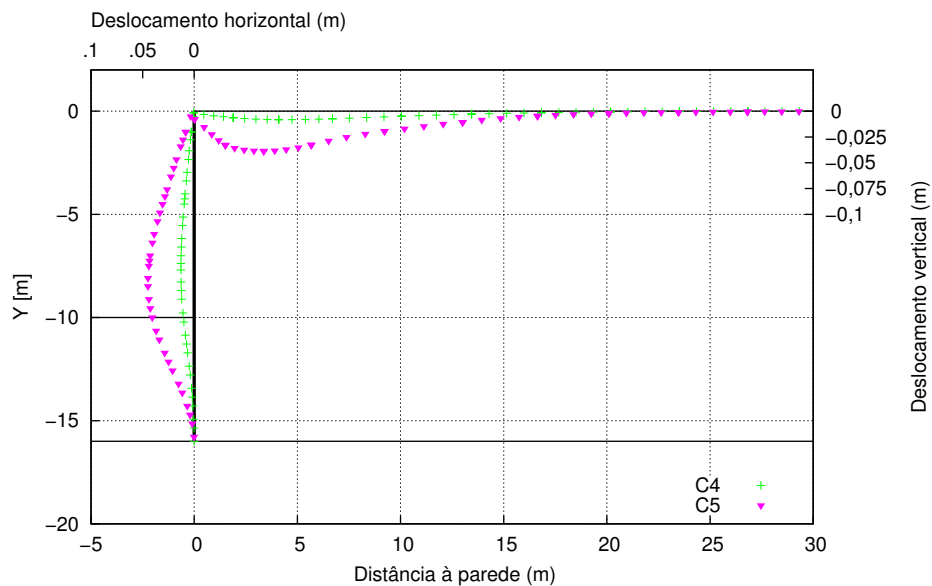


Figura 5.8: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para D=6m: Comparação entre os cenários C4 e C5

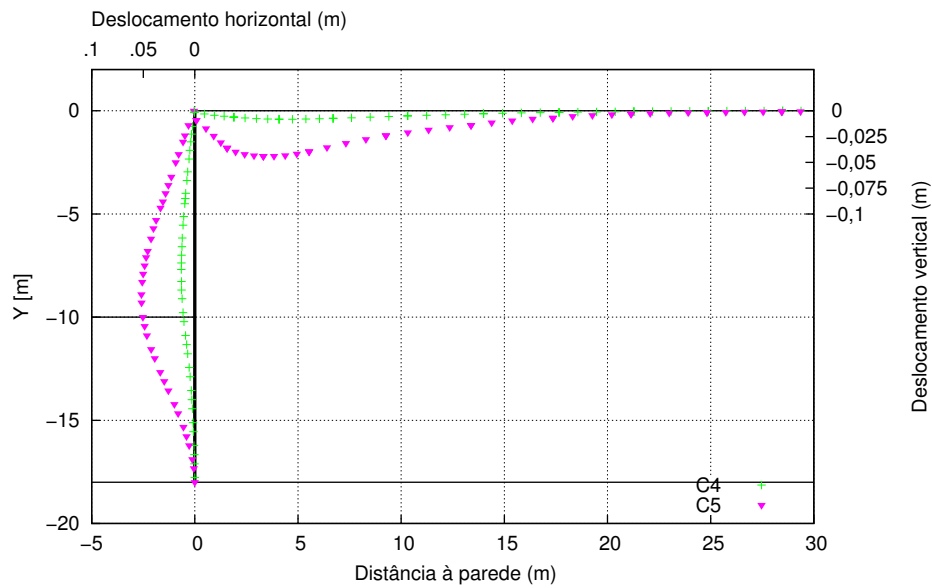


Figura 5.9: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para D=8m: Comparação entre os cenários C4 e C5

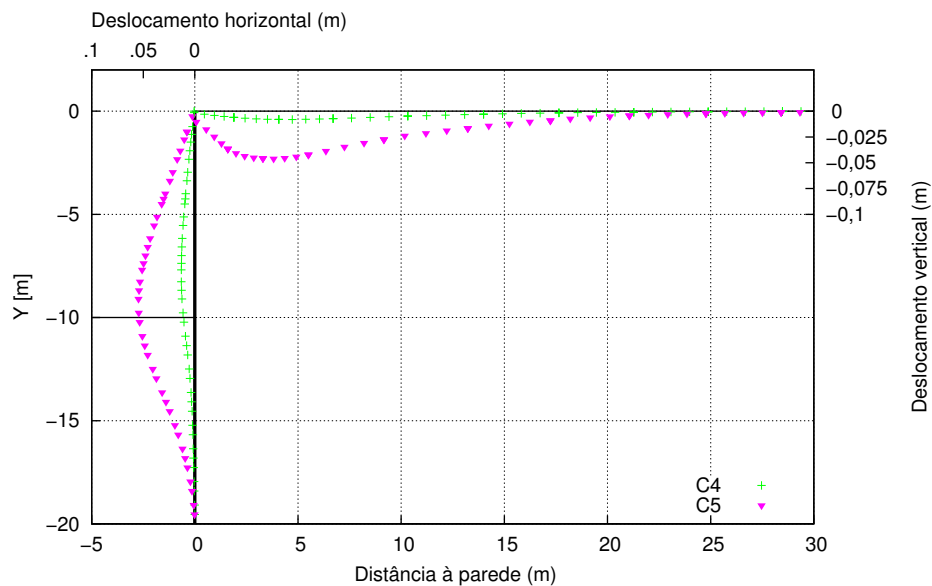


Figura 5.10: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para D=10m: Comparação entre os cenários C4 e C5

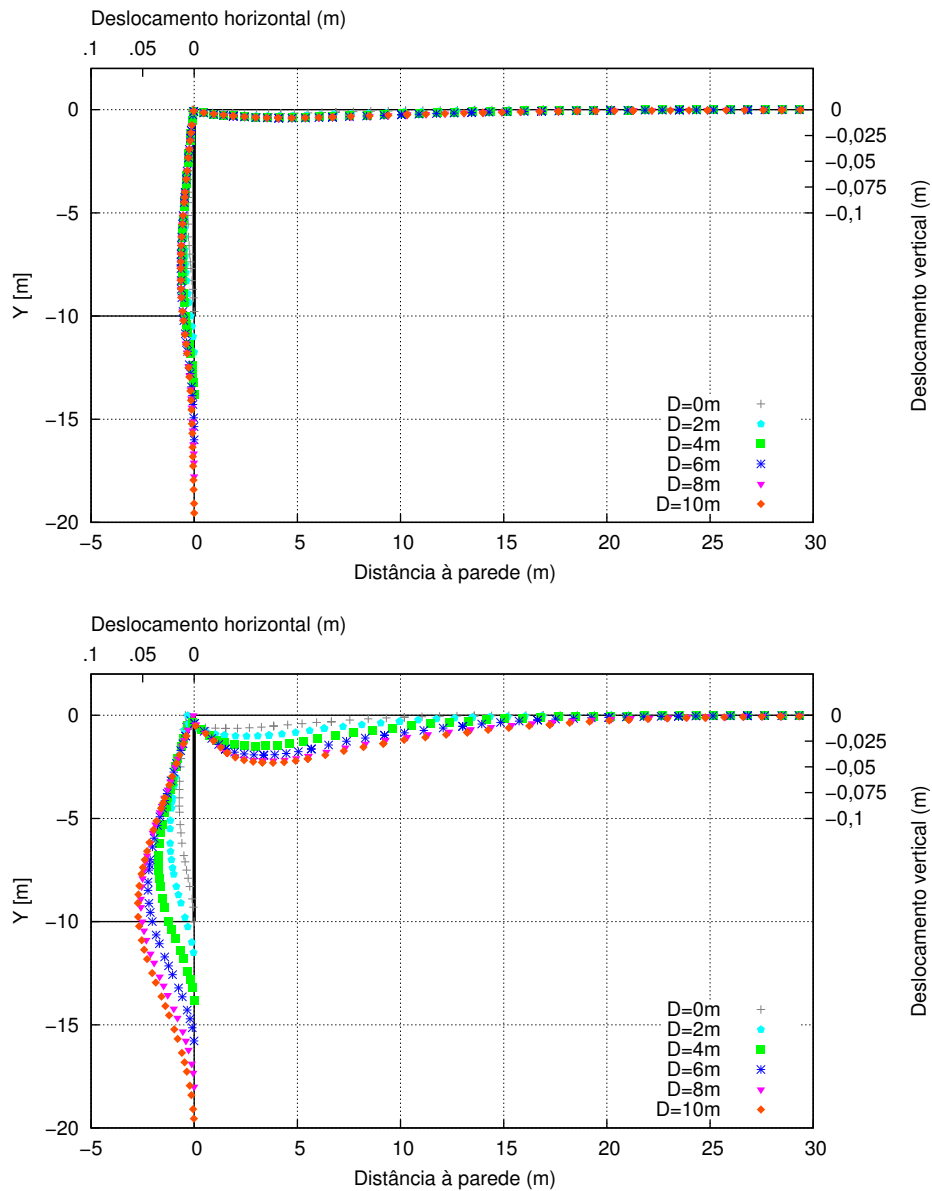


Figura 5.11: Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de para o cenário C4 (em cima) e para o cenário C5 (em baixo): Influência da variação da ficha da cortina

Tabela 5.1: Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da ficha da cortina

		Forças nas escoras [kN/m]					
		D=0m	D=2m	D=4m	D=6m	D=8m	D=10m
Escora		4 <sup>a</sup> Escavação					
C4	1 <sup>a</sup>	55,53	54,33	51,66	50,25	50,19	50,43
	2 <sup>a</sup>	68,89	111,89	131,55	137,92	139,03	139,33
	3 <sup>a</sup>	10,85	56,42	100,51	119,41	123,48	124,47
	Σ	135,27	222,65	283,72	307,59	312,70	314,23
C5	1 <sup>a</sup>	113,46	113,36	93,33	71,38	58,61	54,19
	2 <sup>a</sup>	88,68	189,83	279,93	330,49	349,26	354,23
	3 <sup>a</sup>	8,98	56,88	142,03	240,44	307,88	334,24
	Σ	211,12	360,07	515,29	642,32	715,75	742,66

Tabela 5.2: Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da ficha da cortina

		Forças nas escoras [kN/m]					
		D=0m	D=2m	D=4m	D=6m	D=8m	D=10m
Escora		Max					
C4	1 <sup>a</sup>	55,53	54,91	54,46	54,27	54,48	54,71
	2 <sup>a</sup>	68,89	111,99	131,55	137,92	139,03	139,33
	3 <sup>a</sup>	10,85	56,47	100,51	119,41	123,48	124,47
	Σ	135,27	223,37	286,51	311,61	316,99	318,51
C5	1 <sup>a</sup>	113,46	116,60	114,19	112,37	111,25	110,58
	2 <sup>a</sup>	88,68	189,83	279,93	330,49	349,26	354,23
	3 <sup>a</sup>	8,98	56,88	142,03	240,44	307,88	334,24
	Σ	211,12	363,31	536,15	683,31	768,38	799,05

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- a influência da variação da ficha sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é bem mais significativa no cenário C5 do que no cenário C4.
- globalmente falando, tanto para o cenário C4 como para o cenário C5, a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras e quanto maior o valor adoptado para a ficha/profundidade do estrato rijo, maiores são as forças instaladas nas escoras.

### 5.3 Influência da Rigidez Axial das Escoras

Fez-se, a partir do caso base, a variação da rigidez axial das escoras, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C4 e C5 (figuras 3.3(d) e 3.3(e)).

Adoptou-se para a rigidez axial das escoras três valores distintos:  $EA = 25000\text{kN/m}$ ,  $EA = 120000\text{kN/m}$  (caso base) e  $EA = 600000\text{kN/m}$ . O afastamento, o comprimento e

a profundidade de instalação das escoras mantêm-se iguais aos do caso base.

### 5.3.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a rigidez axial das escoras são apresentados na figura 5.12. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 5.12 e serão abordadas na secção 5.3.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 5.12 permite constatar o seguinte:

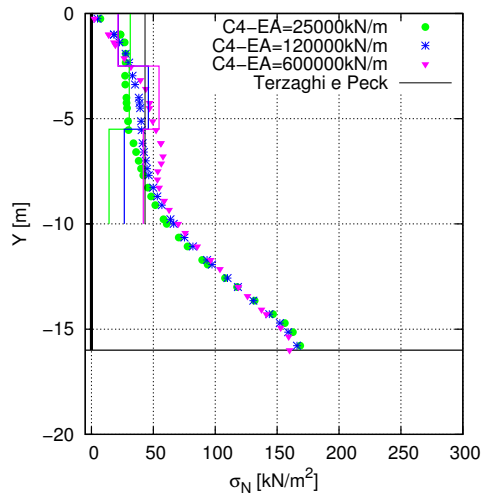
- cenário C4: genericamente falando, as pressões na fase final são tanto maiores quanto maior for a rigidez axial das escoras, o que corresponde ao esperado, dado que maior rigidez implica menor deslocamento e, portanto, maiores pressões na cortina. A excepção parece ocorrer para pequenas profundidades, em que, para a última fase, se verifica o inverso.
- cenário C5: para profundidades intermédias, as pressões na fase final são tanto maiores quanto maior for a rigidez axial das escoras, o que corresponde ao esperado, dado que maior rigidez implica menor deslocamento e, portanto, maiores pressões na cortina. No entanto, para os primeiros e últimos metros de profundidade, para as situações analisadas, a distribuição de tensões totais na cortina não parece depender substancialmente da rigidez axial das escoras.

