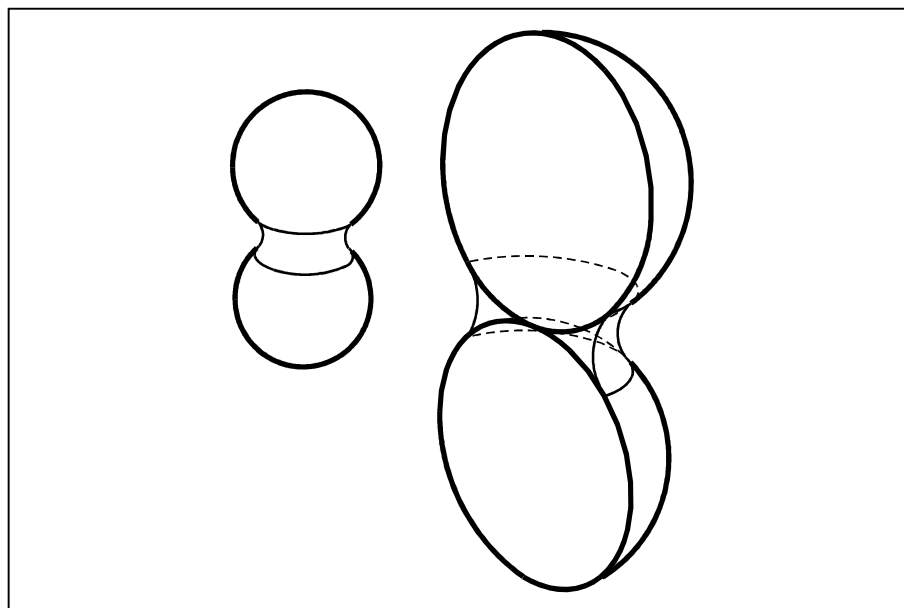


INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Civil

ISEL



Danos em Edifícios Devidos a Assentamentos Por Colapso em Solos Não Saturados

ANA MARIA DOS SANTOS MOURINHA
Licenciada em Engenharia Civil (ISEL)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização em Edificações

Orientadores:

Doutora Ana Maria Carvalho Pinheiro Vieira, Investigadora (LNEC).

Doutor João Manuel Candeias Simão Portugal, Eq. Prof. Adjunto (ISEL).

Júri:

Presidente:

Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos, Professor Coordenador (ISEL).

Vogais:

Doutora Maria Rafaela Pinheiro Cardoso, Professora Auxiliar (IST).

Doutora Ana Maria Carvalho Pinheiro Vieira, Investigadora (LNEC).

Doutor João Manuel Candeias Simão Portugal, Eq. Prof. Adjunto (ISEL).

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Meste em Engenharia Civil na Área de Especialização de Edificações pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, no âmbito do protocolo de cooperação entre o ISEL e LNEC.

Dezembro de 2010

AGRADECIMENTOS

O meu primeiro agradecimento é dirigido à Doutora Ana Vieira por ter possibilitado a execução desta dissertação, pelo seu interesse e orientação e ainda pela sua revisão deste trabalho.

Ao Doutor João Portugal pela sua amabilidade e disponibilidade ao ter aceitado a co-orientação deste trabalho.

Ao Doutor João Maranha, Investigador do LNEC, a implementação do seu algoritmo para modelar os assentamentos por colapso no programa FLAC.

Agradeço ainda ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pelo acolhimento, disponibilização do software e bibliografia utilizados na elaboração da dissertação.

RESUMO

A saturação do solo de fundação de um edifício pode estar associada a danos neste, por intermédio de assentamentos de colapso. A anulação da sucção matricial, que representa o efeito das forças inter-partículas de natureza capilar, é responsável por estes assentamentos. Neste trabalho utilizou-se um algoritmo especificamente formulado para simular os assentamentos por colapso. Foram feitas análises numéricas dos assentamentos e danos provocados na fachada em alvenaria de um edifício pela saturação ocorrida numa zona do solo de fundação. Foi estudada a influência dos seguintes factores: a sucção inicial do solo, o grau de pré-consolidação do solo e a extensão e localização da zona saturada.

Palavras chave: Fundações de edifícios, interacção solo-estrutura, solos não saturados, modelação numérica.

ABSTRACT

Saturation occurring on the soil foundation of a building may damage it, due to collapse settlement. The mechanism responsible for collapse settlement in soils is the reduction to zero of the matric suction, which represents the effect of interparticle capillary forces. An algorithm specifically formulated to simulate collapse settlement was used in this work. Numerical analyses of the settlements and damage on a masonry façade of a building, due to saturation of soil zone in the foundation, were performed. The influence of the following factors was assessed: the initial matric suction in the soil, the level of over-consolidation and the extension and position of the saturated zone.

Keywords: building foundations, soil-structure interaction, unsaturated soil, numerical modeling.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
2. CAPÍTULO 2 - MODELAÇÃO DOS ASSENTAMENTOS POR COLAPSO	3
2.1 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO.....	3
2.2 MODELO CAM-CLAY MODIFICADO	5
3. CAPÍTULO 3 – ANÁLISE NUMÉRICA DA FACHADA DE UM EDIFÍCIO E SUA FUNDAÇÃO ...	12
3.1 MODELO NUMÉRICO DA FACHADA E SUA FUNDAÇÃO	12
3.1.1 Alvenaria	14
3.1.2 Caracterização do estado inicial da fundação	16
3.1.3 Caso de referência	18
3.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES.....	19
3.2.1 Caso de referência	20
3.2.1.1. Fase de construção da fachada	20
3.2.1.2. Fase de saturação	24
3.2.1.3. Efeito da saturação	26
3.2.2 Caso com sucção inicial de 100kPa.....	29
3.2.2.1. Fase de construção da fachada	29
3.2.2.2. Fase de saturação	32
3.2.2.3. Efeito da saturação	34
3.2.3 Caso com sobreconsolidação $H=80m$	37
3.2.3.1. Fase de construção da fachada	37
3.2.3.2. Fase de saturação	40
3.2.3.3. Efeito da saturação	43
3.2.4 Caso com sobreconsolidação $H=25m$	46
3.2.4.1. Fase de construção da fachada	46
3.2.4.2. Fase de saturação	49
3.2.4.3. Efeito da saturação	51
3.2.5 Influência da zona saturada	55
3.2.5.1. Zona de 3m de comprimento e 5m de altura junto ao eixo	55
3.2.5.2. Efeito da saturação	58
3.2.5.4. Efeito da saturação	63
3.2.5.5. Zona superficial de 3m de comprimento e 1m de altura afastada 6m do eixo	66
3.2.5.6. Efeito da saturação	69
3.2.5.7. Zona superficial de 20m de comprimento e 1m de altura	72
3.2.5.8. Zona de 3m de comprimento e 1m de altura a diferentes profundidades	73
3.2.5.9. Efeito da saturação	82
4. CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	86
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Danos em edificações, devidos a assentamentos por colapso, por subida do nível freático (Cidade Pereira Barreto, SP, Brasil). Fotografias retiradas de Rodrigues, R. A. (2007).	1
Figura 2. a) Situação inicial. b) Saturado (fixo). c) Fixações livres.	4
Figura 3. Ponte capilar em redor do contacto entre duas partículas.	6
Figura 4. Valor da tensão média efectiva de pré-consolidação do solo saturado. Curvas de compressão isotrópica virgem do solo para os estados não-saturado e saturado.	7
Figura 5. Representação simultânea nos planos (p',v) e (p',q) dos processos de consolidação, erosão (sobreconsolidação), secagem, carregamento vertical e saturação. Condições de deformação uniaxial (edométricas).	10
Figura 6. Procedimento adoptado no algoritmo para o colapso durante a saturação (ABC) e caminho realmente descrito pelo solo (AC).	11
Figura 7. Geometria e dimensões do modelo da fachada de edifício e fundação.	13
Figura 8. Malha da fachada e fundação com as condições de fronteira.	13
Figura 9. Critério de Mohr-Coulomb aplicado a um material em que se conhece a resistência à compressão e à tracção. O critério incorpora um limite adicional para a resistência à tracção.	14
Figura 10 Critério de Tresca aplicado a um material em que se conhece a resistência à compressão e à tracção. O modelo incorpora um limite adicional para a resistência à tracção.	15
Figura 11. Sedimentação/consolidação seguida da erosão da camada superficial de espessura H e rebaixamento do nível freático.	16
Figura 12. Linhas de compressão isotrópica para diferentes valores da sucção	18
Figura 13. Dimensões e posição da zona saturada. a) $3m \times 1m$ sobre o eixo de simetria superficial; b) $3m \times 1m$ sobre o eixo a $1m$ de prof.; c) $3m \times 1m$ sobre o eixo a $2m$ de prof.; d) $3m \times 1m$ sobre o eixo a $4m$ de prof.; e) $3m \times 5m$ sobre o eixo; f) $1m \times 1m$ sobre o eixo superficial; g) $3m \times 1m$ superficial afastado $6m$ do eixo; h) $20m \times 1m$ superficial.	20
Figura 14. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.	21
Figura 15. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: $1m \Leftrightarrow$ extensão $0,05$).....	22
Figura 16. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.	22
Figura 17. Deformação volumétrica (compressão negativa).	23
Figura 18. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.	23
Figura 19. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.	24
Figura 20. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: $1m \Leftrightarrow$ extensão $0,05$).....	24
Figura 21. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.	25
Figura 22. Deformação volumétrica (compressão negativa).	25
Figura 23. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.	26
Figura 24. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	27
Figura 25. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	27
Figura 26. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	28
Figura 27. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	29
Figura 28. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.	30

Figura 29. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \leftrightarrow extensão 0,05).....	30
Figura 30. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.	31
Figura 31. Deformação volumétrica (compressão negativa).	31
Figura 32. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.	32
Figura 33. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.	32
Figura 34. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \leftrightarrow extensão 0,05).....	33
Figura 35. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.	33
Figura 36. Deformação volumétrica (compressão negativa).	34
Figura 37. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.	34
Figura 38. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	35
Figura 39. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	35
Figura 40. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	36
Figura 41. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	37
Figura 42. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.	38
Figura 43. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \leftrightarrow extensão 0,05).....	38
Figura 44. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.	39
Figura 45. Deformação volumétrica (compressão negativa).	39
Figura 46. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.	40
Figura 47. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.	40
Figura 48. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \leftrightarrow extensão 0,05).....	41
Figura 49. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.	41
Figura 50. Deformação volumétrica (compressão negativa).	42
Figura 51. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.	42
Figura 52. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	43
Figura 53. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	44
Figura 54. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	45
Figura 55. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	45
Figura 56. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.	46
Figura 57. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \leftrightarrow extensão 0,05).....	47
Figura 58. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.	47
Figura 59. Deformação volumétrica (compressão negativa).	48
Figura 60. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.	48
Figura 61. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.	49

Figura 62. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m ⇔ extensão 0,05).....	50
Figura 63. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.	50
Figura 64. Deformação volumétrica (compressão negativa).	51
Figura 65. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.	51
Figura 66. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	52
Figura 67. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	53
Figura 68. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	54
Figura 69. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	54
Figura 70. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.	55
Figura 71. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m ⇔ extensão 0,05).....	56
Figura 72. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.	56
Figura 73. Deformação volumétrica (compressão negativa).	57
Figura 74. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.	57
Figura 75. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	58
Figura 76. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	59
Figura 77. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	60
Figura 78. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	60
Figura 79. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.	61
Figura 80. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m ⇔ extensão 0,05).....	61
Figura 81. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.	62
Figura 82. Deformação volumétrica (compressão negativa).	62
Figura 83. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.	63
Figura 84. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	64
Figura 85. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	64
Figura 86. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	65
Figura 87. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	66
Figura 88. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.	67
Figura 89. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m ⇔ extensão 0,05).....	67
Figura 90. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.	68
Figura 91. Deformação volumétrica (compressão negativa).	68
Figura 92. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.	69

Figura 93. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	70
Figura 94. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	70
Figura 95. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	71
Figura 96. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.....	72
Figura 97. Mecanismo de rotura da fachada (vectores de velocidade).....	73
Figura 98. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes. Zona saturada a 1m de profundidade.	74
Figura 99. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes. Zona saturada a 2m de profundidade.	74
Figura 100. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes. Zona saturada a 4m de profundidade.	75
Figura 101. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05). Zona saturada a 1m de profundidade.....	75
Figura 102. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05). Zona saturada a 2m de profundidade.....	76
Figura 103. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05). Zona saturada a 4m de profundidade.....	76
Figura 104. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva. Zona saturada a 1m de profundidade.	77
Figura 105. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva. Zona saturada a 2m de profundidade.	78
Figura 106. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva. Zona saturada a 4m de profundidade.	78
Figura 107. Deformação volumétrica (compressão negativa). Zona saturada a 1m de profundidade.	79
Figura 108. Deformação volumétrica (compressão negativa). Zona saturada a 2m de profundidade.	80
Figura 109. Deformação volumétrica (compressão negativa). Zona saturada a 4m de profundidade.	80
Figura 110. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto. Zona saturada a 1m de profundidade.	81
Figura 111. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto. Zona saturada a 2m de profundidade.	81
Figura 112. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto. Zona saturada a 4m de profundidade.	82
Figura 113. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para a fases de construção e de saturação a diferentes profundidades. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	82
Figura 114. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação a diferentes profundidades. Distância vertical medida a partir da superfície.....	83
Figura 115. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação a diferentes profundidades. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.	84
Figura 116. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação a diferentes profundidades. Distância vertical medida a partir da superfície.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Os símbolos e abreviaturas são definidos pela mesma ordem com que aparecem no texto.

$\mathbf{F}_{(D)}$	----	forças nodais em equilíbrio com o estado de tensão seco
$\sigma_{(D)}$	----	estado de tensão para caso seco
$\mathbf{F}_{(W)}$	----	forças nodais em equilíbrio com o estado de tensão “saturado”
$\sigma_{(W)}$	----	estado de tensão para o caso “saturado”
p'	----	tensão média efectiva
p	----	tensão média total
u_a	----	pressão no ar
u_w	----	pressão na água
χ	----	contribuição da sucção para a tensão efectiva (varia entre 0 e 1)
s	----	sucção matricial ($s=u_a-u_w$)
\bar{u}_w	----	pressão neutra equivalente
s_e	----	pressão de entrada de ar
v	----	volume específico
p_{ref}	----	pressão de referência
N	----	volume específico para a pressão de referência em compressão isotrópica
λ	----	compressibilidade volumétrica
κ	----	compressibilidade volumétrica elástica
ν	----	coeficiente de Poisson
M	----	declive da linha dos estados críticos
σ_0	----	estado inicial de tensão
p_c	----	tensão média efectiva de pré-consolidação do solo seco
p_{cw}	----	tensão média efectiva de pré-consolidação do solo saturado
v_c	----	volume específico correspondente à tensão de pré-consolidação
σ_{0w}	----	estado de tensão inicial de solo saturado
p_0	----	tensão média efectiva inicial do solo não saturado
η_0	----	quociente entre a tensão deviatórica e a tensão média efectiva
q_0	----	invariante da tensão deviatórica inicial
s_0	----	tensor das tensões deviatóricas
I	----	tensor identidade de 2ª ordem
q	----	invariante da tensão deviatórica
s_0	----	tensão deviatórica inicial
K_0	----	coeficiente de impulso em repouso
σ'_h	----	tensão efectiva horizontal
σ'_v	----	tensão efectiva vertical
σ_c	----	resistência à compressão
σ_t	----	resistência à tracção
ϕ	----	ângulo de atrito
c	----	coesão
σ_t	----	resistência uniaxial à tracção
ψ	----	ângulo de dilatância
E	----	módulo de Young
γ	----	peso volúmico
σ'_v^{\max}	----	tensão efectiva vertical máxima a que o solo esteve submetido
K_0^{NC}	----	coeficiente de impulso em repouso normalmente consolidado
ϕ_{cs}	----	ângulo de atrito dos estados críticos

p'_{\max}	----	tensão média efectiva máxima
η_{NC}	----	q/p do solo normalmente consolidado
K_0^{OC}	----	coeficiente de impulso em repouso sobreconsolidado
w	----	expoente da relação empírica para o coeficiente de impulso em repouso sobreconsolidado
OCR	----	grau de sobreconsolidação
LCI	----	linha de compressão isotrópica virgem
γ_d	----	peso volúmico seco do solo
H	----	espessura da camada de solo erodida
H_w	----	profundidade do nível freático

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Sob certas condições, edifícios construídos sobre solos não saturados podem sofrer danos associados a assentamentos por colapso, que acompanham um aumento do teor em água do terreno. Aterros mal compactados, assim como solos naturais com elevado índice de vazios, por efeito da elevação do nível freático, de infiltrações por fugas em canalizações ou reencaminhamento de águas pluviais, sofrem uma redução das forças capilares associadas à saturação parcial (sucção matricial) que pode dar origem a assentamentos por colapso. Se estes assentamentos forem de magnitude suficientemente elevada e não uniformes, causarão danos ou até mesmo rotura (parcial ou total) em edifícios. Danos em edifícios devidos a assentamentos por colapso encontram-se documentados em detalhe em Rodrigues (2007). Souza Neto (2004) também apresenta alguns casos, mas com menos detalhe.

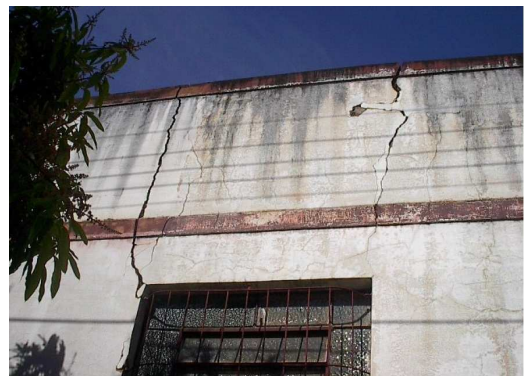


Figura 1. Danos em edificações, devidos a assentamentos por colapso, por subida do nível freático (Cidade Pereira Barreto, SP, Brasil). Fotografias retiradas de Rodrigues, R. A. (2007).

A análise dos assentamentos em solos não saturados devidos a um aumento do grau de saturação só é feita em casos muito excepcionais. Isto em parte deve-se à escassez de ferramentas de análise para solos não saturados e também à maior complexidade do problema relativamente à mecânica dos solos clássica, que apenas incide sobre os solos saturados. Como uma parte significativa das fundações superficiais de edifícios ocorre em solos não saturados, porque raramente o terreno se encontra saturado até à superfície, os fenómenos de assentamento por colapso ou expansão do solo não podem ser excluídos em caso de um aumento do grau de saturação do solo. Existe pois a necessidade de compreender melhor, não só as condições em que este fenómeno se verifica, mas também a sua interacção com os edifícios sobrejacentes. Para tal torna-se necessário desenvolver métodos de análise do problema. Com este trabalho pretende-se contribuir para a compreensão dos mecanismos de interacção solo-estrutura e rotura associados aos assentamentos por colapso em fundações de edifícios em solos não saturados, assim como desenvolver e aperfeiçoar métodos para a sua análise.

Neste trabalho modelou-se numericamente, recorrendo ao programa FLAC, o fenómeno das deformações devidas ao colapso assim como a interacção solo/estrutura e a identificação de eventuais danos que ocorram na fachada de um edifício. O efeito do colapso foi simulado através de um método em que os efeitos da saturação do terreno são representados por uma mudança das propriedades materiais (considerando-se apenas duas fases – sólida e líquida) como descrito em Maranha (1997), recorrendo a uma extensão do conceito de tensão efectiva devida a Bishop (Nuth e Laloui, 2008). Não foram utilizadas leis constitutivas formuladas especificamente para solos não saturados como em Alonso et al. (1990). Para representar o comportamento do solo foi utilizado o modelo Cam-Clay modificado (estado crítico).

O campo de tensões iniciais na fundação e as tensões induzidas pela construção da fachada de um edifício, considerando a sequência construtiva, foram objecto de particular atenção na modelação numérica.

CAPÍTULO 2 - MODELAÇÃO DOS ASSENTAMENTOS POR COLAPSO

Neste capítulo descreve-se o algoritmo utilizado neste estudo para modelar os assentamentos por colapso dos solos. Este fenómeno ocorre, sob certas condições, quando as sucções matriciais existentes em solos não saturados, se reduzem devido ao aumento do grau de saturação. Este algoritmo é, em princípio, aplicável a qualquer lei constitutiva para solos saturados. Assim sendo, dispensa a utilização de leis constitutivas formuladas especificamente para solos não saturados. Isto revela-se duplamente vantajoso, não só por estas serem mais complexas assim como por requererem programas de elementos finitos especialmente formulados para o efeito. Por outro lado a utilização de leis constitutivas para solos não saturados permite representar a evolução gradual do processo de molhagem com maior rigor.

2.1 Descrição do algoritmo

O algoritmo utilizado para simular os assentamentos por colapso do solo é uma generalização daquele apresentado por Nobari e Duncan (1972) associado ao modelo hiperbólico de Duncan e Chang (1970). Esta generalização, descrita em Maranhã (1997), ao contrário da abordagem de Nobari e Duncan (1972), é aplicável a qualquer lei constitutiva formulada para solos saturados.

O algoritmo assume que existem dois conjuntos de constantes materiais, um para o material no estado seco e outro para o material no estado saturado ou molhado. Assume-se também que, numa primeira fase, o material muda do estado seco para o estado saturado sem que seja permitido qualquer movimento do mesmo. Isto é, o material sofre uma relaxação da tensão enquanto as deformações se mantêm fixas. A tensão no material saturado é calculada assumindo que este foi previamente submetido à mesma trajectória de deformação que o material seco. Como o novo estado de tensão do material saturado, que substitui o estado de tensão do material seco, não vai estar em equilíbrio com as forças externas aplicadas, é necessária uma segunda fase do algoritmo para restabelecer o equilíbrio no corpo. Nesta fase, são aplicadas ao corpo forças nodais equivalentes à variação da tensão e são calculados os deslocamentos daí resultantes. Este processo encontra-se representado para o caso de um elemento finito, suficientemente pequeno para que os estados de tensão e deformação sejam homogêneos, na Figura 2.