### 5.3.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

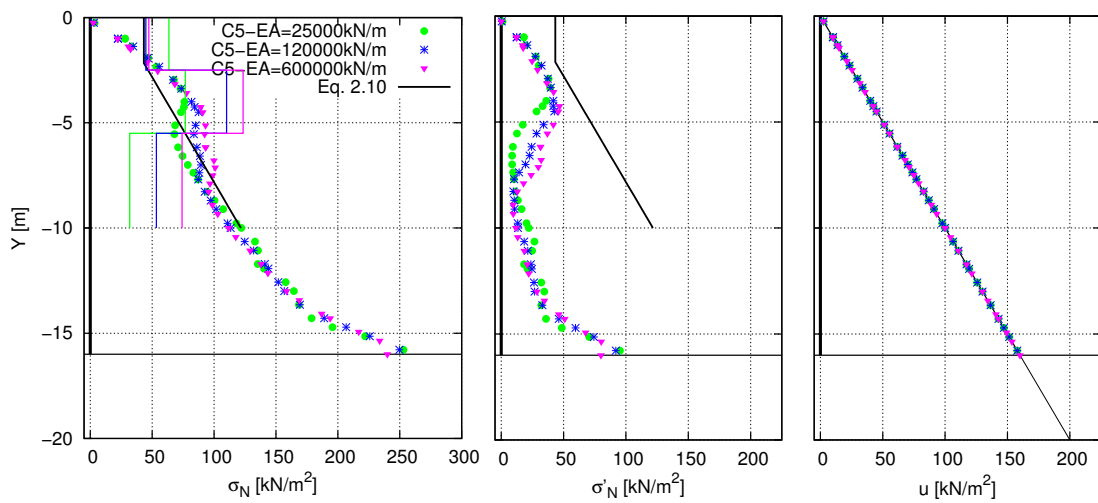
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a rigidez axial das escoras são apresentados nas figuras 5.13 e 5.14.

A partir da análise das figuras 5.13 e 5.14, é possível constatar o seguinte:

- tanto para o cenário C4 como para o cenário C5 os deslocamentos são tanto maiores quanto menor for o valor adoptado para a rigidez axial das escoras. No entanto, as diferenças observadas são mais significativas no cenário C5. Esta influência é mais significativa, nos deslocamentos calculados, quando a rigidez passa de 120000kN/m para 25000kN/m do que de 600000kN/m para 120000kN/m.



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 5.12: Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação da rigidez das escoras

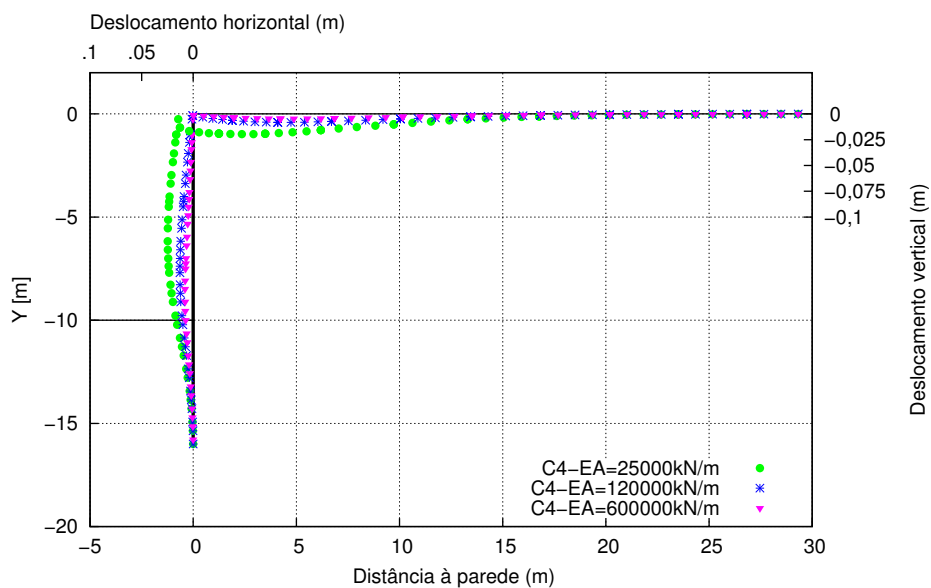


Figura 5.13: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C4: Influência da variação da rigidez das escoras

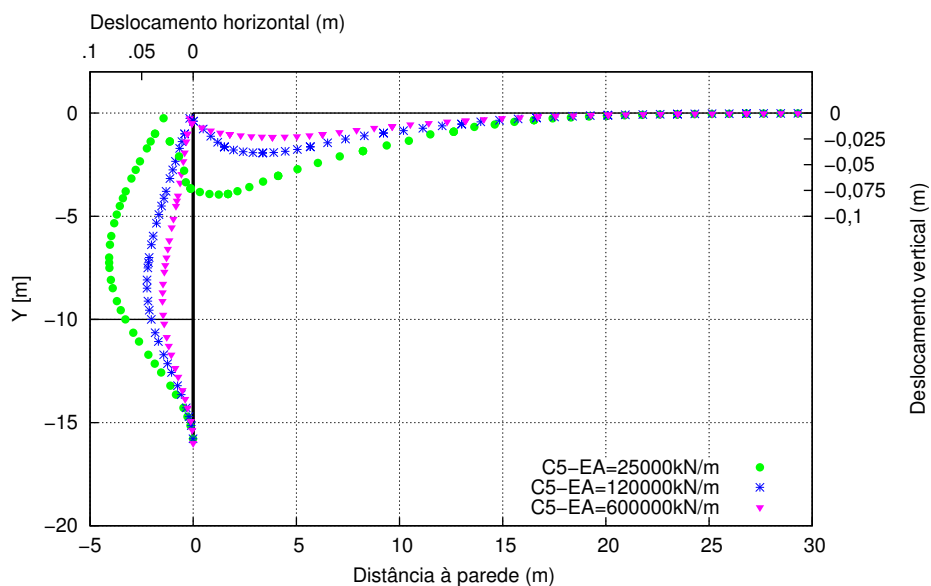


Figura 5.14: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C5: Influência da variação da rigidez das escoras

### 5.3.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a rigidez axial das escoras são apresentados na tabela 5.3. Apresenta-se ainda a tabela 5.4 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a rigidez axial das escoras.

Tabela 5.3: Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da rigidez das escoras

		Forças nas escoras [kN/m]		
		EA=25000kN/m	EA=120000kN/m	EA=600000kN/m
Escora		4ª Escavação		
C4	1ª	78,31	50,25	27,71
	2ª	91,57	137,92	163,92
	3ª	64,09	119,41	188,41
	Σ	233,97	307,59	380,05
C5	1ª	158,30	71,38	25,84
	2ª	230,41	330,49	350,03
	3ª	143,62	240,44	333,50
	Σ	532,33	642,32	709,37

Tabela 5.4: Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da rigidez das escoras

		Forças nas escoras [kN/m]		
		EA=25000kN/m	EA=120000kN/m	EA=600000kN/m
Escora		Max		
C4	1ª	78,31	54,27	53,61
	2ª	91,57	137,92	163,92
	3ª	64,09	119,41	188,41
	Σ	233,97	311,61	405,94
C5	1ª	158,89	112,37	118,28
	2ª	230,41	330,49	370,29
	3ª	143,62	240,44	333,50
	Σ	532,92	683,31	822,07

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a rigidez axial das escoras são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 5.12(a) e 5.12(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- a influência da variação da rigidez axial das escoras sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é ligeiramente mais significativa no cenário C5 do que no cenário C4.

- de uma forma global, tanto para o cenário C4 como para o cenário C5, a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras e as forças são tanto maiores quanto maior é a rigidez das escoras.

## 5.4 Influência da Rigidez da Parede

Fez-se, a partir do caso base, a variação da rigidez da parede, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C4 e C5 (figuras 3.3(d) e 3.3(e)).

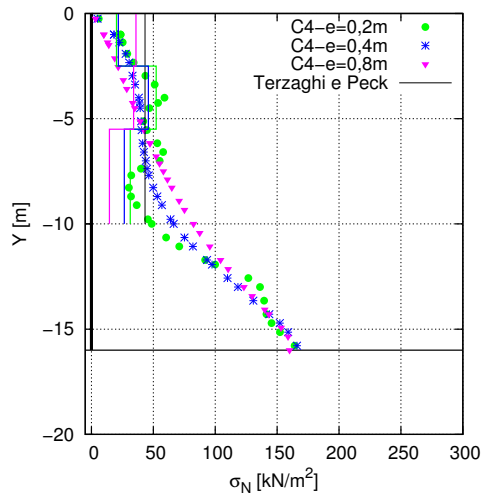
Adoptou-se diferentes valores para a espessura da parede, traduzindo-se portanto em diferentes valores tanto para a rigidez axial, como para a rigidez a flexão da parede, e ainda para o peso por metro por metro. Estes valores foram os mesmos adoptados na secção 4.4, ver tabela 4.6. Os restantes parâmetros, tais como a altura da parede e o coeficiente de Poisson, mantêm-se iguais aos do caso base.

### 5.4.1 Pressões na Cortina

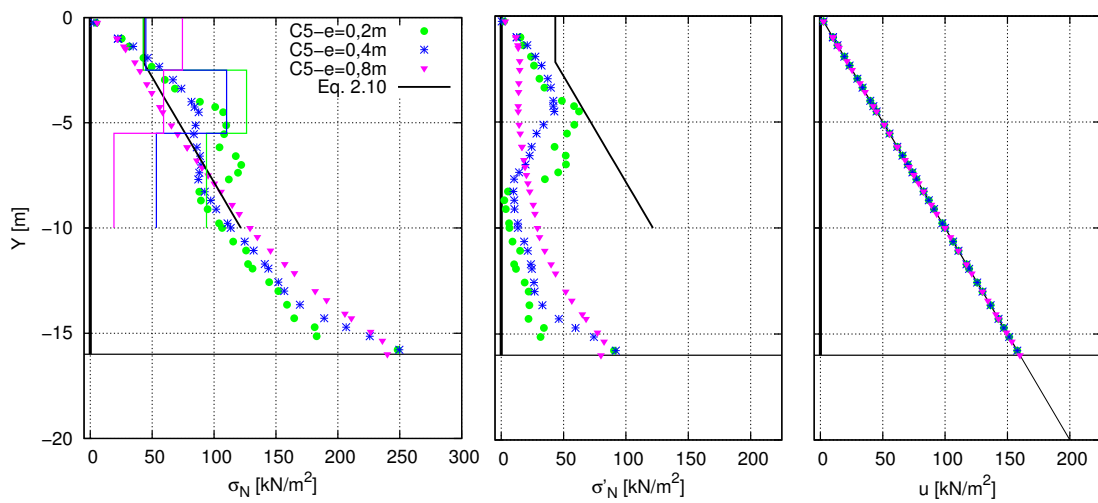
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina são apresentados na figura 5.15. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 5.15 e serão abordadas na secção 5.4.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 5.15 permite constatar o seguinte:

- cenário C4: para a parede muito flexível ( $e=0,2\text{m}$  -  $EI = 20000\text{kN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$ ), há grande irregularidade na distribuição de pressões após à última fase de escavação; para os dois outros valores a distribuição é mais regular, constatando-se que para a maior rigidez ( $e=0,8\text{m}$  -  $EI = 1280000\text{kN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$ ) tem-se, em profundidade, mais pressão do que para  $e=0,4\text{m}$  ( $EI = 160000\text{kN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$ ) e que o inverso verifica-se mais superficialmente.
- cenário C5: quanto menor a rigidez mais irregular é a distribuição de pressões após à última fase de escavação. Com efeito, para a parede muito flexível ( $e=0,2\text{m}$  -  $EI = 20000\text{kN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$ ) verifica-se que há grande irregularidade. Para a maior rigidez ( $e=0,8\text{m}$  -  $EI = 1280000\text{kN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$ ) tem-se, para  $z < 0,75H$ , menor pressão do que para  $e=0,4\text{m}$  ( $EI = 160000\text{kN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$ ) e o inverso verifica-se em maiores profundidades.



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 5.15: Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação da rigidez da parede

### 5.4.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina são apresentados nas figuras 5.16 e 5.17.

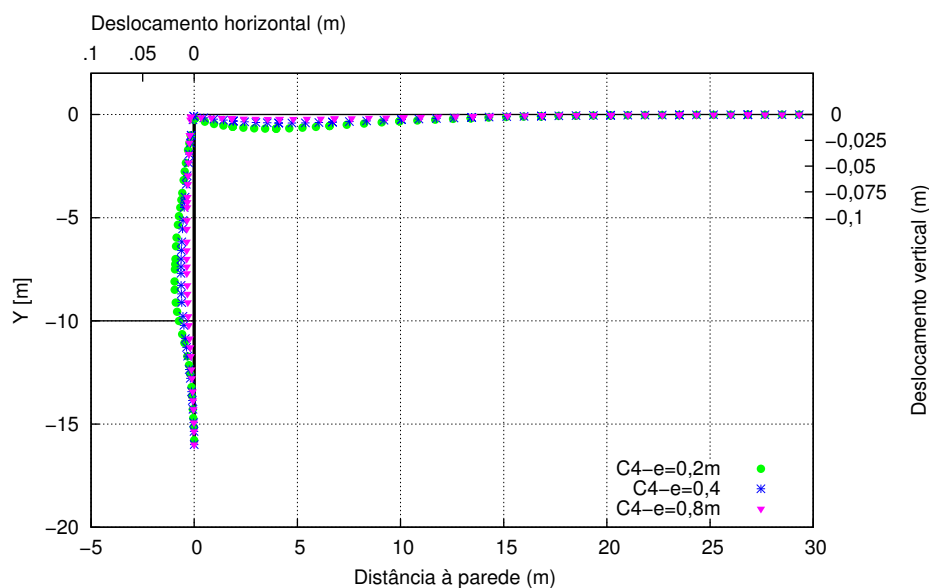


Figura 5.16: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C4: Influência da variação da rigidez da parede

A partir da análise das figuras 5.16 e 5.17, é possível constatar o seguinte:

- para o cenário C4 os deslocamentos observados não apresentam grandes diferenças para os valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina. Contudo, quanto menor o valor adoptado para a rigidez à flexão da cortina, maiores são os deslocamentos observados;
- para o cenário C5 os deslocamentos são tanto maiores quanto menor for o valor adoptado para a rigidez à flexão da cortina. Com efeito, os deslocamentos são consideravelmente superiores para o caso em que  $e=0,2\text{m}$  ( $EI = 20000\text{kN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$ ).