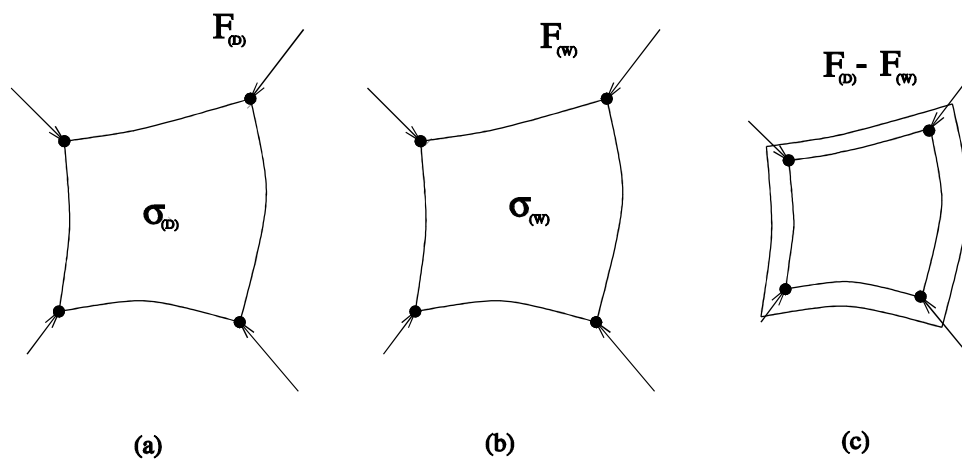


Figura 2. a) Situação inicial. b) Saturado (fixo). c) Fixações livres.

Relativamente à Figura 2, $\mathbf{F}_{(D)}$ são as forças nodais em equilíbrio com o estado de tensão, $\boldsymbol{\sigma}_{(D)}$, para o caso seco (“dry” em Inglês). $\mathbf{F}_{(w)}$ são as forças nodais em equilíbrio com o estado de tensão, $\boldsymbol{\sigma}_{(w)}$, para o caso saturado (“wet” em Inglês).

2.2 Modelo Cam-Clay modificado

O modelo Cam-Clay modificado, de Roscoe e Burland (1968), foi escolhido para representar o comportamento do solo, por ser um modelo que incorpora alguns dos seus aspectos mais relevantes. Em particular, este modelo consegue reproduzir o efeito de pré-consolidação que desempenha um papel essencial no fenómeno do colapso por molhagem. Por outro lado, este modelo encontra-se disponível no programa FLAC, utilizado neste trabalho. Apesar disso o modelo foi modificado para permitir o cálculo da tensão “saturada” em paralelo ao da tensão “seca”.

Bishop (1959) sugeriu a seguinte extensão do conceito de tensão efectiva devido a Terzaghi:

$$p' = p - u_a + \chi(u_a - u_w), \quad (1)$$

em que p' é a tensão média efectiva, p é a tensão média total, u_a é a pressão no ar, u_w é a pressão na água e χ é um parâmetro que varia entre 0, que corresponde a estado completamente seco e 1, que corresponde ao estado saturado. Quando $\chi=1$ recupera-se a tensão efectiva de Terzaghi. Para efeitos de utilização com um programa para resolução de problemas de valores na fronteira, formulado só para solos saturados de acordo com a mecânica dos solos tradicional, considera-se uma pressão neutra equivalente dada por:

$$\bar{u}_w = u_a - \chi s, \quad (2)$$

em que $s = u_a - u_w$ é designada como sucção matricial e desempenha um papel primordial no comportamento dos solos não saturados. A sucção matricial traduz o efeito das forças capilares entre as partículas do solo. As forças capilares que actuam sobre as partículas num solo não saturado devem-se à tensão superficial. Formam-se à volta dos contactos entre partículas, pontes de fluido (água) com forma anelar, limitadas lateralmente pela tensão superficial que funciona como uma membrana à tracção (Figura 3). Esta membrana comprime as partículas entre si. O valor da sucção matricial depende da curvatura da membrana que, por sua vez, aumenta com a diminuição do raio das partículas e com a redução do volume de água na ponte (redução do grau de saturação).

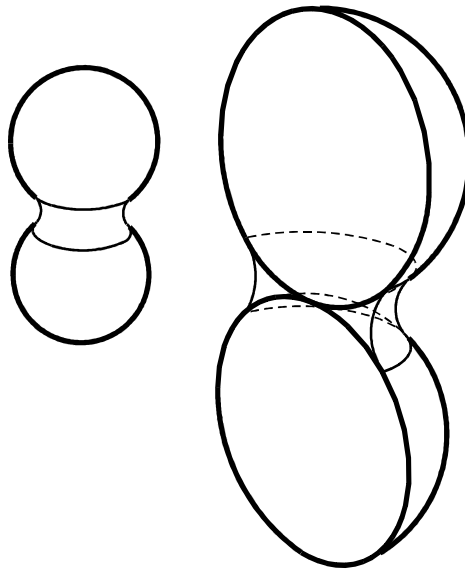


Figura 3. Ponte capilar em redor do contacto entre duas partículas.

Verifica-se experimentalmente que χ é função da sucção matricial s . Loret e Khalili (2002) sugerem a seguinte expressão,

$$\chi(s) = \begin{cases} 1 & \text{se } s \leq s_e \\ \left(\frac{s_e}{s}\right)^{0.55} & \text{se } s > s_e \end{cases} \quad (3)$$

onde s_e é a pressão de entrada de ar, que é o valor da sucção para o qual o solo deixa de estar saturado.

Assume-se, de acordo com Loret e Khalili (2002), que a relação entre a tensão média efectiva, p' , e o volume específico, v , para a compressão isotrópica virgem em solos não saturados é dada por:

$$v = N(s) - \lambda(s) \ln \frac{p'}{p_{ref}}, \quad (4)$$

em que p_{ref} é uma pressão de referência, $N(s)$ e $\lambda(s)$ são funções da sucção. O caso saturado obtém-se quando $s=0$. No método aqui proposto assume-se a transição brusca de um estado não saturado, a que corresponde um dado valor da sucção, $s_I > 0$, para outro com $0 \leq s_2 < s_I$. No presente estudo considera-se $s_2=0$, que corresponde à saturação. Tem-se assim, um conjunto de constantes para o solo seco (não saturado), $N_D=N(s>0)$ e $\lambda_D=\lambda(s>0)$, e um conjunto de constantes para o solo saturado, $N_W=N(s=0)$ e $\lambda_W=\lambda(s=0)$.

As constantes elásticas do modelo, κ (compressibilidade volumétrica) e ν (coeficiente de Poisson), assim como o declive da linha dos estados críticos, M , consideram-se independentes da sucção (Loret e Khalili, 2002).

A utilização do modelo Cam-Clay modificado pressupõe a especificação de um estado inicial de tensão, σ_0 , e uma tensão média efectiva de pré-consolidação, p_c , diferentes de zero. Conhecendo o valor inicial da tensão média efectiva de pré-consolidação do solo seco, p_c , o correspondente valor para o solo saturado, p_{cw} , é obtido da forma que se ilustra na Figura 4.

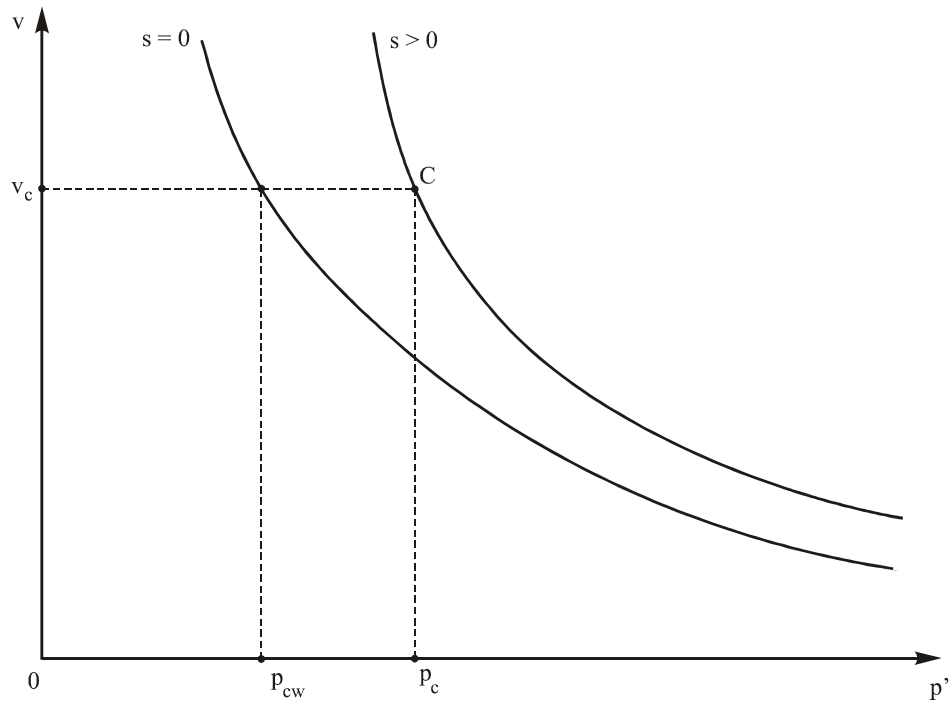


Figura 4. Valor da tensão média efectiva de pré-consolidação do solo saturado. Curvas de compressão isotrópica virgem do solo para os estados não-saturado e saturado.

p_{cw} é o valor obtido sobre a curva de compressão isotrópica virgem do solo saturado correspondente ao volume específico v_c , associado à tensão média de pré-consolidação do solo “seco” (não saturado), p_c . Daqui resulta a seguinte expressão:

$$\frac{p_{cw}}{p_c} = \exp\left(\frac{N(s=0) - v_c}{\lambda(s=0)} - \frac{N(s=s_1 > 0) - v_c}{\lambda(s=s_1 > 0)}\right) = \exp\left(\frac{N_w - v_c}{\lambda_w} - \frac{N_d - v_c}{\lambda_d}\right). \quad (5)$$

O estado de tensão inicial de solo saturado, σ_{0w} , é igual ao do solo “seco”, σ_0 , a não ser que fique fora da superfície de cedência saturada (definida por p_{cw}), caso em que este é obtido pela projecção radial de σ_0 sobre a referida superfície. A projecção radial obtém-se multiplicando σ_0 por um factor escalar dado por

$$\alpha = \frac{p_{cw}}{p_0 \left[1 + \left(\frac{\eta_0}{M} \right)^2 \right]}, \quad (6)$$

em que $p_0 = \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}_0)/3$ é a tensão média efectiva inicial do solo não saturado, $\eta_0 = q_0/p_0$, $q_0 = \sqrt{3/2 \mathbf{s}_0 : \mathbf{s}_0}$ é a tensão deviatórica escalar e $\mathbf{s}_0 = \boldsymbol{\sigma}_0 - p_0 \mathbf{I}$ é o tensor das tensões deviatóricas correspondente.

O fenómeno do colapso associado à saturação pode ser representado graficamente de forma qualitativa recorrendo ao modelo Cam-Clay modificado em conjunto com a generalização do conceito de tensão efectiva para solos não saturados acima descrita. Por motivos de simplicidade, são assumidas condições de deformação uniaxial, em que só é permitida a deformação na direcção vertical. O processo encontra-se representado na Figura 5 simultaneamente nos planos (p',v) e (p',q) . Assume-se aqui uma sequência histórica de processos que se inicia com a sedimentação/consolidação do solo saturado, sobre a linha de consolidação anisotrópica saturada ($s=0$) de A para B. As linhas de compressão anisotrópica saturada ($s=0$) e não saturada ($s>0$) são distintas no plano (p',v) mas sobrepõem-se no plano (p',q) , no qual desenham uma linha recta, que passa pela origem, com declive η_0 , que depende de $K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v$. Em seguida, o solo sofre o efeito da erosão de uma camada superficial, ainda em condições de saturação, de B para C, sobre a “parede” elástica definida pela tensão de pré-consolidação p_c^B .

Durante o estágio seguinte, o solo é submetido a um processo de secagem, que se traduz num aumento da sucção de $s=0$ para um valor $s>0$. Este aumento da sucção tem dois efeitos simultâneos, por um lado provoca uma expansão da superfície de cedência, com a tensão de pré-consolidação a aumentar de p_c^B para p_c^E , e por outro lado ocasiona um aumento da tensão média efectiva, que produz uma compressão elástica do solo de C para D.

É importante referir que a expansão da superfície de cedência não se encontra associada a deformações plásticas, mas deve-se unicamente ao aumento da sucção, pelo que a parede “elástica” não sofre qualquer translação na direcção do eixo do volume específico. Segue-se a um aumento da tensão vertical, em condições não saturadas, devida à aplicação de uma carga vertical (como, por exemplo, a construção de um edifício), de D para F. Entre D e E, o estado de tensão sofre uma compressão elástica. No ponto E, encontra a superfície de cedência, definida por p_c^E , e entre os pontos E e F as deformações compressivas são predominantemente de natureza plástica, com a superfície de cedência a expandir, e a “parede” elástica a sofrer uma translação vertical para baixo no plano (p',v) imposta pelo evolução do valor tensão média de pré-consolidação de p_c^E para p_c^F . Finalmente, ocorre um processo de saturação, de F para G, traduzido por uma redução da sucção para zero. Inversamente ao processo de secagem, de C para D, a superfície de cedência sofre uma contracção imposta pela anulação da sucção, com o valor da tensão média de pré-consolidação a evoluir de p_c^F para p_c^G . Ao contrair-se, a superfície de cedência arrasta consigo o estado de tensão. Como o estado de tensão evolui de F para G sobre a superfície de cedência, as deformações compressivas produzidas (por o estado de tensão se encontrar na zona sub-crítica) são predominantemente plásticas. Estas deformações plásticas de compressão constituem os designados assentamentos por colapso devidos à saturação. Ao ponto final pós saturação, G, corresponde uma tensão efectiva inferior à do estado F, pré saturação, por efeito da anulação da sucção. A tensão total não varia entre F e G.

Caso o estágio DF tivesse terminado antes de atingir o ponto B que define o limite de cedência para solo saturado, não existiria colapso do solo, mas sim uma expansão elástica do mesmo. Isto porque a superfície de cedência, ao contrair-se sob o efeito da redução da sucção, não chegaria a atingir o estado de tensão, logo o único efeito seria a redução da tensão efectiva com a expansão do solo a ela associada. Por outras palavras, a ocorrência ou não de colapso por saturação está dependente da posição do estado de tensão relativamente à linha de compressão anisotrópica saturada.

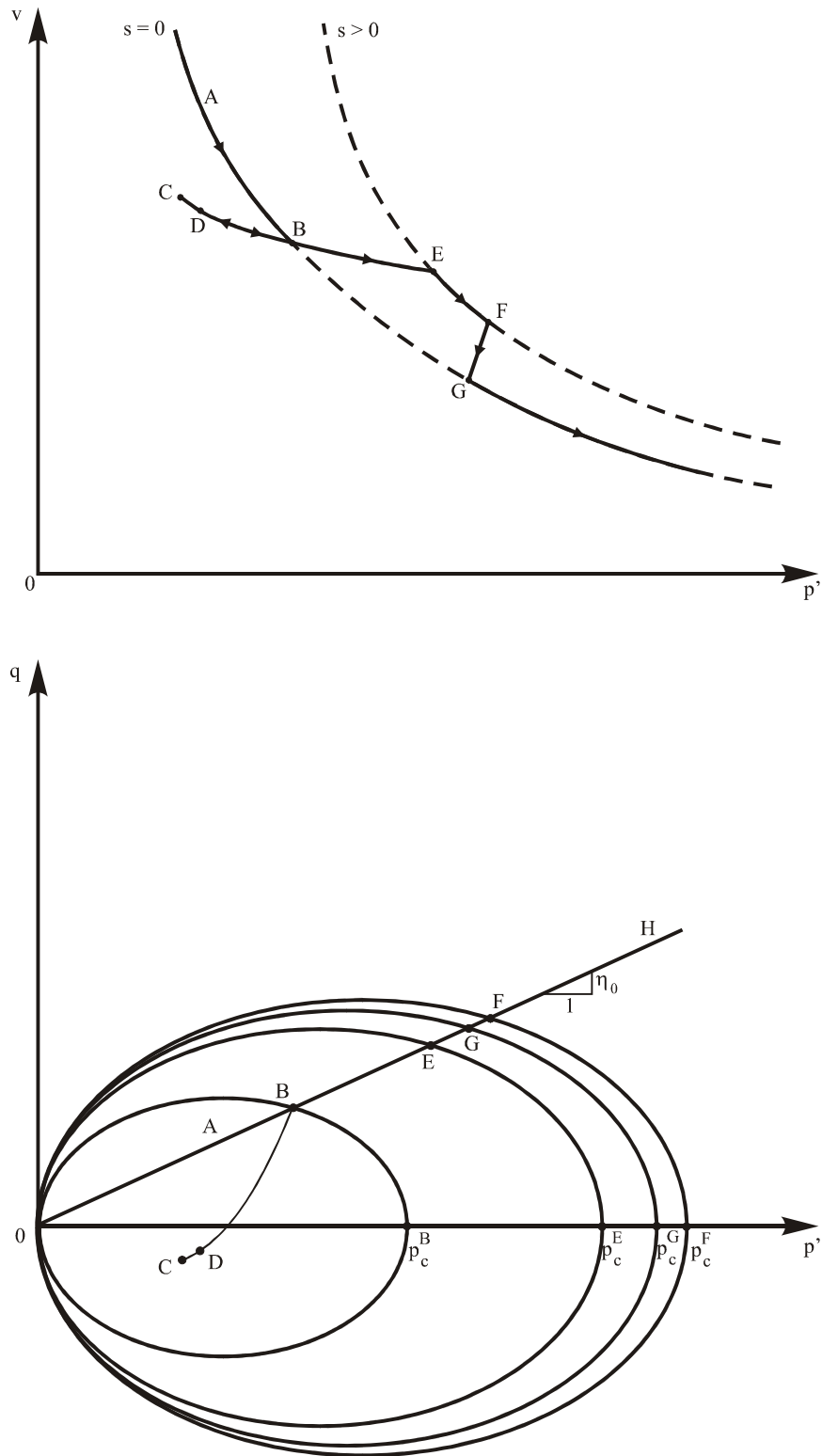


Figura 5. Representação simultânea nos planos (p', v) e (p', q) dos processos de consolidação, erosão (sobreconsolidação), secagem, carregamento vertical e saturação. Condições de deformação uniaxial (edométricas).

O algoritmo adoptado neste trabalho pretende reproduzir o fenómeno do colapso sem recorrer a um modelo com endurecimento devido à sucção como o acima descrito. As diferenças entre a abordagem utilizada no algoritmo e a resposta de uma lei constitutiva formulada para incorporar o papel desempenhado pela sucção, podem ser observadas na Figura 6.

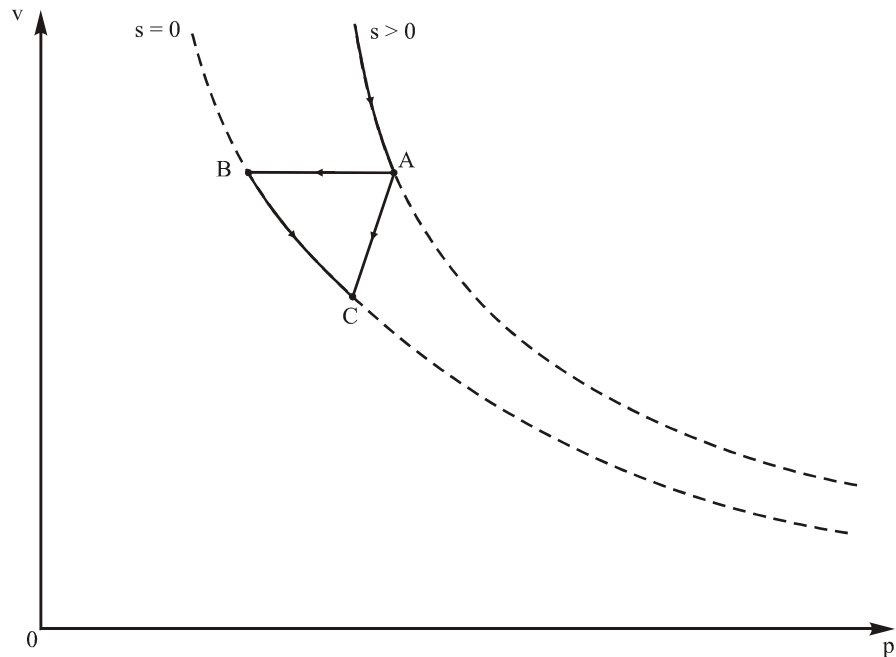


Figura 6. Procedimento adoptado no algoritmo para o colapso durante a saturação (ABC) e caminho realmente descrito pelo solo (AC).

O algoritmo simplificado assume que a transição entre o estado não saturado, A, e o estado saturado, C, se processa em duas fases distintas. Numa primeira fase, de A para B, a tensão efectiva sofre uma redução a deformação constante ($v=cte.$). O estado de tensão saturado é calculado, como descrito acima, assumindo que o solo com as constantes materiais, assim como a tensão média de pré-consolidação e o estado de tensão inicial correspondentes a $s=0$ foi submetido à mesma história (que neste caso é uma trajectória porque não há dependência explícita do tempo) de deformações do que o solo “seco” ($s>0$). Numa segunda fase, de B para C, a restrição imposta à deformação é removida e a tensão efectiva aumenta até se encontrar em equilíbrio com a tensão total imposta. A tensão efectiva final, C, é inferior à inicial, A, pelo efeito da anulação da sucção, enquanto que a tensão total em C é a mesma do que em A. Por outro lado, a lei constitutiva incorporando a influência da sucção, descreveria uma evolução gradual com a redução desta, directamente de A para C.

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE NUMÉRICA DA FACHADA DE UM EDIFÍCIO E SUA FUNDAÇÃO

Neste capítulo descrevem-se análises numéricas da interacção solo-estrutura entre a fachada de um edifício em alvenaria e o solo da sua fundação, por efeito da construção do edifício e da posterior ocorrência de saturação localizada na fundação.

3.1 Modelo numérico da fachada e sua fundação

O modelo idealizado da fachada de um edifício é simplificado de três para duas dimensões, em que se assumem condições de deformação plana na fundação e tensão plana na fachada. O modelo é analisado com o programa explícito de diferenças finitas bidimensional FLAC (Itasca, 2000). Este programa possui uma linguagem de programação própria, designada por FISH, que permite uma expansão muito grande das suas capacidades de modelação, incluindo a possibilidade de acrescentar novas leis constitutivas. A utilização da linguagem FISH foi necessária para levar a cabo a análise numérica que aqui se descreve.