### 5.4.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina são apresentados na tabela 5.5. Apresenta-se ainda a tabela 5.6 na qual são apresentadas as cargas máximas

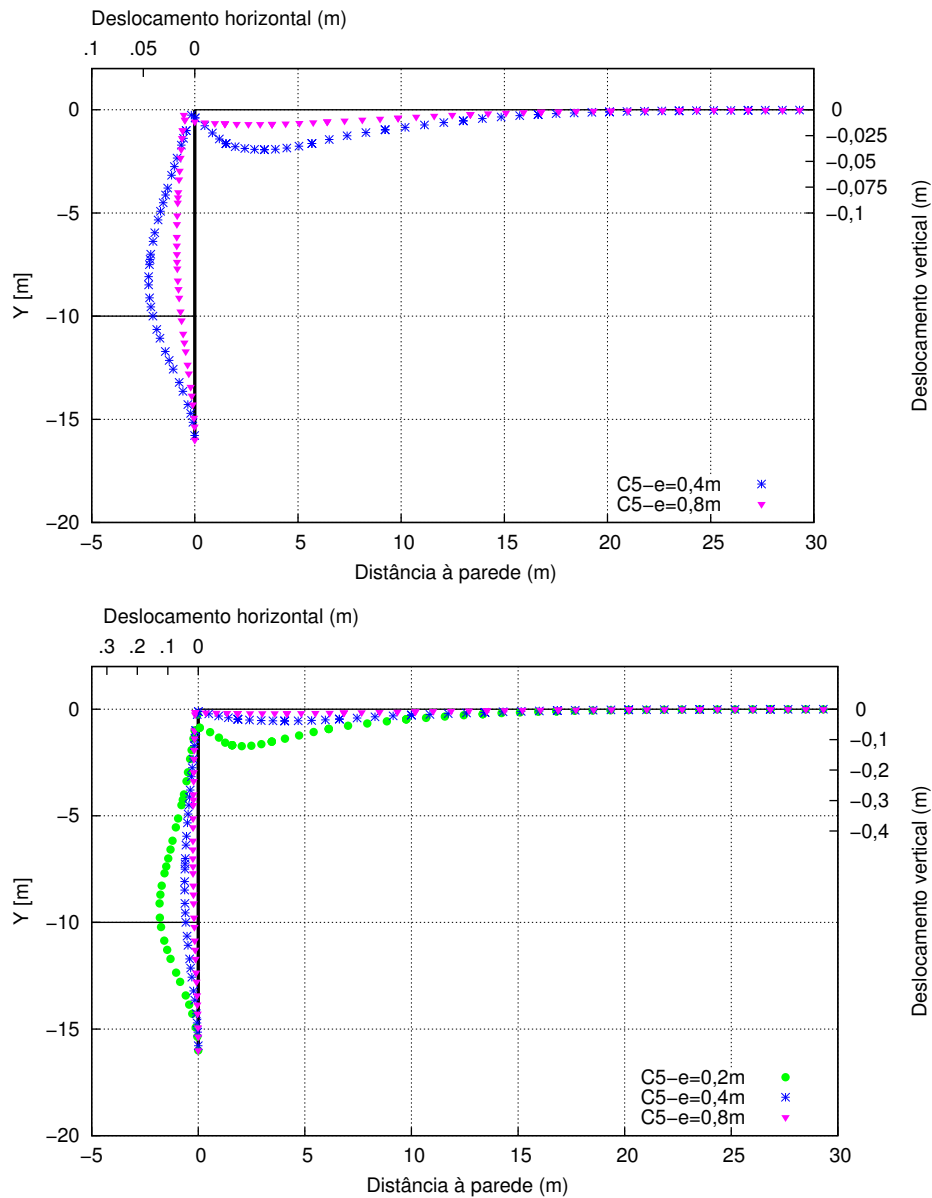


Figura 5.17: Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de esta para o cenário C5: Influência da variação da rigidez da parede. O gráfico de baixo corresponde ao mesmo caso do gráfico de cima com, no entanto, uma diferente escala de deslocamentos que permite ver os deslocamentos para  $e=0,2\text{m}$ .

nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina.

Tabela 5.5: Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da rigidez da parede

		Forças nas escoras [kN/m]		
		e=0,2m	e=0,4m	e=0,8m
Escora		4ª Escavação		
C4	1ª	50,53	50,25	90,03
	2ª	157,05	137,92	102,12
	3ª	141,21	119,41	65,24
	Σ	348,79	307,59	257,40
C5	1ª	38,89	71,38	186,10
	2ª	315,71	330,49	177,76
	3ª	422,55	240,44	86,33
	Σ	777,15	642,32	450,19

Tabela 5.6: Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da rigidez da parede

		Forças nas escoras [kN/m]		
		e=0,2m	e=0,4m	e=0,8m
Escora		Max		
C4	1ª	50,53	54,27	90,03
	2ª	157,05	137,92	102,12
	3ª	141,21	119,41	65,24
	Σ	348,79	311,61	257,40
C5	1ª	106,87	112,37	186,10
	2ª	378,75	330,49	177,76
	3ª	422,55	240,44	86,33
	Σ	908,17	683,31	450,19

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a rigidez à flexão da cortina são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 5.15(a) e 5.15(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- a influência da variação da rigidez da cortina sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é bem mais significativa no cenário C5 do que no cenário C4.
- de um modo geral, tanto para o cenário C4 como para o cenário C5, a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras e as forças são tanto maiores quanto menor é a rigidez da cortina.

## 5.5 Influência da Largura de Escavação

Fez-se, a partir do caso base, a variação da largura de escavação, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C4 e C5 (figuras 3.3(d) e 3.3(e)).

Adoptou-se três valores distintos para a largura de escavação:  $L=6\text{m}$ ,  $L=10\text{m}$  (caso base) e  $L=20\text{m}$ . Note-se que o afastamento e a profundidade de instalação das escoras mantêm-se iguais aos do caso base, alterando-se apenas o comprimento.

### 5.5.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação são apresentados na figura 5.18. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 5.18 e serão abordadas na secção 5.5.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 5.18 permite constatar o seguinte:

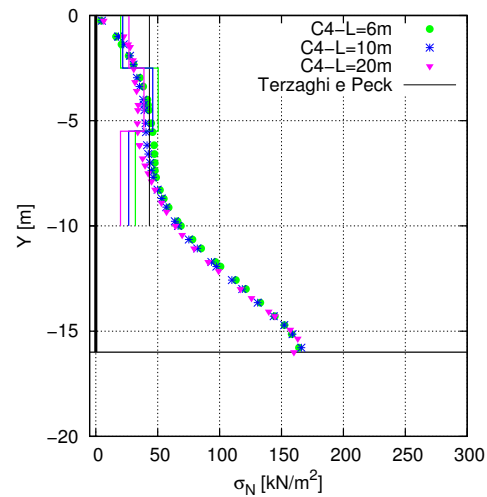
- cenário C4: as pressões são praticamente as mesmas, com uma ligeira tendência para menor pressão em profundidade e maior à superfície para os maiores valores de  $L$ .
- cenário C5: as pressões são praticamente as mesmas, com uma ligeira tendência para menor pressão para os maiores valores de  $L$  para  $0.5H < z < 0.8H$ .

### 5.5.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

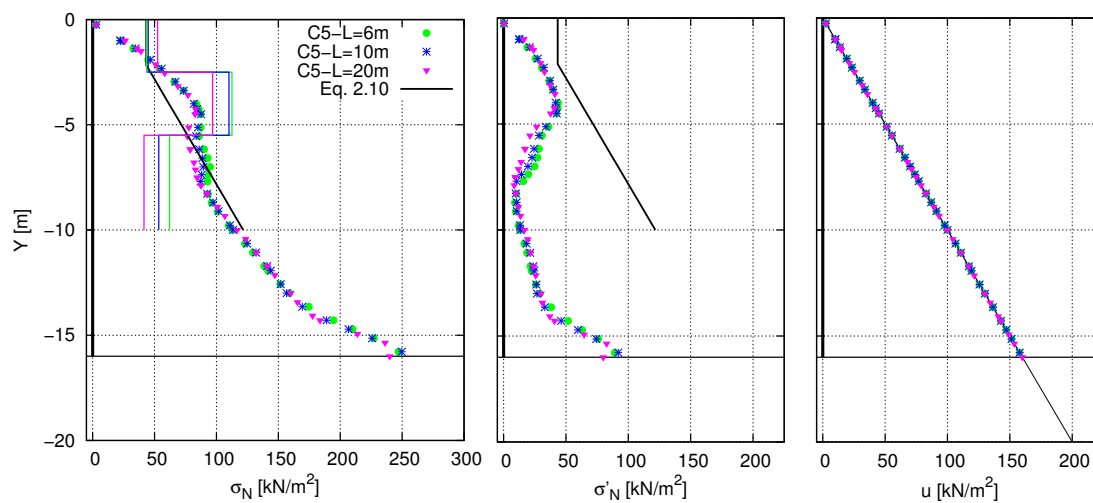
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação são apresentados nas figuras 5.19 e 5.20.

A partir da análise das figuras 5.19 e 5.20, é possível constatar o seguinte:

- para o cenário C4 os deslocamentos observados não apresentam grandes diferenças entre os diferentes valores adoptados para a largura de escavação. Contudo, quanto maior o valor adoptado para a largura de escavação, maiores são os deslocamentos observados;
- para o cenário C5 os deslocamentos são tanto maiores quanto maior for o valor adoptado para a largura de escavação, o oposto do observado para o cenário C3.



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 5.18: Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação da largura de escavação

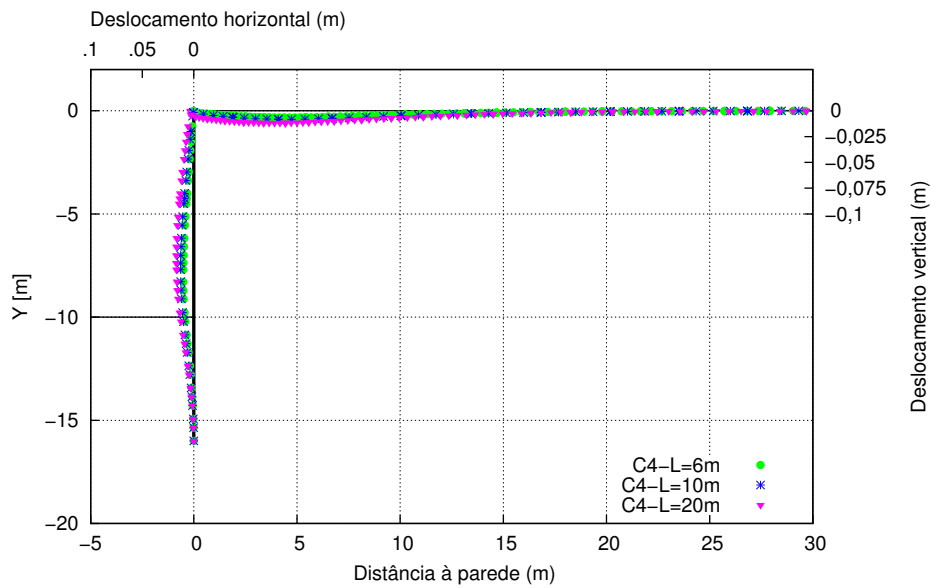


Figura 5.19: Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de para o cenário C4: Influência da variação da largura de escavação

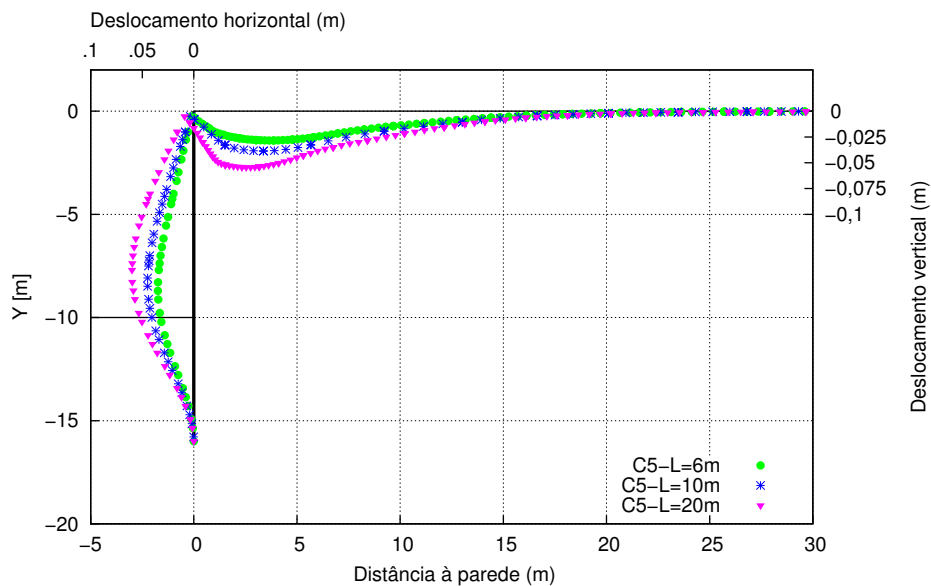


Figura 5.20: Deslocamentos da cortina e do solo no tardo de para o cenário C5: Influência da variação da largura de escavação

### 5.5.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as forças nas escoras para os cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação são apresentados na tabela 5.7. Apresenta-se ainda a tabela 5.8 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação.

Tabela 5.7: Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da largura de escavação

		Forças nas escoras [kN/m]		
		L=6m	L=10m	L=20m
Escora		4ª Escavação		
C4	1ª	41,28	50,25	66,86
	2ª	151,25	137,92	116,69
	3ª	143,75	119,41	89,88
	Σ	336,28	307,59	273,43
C5	1ª	50,24	71,38	112,92
	2ª	337,60	330,49	290,65
	3ª	279,56	240,44	186,55
	Σ	667,40	642,32	590,12

Tabela 5.8: Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da largura de escavação

		Forças nas escoras [kN/m]		
		L=6m	L=10m	L=20m
Escora		Max		
C4	1ª	50,15	54,27	66,86
	2ª	151,25	137,92	116,69
	3ª	143,75	119,41	89,88
	Σ	345,16	311,61	273,43
C5	1ª	108,80	112,37	131,27
	2ª	337,60	330,49	290,65
	3ª	279,56	240,44	186,55
	Σ	725,96	683,31	608,47

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para a largura de escavação são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 5.18(a) e 5.18(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- a influência da variação da largura de escavação sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é bastante semelhante nos cenários C4 e C5;

- de um modo geral, tanto para o cenário C4 como para o cenário C5, a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras e quanto menor é a largura de escavação, maiores são as forças instaladas nas escoras.

## 5.6 Influência da Escala do Problema

Fez-se, a partir do caso base, a variação da escala geométrica do problema, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C4 e C5 (figura 5.21). Os parâmetros que sofreram alterações e os valores adotados constam na tabela 4.12. Note-se que se manteve sempre a relação entre as grandezas.

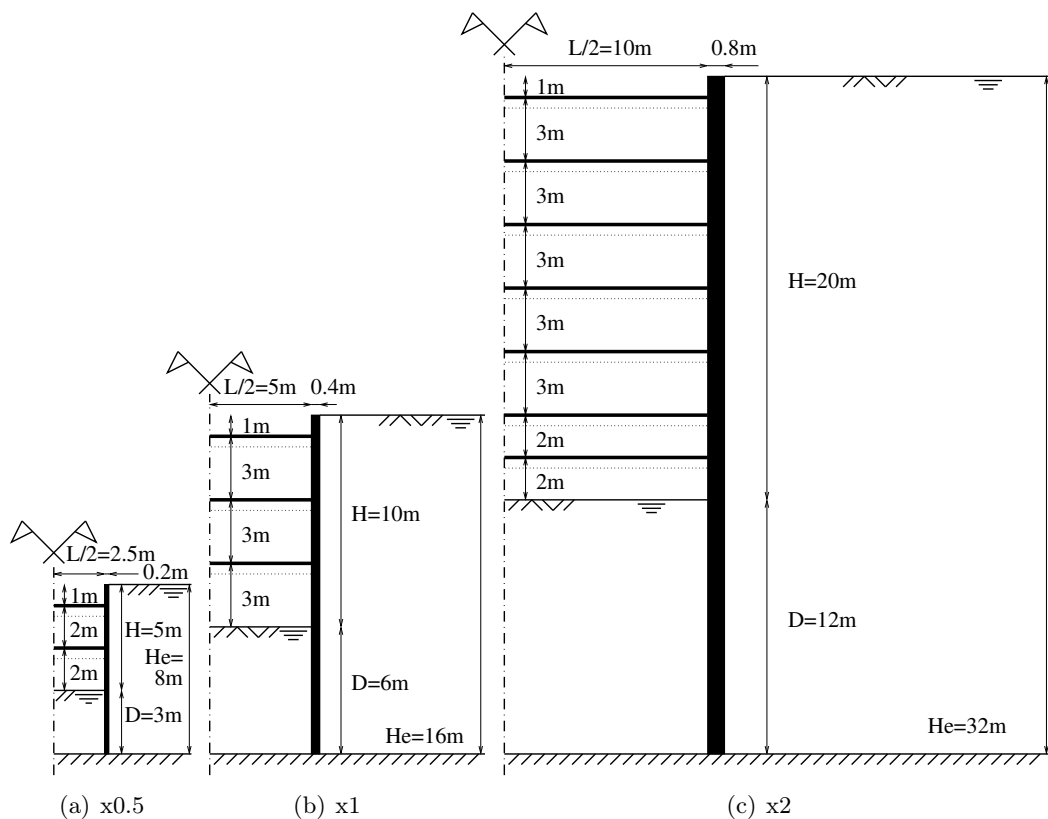


Figura 5.21: Representação esquemática do cenário C5 tal como é abordado na análise da influência da escala do problema

### 5.6.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C4 e C5 para as diferentes escalas adotadas são apresentados na figura 5.22. As

pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 5.22 e serão abordadas na secção 5.6.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 5.22 permite constatar o seguinte:

- tanto para o cenário C4 como para o cenário C5 as distribuições de pressões são bastante semelhantes ao longo da altura de escavação nos três casos, isto é, parecem ter uma relação directa com cada escala adoptada. Em suma, é possível notar que a variação da escala não tem grande influência na distribuição de pressões ao longo da altura de escavação.

### 5.6.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C4 e C5 para as diferentes escalas adoptadas são apresentados nas figuras 5.23 e 5.24.

A partir da análise das figuras 5.23 e 5.24, é possível constatar o seguinte:

- tanto para o cenário C4 como para o C5 os deslocamentos observados parecem ser coerentes entre as três escalas adoptadas. Isto é, ter uma relação directa com cada escala adoptada. Tal como para as pressões na cortina, é possível notar que a variação da escala não tem grande influência nos deslocamentos observados.

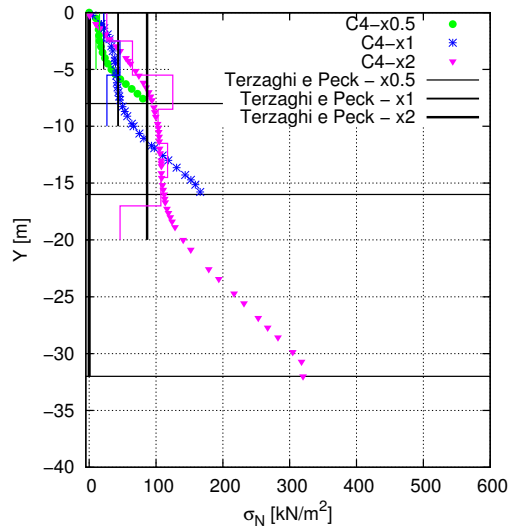
### 5.6.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C4 e C5 para as diferentes escalas adoptadas são apresentados na tabela 5.9. Apresenta-se ainda a tabela 5.10 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C4 e C5 para as diferentes escalas adoptadas.

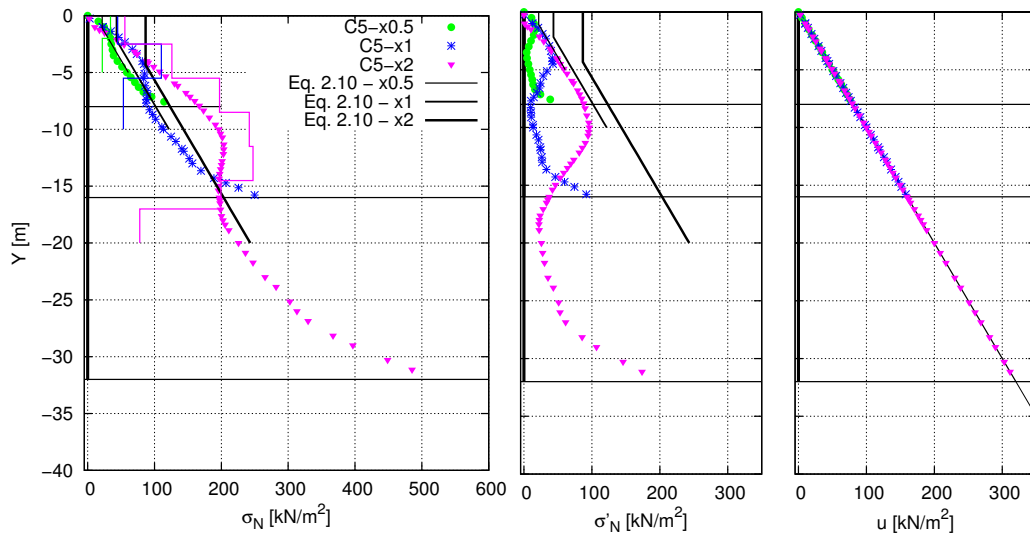
As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C4 e C5 para as diferentes escalas adoptadas são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 5.22(a) e 5.22(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- tanto para o cenário C4 como para o cenário C5, parece haver uma relação de cerca



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 5.22: Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação da escala do problema

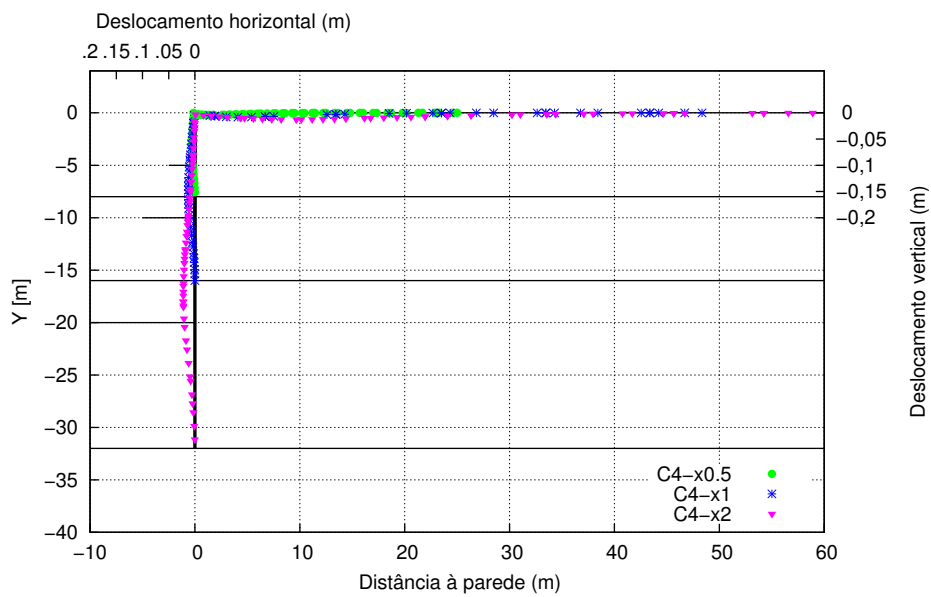


Figura 5.23: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C4: Influência da variação da escala do problema

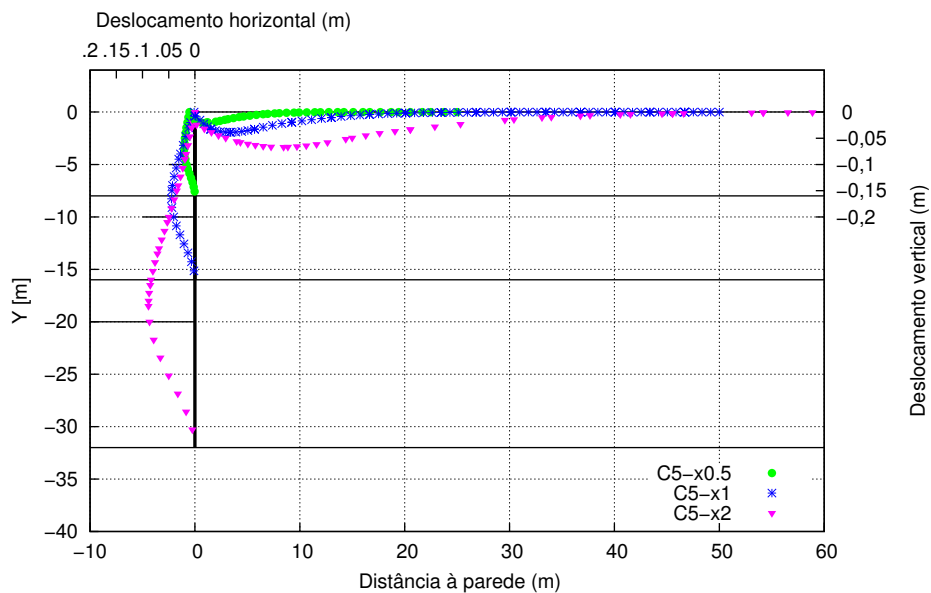


Figura 5.24: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C5: Influência da variação da escala do problema

Tabela 5.9: Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da escala do problema

		Forças nas escoras [kN/m]		
		x0.5	x1	x2
	Escora	3ª Escavação	4ª Escavação	8ª Escavação
C4	1ª	30,99	50,25	-19,08
	2ª	30,93	137,92	185,17
	3ª	-	119,41	375,26
	4ª	-	-	308,89
	5ª	-	-	351,72
	6ª	-	-	268,29
	7ª	-	-	138,46
	Σ	61,92	307,59	1608,73
C5	1ª	68,24	71,38	-68,06
	2ª	65,57	330,49	332,81
	3ª	-	240,44	579,34
	4ª	-	-	725,32
	5ª	-	-	742,31
	6ª	-	-	498,54
	7ª	-	-	234,10
	Σ	133,81	642,32	3044,35

Tabela 5.10: Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação da escala do problema

		Forças nas escoras [kN/m]		
		x0.5	x1	x2
	Escora	Max		
C4	1ª	30,99	54,27	65,96
	2ª	30,93	137,92	194,31
	3ª	-	119,41	375,26
	4ª	-	-	308,89
	5ª	-	-	351,72
	6ª	-	-	268,29
	7ª	-	-	138,46
	Σ	61,92	311,60	1702,90
C5	1ª	68,24	112,37	139,33
	2ª	65,57	330,49	377,83
	3ª	-	240,44	591,99
	4ª	-	-	725,34
	5ª	-	-	742,31
	6ª	-	-	498,54
	7ª	-	-	234,10
	Σ	133,81	683,31	3309,43

de 4 vezes no somatório das cargas nas escoras, ou seja, a carga total em x1 é cerca de 4 vezes a x0.5 e em x2 é 4 vezes a x1.

- de uma forma geral, tanto para o cenário C4, como para o cenário C5 a carga máxima ocorre na última fase de escavação para os últimos níveis de escoras.

## 5.7 Influência das Características Mecânicas do Terreno

Fez-se, a partir do caso base, a variação dos parâmetros de resistência e de deformabilidade do terreno, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C4 e C5 (figuras 3.3(d) e 3.3(e)).