A geometria do modelo da fachada de edifício e fundação pode ser observada na Figura 7. A geometria da fachada apresenta simetria horizontal por reflexão, pelo que só metade desta e respectiva fundação é modelada. A fachada, em alvenaria, corresponde a um edifício de dois pisos com 6m de altura e 18m de desenvolvimento horizontal. A fundação é constituída por uma camada de solo argiloso com 5m de espessura, a qual assenta sobre uma formação rochosa considerada como indeformável nestas análises. A fachada inclui 10 janelas de 1m×1m e 2 portas de 1m×2m.

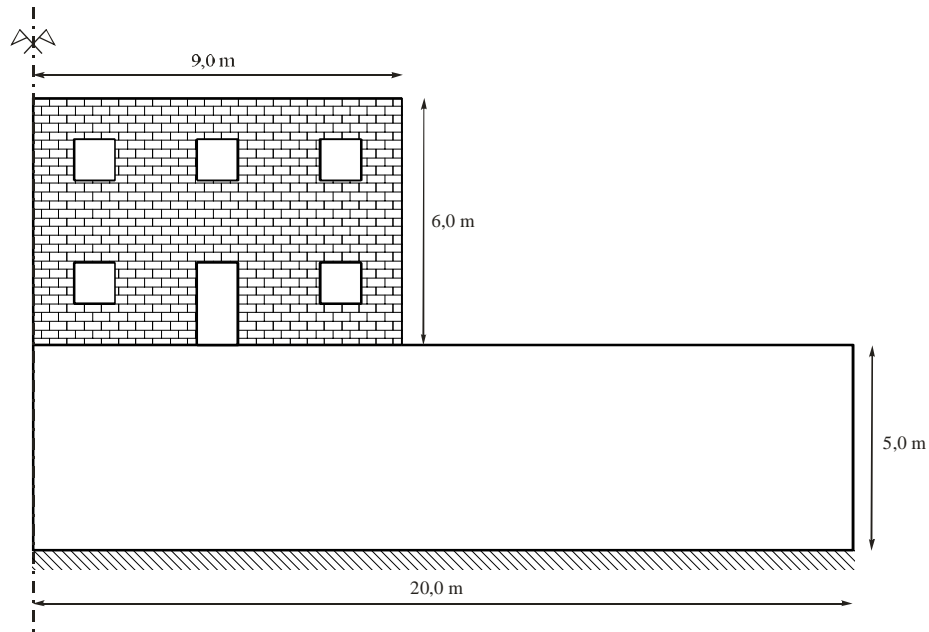


Figura 7. Geometria e dimensões do modelo da fachada de edifício e fundação.

O modelo foi discretizado numa malha de elementos finitos (designados por zonas no programa FLAC) que se encontra representada na Figura 8 juntamente com as condições de fronteira. Entre a fachada e a fundação foi definida uma interface, que possibilita o eventual deslizamento ou separação entre as duas partes. A fundação foi discretizada em 1600 elementos e a fachada em 752 elementos. Os elementos são quadrados com 0,25m de lado.

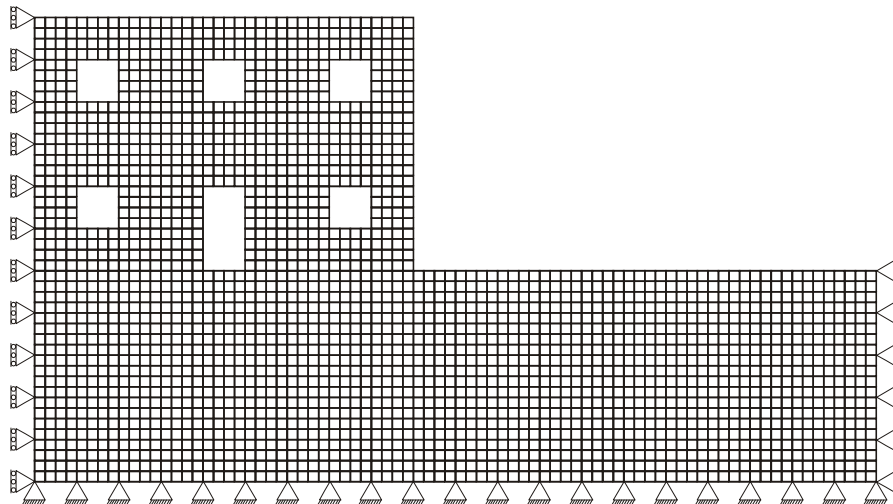


Figura 8. Malha da fachada e fundação com as condições de fronteira.

3.1.1 Alvenaria

O comportamento da alvenaria é complexo e existem leis constitutivas especialmente desenvolvidas para a sua representação, como as descritas em Lourenço (1996). No entanto, e porque a sua implementação no programa FLAC exigiria demasiado tempo, decidiu-se adoptar o modelo elástico perfeitamente plástico de Mohr-Coulomb não associado, com limitação da tensão de tracção, disponível no programa FLAC. Para a atribuição das constantes materiais consideraram-se duas abordagens alternativas. Ambas utilizam os valores da resistência à compressão, σ_c , e à tracção, σ_t , que resultam, respectivamente, dos ensaios uniaxiais de tensão de compressão e de tracção. Na primeira abordagem, ilustrada na Figura 9 utilizando a representação de Mohr, a linha recta que define a rotura é tangente a ambos os círculos que definem os estados uniaxiais de compressão e de tracção, com uma linha vertical adicional a definir a resistência à tracção.

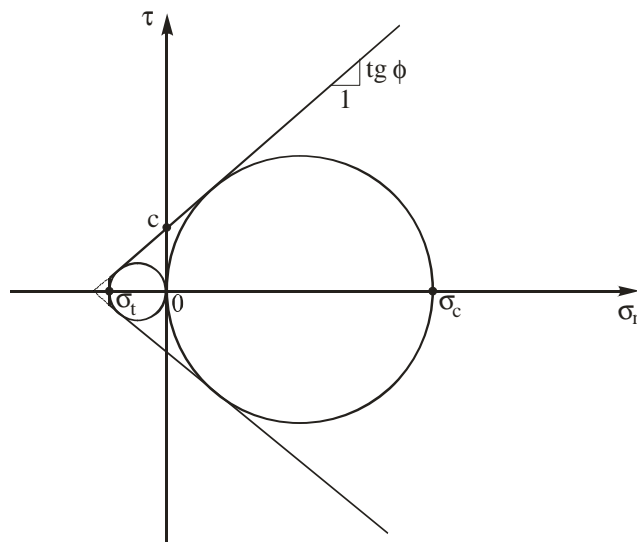


Figura 9. Critério de Mohr-Coulomb aplicado a um material em que se conhece a resistência à compressão e à tracção. O critério incorpora um limite adicional para a resistência à tracção.

Na segunda abordagem, representada graficamente na Figura 10, considera-se que o ângulo de atrito é nulo, e cai-se no caso do modelo de Tresca, com limitação da resistência a tensões de tracção. Optou-se pela segunda abordagem, porque a primeira dá origem a elevados ângulos de atrito, com $|\sigma_c| \ll |\sigma_t|$, o que restringe drasticamente o modo rotura por tracção.

Como se pode observar na Figura 9, a linha vertical sobre a qual ocorre a rotura por tracção, apresenta uma extensão muito reduzida. Este modo de rotura está associado à abertura de fendas e, no programa FLAC, induz uma perda de resistência à tracção de σ_t para zero, precisamente para simular este efeito. Privilegia-se assim o modo de rotura à tracção, mais relevante na alvenaria, em detrimento da rotura por corte. Os valores das constantes do modelo de Mohr-Coulomb são assim calculados: ângulo de atrito, $\phi=0$, coesão, $c = \sigma_c / 2$, resistência à tracção, σ_t , e ângulo de dilatância, $\psi=0$. Os valores para a resistência à compressão simples e à tracção foram obtidos a partir de ensaios efectuados em panos de alvenaria reproduzidos em Lourenço (1996). Foram atribuídos os seguintes valores: $\sigma_c=7500\text{kPa}$ e $\sigma_t=100\text{kPa}$. Os valores das constantes elásticas seguiram o sugerido em Liu *et al.* (2000): módulo de elasticidade $E=10\text{GPa}$ e coeficiente de Poisson $\nu=0,2$. Para o peso volúmico da fachada adoptou-se $\gamma=20\text{kN/m}^3$.

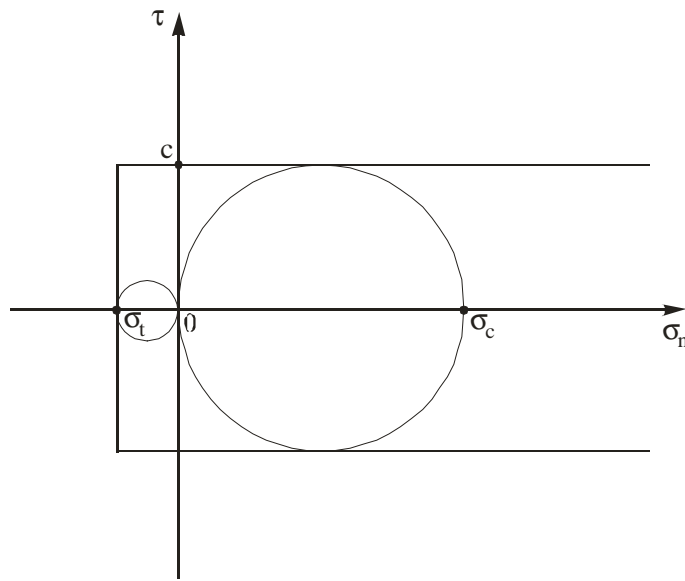


Figura 10. Critério de Tresca aplicado a um material em que se conhece a resistência à compressão e à tracção. O modelo incorpora um limite adicional para a resistência à tracção.

3.1.2 Caracterização do estado inicial da fundação

Antes de proceder à análise numérica da construção da fachada e posterior saturação da fundação, é necessário definir o campo inicial de tensões e de pré-consolidação instalado no solo da fundação para poder utilizar o modelo Cam-Clay modificado. Uma origem frequente para um solo de tipo argiloso é a sedimentação em meio aquático (marinho ou lacustre) seguida de um rebaixamento do nível da água e erosão de uma camada superficial. É esta origem que se considera para o solo de fundação. Na Figura 11 representa-se esquematicamente a situação imediatamente anterior e aquela imediatamente posterior à erosão da camada superficial de solo que é responsável pela sua sobreconsolidação. A tensão efectiva vertical máxima a que o solo esteve submetido é $\sigma_v^{\text{max}} = \gamma'(h+H)$, que corresponde a consolidação normal e portanto o coeficiente de impulso em repouso é $K_0^{\text{NC}} = 1 - \sin \phi_{cs}$, sendo ϕ_{cs} o ângulo de atrito dos estados críticos. Assim o valor da tensão média efectiva de pré-consolidação pode ser calculado como:

$$p_c = p'_{\text{max}} \left[1 + \left(\frac{\eta_{\text{NC}}}{M} \right)^2 \right], \quad \text{com } p'_{\text{max}} = \frac{\gamma'(h+H)(1+2K_0^{\text{NC}})}{3} \text{ e } \eta_{\text{NC}} = \frac{3(1-K_0^{\text{NC}})}{1+2K_0^{\text{NC}}}. \quad (7)$$

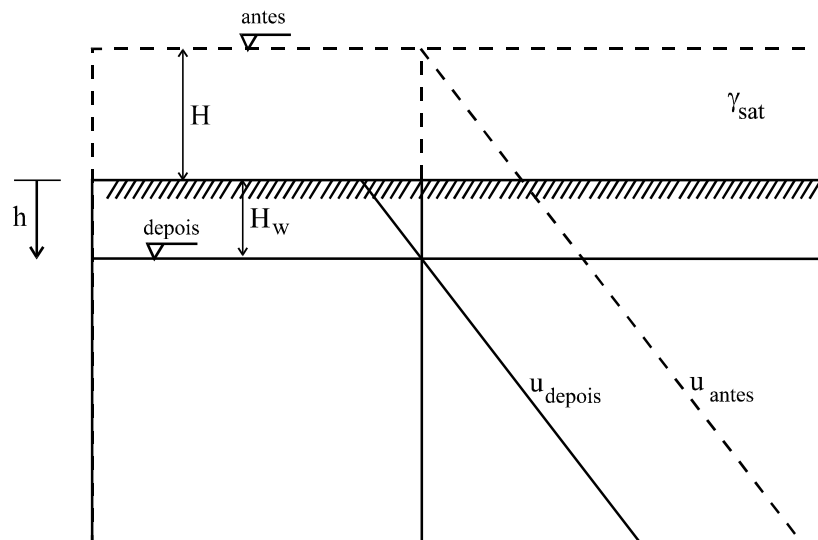


Figura 11. Sedimentação/consolidação seguida da erosão da camada superficial de espessura H e rebaixamento do nível freático.

Por sua vez a tensão vertical pós-erosão é $\sigma'_v = \gamma' h + \gamma_w H_w$. O coeficiente de impulso em repouso sobreconsolidado pode ser obtido a partir da expressão empírica $K_0^{OC} = K_0^{NC} OCR^w$, com $w=0,4$. Por sua vez o grau de sobreconsolidação $OCR = \sigma_v^{\max} / \sigma'_v$. O valor da tensão efectiva horizontal sobreconsolidada é $\sigma'_h = K_0^{OC} \sigma'_v$. A pressão neutra fica $u_w = \gamma_{sat} (h - H_w)$.

O volume específico, v , também é uma variável de estado do modelo Cam-Clay, pelo que tem de ser inicializada. Depende da tensão média efectiva, p' , e do valor da tensão média de pré-consolidação, p_c . Pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$v = N - \lambda \ln \frac{p_c}{p_{ref}} + \kappa \ln \frac{p_c}{p'} \quad (8)$$

Neste estudo adoptou-se para o solo de fundação uma argila conhecida como caulino “speswhite”, por ter sido amplamente ensaiada a diferentes níveis de sucção. Os valores das constantes materiais do modelo Cam-Clay modificado para esta argila foram obtidos de Loret e Khalili (2002). Relativamente às constantes, que são independentes do grau de saturação, o declive da linha dos estados críticos é $M=0,85$ e a compressibilidade elástica é $\kappa=0,015$. Para o comportamento elástico, considerou-se ainda o coeficiente de Poisson constante, $\nu=0,2$, o que significa que o módulo de distorção é proporcional ao módulo de compressibilidade volumétrica, e portanto, aumenta também com a tensão média efectiva. Outro valor importante é a sucção de entrada de ar, que para este solo é $s_e=85\text{kPa}$. Os parâmetros que definem a linha de compressão isotrópica virgem (LCI), e que dependem do valor da sucção, foram determinados para 4 valores distintos desta (Loret e Khalili, 2002), como se apresenta na Tabela 1. Os valores foram determinados para uma pressão de referência $p_{ref}=100\text{kPa}$. O peso volúmico seco do solo é $\gamma_d=17,02\text{kN/m}^3$.

	$s \leq s_e = 85\text{kPa}$	$s = 100\text{kPa}$	$s = 200\text{kPa}$	$s = 300\text{kPa}$
λ	0,125	0,273	0,327	0,38
N	2,06	2,30	2,44	2,60

Tabela 1. Valores de λ e N para diferentes valores da sucção.

As curvas LCI para os diferentes níveis de sucção encontram-se representadas na Figura 12.

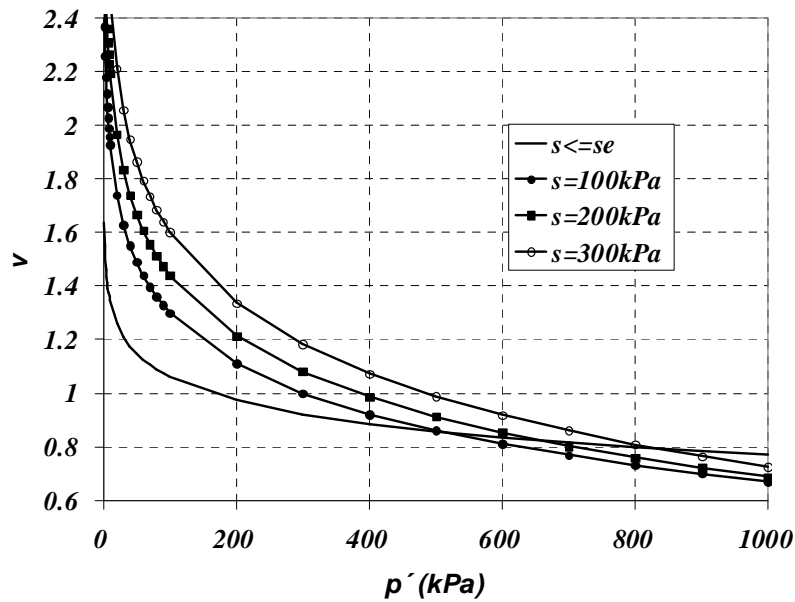


Figura 12. Linhas de compressão isotrópica para diferentes valores da sucção

3.1.3 Caso de referência

O cenário de referência serve de base para avaliar os efeitos da variação da sobreconsolidação inicial do solo, da sucção inicial do solo e da forma e localização da zona onde ocorre a saturação. No caso de referência, a espessura da camada de solo erodida, que é responsável pelo nível de sobreconsolidação do solo de fundação, é $H=40\text{m}$. Se a altura H for demasiado pequena, a fundação não será capaz de suportar a fachada. No final da fase erosiva, o nível freático coincide com a superfície do terreno, com $H_w=0$.

A construção da fachada ocorre sobre um solo sobreconsolidado que sofreu o processo de sedimentação/consolidação seguido de erosão como acima descrito, a que se segue a secagem da camada de 5m de espessura do solo de fundação, de modo que este fica com uma sucção matricial constante em profundidade. O valor desta sucção é $s=300\text{kPa}$. Como se está a utilizar uma formulação bifásica (sólida+liquida), a esta sucção corresponde uma pressão intersticial equivalente $\bar{u}_w = u_a - \chi(s)s$. Assumindo que a fase gasosa é conexa, $u_a=100\text{kPa}$, que é o valor da pressão atmosférica. Como $s > s_e=85\text{kPa}$, $\chi = (85/300)^{0,55} = 0,5$. Assim $\bar{u}_w = -50\text{kPa}$. Estão assim especificadas as condições iniciais prevaletentes na fundação antes da construção da fachada, com um campo de tensões auto-equilibrado.

A construção da fachada do edifício é simulada através do aumento gradual da densidade do material que a constitui, desde zero até atingir o seu valor real.

Na fase final, uma zona delimitada da fundação é saturada. Nessa zona o estado de tensão é substituído pela tensão saturada, que foi calculada, em paralelo à tensão real, desde o início da fase de construção da fachada, utilizando os parâmetros do solo saturado em vez dos parâmetros do solo não saturado (para $s=300\text{kPa}$). A pressão intersticial equivalente, que representa o efeito da sucção, é também reduzida para zero dentro da zona saturada. É nesta fase que podem ocorrer os assentamentos por colapso. No caso de referência a zona saturada é rectangular com $3\text{m}\times 1\text{m}$ ($6\text{m}\times 1\text{m}$ considerando a simetria) e situa-se à superfície junto ao eixo de simetria.

3.2 Resultados das análises

Nesta secção são apresentados, discutidos e comparados entre si os resultados das diferentes análises efectuadas. Primeiro são apresentados os resultados relativos à fase de construção da fachada, seguidos dos resultados correspondentes ao final da fase de saturação. A comparação entre estas duas fases permite avaliar os efeitos da saturação.

O caso de referência é utilizado como base relativamente à qual são aferidos os efeitos dos diferentes factores considerados. Foi feita uma análise para um valor da sucção matricial inicial, $s=100\text{kPa}$, distinto do assumido no caso de referência, que foi $s=300\text{kPa}$. Foram também efectuadas duas análises para dois níveis de sobreconsolidação inicial do solo de fundação diferentes do caso de referência: um inferior, com $H=25\text{m}$, e um superior com $H=80\text{m}$. Finalmente, foram efectuadas diversas análises, nas quais se assumiram várias dimensões e posições para a zona saturada, que se encontram representadas na Figura 13.

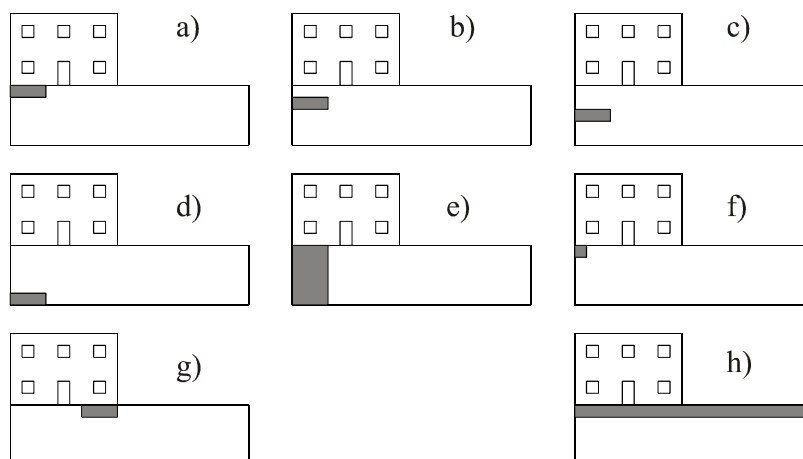


Figura 13. Dimensões e posição da zona saturada. a) $3\text{m} \times 1\text{m}$ sobre o eixo de simetria superficial; b) $3\text{m} \times 1\text{m}$ sobre o eixo a 1m de prof.; c) $3\text{m} \times 1\text{m}$ sobre o eixo a 2m de prof.; d) $3\text{m} \times 1\text{m}$ sobre o eixo a 4m de prof.; e) $3\text{m} \times 5\text{m}$ sobre o eixo; f) $1\text{m} \times 1\text{m}$ sobre o eixo superficial; g) $3\text{m} \times 1\text{m}$ superficial afastado 6m do eixo; h) $20\text{m} \times 1\text{m}$ superficial.

3.2.1 Caso de referência

O caso de referência corresponde à zona saturada representada na Figura 13 a).