### 5.7.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C4 e C5 para os solos com diferentes características mecânicas são apresentados na figura 5.25. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 5.25 e serão abordadas na seção 5.7.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 5.25 permite constatar o seguinte:

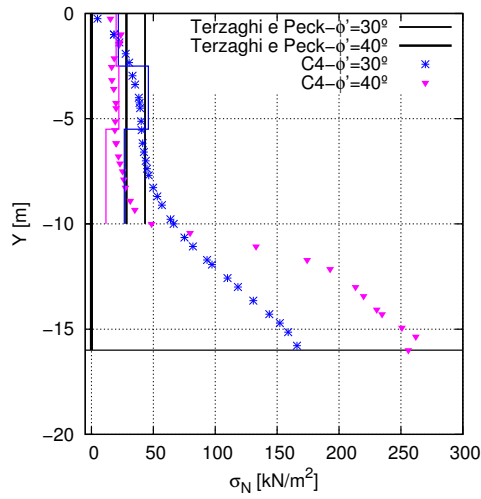
- cenário C4: as distribuições não apresentam grande diferença ao longo da altura de escavação. As diferenças observadas são sobretudo na amplitude, o tipo de andamento verificado é bastante semelhante em ambos os casos. De um modo geral, quanto melhor as características mecânicas do terreno menores são as pressões na cortina.
- cenário C5: até uma profundidade aproximadamente igual a  $0.4H$  as distribuições de pressões não apresentam diferenças apreciáveis; a partir de  $0.4H$  é possível perceber que quanto melhor as características mecânicas do terreno menores são as pressões na cortina.

### 5.7.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

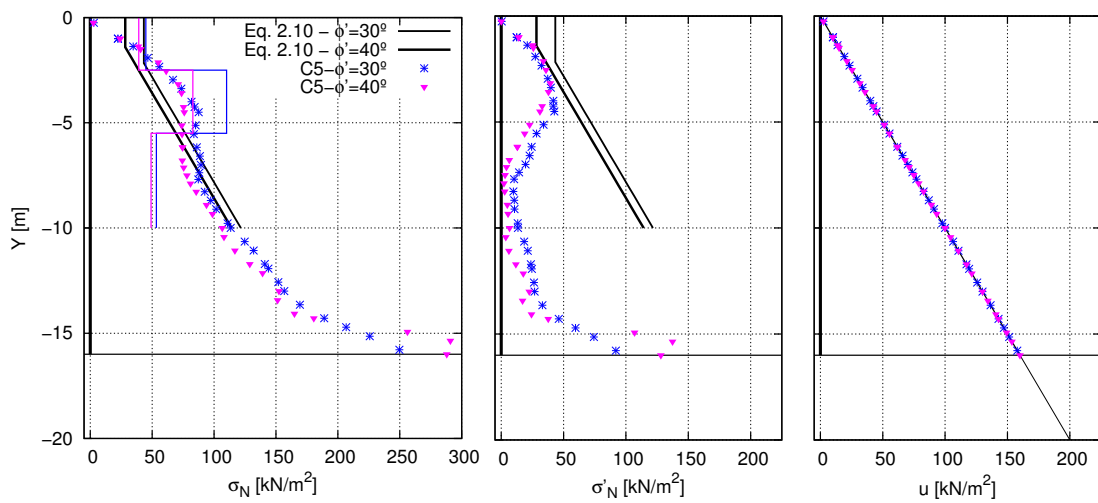
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C4 e C5 para os solos com diferentes características mecânicas são apresentados nas figuras 5.26 e 5.27.

A partir da análise das figuras 5.26 e 5.27, é possível constatar o seguinte:

- para o cenário C4 os deslocamentos observados não apresentam grandes diferenças entre os diferentes valores adotados para os parâmetros de resistência e de deformabilidade do terreno. No entanto, é possível perceber que quanto melhores as características mecânicas do terreno, menores são os deslocamentos observados, ainda que a diferença seja muito subtil;



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 5.25: Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação das características mecânicas do terreno

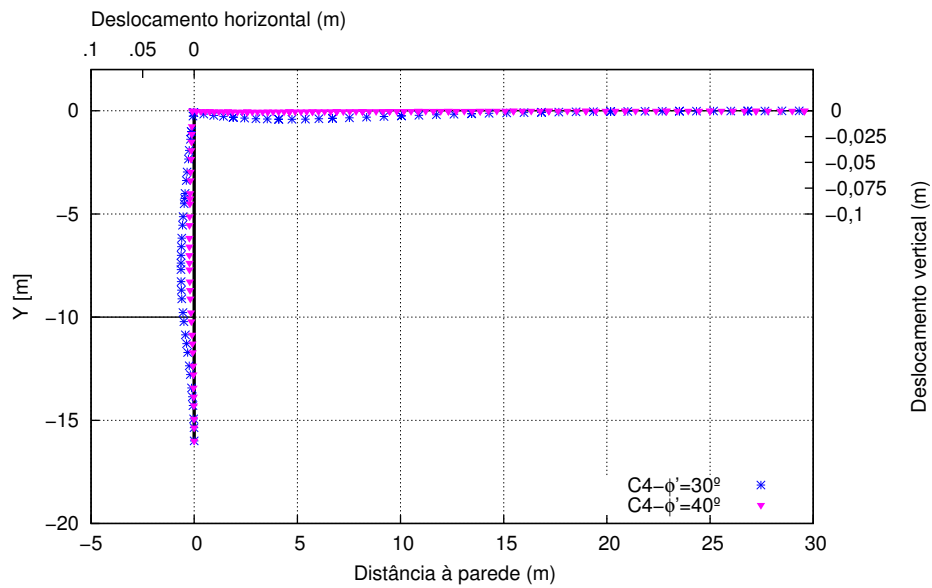


Figura 5.26: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C4: Influência da variação das características mecânicas do terreno

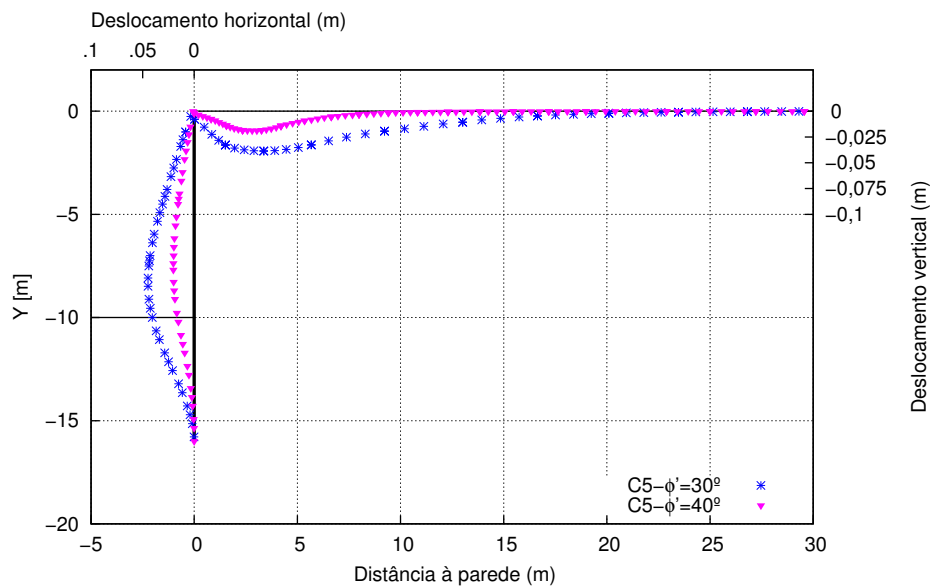


Figura 5.27: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C5: Influência da variação das características mecânicas do terreno

- tal como no cenário C4, para o cenário C5 os deslocamentos são tanto menores quanto melhores forem as características mecânicas do terreno.

### 5.7.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos após a última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C4 e C5 para os solos com diferentes características mecânicas são apresentados na tabela 5.11. Apresenta-se ainda a tabela 5.12 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C4 e C5 para os solos com diferentes características mecânicas.

Tabela 5.11: Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação das características mecânicas do terreno

		Forças nas escoras [kN/m]	
		$\phi' = 30^\circ$	$\phi' = 40^\circ$
	Escora	4ª Escavação	
C4	1ª	50,25	49,80
	2ª	137,92	66,53
	3ª	119,41	52,89
	$\Sigma$	307,59	169,22
C5	1ª	71,38	84,98
	2ª	330,49	248,51
	3ª	240,44	221,19
	$\Sigma$	642,32	554,68

Tabela 5.12: Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação das características mecânicas do terreno

		Forças nas escoras [kN/m]	
		$\phi' = 30^\circ$	$\phi' = 40^\circ$
	Escora	Max	
C4	1ª	54,27	49,80
	2ª	137,92	66,53
	3ª	119,41	52,89
	$\Sigma$	311,60	169,22
C5	1ª	112,37	97,93
	2ª	330,49	248,51
	3ª	240,44	221,19
	$\Sigma$	683,31	567,63

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C4 e C5 para os solos com diferentes características mecânicas são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 5.25(a) e 5.25(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- tal como para as pressões na cortina, a influência das características mecânicas do terreno sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é mais evidente no cenário C4 do que no cenário C5.
- de um modo geral, tanto para o cenário C4 quanto para o cenário C5, a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras e as cargas nas escoras são tanto menores quanto melhores forem as características mecânicas do terreno.

## 5.8 Influência do peso volúmico ( $\phi' = 30^\circ$ )

Fez-se, a partir do caso base, a variação do peso volúmico do solo, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso dos cenários C4 e C5 (figuras 3.3(d) e 3.3(e)).

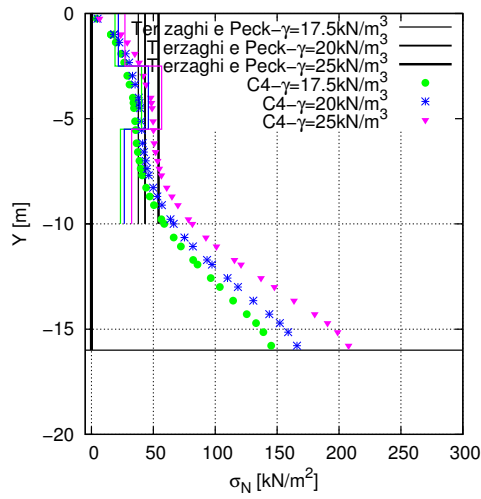
Os valores adoptados para os parâmetros do solo mantêm-se, com excepção apenas do peso volúmico. Adoptou-se para o peso volúmico do solo:  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ ,  $\gamma = 20\text{kN/m}^3$  (caso base) e  $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ . Note-se que para esta análise seria possível a utilização de valores inferiores a  $17.5\text{kN/m}^3$  para o peso volúmico. Contudo, uma vez que se pretende que seja possível a comparação entre todos os cenários, o valor mínimo adoptado para este parâmetro foi o corresponde à situação limite de estabilidade para o cenário 3, cenário condicionante.

### 5.8.1 Pressões na Cortina

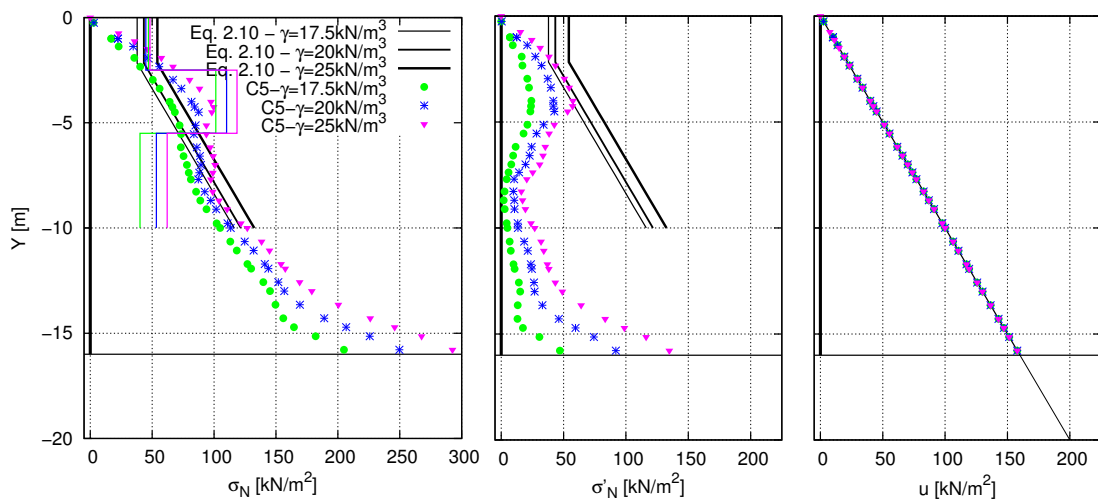
Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentados na figura 5.28. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 5.28 e serão abordadas na secção 5.8.3.

A análise dos resultados apresentados na figura 5.28 permite constatar o seguinte:

- cenário C4: as distribuições de tensões totais na cortina não apresentam grande diferença para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico. As diferenças observadas são sobretudo na amplitude, isto é, quanto maior o peso volúmico do solo maiores são as pressões na cortina, o tipo de andamento verificado é bastante semelhante em todos os casos.
- cenário C5: as diferenças observadas nas distribuições de tensões totais na cortina são sobretudo na amplitude, isto é, quanto maior o peso volúmico do solo maiores



(a) Tensões totais (iguais às tensões efectivas)



(b) Tensões totais

(c) Tensões efectivas

(d) Pressões intersticiais

\* Pressão calculada      — Pressão aparente

Figura 5.28: Pressões na cortina para os cenários C4 (em cima) e C5 (em baixo): Influência da variação do peso volúmico

são as pressões na cortina, o tipo de andamento verificado é bastante semelhante em todos os casos.

### 5.8.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentados nas figuras 5.29 e 5.30.

A partir da análise das figuras 5.29 e 5.30, é possível constatar o seguinte:

- para o cenário C4 os deslocamentos observados não apresentam diferenças apreciáveis entre os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo. No entanto, é possível perceber que quanto maior o peso volúmico, maiores são os deslocamentos observados, ainda que a diferença seja muito subtil;
- para o cenário C5 os deslocamentos são tanto maiores quanto menor for o valor adoptado para o peso volúmico do solo, ainda que as diferenças observadas não sejam muito grandes de caso para caso.