3.2.1.1. Fase de construção da fachada

Na Figura 14 pode ser observada a configuração deformada da fachada e fundação, após a fase de construção, com os deslocamentos aumentados 10 vezes. Verifica-se que os assentamentos da fachada são praticamente uniformes, com o valor aproximado de 2cm.

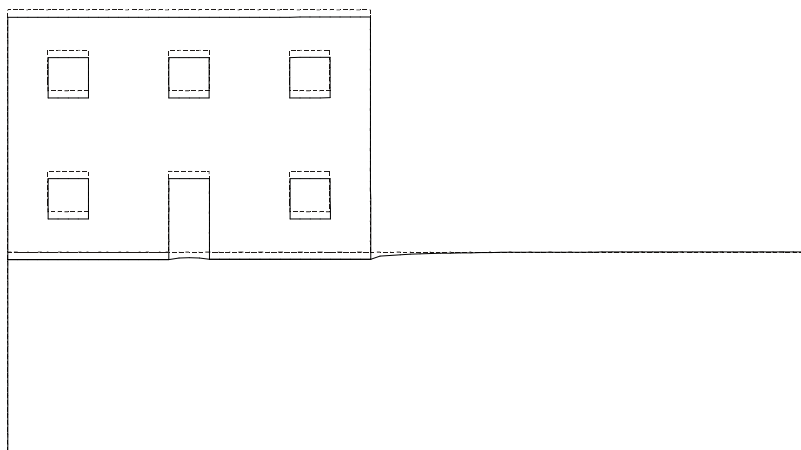


Figura 14. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.

A Figura 15 mostra a distribuição da fendilhação na fachada após a fase construtiva. Esta representação permite apreciar o nível de danos na fachada. No modelo utilizado, as fendas não são modeladas directamente. As fendas são representadas, para cada elemento, como uma linha orientada perpendicularmente à direcção da deformação de extensão máxima. O comprimento da linha é proporcional à deformação de extensão. Só se considera abertura de fenda para extensões superiores a 0,0005. Na representação gráfica, o comprimento de 1m corresponde a uma extensão igual a 0,05. Considerando que a deformação se localiza num elemento, e como estes têm 0,25m de lado, esta deformação corresponde a uma abertura da fenda igual a 1,25cm. Verifica-se a ocorrência de fendas pouco expressivas, com abertura máxima de cerca de 0,8mm, localizadas acima da porta e orientadas verticalmente. Este reduzido nível de danos é compatível com o padrão uniforme de assentamentos verificado.

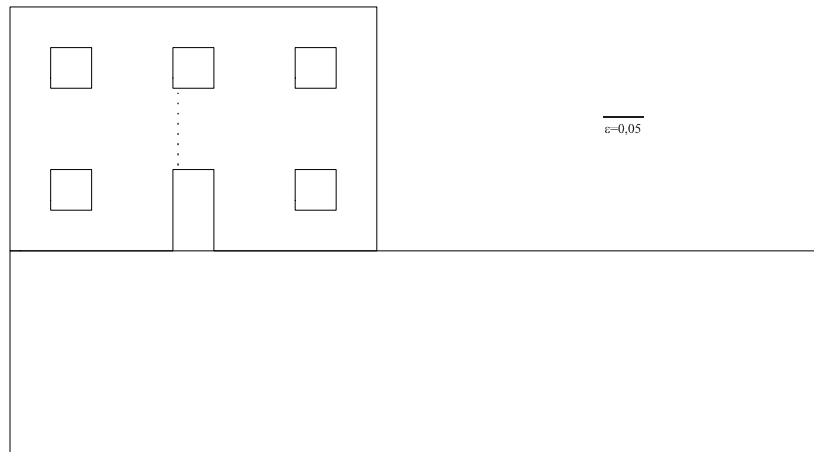


Figura 15. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05).

Na Figura 16 encontra-se representado o campo de tensão média efectiva, p' , existente na fundação após a construção da fachada.

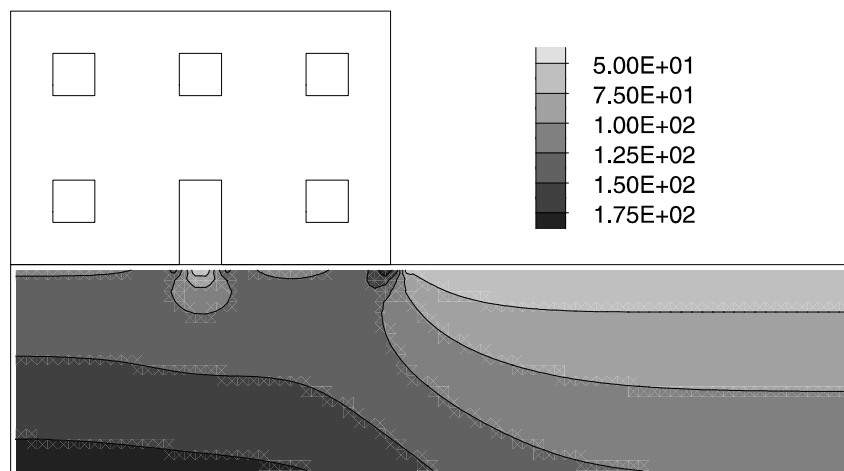


Figura 16. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.

O campo de deformações volumétricas encontra-se representado na Figura 17 para a fachada e fundação.

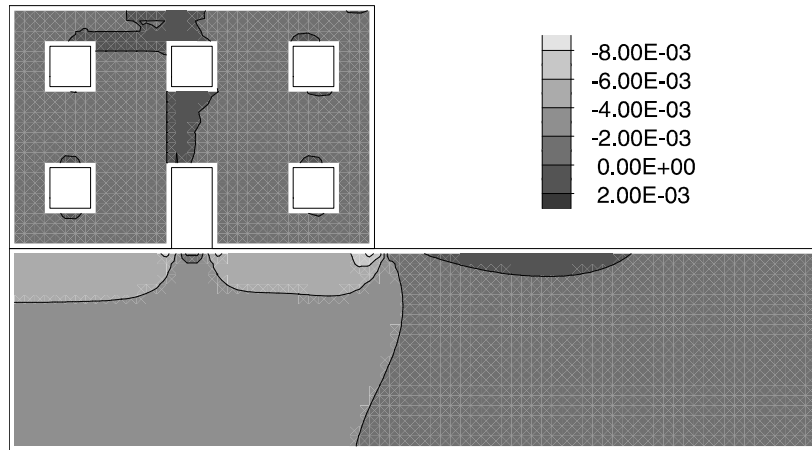


Figura 17. Deformação volumétrica (compressão negativa).

Na Figura 18 podem ser observadas as trajectórias espaciais de tensão prevaletentes no final da fase de construção da fachada. Estas curvas, ortogonais entre si, são tangentes em cada ponto às tensões principais no plano. Estas trajectórias de tensão são aqui designadas por espaciais, por contraste com as trajectórias “locais” de tensão, que decorrem no espaço das tensões e representam a história de tensão de um ponto material. As trajectórias espaciais de tensão permitem visualizar a distribuição no espaço da orientação das tensões principais, mas nada mostram relativamente à sua magnitude.

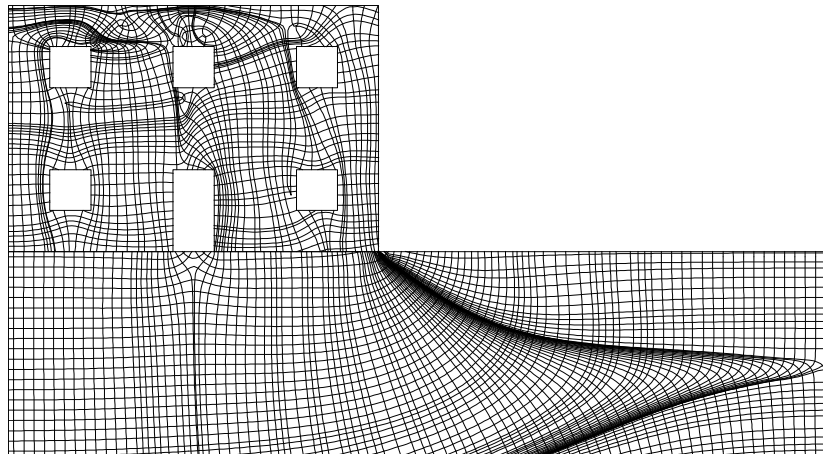


Figura 18. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.

3.2.1.2. Fase de saturação

A saturação dá origem a assentamentos adicionais não uniformes (ver Figura 19). Os maiores assentamentos, cerca de 5cm, verificam-se na zona saturada, junto ao eixo de simetria.

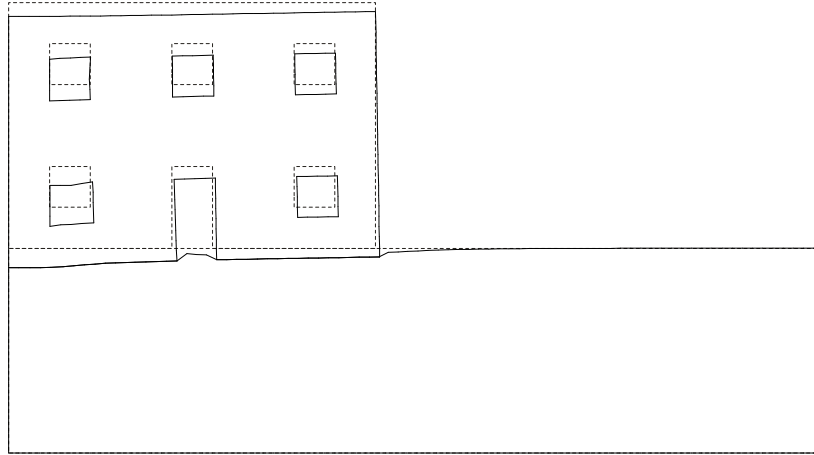


Figura 19. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.

A saturação dá origem a um padrão de fendilhação relativamente extenso na fachada e que abrange a zona próxima do eixo de simetria. A abertura máxima de fendas é cerca de 4mm. Este comportamento deve-se ao maior assentamento da zona central da fachada, acima da zona saturada, onde ocorreram os assentamentos por colapso.

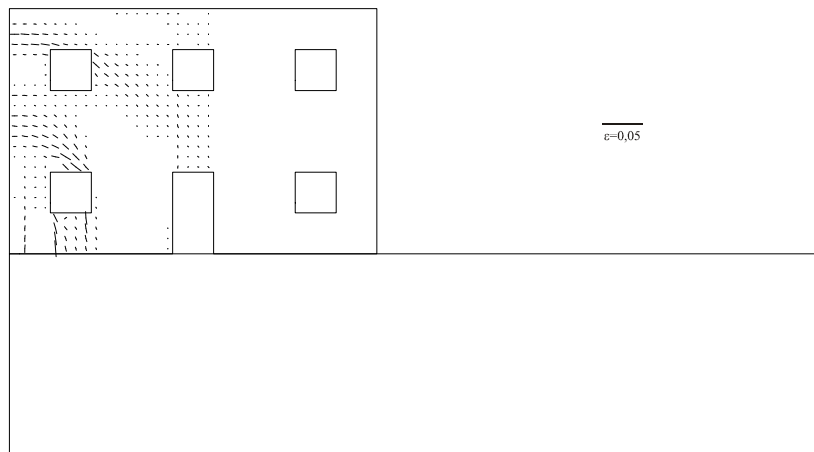


Figura 20. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05).

A tensão média efectiva, p' , sofre uma redução significativa na zona saturada, como se pode ver claramente na Figura 21.

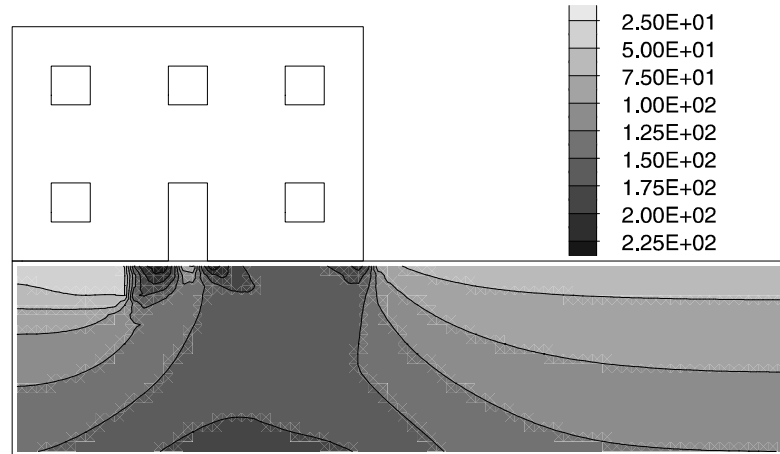


Figura 21. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.

Na zona saturada, onde ocorre o colapso, verifica-se uma deformação volumétrica compressiva significativa associada à redução de p' , descrita acima.



Figura 22. Deformação volumétrica (compressão negativa).

As direcções principais de tensão sofrem uma alteração de acordo com o ilustrado na Figura 23.

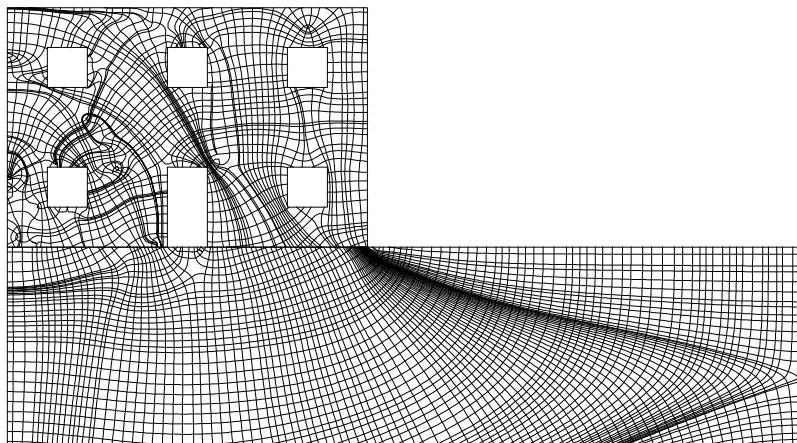


Figura 23. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.

3.2.1.3. Efeito da saturação

O efeito da saturação, e assentamentos por colapso do solo associados, pode ser melhor avaliado pela comparação directa com a situação imediatamente após a fase de construção. Esta comparação é feita relativamente aos deslocamentos verticais e tensões verticais totais à superfície do terreno e na fundação sobre o eixo de simetria.

Na Figura 24, verifica-se a ocorrência de um assentamento significativo da fachada por colapso. O assentamento não é uniforme, variando entre cerca de 3cm sobre o eixo de simetria e cerca de 0,5cm no extremo da fachada. Os assentamentos por colapso são pouco significativos no vão da porta.

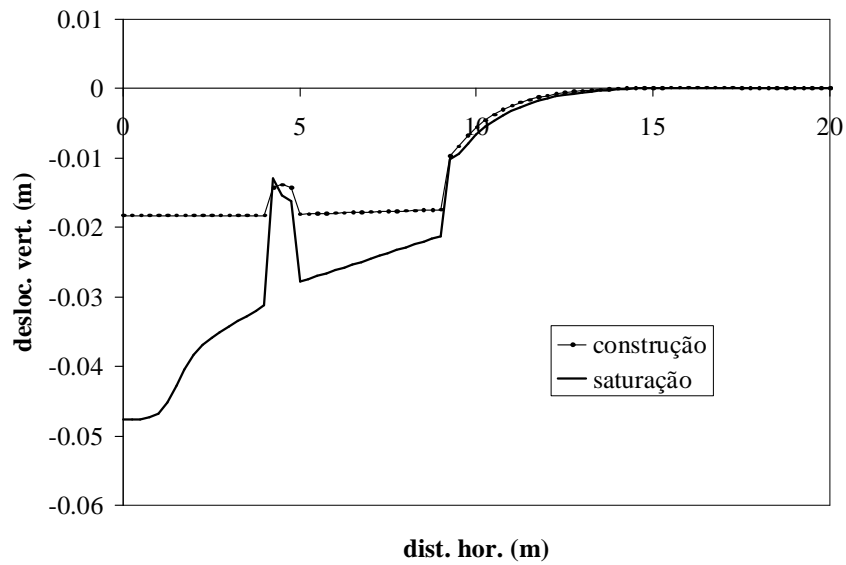


Figura 24. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

Em profundidade, sobre o eixo de simetria, verificam-se assentamentos que se reduzem até se anularem a aproximadamente 1m abaixo da superfície (ver Figura 25). A profundidades superiores verificam-se empolamentos (deslocamentos verticais para cima).

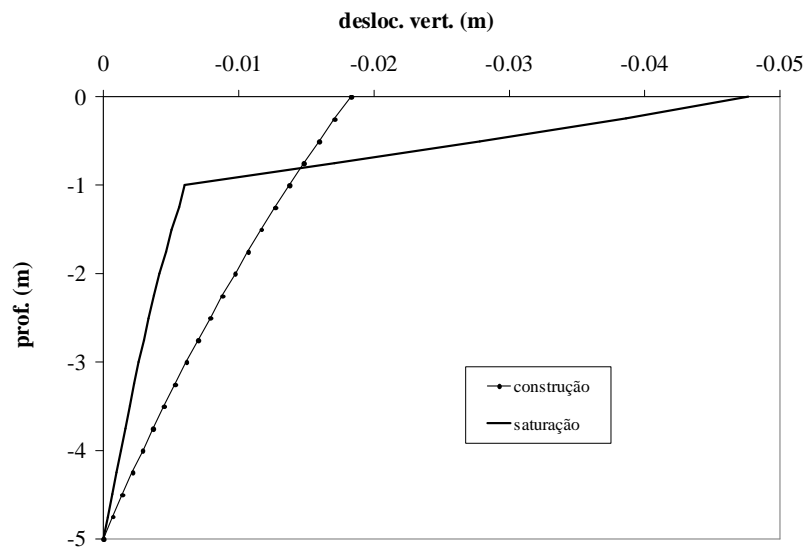


Figura 25. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

Da comparação entre a distribuição da tensão vertical total ao nível da superfície do terreno no final da fase de construção e após os assentamentos por colapso (saturação), constata-se uma redução desta sobre a zona saturada e um aumento sob o resto da fundação da fachada (ver Figura 26). Verifica-se, portanto, uma transferência de tensão vertical, da zona saturada para a restante superfície de fundação. Os assentamentos superficiais na zona não saturada são devidos essencialmente a esta transferência de tensão, que se deve à rigidez da fachada.

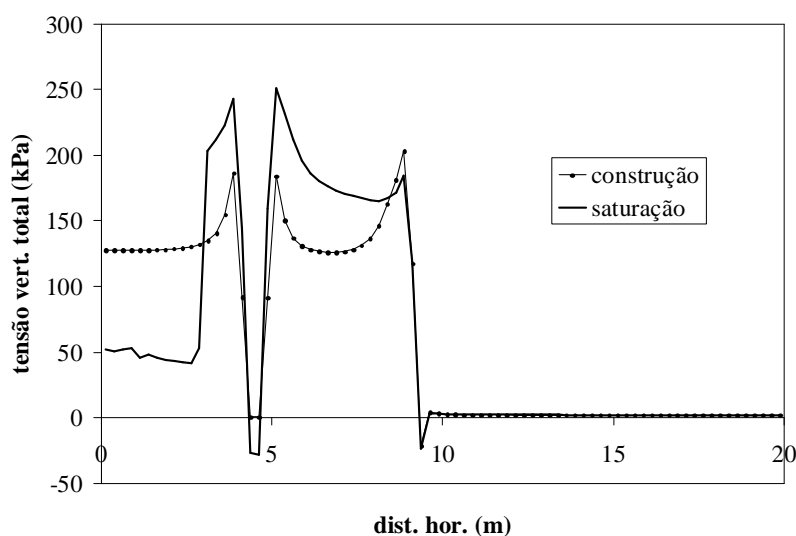


Figura 26. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

Relativamente à variação da tensão vertical total em profundidade sobre o eixo de simetria, constata-se uma redução praticamente constante desta, de aproximadamente 75kPa (ver Figura 27).

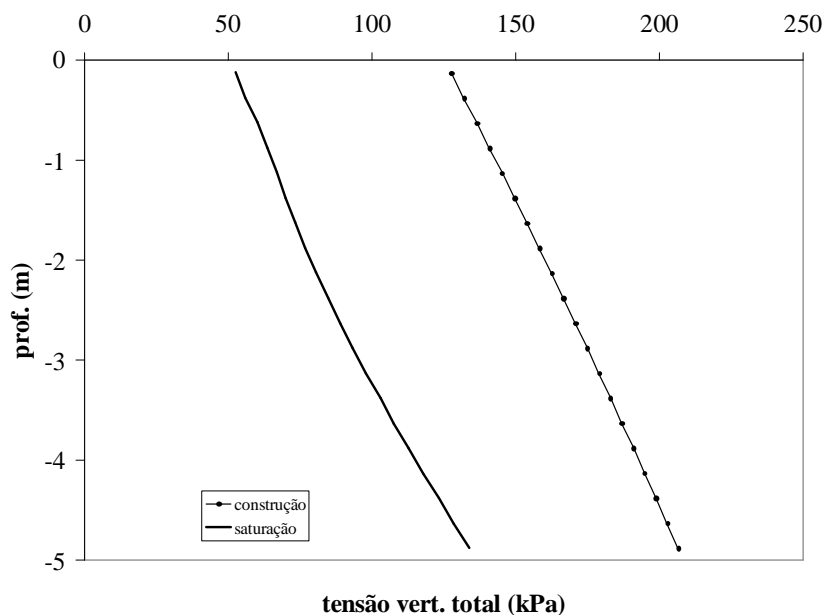


Figura 27. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

3.2.2 Caso com sucção inicial de 100kPa

Com esta análise pretende-se estudar a influência da sucção inicial existente no terreno não saturado. Considera-se uma sucção de 100kPa, inferior ao caso de referência com 300kPa. À sucção de 100kPa corresponde uma pressão intersticial equivalente $\bar{u}_w = -8,6\text{kPa}$. Esta sucção afecta não só a fase de saturação, mas também a fase de construção.