### 5.8.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentados na tabela 5.13. Apresenta-se ainda a tabela 5.14 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para os cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo.

Tabela 5.13: Forças nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação do peso volúmico

		Forças nas escoras [kN/m]		
		$\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$	$\gamma = 20\text{kN/m}^3$	$\gamma = 25\text{kN/m}^3$
Escora		4 <sup>a</sup> Escavação		
C4	1 <sup>a</sup>	43,47	50,25	64,45
	2 <sup>a</sup>	121,57	137,92	170,24
	3 <sup>a</sup>	105,51	119,41	146,28
	$\Sigma$	270,55	307,59	380,97
C5	1 <sup>a</sup>	52,50	71,38	93,25
	2 <sup>a</sup>	304,33	330,49	355,65
	3 <sup>a</sup>	180,83	240,44	279,71
	$\Sigma$	537,66	642,32	728,61

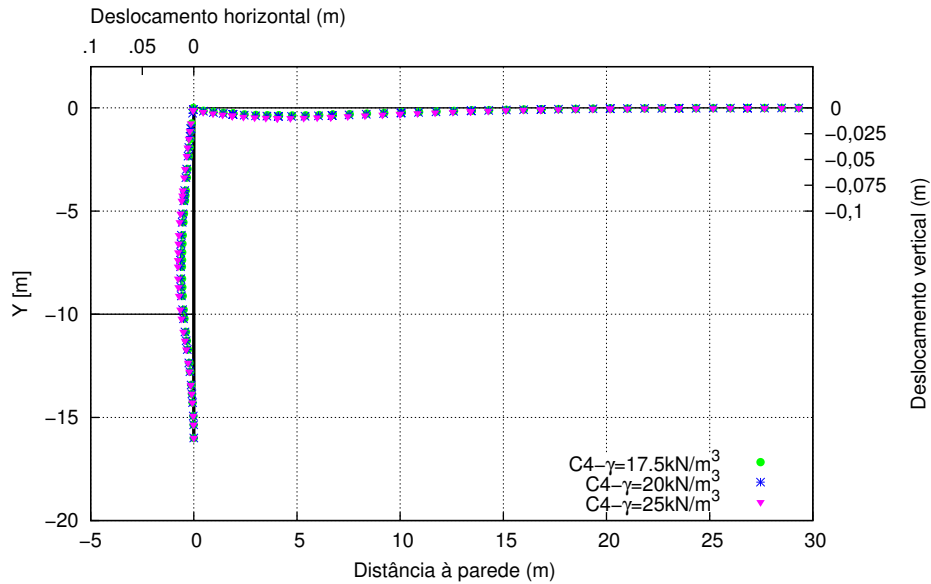


Figura 5.29: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C4: Influência da variação do peso volúmico

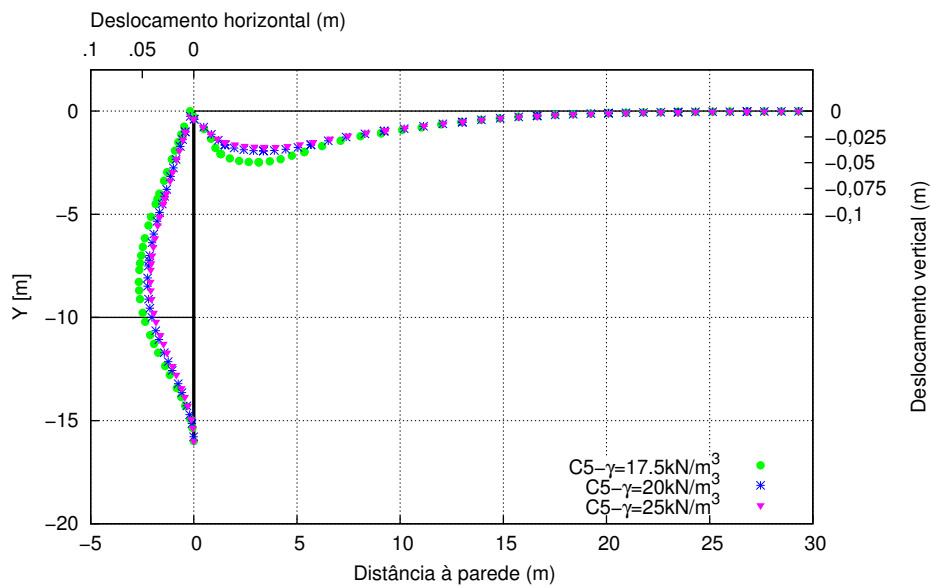


Figura 5.30: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C5: Influência da variação do peso volúmico

Tabela 5.14: Forças máximas nas escoras para os cenários C4 e C5: Influência da variação do peso volúmico

		Forças nas escoras [kN/m]		
		$\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$	$\gamma = 20\text{kN/m}^3$	$\gamma = 25\text{kN/m}^3$
Escora	Max			
	C4	1 <sup>a</sup>	47,53	54,27
2 <sup>a</sup>		121,57	137,92	170,24
3 <sup>a</sup>		105,51	119,41	146,28
$\Sigma$		274,61	311,61	384,26
C5	1 <sup>a</sup>	117,55	112,37	120,61
	2 <sup>a</sup>	304,33	330,49	355,65
	3 <sup>a</sup>	180,83	240,44	279,71
	$\Sigma$	602,71	683,31	755,96

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras nos cenários C4 e C5 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentadas nos gráficos em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de escavação (figuras 5.28(a) e 5.28(b)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- a influência da variação do peso volúmico do solo sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é um tanto quanto mais significativa no cenário C5 do que no cenário C4.
- de um modo geral, tanto para o cenário C4 como para o cenário C5, a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras e quanto maior o peso volúmico do solo, maiores são as forças instaladas nas escoras.

## 5.9 Influência do Peso Volúmico ( $\phi' = 40^\circ$ )

Esta análise é também semelhante à análise realizada em 5.8, onde os valores adoptados para os diferentes parâmetros mantêm-se os mesmos, com distinção apenas dos parâmetros de resistência do solo. Fez-se, a partir do caso base, a variação dos parâmetros de resistência e do peso volúmico do solo, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, para o caso do cenário C5 (figura 3.3(e)). Para esta análise foi considerado o solo apresentado na tabela 4.15 e foram adoptados três valores distintos para o peso volúmico do solo,  $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$ ,  $\gamma = 20\text{kN/m}^3$  e  $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ .

### 5.9.1 Pressões na Cortina

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para as pressões na cortina no cenário C5 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentados na figura 5.31. As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras são também apresentadas na figura 5.31 e serão abordadas na secção 5.9.3.

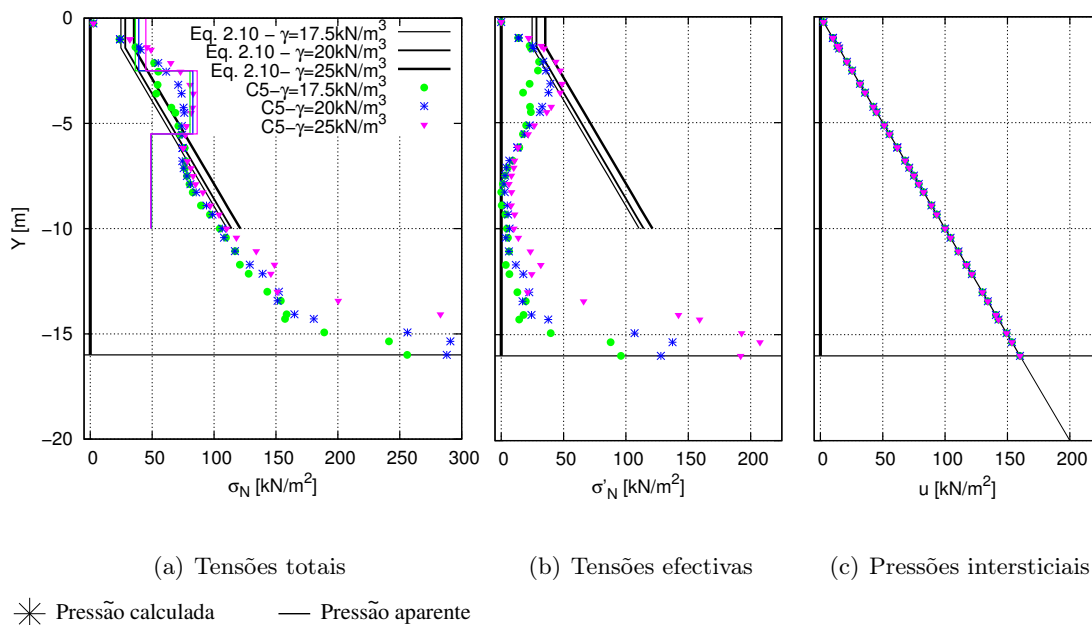


Figura 5.31: Pressões na cortina para o cenário C5: Influência da variação do peso volúmico

A análise dos resultados apresentados na figura 5.31 permite constatar o seguinte:

- a distribuição de tensões totais na cortina é, globalmente, maior quanto maior for o peso volúmico do solo.

### 5.9.2 Deslocamentos da Cortina e do Solo no Tardoz

Os resultados obtidos para a última fase de escavação para os deslocamentos da cortina e do solo no tardoz no cenário C5 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentados na figura 5.32.

A partir da análise da figura 5.32, é possível constatar o seguinte:

- os deslocamentos são tanto maiores quanto menor for o valor adoptado para o peso

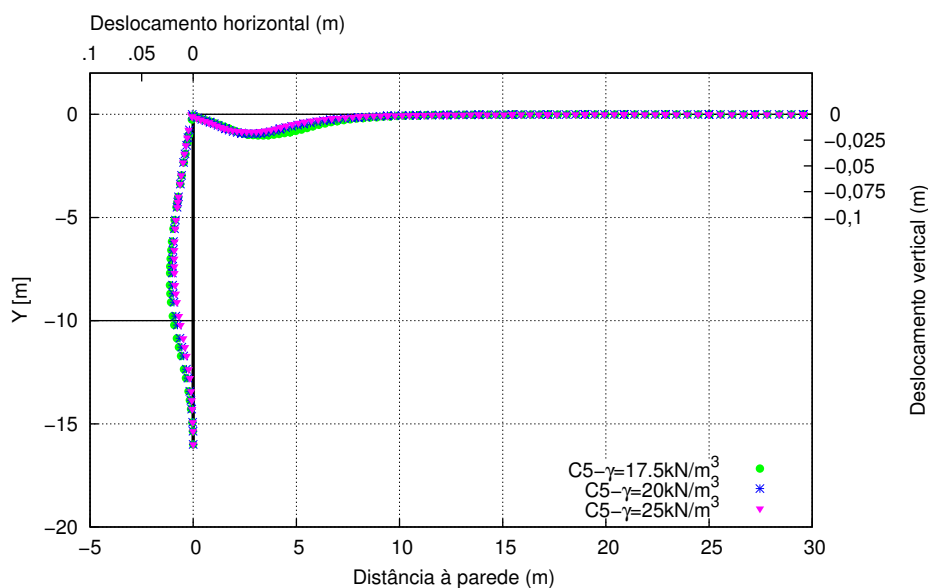


Figura 5.32: Deslocamentos da cortina e do solo no tardoz desta para o cenário C5: Influência da variação do peso volúmico

volúmico do solo, ainda que as diferenças observadas sejam mesmo muito subtis entre cada caso.

### 5.9.3 Forças nas Escoras e Pressões Aparentes

Os resultados obtidos na última fase de escavação para as forças nas escoras no cenário C5 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentados na tabela 5.15. Apresenta-se ainda a tabela 5.16 na qual são apresentadas as cargas máximas nas escoras ao longo do faseamento construtivo para o cenário C5 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo.

Tabela 5.15: Forças nas escoras para o cenário C5: Influência da variação do peso volúmico

		Forças nas escoras [kN/m]		
		$\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$	$\gamma = 20\text{kN/m}^3$	$\gamma = 25\text{kN/m}^3$
C5	Escora	4ª Escavação		
	1ª	71,24	84,98	107,41
	2ª	241,75	248,51	259,07
	3ª	223,24	221,19	220,08
	$\Sigma$	536,23	554,68	586,56

As pressões aparentes provenientes das cargas máximas nas escoras no cenário C5 para os diferentes valores adoptados para o peso volúmico do solo são apresentadas no gráfico em que são também apresentadas as tensões normais totais na cortina após a última fase de

Tabela 5.16: Forças máximas nas escoras para o cenário C5: Influência da variação do peso volúmico

		Forças nas escoras [kN/m]		
		$\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$	$\gamma = 20\text{kN/m}^3$	$\gamma = 25\text{kN/m}^3$
Escora		Max		
C5	1 <sup>a</sup>	90,86	97,93	112,36
	2 <sup>a</sup>	241,75	248,51	259,07
	3 <sup>a</sup>	223,24	221,19	220,08
	$\Sigma$	555,85	567,63	591,51

escavação (figura 5.31(a)).

A análise dos resultados obtidos permite constatar o seguinte:

- a influência da variação do peso volúmico do solo sobre as cargas nas escoras e pressões aparentes é bem menos acentuada no solo com melhores características mecânicas de resistência e deformabilidade, solo 2.
- quanto maior o peso volúmico do solo, maiores são as forças instaladas nas escoras.
- de um modo geral, a carga máxima ocorre na última fase de escavação para todas as escoras.



## Capítulo 6

# Proposta Preliminar para os Diagramas Aparentes

### 6.1 Introdução

Como apresentado no capítulo 1 o objectivo deste trabalho é obter numericamente diagramas do tipo dos aparentes, para casos com nível freático elevado, apresentando assim, uma proposta para a consideração das pressões em tais situações. O estudo desenvolvido nos capítulos anteriores e a posterior reunião dos resultados obtidos para a distribuição de pressões na cortina e para as cargas máximas nas escoras para as diferentes situações abordadas permitem que seja agora possível apresentar uma proposta preliminar para os diagramas aparentes para casos com nível freático à superfície do terreno. Para tal, é necessário proceder ao tratamento dos dados reunidos de forma a se obter resultados independentes dos valores adoptados para os diferentes parâmetros.