3.2.2.1. Fase de construção da fachada

O terreno não saturado com uma sucção de 100kPa dá origem a assentamentos uniformes de cerca de 3cm. Este valor é aproximadamente 50 por cento superior ao valor correspondente para o solo com 300kPa de sucção. A deformada encontra-se representada na Figura 28.

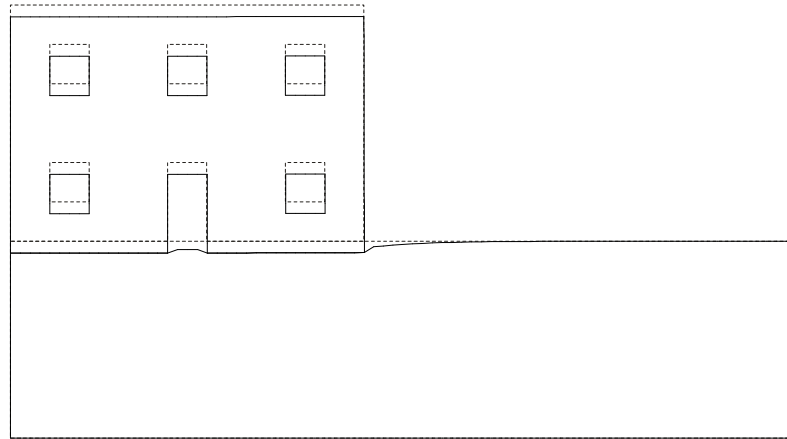


Figura 28. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.

Apesar dos assentamentos serem superiores aos do caso de referência ($s=300\text{kPa}$), o padrão e a magnitude das fissuras (Figura 29) são similares. Esta constatação é consistente com a uniformidade dos assentamentos.

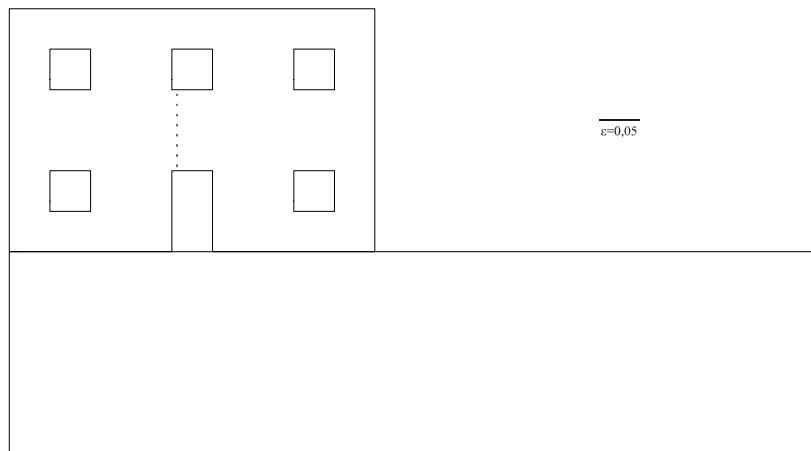


Figura 29. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: $1\text{m} \Leftrightarrow$ extensão 0,05).

A distribuição e magnitude das tensões médias efectivas (Figura 30), são similares às do caso de referência.

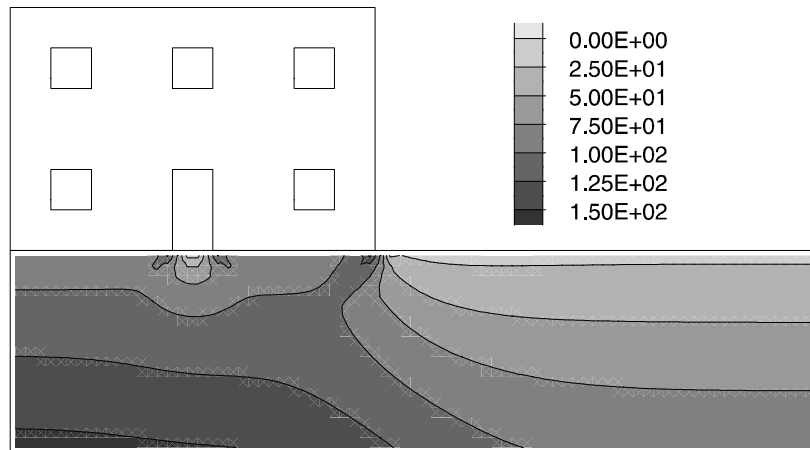


Figura 30. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.

As deformações volumétricas (ver Figura 31) apresentam uma distribuição similar à do caso de referência, mas as deformações de compressão na fundação são maiores.

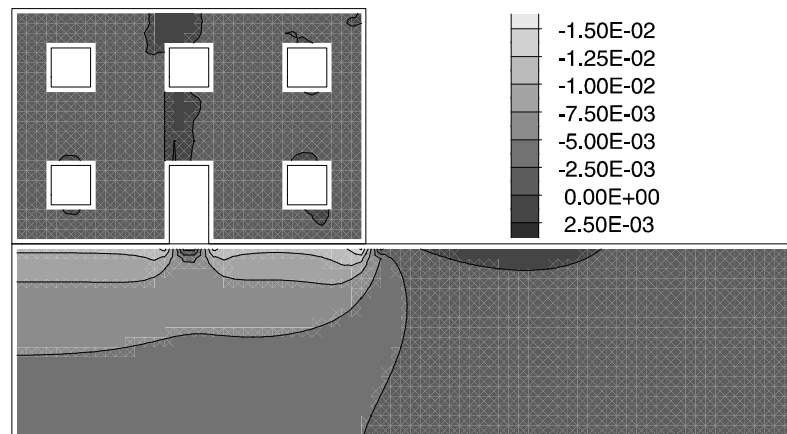


Figura 31. Deformação volumétrica (compressão negativa).

As direcções principais de tensão sofrem uma alteração de acordo com o ilustrado na Figura 32.

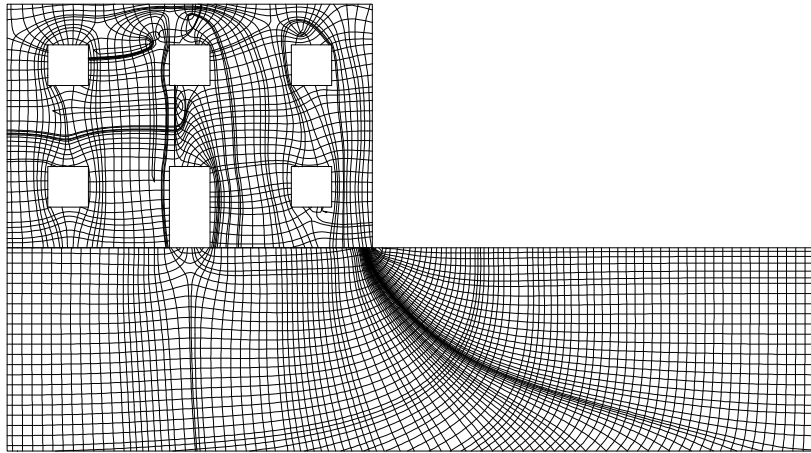


Figura 32. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.

3.2.2.2. *Fase de saturação*

A saturação dá origem a assentamentos não uniformes, mais elevados sobre a zona saturada. O valor máximo é 5,5 cm e ocorre próximo do eixo de simetria. Este valor é apenas ligeiramente superior ao valor correspondente para o solo com 300kPa de sucção. A deformada encontra-se representada na Figura 33. A zona saturada é aquela representada na Figura 13 a).

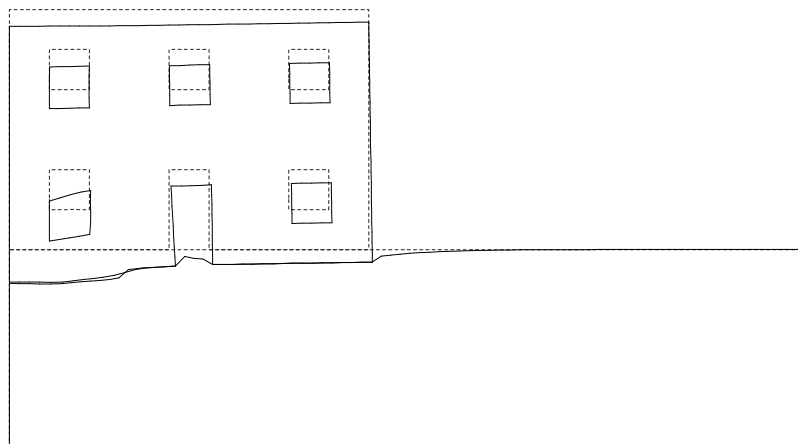


Figura 33. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.

A saturação dá origem a um padrão de fendilhação relativamente extenso na fachada, que abrange a zona próxima do eixo de simetria, mais intenso no piso inferior (Figura 34). Este comportamento deve-se ao maior assentamento da zona central da fachada, acima da zona saturada, onde ocorreram os assentamentos por colapso. A abertura máxima de fendas é cerca de 15mm, quase 4 vezes superior ao caso de referência (300kPa).

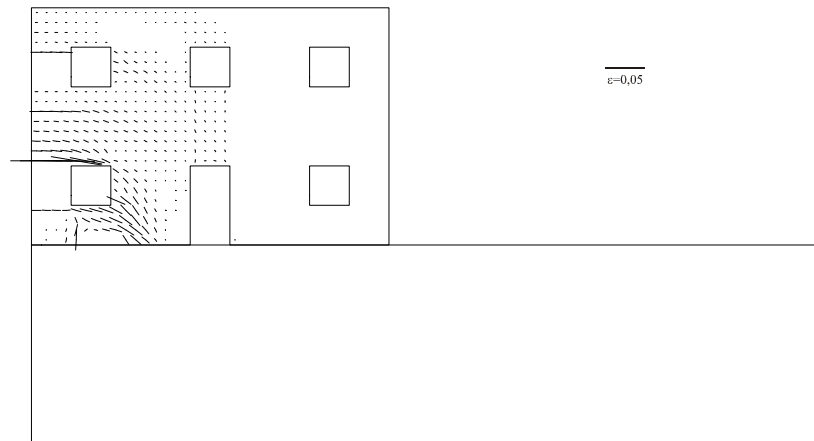


Figura 34. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05).

A tensão média efectiva, p' , sofre uma redução significativa na zona saturada, como se pode ver claramente na Figura 35.

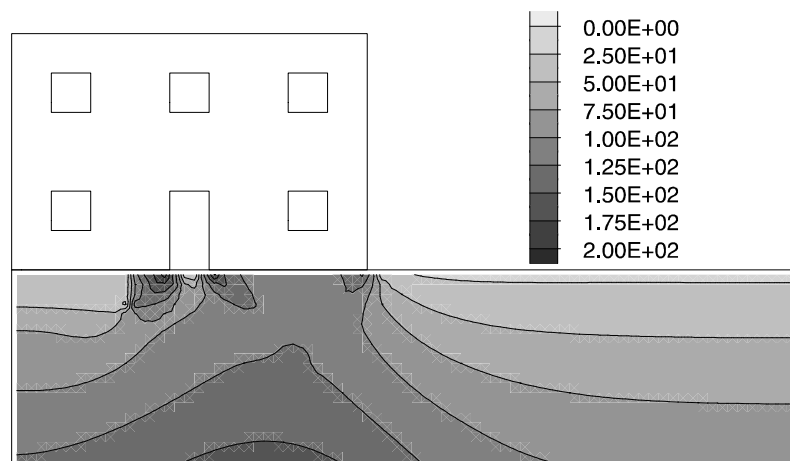


Figura 35. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.

Na zona saturada, onde ocorre o colapso, verifica-se uma deformação volumétrica compressiva significativa (Figura 36) associada à redução de p' descrita acima.

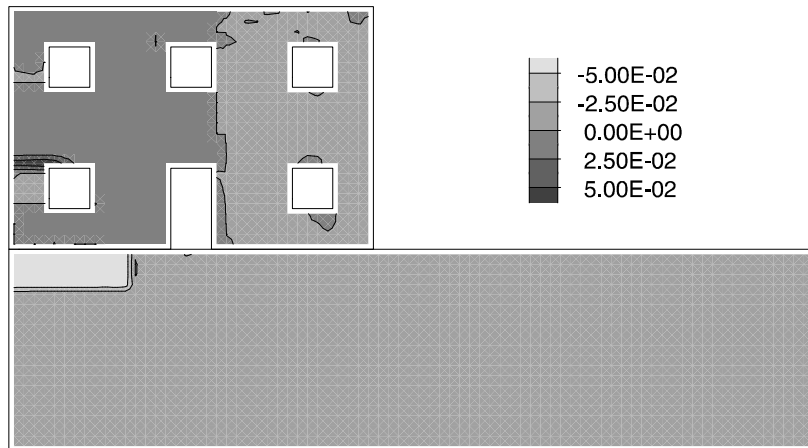


Figura 36. Deformação volumétrica (compressão negativa).

As direcções principais de tensão distribuem-se de acordo com o ilustrado na Figura 37.

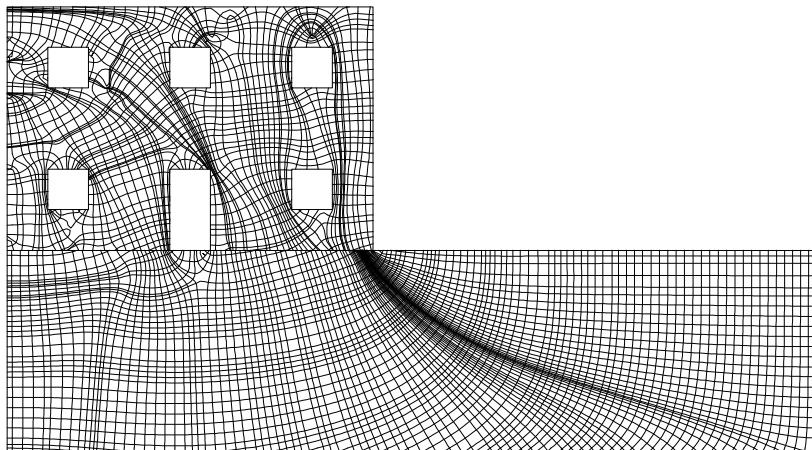


Figura 37. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.

3.2.2.3. Efeito da saturação

Na Figura 38, verifica-se a ocorrência de um assentamento significativo da fachada por colapso. O assentamento não é uniforme, concentrando-se sobre a zona saturada e variando entre cerca de 5,5cm sobre o eixo de simetria e 0,2cm no extremo da fachada. Os assentamentos por colapso são significativamente superiores aos do caso de referência, a que corresponde uma sucção maior (300kPa).

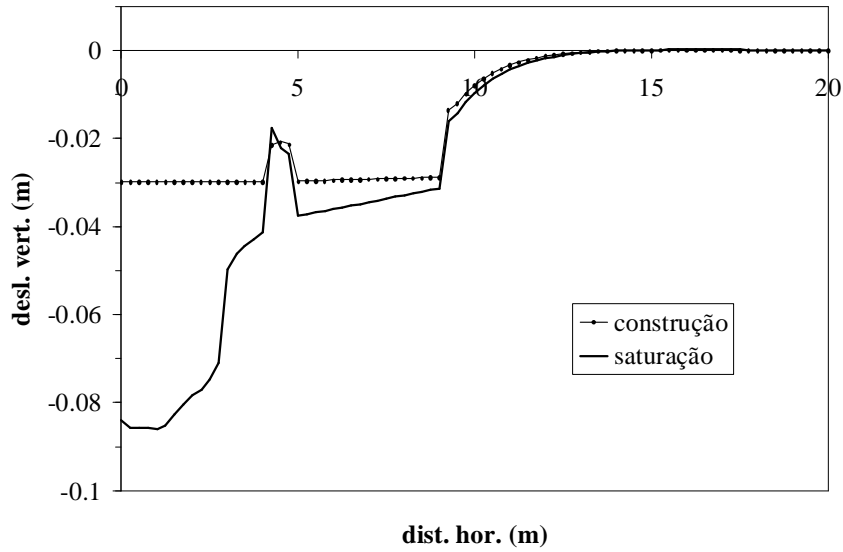


Figura 38. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

Em profundidade, sobre o eixo de simetria, verificam-se assentamentos que se reduzem até se anularem a aproximadamente 1m abaixo da superfície (ver Figura 39). A profundidades superiores verificam-se empolamentos (deslocamentos verticais para cima).

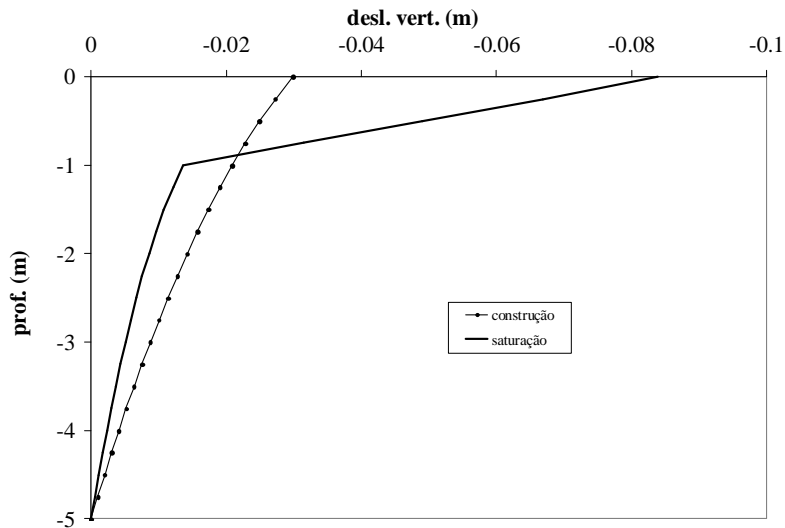


Figura 39. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

Da comparação entre a distribuição da tensão vertical total ao nível da superfície do terreno no final da fase de construção e após os assentamentos por colapso (saturação), constata-se uma redução desta sobre a zona saturada e um aumento sob o resto da fundação da fachada (ver Figura 40). Verifica-se, portanto, uma transferência de tensão vertical, da zona saturada para a restante superfície de fundação. Os assentamentos superficiais na zona não saturada são devidos essencialmente a esta transferência de tensão, que se deve à rigidez da fachada. A redução da tensão vertical sobre a zona saturada é menor do que no caso de referência.

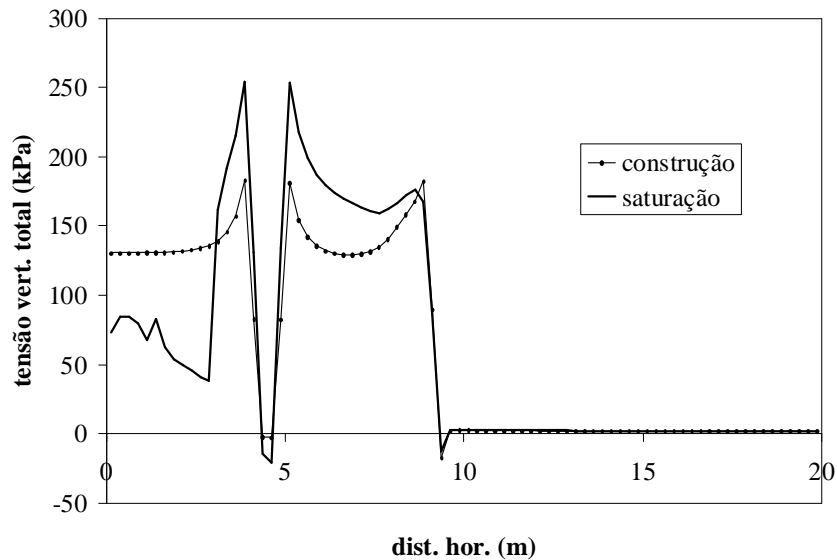


Figura 40. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

Relativamente à variação da tensão vertical total em profundidade sobre o eixo de simetria, constata-se uma redução praticamente constante desta, de aproximadamente 50kPa (ver Figura 41).

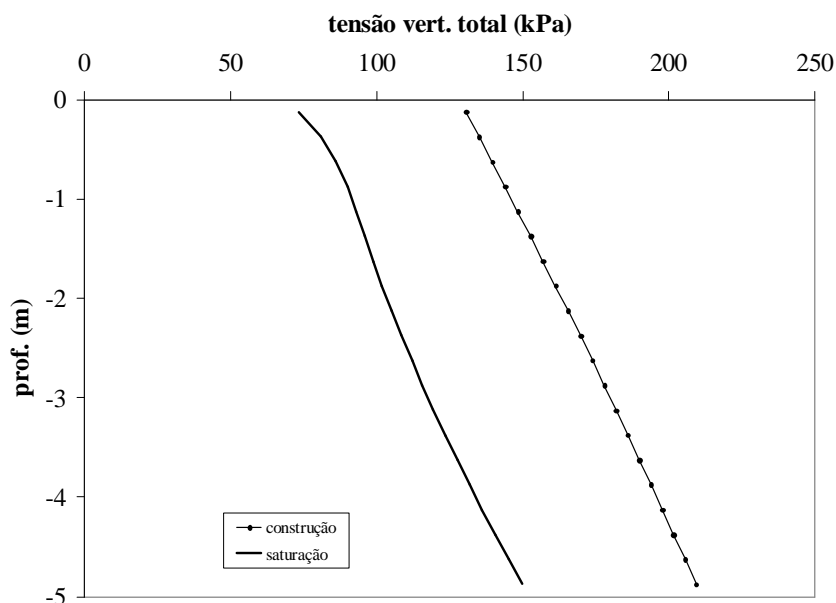


Figura 41. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

3.2.3 Caso com sobreconsolidação $H=80m$

Com esta análise pretende-se estudar a influência do nível de sobreconsolidação existente no terreno não saturado. Considera-se uma sucção igual à do caso de referência (300kPa). Neste caso o nível de sobreconsolidação é determinado por uma espessura da camada de terreno erodida de $H=80m$, superior à do caso de referência, com $H=40m$. A sobreconsolidação afecta tanto a fase de construção como a fase de saturação. A zona saturada é a mesma do caso de referência que se encontra representada na Figura 13 a).

3.2.3.1. Fase de construção da fachada

A fase de construção sobre o terreno não saturado com $H=80m$ dá origem a assentamentos uniformes de cerca de 2cm. Este valor é idêntico ao valor obtido para o caso de referência, com $H=80m$ e a mesma sucção matricial. O comportamento do solo de fundação é essencialmente elástico em ambos os casos. A deformada encontra-se representada na Figura 42.

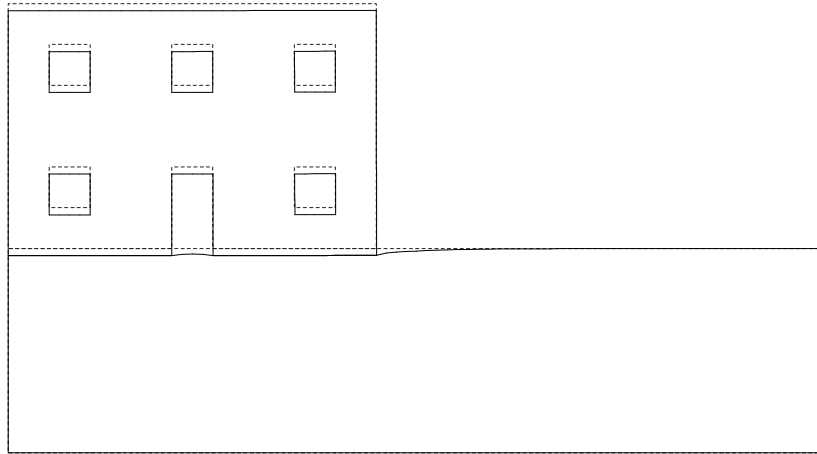


Figura 42. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.

Dado os assentamentos serem idênticos aos do caso de referência, o padrão e a magnitude das fissuras (Figura 43) também o são.

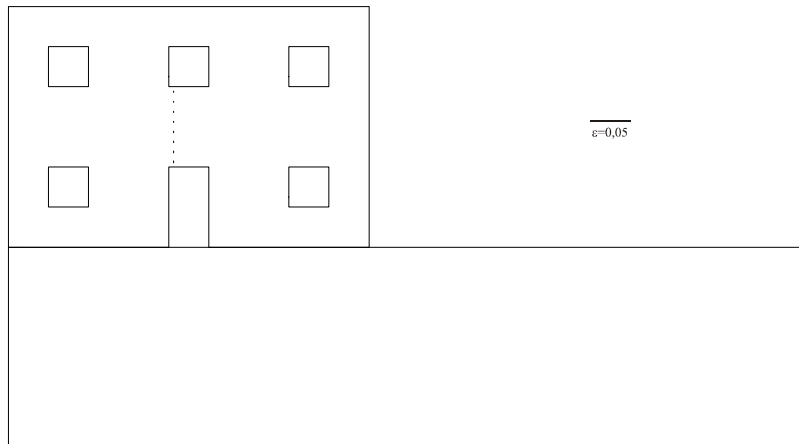


Figura 43. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05).

A distribuição e magnitude das tensões médias efectivas (Figura 44), são similares às do caso de referência.

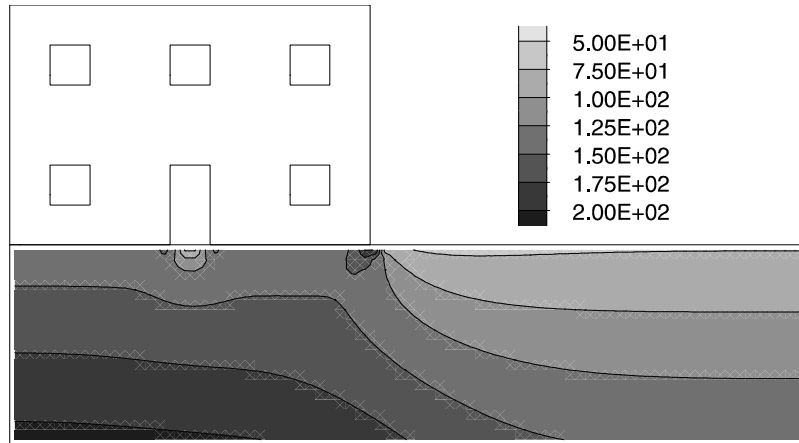


Figura 44. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.

As deformações volumétricas (ver Figura 45) apresentam valores e distribuição similares aos do caso de referência.

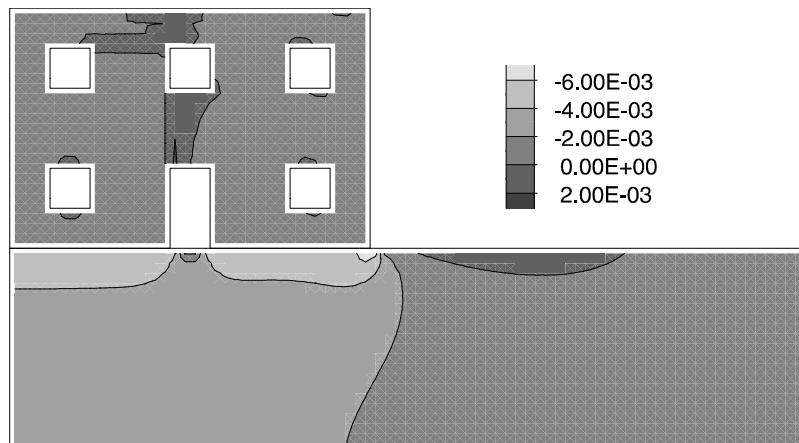


Figura 45. Deformação volumétrica (compressão negativa).

As direcções principais de tensão distribuem-se de acordo com o ilustrado na Figura 46.

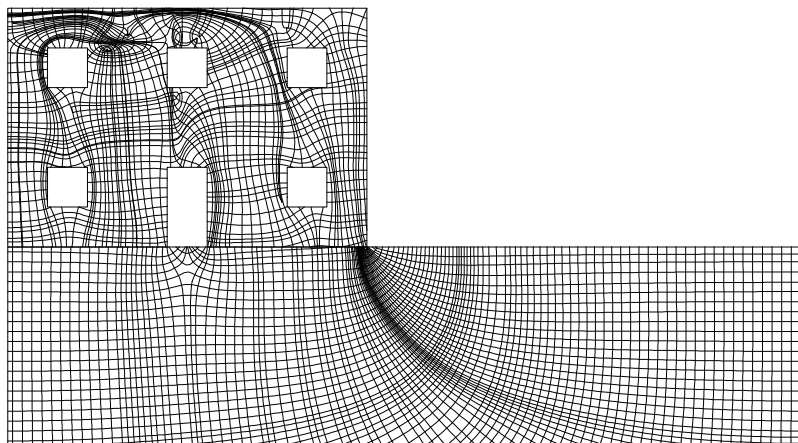


Figura 46. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.

3.2.3.2. Fase de saturação

Para um nível elevado de sobreconsolidação ($H=80\text{m}$) verifica-se somente um ligeiro empolamento (subida) da fachada por efeito da saturação. A configuração deformada é praticamente idêntica à da fase de construção (ver Figura 47).

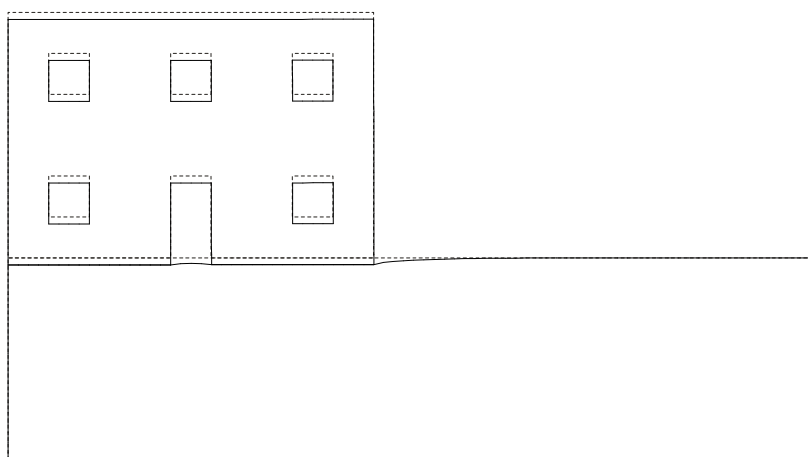


Figura 47. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.

Os danos devidos à fase de saturação mantêm-se inalterados como pode ser constatado através da Figura 48.

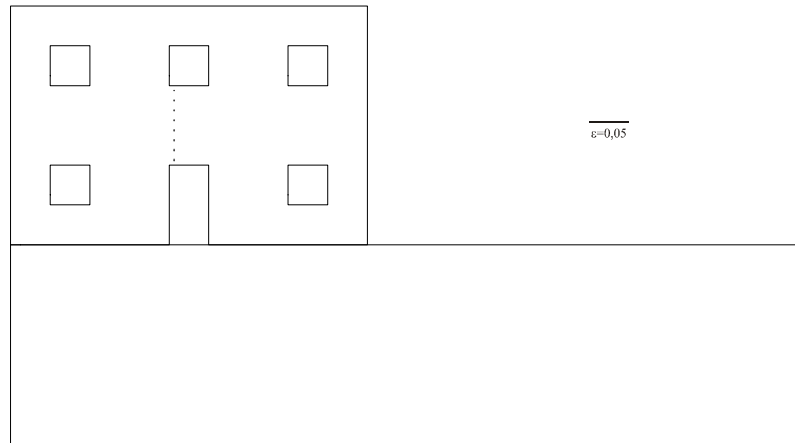


Figura 48. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05).

Os valores e distribuição da tensão média efectiva p' (Figura 49) são idênticos aos da fase construtiva.

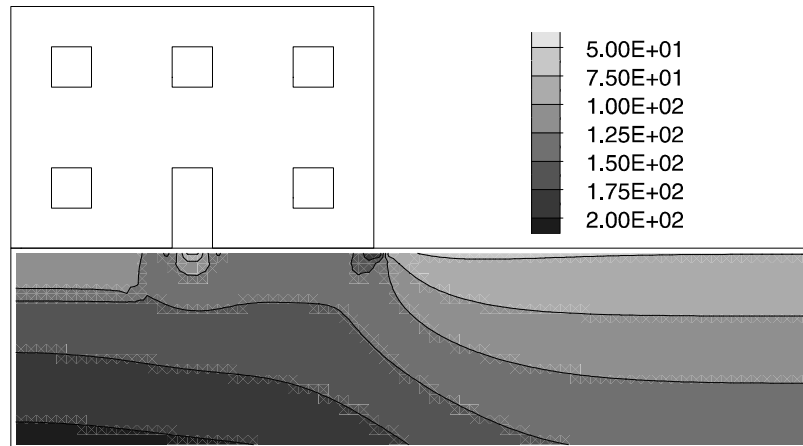


Figura 49. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.

Os valores e distribuição das deformações volumétricas (Figura 50) são idênticos aos da fase construtiva.

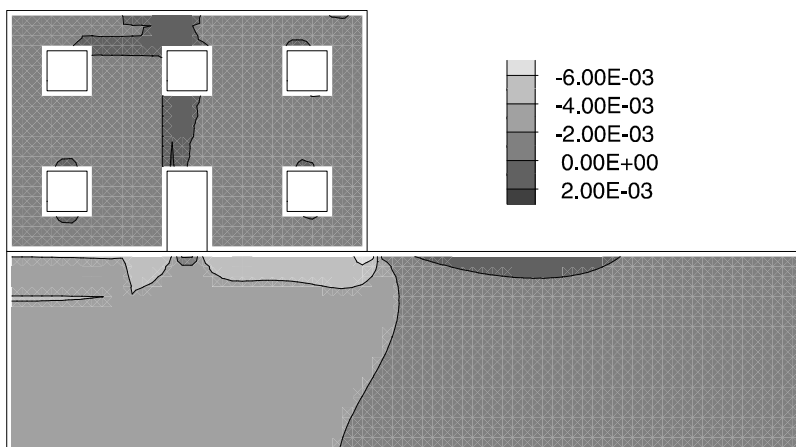


Figura 50. Deformação volumétrica (compressão negativa).

As direcções principais de tensão no final da saturação distribuem-se de acordo com o ilustrado na Figura 51.

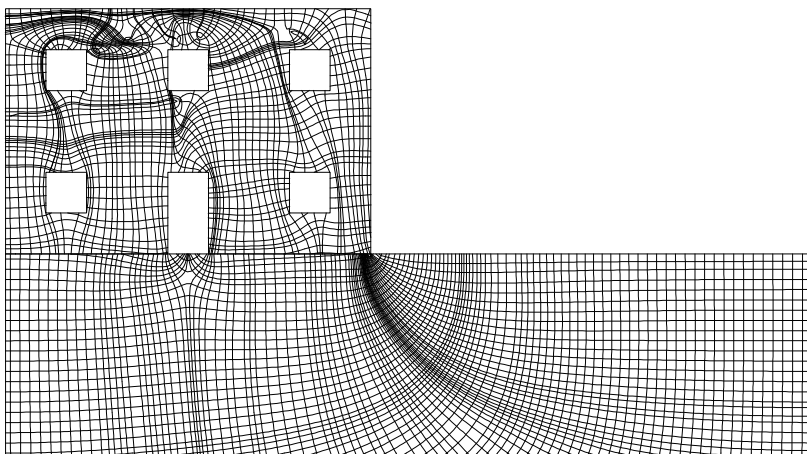


Figura 51. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.

3.2.3.3. Efeito da saturação

A Figura 52 mostra que os assentamentos sofrem uma ligeira redução com a fase de saturação. Isto significa que não se verificam assentamentos por colapso. Os empolamentos devem-se à descarga elástica resultante da redução da tensão efectiva correspondente à redução da sucção matricial. A ausência de colapso resulta da grande dimensão da superfície de cedência do estado saturado por causa do elevado nível de sobreconsolidação. Ou seja, neste caso o processo de saturação não induz deformações plásticas que dão origem aos assentamentos por colapso.

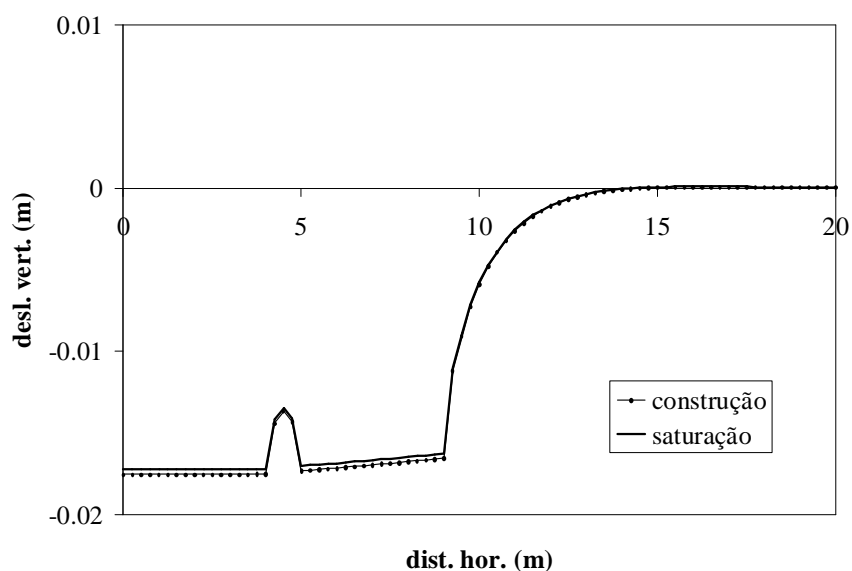


Figura 52. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

Em profundidade, sobre o eixo de simetria (Figura 53), verifica-se um ligeiro empolamento que se anula a cerca de 1m, que se transforma num ligeiro assentamento abaixo deste nível.

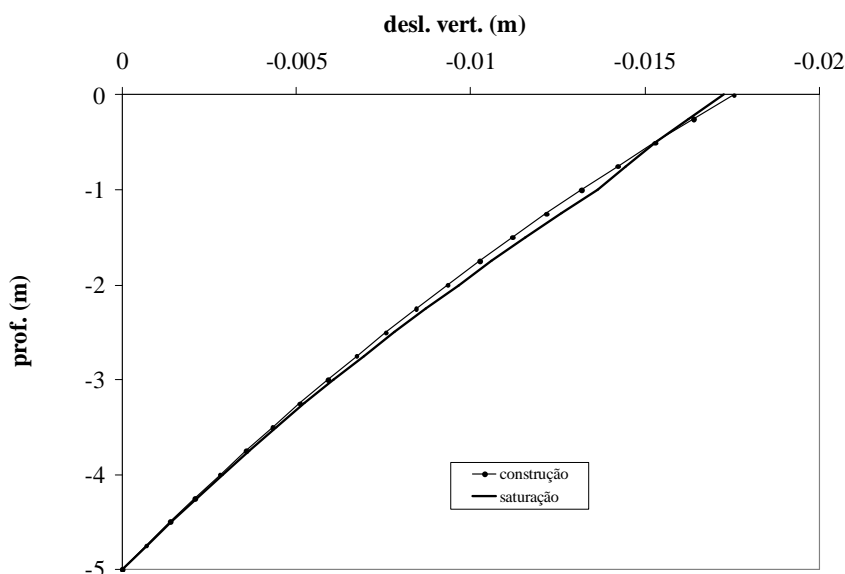


Figura 53. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

Da comparação entre a distribuição da tensão vertical total ao nível da superfície do terreno no final da fase de construção e após os assentamentos por colapso (saturação), constata-se um ligeiro aumento desta sobre a zona saturada e uma redução sob o resto da fundação da fachada (ver Figura 54). Ao contrário do caso de referência, verifica-se uma transferência de tensão vertical da restante superfície de fundação para a zona saturada. O levantamento da fachada dá origem a um aumento da tensão vertical sobre a zona saturada e a um alívio sobre o resto da fundação. Este efeito é devido à rigidez da fachada.

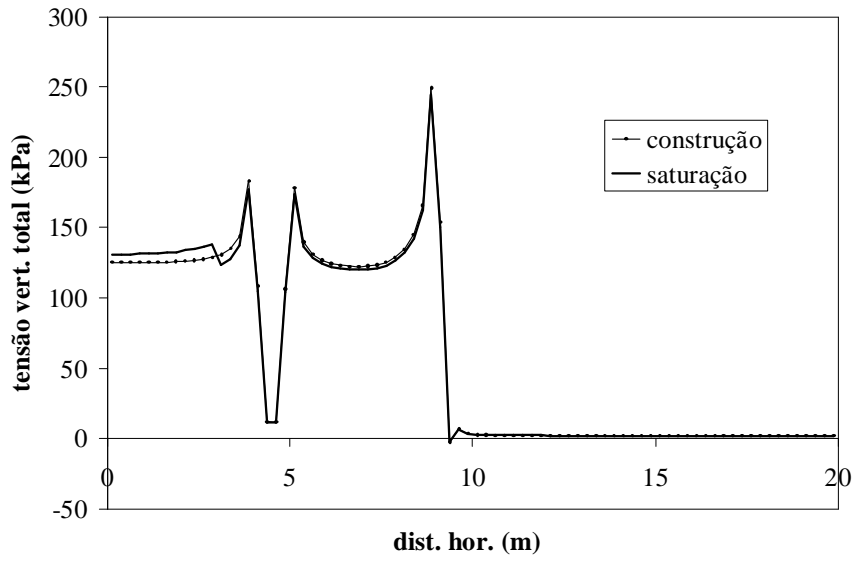


Figura 54. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

Relativamente à variação da tensão vertical total em profundidade sobre o eixo de simetria, constata-se uma pequena redução praticamente constante desta (ver Figura 55).

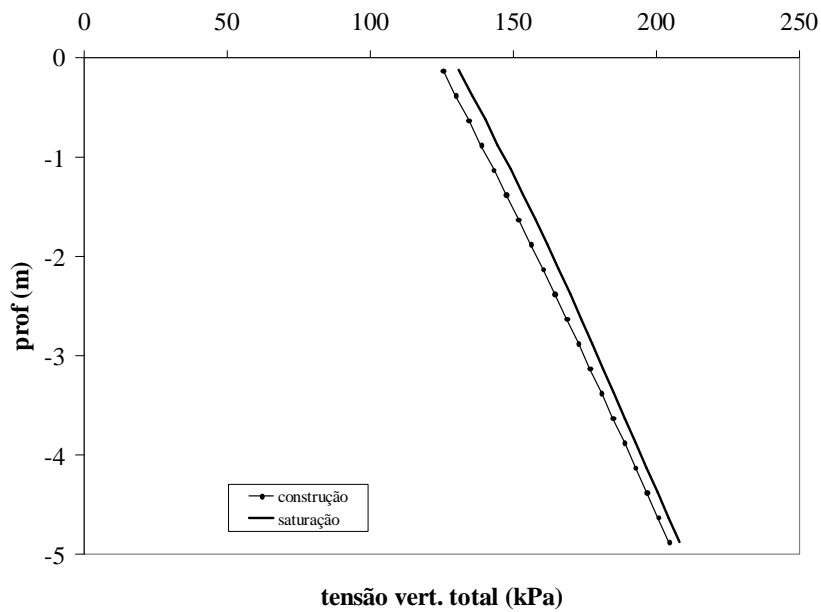


Figura 55. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

3.2.4 Caso com sobreconsolidação $H=25\text{m}$

Com esta análise pretende-se estudar a influência do nível de sobreconsolidação existente no terreno não saturado. Considera-se uma sucção igual à do caso de referência (300kPa). Neste caso o nível de sobreconsolidação é determinado por uma espessura da camada de terreno erodida de $H=25\text{m}$, inferior à do caso de referência, com $H=40\text{m}$. A sobreconsolidação afecta tanto a fase de construção como a fase de saturação. A zona saturada é a mesma do caso de referência que se encontra representada na Figura 13 a).

3.2.4.1. Fase de construção da fachada

A fase de construção sobre o terreno não saturado com $H=25\text{m}$ dá origem a assentamentos uniformes de cerca de 7cm. Este valor é muito superior ao valor obtido para o caso de referência (2cm), com $H=40\text{m}$ e a mesma sucção matricial. A deformada encontra-se representada na Figura 56.