É nesta óptica que se procurou estabelecer uma expressão a aplicar aos resultados obtidos de modo que estes fossem adimensionalizados. A partir da análise dos dados ficou claro que faz mais sentido propor um diagrama em termos de tensões totais do que em termos de tensões efectivas. É também evidente a vantagem de trabalhar em termos de tensões totais para uma utilização directa na estimativa das cargas máximas nas escoras.

A análise dos resultados obtidos revela ser mais adequado que os casos em que há ou não percolação (cenários C3 e C5, respectivamente) sejam abordados de formas distintas.

## 6.2 Pressões Adimensionalizadas

As figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam as pressões adimensionalizadas na cortina para a última fase de escavação e as pressões aparentes adimensionalizadas provenientes das cargas máximas nas escoras para os cenários C1, C3, C4 e C5, respectivamente.

As figuras 6.1 e 6.3, respeitantes aos cenários C1 e C4, representam as tensões horizontais totais (iguais às efectivas) adimensionalizadas com base nas equações correspondentes aos diagramas de Terzaghi e Peck:

$$S_1 = S_4 = \frac{\sigma_H}{0.65K_a\gamma H} \quad (6.1)$$

Pode verificar-se da análise das figuras 6.1 e 6.3 que para a maior parte das situações os diagramas de Terzaghi e Peck constituem boas estimativas das pressões aparentes inferidas das cargas nas escoras e mesmo das pressões na cortina após a última fase de escavação.

Pocura-se em seguida uma forma de adimensionalização adequada aos cenários C3 e C5. A forma encontrada está traduzida nas figuras 6.2 e 6.4, respeitantes aos cenários C3 e C5, em que as tensões horizontais são adimensionalizadas usando as seguintes equações:

$$S_3 = \sigma_H \frac{\sqrt[5]{\gamma}}{K_a H \gamma_w \sqrt[5]{\gamma_w}} \quad (6.2)$$

$$S_5 = \sigma_H \frac{1}{\sqrt{K_a \gamma H}} \quad (6.3)$$

Estas equações foram obtidas por tentativas, procurando que os resultados das tensões totais se sobrepusessem. Tais resultados conduziram à proposta preliminar para os diagramas aparentes que são também apresentados nas figuras 6.2 e 6.4. Estes diagramas são definidos por um polígono com: altura H; base menor, por uma questão de prudência, dada pelo valor análogo ao diagrama aparente de Terzaghi e Peck correspondente à situação em que se considera o peso volúmico húmido do solo (equação 2.1); base maior com o valor resultante das expressões 6.2 e 6.3, para caso em que há ou não percolação respectivamente; e ponto de inflexão definido a 0.4H e 0.45H, para caso em que há ou não percolação respectivamente.

Considerou-se para este ponto a possibilidade de o definir como sendo dependente do valor do ângulo de resistência ao corte, sendo este traduzido pelo valor do coeficiente de impulso activo. Contudo, considerou-se ser mais prudente não se adoptar essa proposta uma vez que não foram realizados cálculos suficientes em que fossem adoptados diversos valores para os parâmetros de resistência.

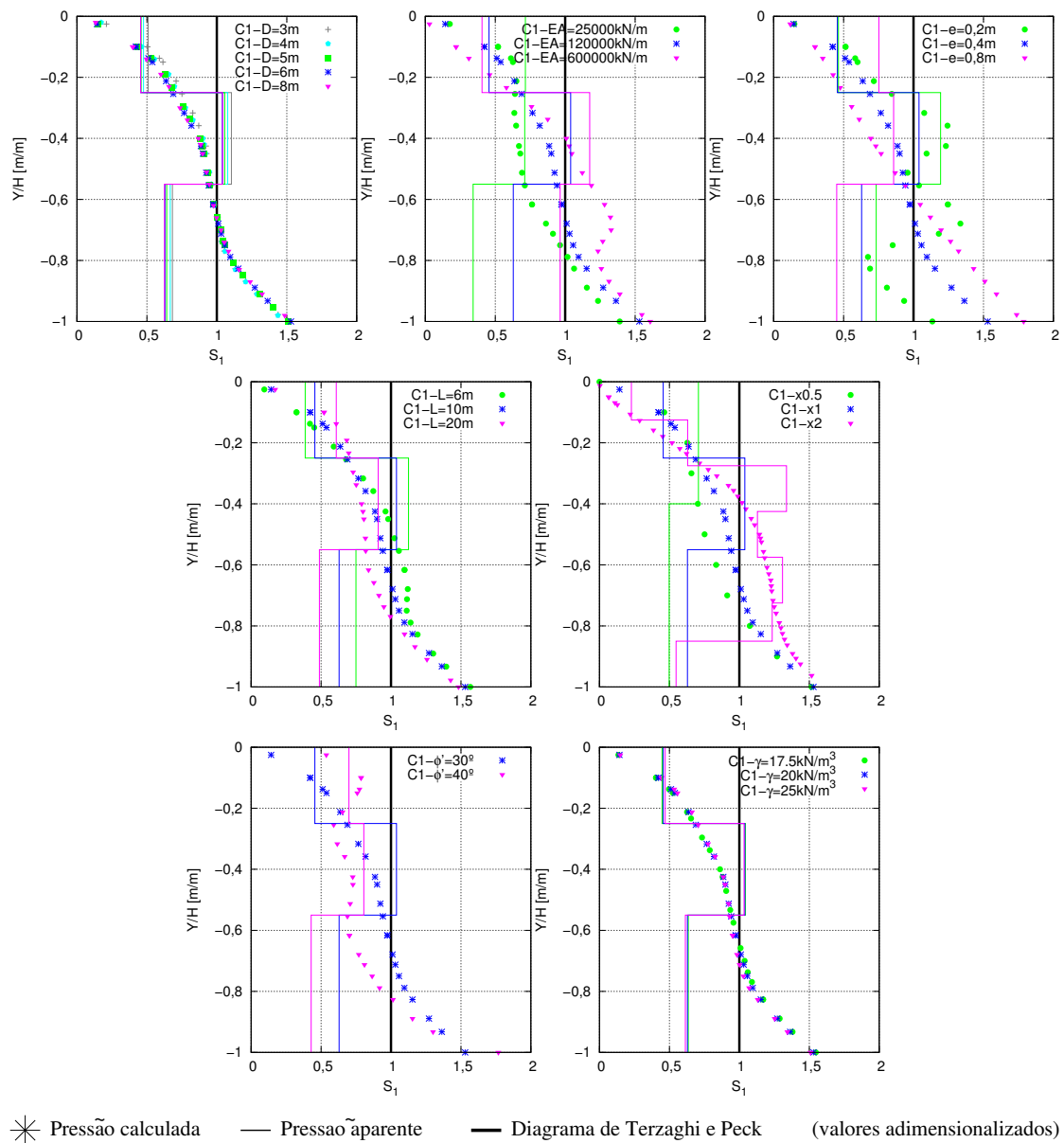


Figura 6.1: Pressões adimensionalizadas na cortina para o cenário C1: Influência da variação da ficha da cortina (em cima e à esquerda); Influência da variação da rigidez das escoras (em cima e ao centro); Influência da variação da rigidez da parede (em cima e à direita); Influência da variação da largura de escavação (ao centro e à esquerda); Influência da variação da escala do problema (ao centro e à direita); Influência da variação das características mecânicas do terreno (em baixo e à esquerda); Influência da variação do peso volúmico para o solo base (em baixo e à direita)

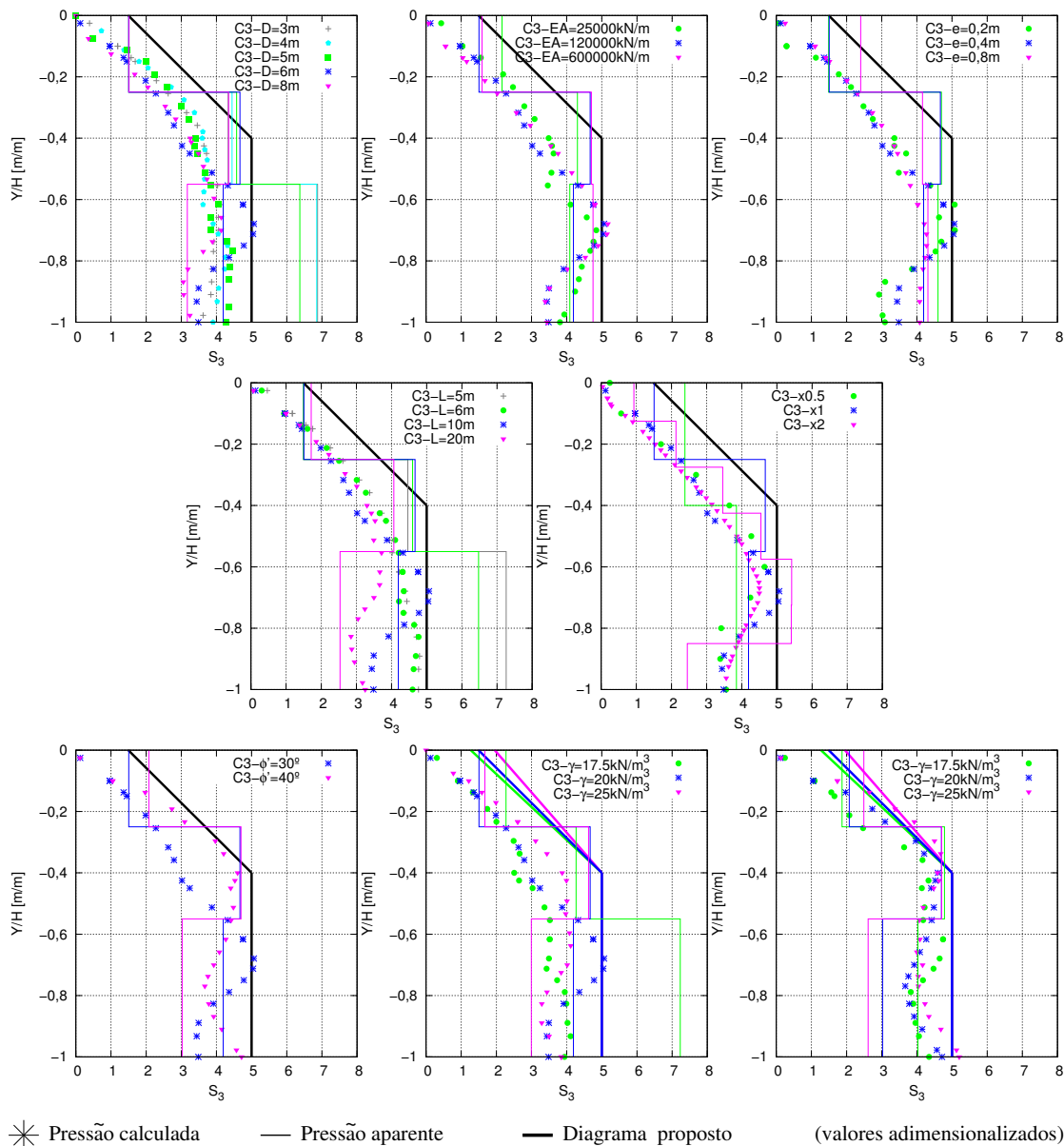
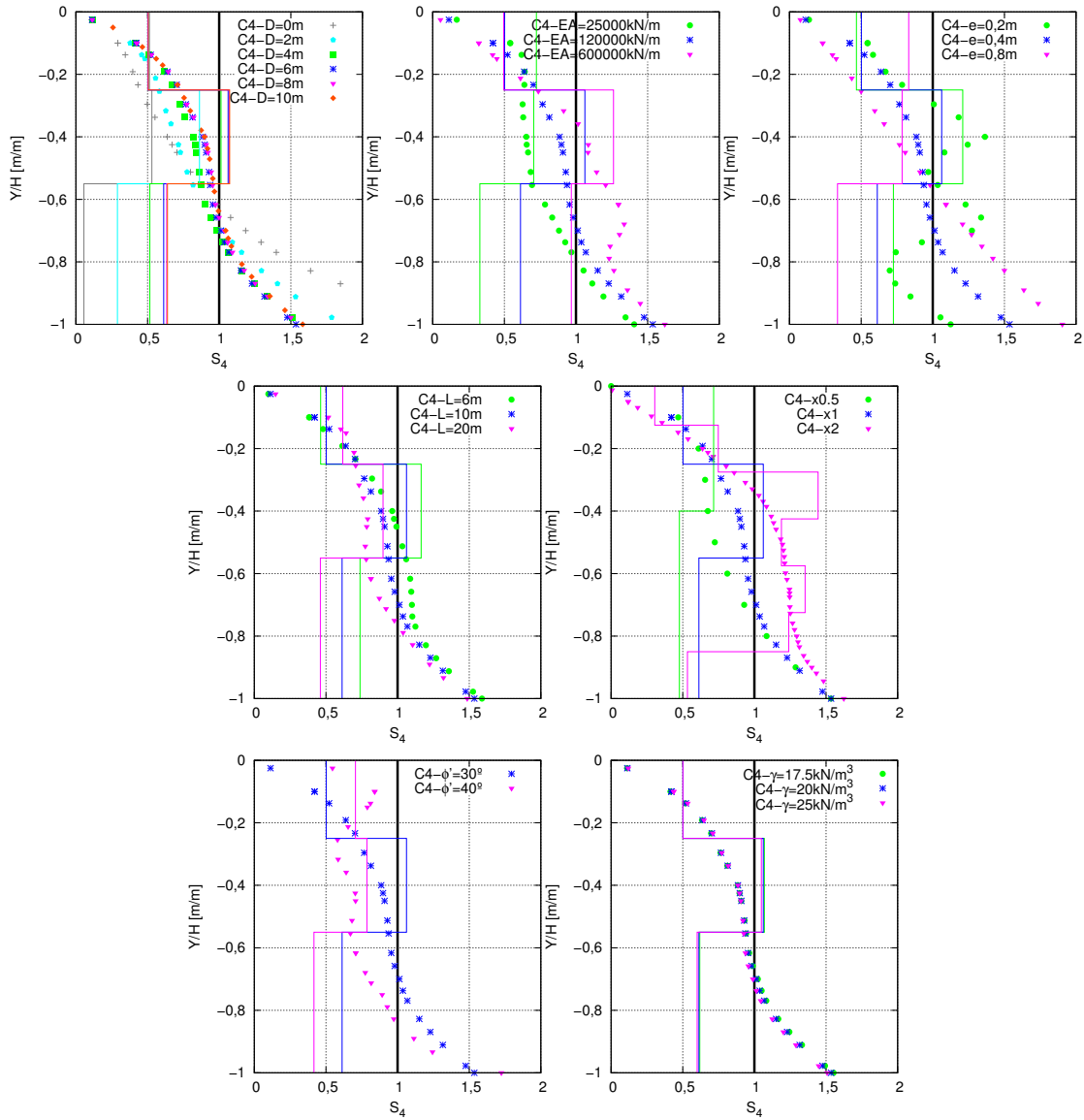