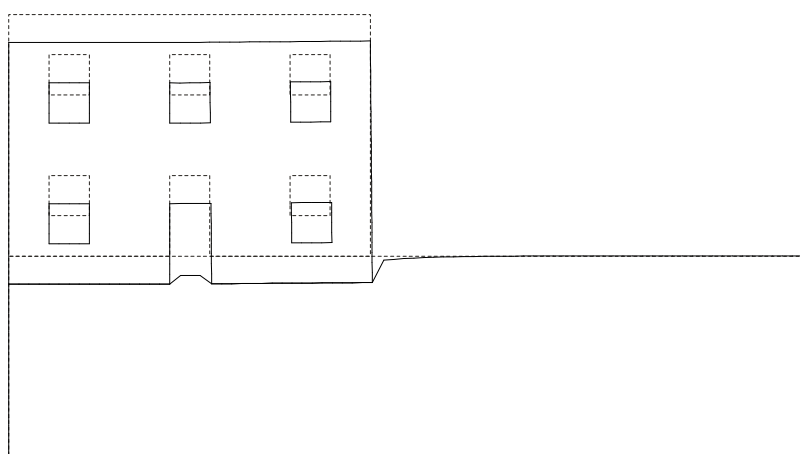


Figura 56. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.

Os assentamentos da fase construtiva são superiores aos do caso de referência e os danos por fissuração associados também o são (Figura 57). Ainda assim os danos são relativamente limitados pela uniformidade dos assentamentos.

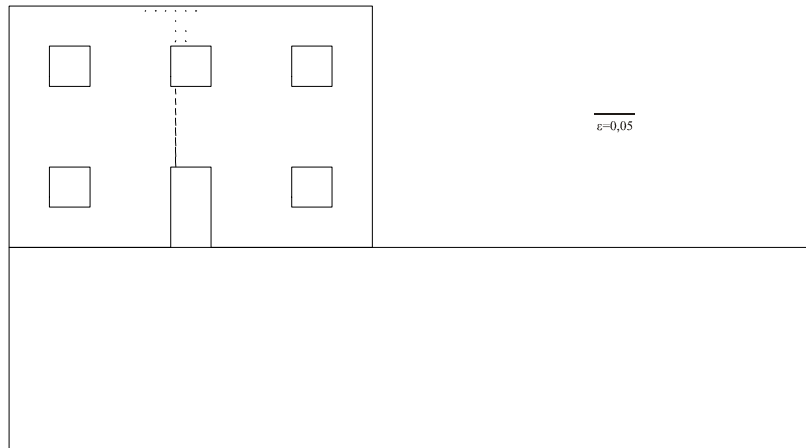


Figura 57. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \leftrightarrow extensão 0,05).

As tensões médias efectivas, p' , na fundação (Figura 58) são mais elevadas do que no caso de referência.

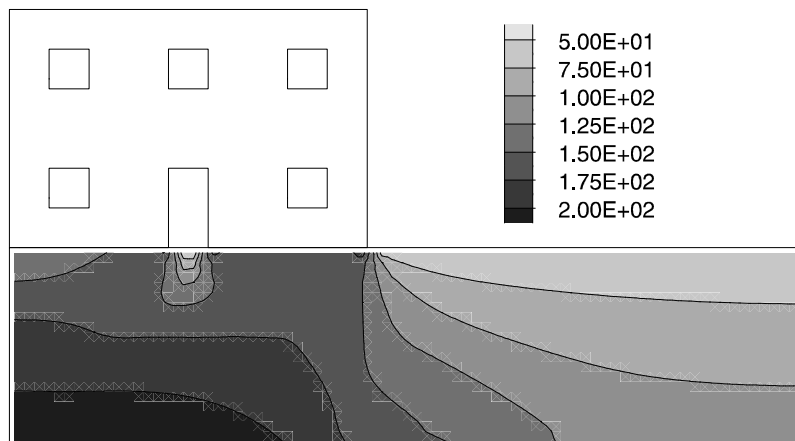


Figura 58. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.

Como os assentamentos da fase construtiva são superiores aos do caso de referência, as deformações volumétricas compressivas na fundação (Figura 59) também o são.

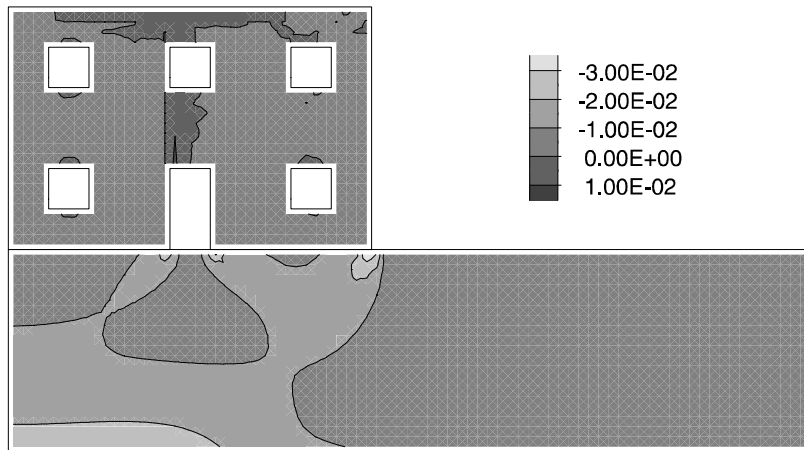


Figura 59. Deformação volumétrica (compressão negativa).

As direcções principais de tensão no final da construção distribuem-se de acordo com o ilustrado na Figura 60.

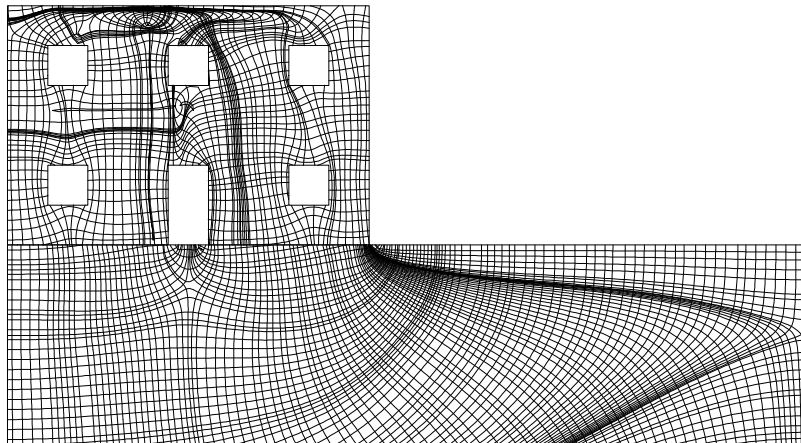


Figura 60. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.

3.2.4.2. Fase de saturação

Para um nível reduzido de sobreconsolidação ($H=25\text{m}$) verifica-se um assentamento máximo por efeito da saturação de cerca de 15cm. Este assentamento é muito superior ao do caso de referência ($H=40\text{m}$). Os assentamentos são mais acentuados sobre a zona saturada. A configuração deformada encontra-se representada na Figura 61.

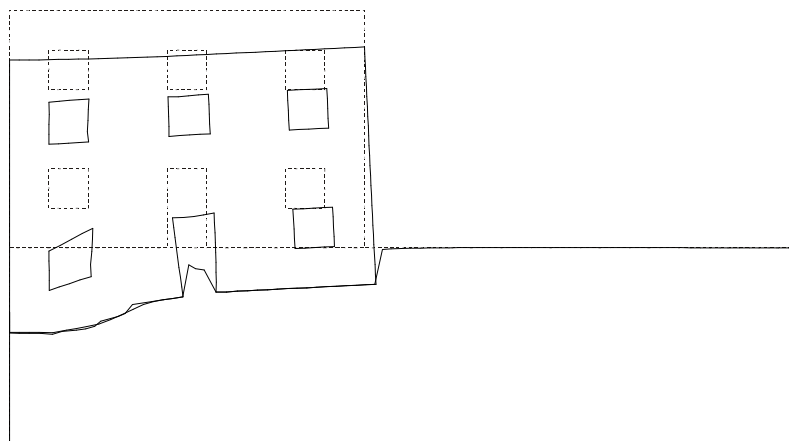


Figura 61. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.

A saturação dá origem a um padrão de fendilhação relativamente extenso na fachada, que abrange a zona próxima do eixo de simetria e com maior intensidade no piso inferior (Figura 62). Este comportamento deve-se ao maior assentamento da zona central da fachada, acima da zona saturada, onde ocorreram os assentamentos por colapso. A abertura máxima de fendas é cerca de 29mm, quase 7 vezes superior ao caso de referência ($H=40\text{m}$).

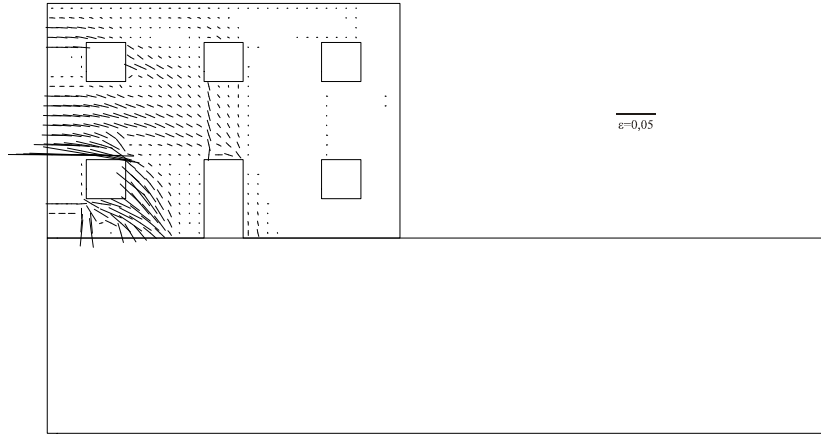


Figura 62. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \leftrightarrow extensão 0,05).

Na Figura 63 pode observar-se uma redução da tensão média efectiva na zona saturada relativamente à fase construtiva. Por outro lado, a tensão média na fundação apresenta valores algo inferiores aos do caso de referência.

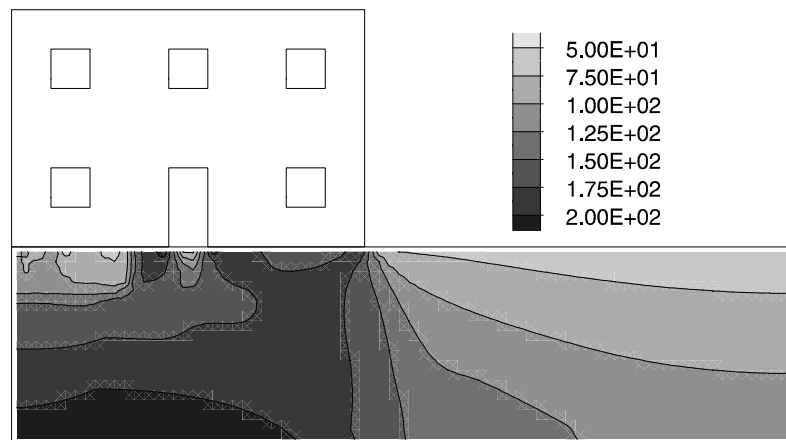


Figura 63. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.

As deformações volumétricas compressivas (Figura 64), concentradas na zona saturada da fundação, são significativamente superiores às do caso de referência. A abertura de fendas, que assume maior expressão sobre a janela do piso inferior junto ao eixo, manifesta-se também como importante deformação volumétrica de natureza dilatante.

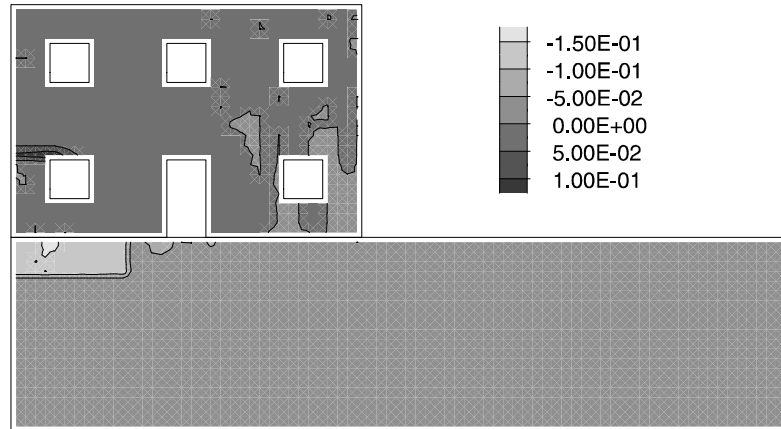


Figura 64. Deformação volumétrica (compressão negativa).

As direcções principais de tensão no final da fase de saturação distribuem-se de acordo com o ilustrado na Figura 65.

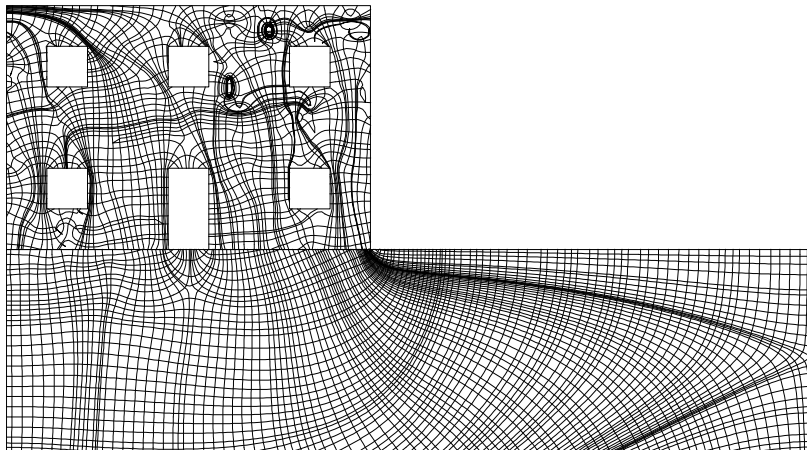


Figura 65. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.

3.2.4.3. Efeito da saturação

A Figura 66 mostra que os assentamentos na base da fachada sofrem um importante agravamento com a fase de saturação, sendo superiores aos do caso de referência.

Os assentamentos devidos à saturação variam entre um valor máximo de 15cm, junto ao eixo de simetria, e um valor mínimo de 3cm, no extremo da fachada. Os assentamentos são maiores sobre a zona saturada.

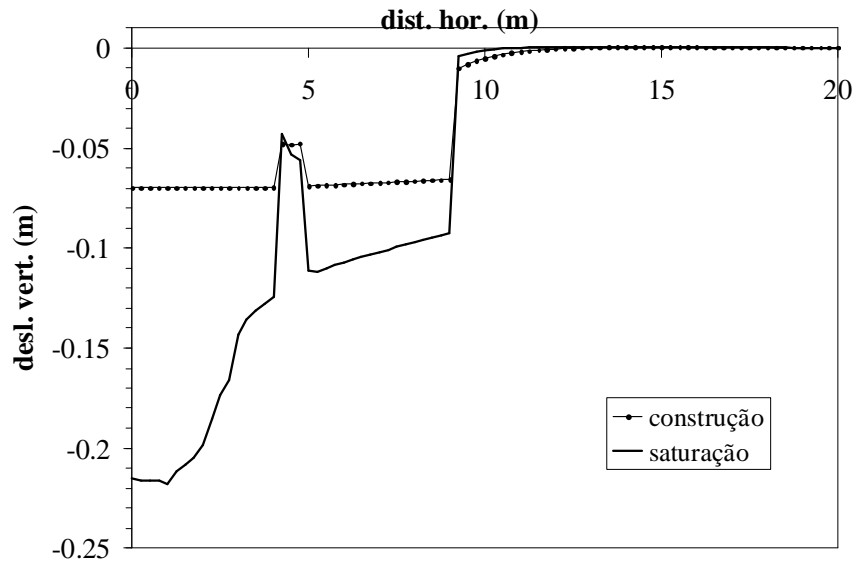


Figura 66. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

Em profundidade, sobre o eixo de simetria, os assentamentos por saturação variam entre um valor máximo de 15cm à superfície e anulam-se no limite inferior da zona saturada (ver Figura 67). Abaixo da zona saturada os assentamentos são praticamente nulos.

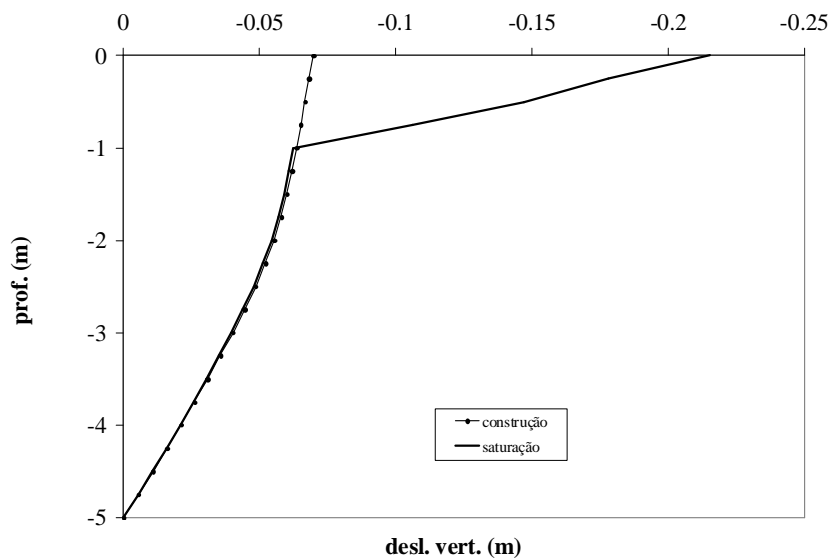


Figura 67. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

Da comparação entre a distribuição da tensão vertical total ao nível da superfície do terreno no final da fase de construção e após os assentamentos por colapso (saturação), constata-se uma redução desta sobre a zona saturada, com algumas oscilações, e um aumento sob o resto da fundação da fachada (ver Figura 68). Verifica-se, portanto, uma transferência de tensão vertical, da zona saturada para a restante superfície de fundação. Os assentamentos superficiais na zona não saturada são devidos essencialmente a esta transferência de tensão, que se deve à rigidez da fachada. A redução da tensão vertical sobre a zona saturada é menor do que no caso de referência e o mesmo acontece com o aumento da tensão vertical sobre o resto da fundação. Ou seja, a transferência de tensão é inferior à registada no caso de referência.

Relativamente à variação da tensão vertical total em profundidade sobre o eixo de simetria, constata-se uma redução praticamente constante desta, de aproximadamente 15kPa, inferior à registada no caso de referência (ver Figura 69).

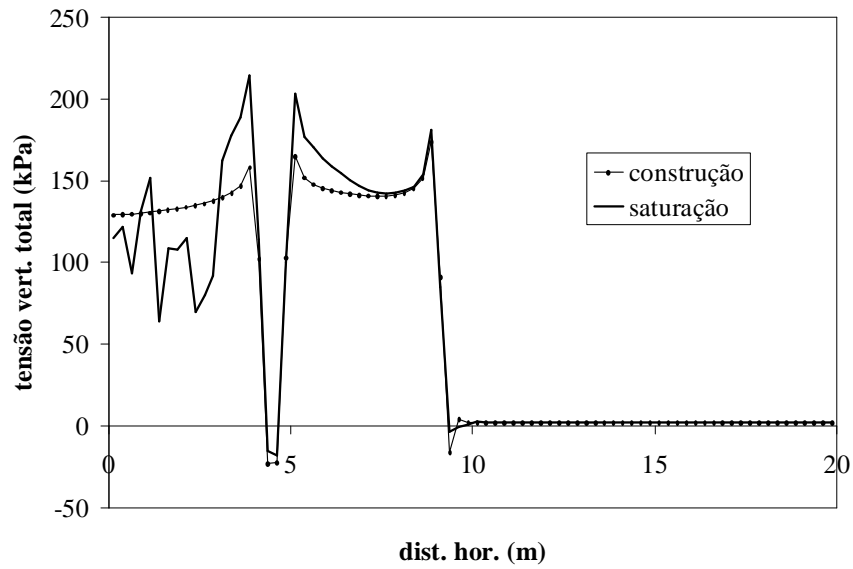


Figura 68. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

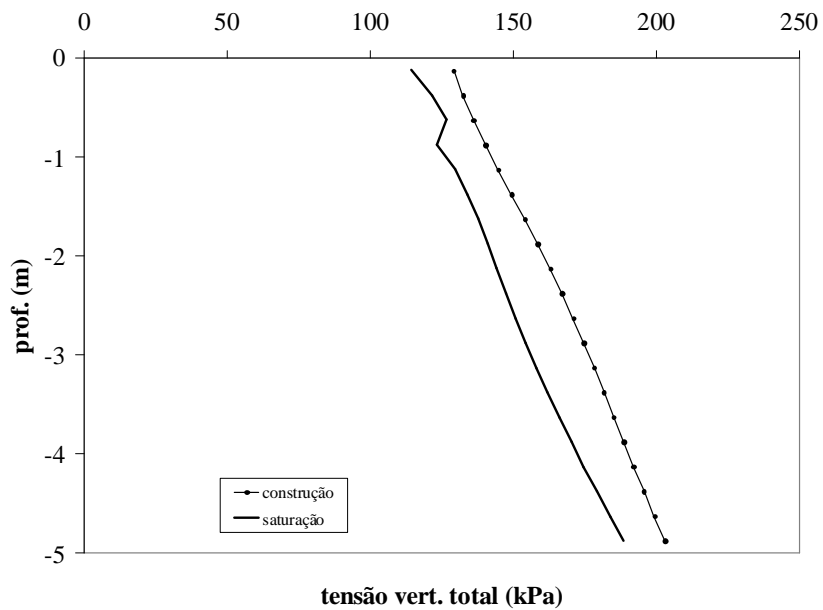


Figura 69. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

3.2.5 Influência da zona saturada

Apresentam-se de seguida os resultados das análises em que se considera a influência da posição e dimensões da zona saturada nos assentamentos por colapso. O conjunto de zonas saturadas, para além do caso de referência, estão representadas na Figura 13. Como este factor só influencia a fase de saturação, pois os resultados da fase de construção são iguais aos do caso de referência, só os resultados respeitantes a esta fase são apresentados.

3.2.5.1. Zona de 3m de comprimento e 5m de altura junto ao eixo

Neste caso, a zona saturada tem 3m de comprimento e 5m de profundidade, e situa-se junto ao eixo de simetria, assumindo a configuração representada na Figura 13e). Verifica-se um assentamento máximo por efeito da saturação de cerca de 23cm. Este assentamento é muito superior ao do caso de referência. Os assentamentos são mais acentuados sobre a zona saturada. A configuração deformada encontra-se representada na Figura 70.