Figura 6.2: Pressões adimensionalizadas na cortina para o cenário C3: Influência da variação da ficha da cortina (em cima e à esquerda); Influência da variação da rigidez das escoras (em cima e ao centro); Influência da variação da rigidez da parede (em cima e à direita); Influência da variação da largura de escavação (ao centro e à esquerda); Influência da variação da escala do problema (ao centro e à direita); Influência da variação das características mecânicas do terreno (em baixo e à esquerda); Influência da variação do peso volúmico para o solo base (em baixo e ao centro) e para o solo com melhores características mecânicas (em baixo e à direita)



✱ Pressão calculada — Pressão aparente — Diagrama de Terzaghi e Peck (valores adimensionalizados)

Figura 6.3: Pressões adimensionalizadas na cortina para o cenário C4: Influência da variação da ficha da cortina (em cima e à esquerda); Influência da variação da rigidez das escoras (em cima e ao centro); Influência da variação da rigidez da parede (em cima e à direita); Influência da variação da largura de escavação (ao centro e à esquerda); Influência da variação da escala do problema (ao centro e à direita); Influência da variação das características mecânicas do terreno (em baixo e à esquerda); Influência da variação do peso volúmico para o solo base (em baixo e à direita)

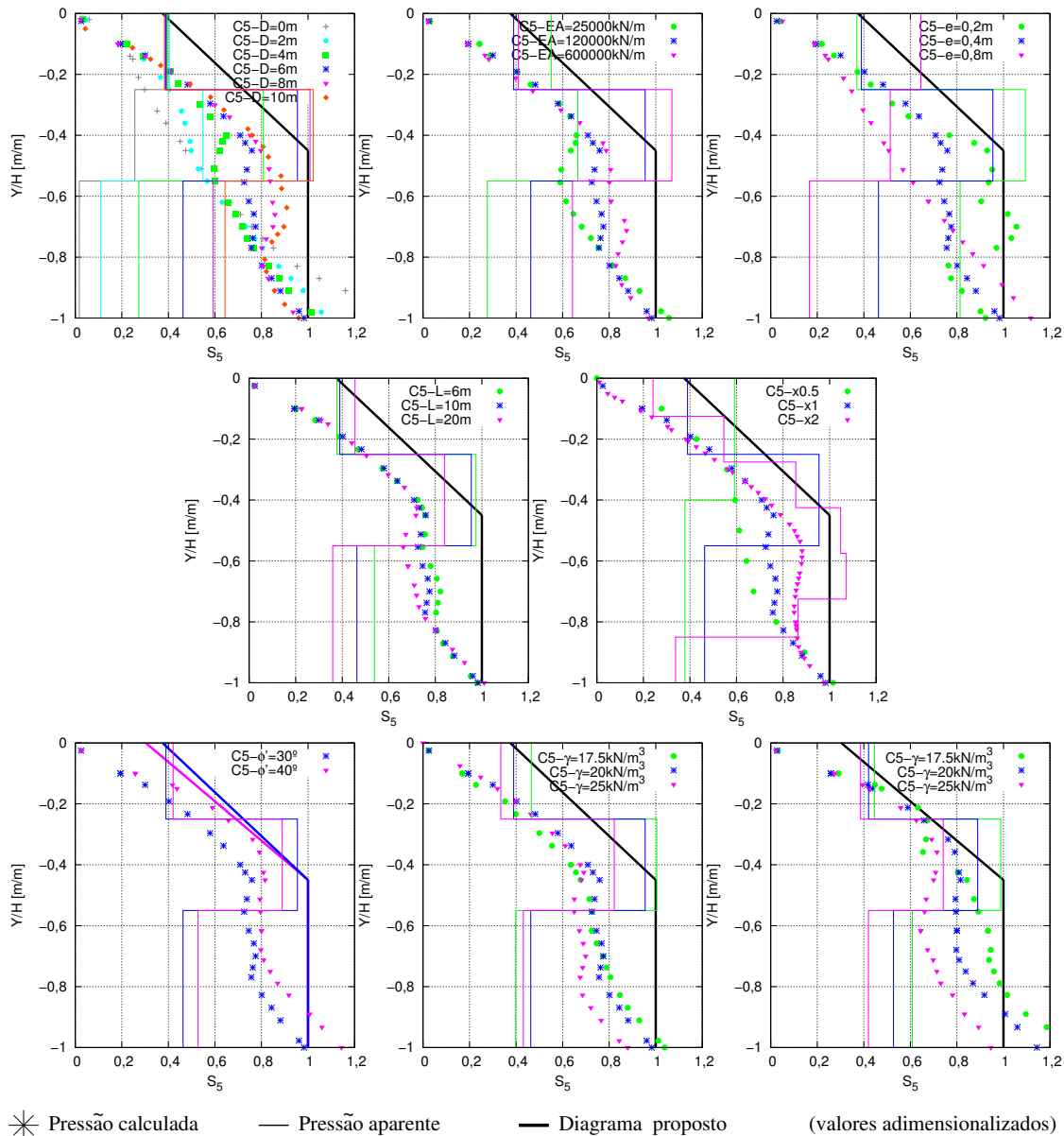


Figura 6.4: Pressões adimensionalizadas na cortina para o cenário C5: Influência da variação da ficha da cortina (em cima e à esquerda); Influência da variação da rigidez das escoras (em cima e ao centro); Influência da variação da rigidez da parede (em cima e à direita); Influência da variação da largura de escavação (ao centro e à esquerda); Influência da variação da escala do problema (ao centro e à direita); Influência da variação das características mecânicas do terreno (em baixo e à esquerda); Influência da variação do peso volúmico para o solo base (em baixo e ao centro) e para o solo com melhores características mecânicas (em baixo e à direita)

Note-se que as situações correspondentes a estados próximos de rotura, como por exemplo as situações em que se considerou fichas com valores pequenos, por razões evidentes, foram desprezadas na definição da proposta preliminar para os diagramas aparentes.

Para o cenário C5 as cargas máximas nas escoras no último nível são notoriamente reduzidas. As pressões aparentes (adimensionalizadas) provenientes das cargas máximas nas escoras no último nível são bastante inferiores às pressões (adimensionalizadas) na cortina para a última fase de escavação. Isto é possivelmente explicado pelo facto de o estrato rijo ser admitido logo no pé da cortina e nesse ponto ter sido considerado um encastramento. Este encastramento será o responsável pela absorção de uma importante parcela das cargas. De qualquer forma, na definição da proposta preliminar para os diagramas aparentes adoptou-se uma postura prudente, que tem implícito que o pé da cortina levado até um estrato impermeável não implicaria necessariamente um encastramento nesse ponto.

Apresenta-se, assim, na figura 6.5 a representação esquemática da proposta preliminar para os diagramas aparentes para casos com nível freático elevado em que há percolação (figura 6.5(a)) ou não (figura 6.5(b)):

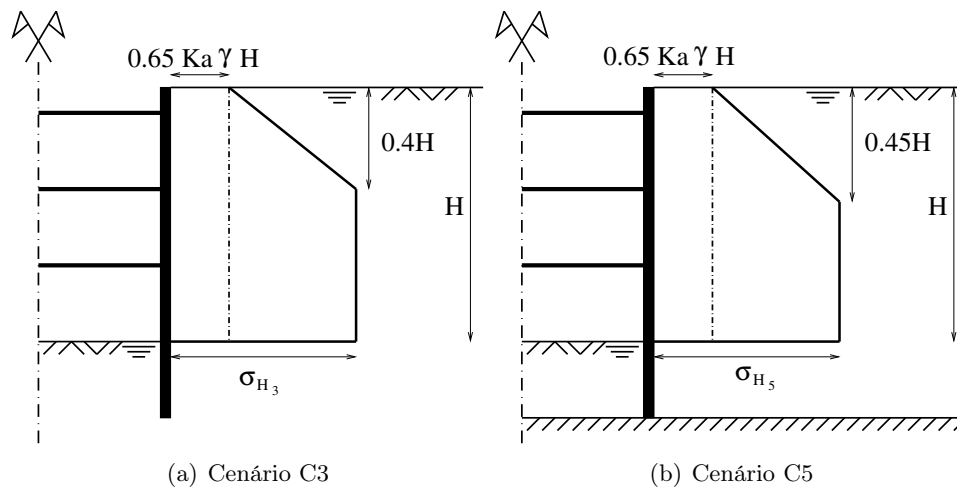


Figura 6.5: Proposta preliminar para diagramas aparentes para situações com nível freático elevado

em que:

$$\sigma_{H_3} = 5 \frac{K_a H \gamma_w \sqrt[5]{\gamma_w}}{\sqrt[5]{\gamma}} \quad (6.4)$$

$$\sigma_{H_5} = \sqrt{K_a \gamma} H \quad (6.5)$$



## Capítulo 7

# Considerações Finais

### 7.1 Conclusões

O estudo desenvolvido permite concluir que as propostas até então existentes para os diagramas aparentes correspondentes às situações em que se considera o nível freático elevado e escoamento em regime estacionário (cenário C3), bem como às situações em que se considera o nível freático elevado e hidrostático (cenário C5), não são de facto válidas. Com efeito, em todos os cálculos realizados os resultados obtidos foram superiores aos valores correspondentes à esses diagramas propostos na bibliografia.

Conclui-se ainda que as situações em que há ou não percolação (cenários C3 e C5, respectivamente) devem ser abordadas de formas distintas.

No caso em que se considera o nível freático elevado e escoamento em regime estacionário (cenário C3) os parâmetros que manifestam maior influência sobre as pressões na cortina e pressões aparentes são a ficha da cortina, a largura de escavação, as características mecânicas do terreno e o peso volúmico do solo (que apresenta maior relevância no solo com características mecânicas inferiores); os parâmetros que apresentam menor influência face aos anteriormente citados são a rigidez axial das escoras, a rigidez à flexão da cortina e a escala do problema.

No caso em que se considera o nível freático elevado e hidrostático (cenário C5) os parâmetros que manifestam maior influência sobre as pressões na cortina e pressões aparentes são a ficha da cortina, a rigidez à flexão da cortina (em contraste ao que se verifica para o cenário C3), as características mecânicas do terreno e o peso volúmico do solo (que, tal como se verifica para o cenário C3, apresenta menor relevância no solo com melhores características mecânicas); enquanto que os parâmetros que apresentam menor influência face

aos anteriormente citados são a rigidez axial das escoras e a escala do problema (os quais apresentam maior influência sobre as pressões aparentes), mas principalmente a largura de escavação (que não apresenta grande influência, o oposto do que se verifica para o cenário C3).

Com base no conjunto de resultados obtidos, propôs-se diagramas aparentes preliminares para o caso de nível freático à superfície do terreno.

## 7.2 Desenvolvimentos Futuros

Uma vez que o estudo realizado incidiu apenas sobre casos em que se considerou o nível freático à superfície do terreno, uma proposta evidente para desenvolvimentos futuros é a análise da influência da posição do nível freático.

Para todos os cálculos realizados admitiu-se sempre o solo como sendo homogêneo. Sendo assim, propõe-se que sejam estudados os possíveis efeitos da estratificação do solo.

A análise paramétrica quanto às características mecânicas de resistência e deformabilidade do terreno consistiu na comparação de apenas dois solos. O resultados obtidos e as análises subsequentes evidenciaram uma forte influência dos parâmetros de resistência do terreno. Com efeito, para a proposta preliminar de diagramas aparentes considerou-se inclusive a possibilidade de se definir o ponto de inflexão como sendo dependente do valor do ângulo de resistência ao corte, sendo este traduzido pelo valor do coeficiente de impulso activo. Contudo, considerou-se ser mais prudente não se adoptar essa proposta uma vez que não foram realizados cálculos suficientes em que fossem adoptados diversos valores para os parâmetros de resistência. Desta forma, propõe-se que se aprofunde o estudo quanto à influência das características mecânicas do terreno.

# Bibliografia

- Ebeling, R. M. e Morrison, E. E. (1992). The seismic design of waterfront retaining structures. Technical Report ITL-92-11, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Guerra, N. M. d. C. (2003). *Estruturas de Suporte*. Mestrado em Geotecnia para Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Guerra, N. M. d. C. (2013). Comunicação pessoal.
- Matos Fernandes, M. (1983). *Estruturas Flexíveis para Suporte de Terras. Novos Métodos de Dimensionamento*. PhD thesis, FEUP.
- NP EN 1997-1 (2010). Eurocódigo 7, Projecto Geotécnico, Parte 1: Regras Gerais. CT115, Instituto Português da Qualidade.
- Rodrigues de Sousa, N. A. (2008). Desenvolvimento de ferramentas de projecto de estruturas de suporte flexíveis. Master's thesis, FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Strom, R. M. e Ebeling, R. M. (2001). State of the practice in the design of tall, stiff, and flexible tieback retaining walls. Technical Report ITL TR-01-1, US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., e Mesri, G. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc., 2 edition.
- Plaxis (2014). *Plaxis 2D Manual*.