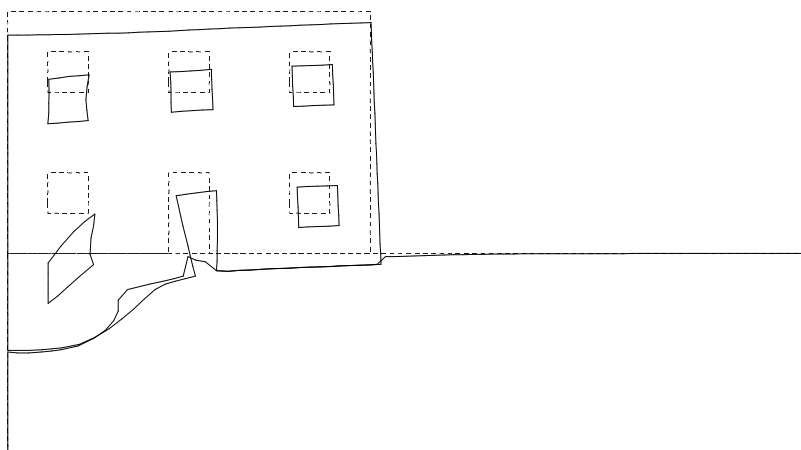


Figura 70. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.

A saturação dá origem a um padrão de fendilhação relativamente extenso na fachada, que abrange a zona próxima do eixo de simetria e com maior intensidade no piso inferior (Figura 71). Este comportamento deve-se ao maior assentamento da zona central da fachada, acima da zona saturada, onde ocorreram os assentamentos por colapso. A abertura máxima de fendas é cerca de 60mm, 15 vezes superior ao caso de referência.

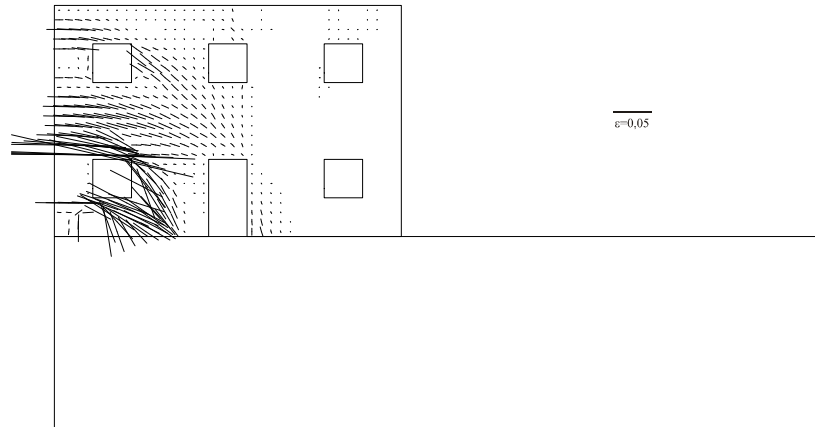


Figura 71. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \leftrightarrow extensão 0,05).

Na Figura 72 pode observar-se uma redução da tensão média efectiva na zona saturada, que se estende até à base da camada de solo de fundação, relativamente à fase construtiva.

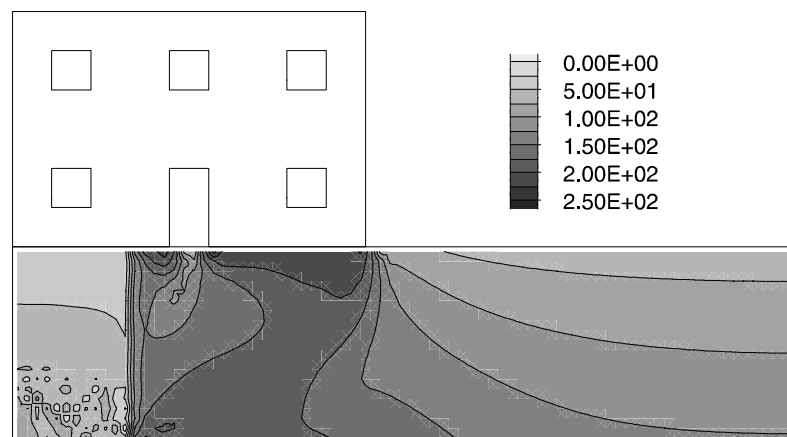


Figura 72. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.

As deformações volumétricas compressivas (Figura 73), concentradas na zona saturada da fundação, são similares às do caso de referência. A abertura de fendas, que assume maior expressão sobre a janela do piso inferior junto ao eixo, manifesta-se também como importante deformação volumétrica de natureza dilatante.



Figura 73. Deformação volumétrica (compressão negativa).

As direcções principais de tensão no final da fase de saturação distribuem-se de acordo com o ilustrado na Figura 74.

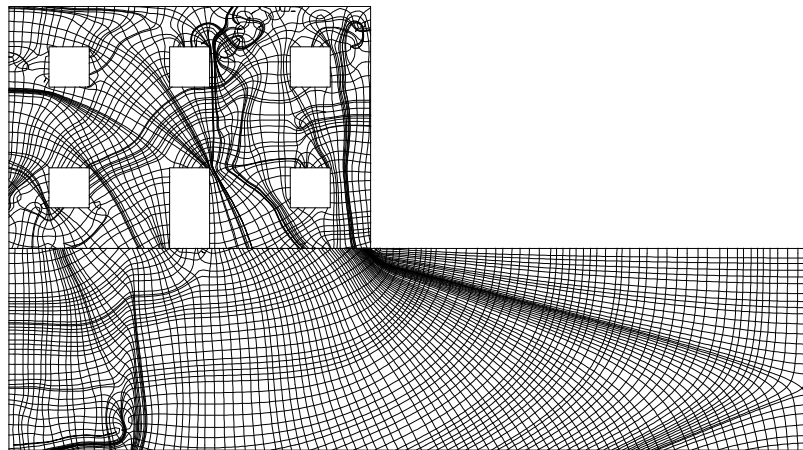


Figura 74. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.

3.2.5.2. Efeito da saturação

A Figura 75 mostra que os assentamentos na base da fachada sofrem um importante agravamento com a fase de saturação, sendo também superiores aos do caso de referência. Os assentamentos devidos à saturação variam entre um valor máximo de 23cm, junto ao eixo de simetria, e um valor mínimo de 1cm, no extremo da fachada. Os assentamentos são maiores sobre a zona saturada.

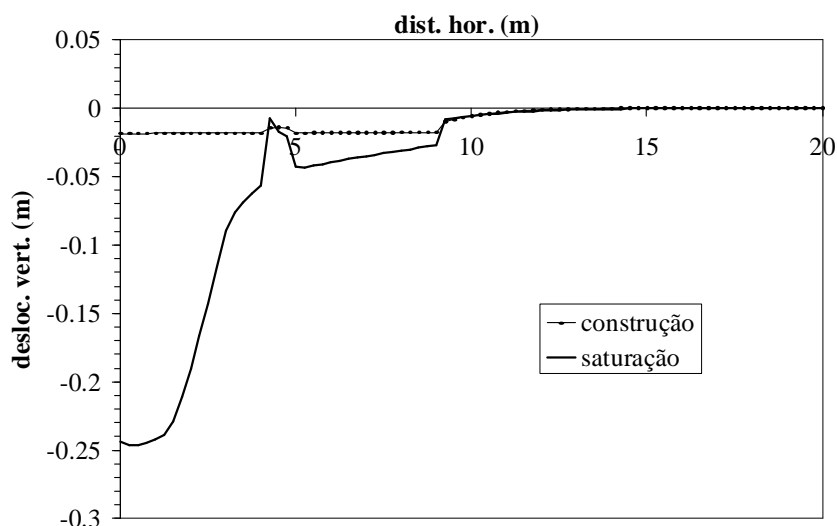


Figura 75. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

Em profundidade, sobre o eixo de simetria, os assentamentos por saturação variam entre um valor máximo de 23cm à superfície e anulam-se no limite inferior da zona saturada (ver Figura 76), que coincide com o “bedrock”.

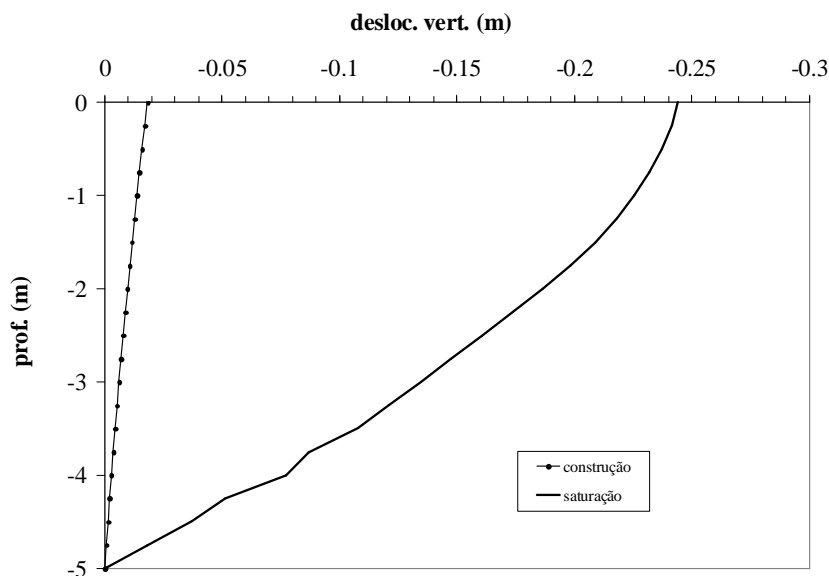


Figura 76. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

Da comparação entre a distribuição da tensão vertical total ao nível da superfície do terreno no final da fase de construção e após os assentamentos por colapso (saturação), constata-se uma redução desta sobre a zona saturada e um aumento sob o resto da fundação da fachada (ver Figura 77). Verifica-se, portanto, uma transferência de tensão vertical, da zona saturada para a restante superfície de fundação. Os assentamentos superficiais na zona não saturada são devidos essencialmente a esta transferência de tensão, que se deve à rigidez da fachada. A redução da tensão vertical sobre a zona saturada é ligeiramente maior do que no caso de referência e o mesmo acontece com o aumento da tensão vertical sobre o resto da fundação. Ou seja, a transferência de tensão é um pouco superior à registada no caso de referência.

Relativamente à variação da tensão vertical total em profundidade sobre o eixo de simetria, constata-se uma redução praticamente constante desta, de aproximadamente 100kPa, superior à registada no caso de referência (ver Figura 78).

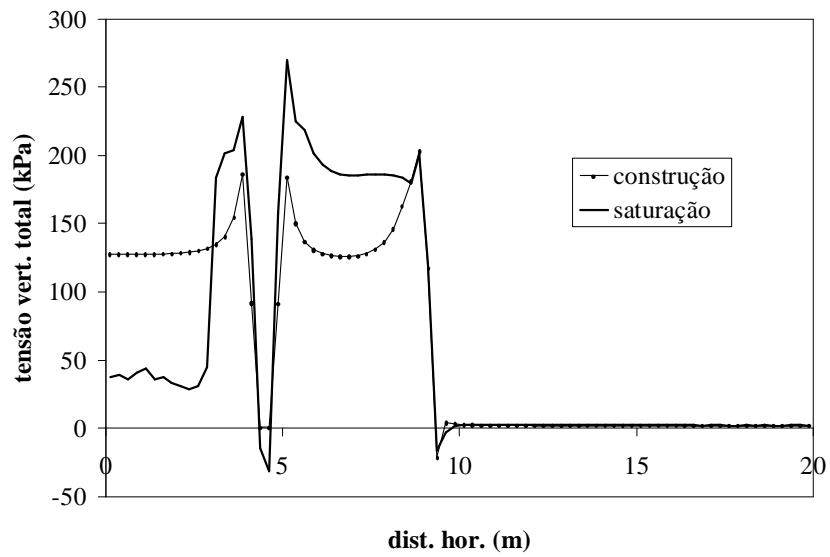


Figura 77. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

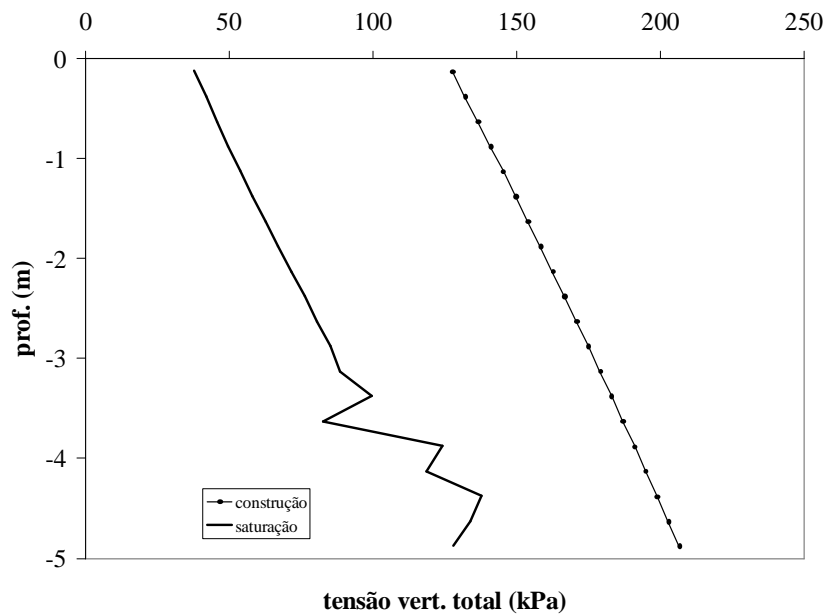


Figura 78. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

3.2.5.3. Zona superficial de 1m de comprimento e 1m de altura junto ao eixo

Neste caso, a zona saturada tem 1m de comprimento e 1m de altura, e situa-se junto ao eixo de simetria, assumindo a configuração representada na Figura 13f).

Verifica-se um assentamento máximo por efeito da saturação de cerca de 0.25cm. Este assentamento é muito inferior ao do caso de referência. Os assentamentos são mais acentuados sobre a zona saturada. A configuração deformada encontra-se representada na Figura 79.

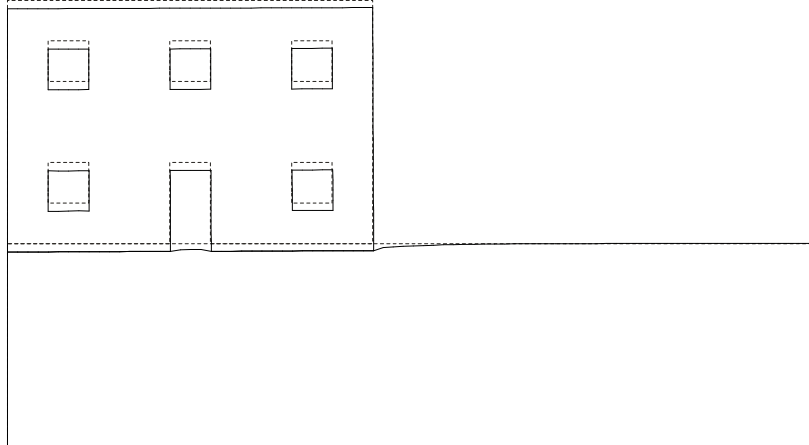


Figura 79. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.

Os danos por fendilhação devidos à saturação são pouco significativos em comparação com o caso de referência (Figura 80).

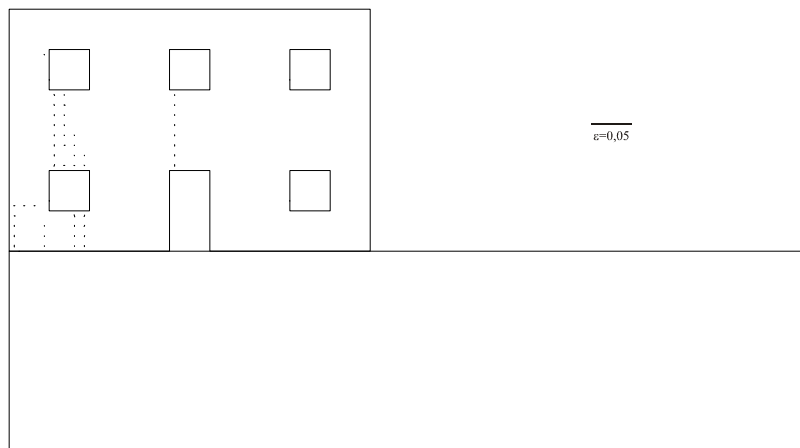


Figura 80. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05).

Na Figura 81, pode observar-se uma redução da tensão média efectiva na zona saturada relativamente à fase construtiva.

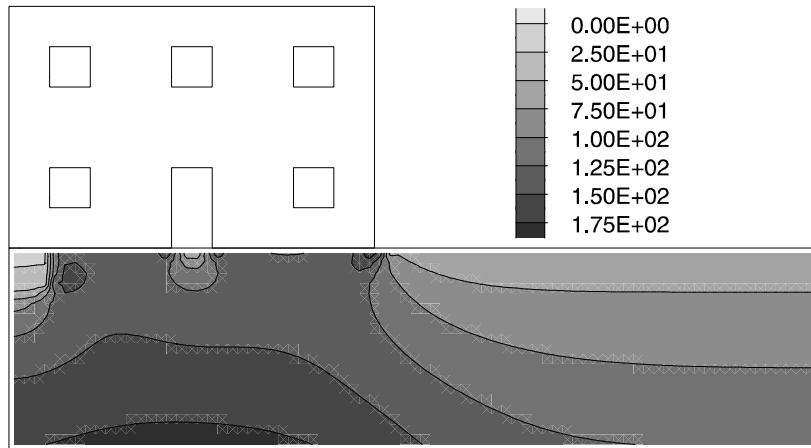


Figura 81. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.

As deformações volumétricas compressivas (Figura 82), concentradas na zona saturada da fundação, são inferiores às do caso de referência.

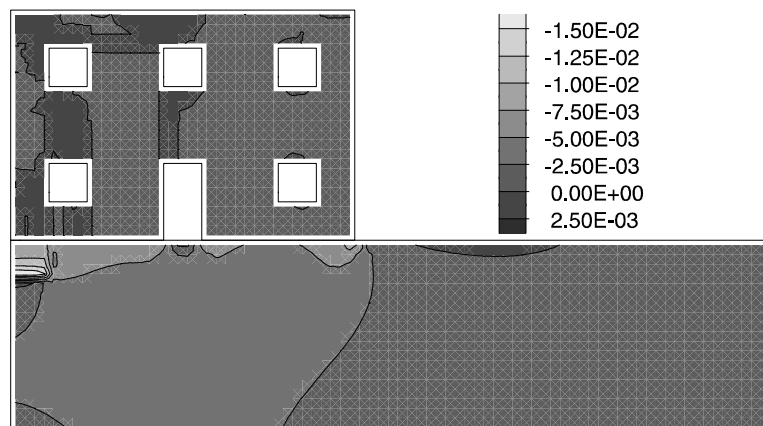


Figura 82. Deformação volumétrica (compressão negativa).

As direcções principais de tensão no final da fase de saturação distribuem-se de acordo com o ilustrado na Figura 83.

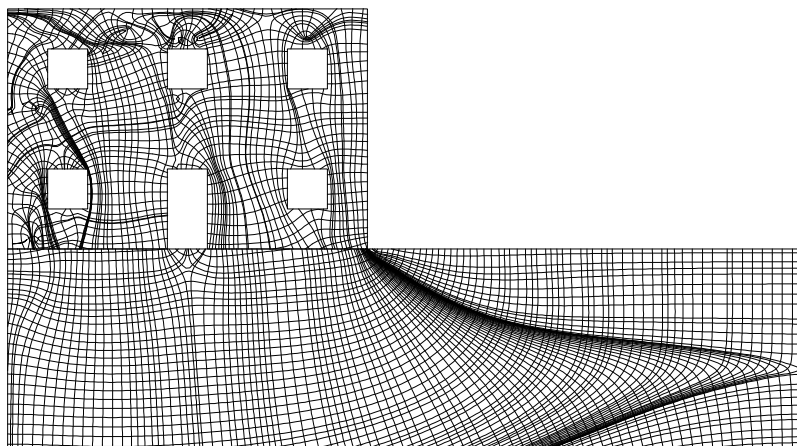


Figura 83. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.

3.2.5.4. Efeito da saturação

A Figura 84 mostra que os assentamentos na base da fachada sofrem um pequeno agravamento com a fase de saturação, sendo também inferiores aos do caso de referência. Os assentamentos devidos à saturação variam entre um valor máximo de 0,25cm, junto ao eixo de simetria, e um valor mínimo de zero, no extremo da fachada. Os assentamentos são maiores sobre a zona saturada.

Em profundidade, sobre o eixo de simetria, os assentamentos por saturação variam entre um valor máximo de 0,25cm à superfície e anulam-se a meio da zona saturada (ver Figura 85), para abaixo desse ponto passarem a empolamentos que chegam a assumir valores superiores ao assentamento máximo.

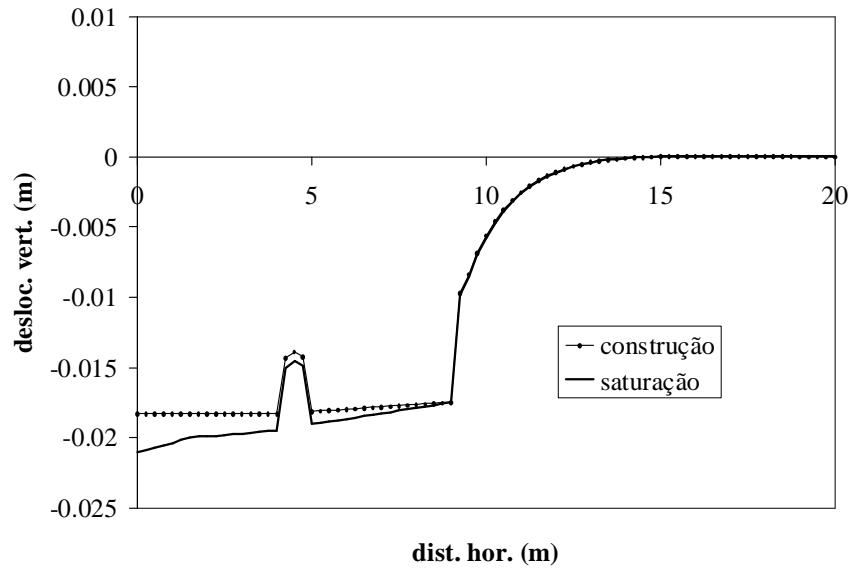


Figura 84. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

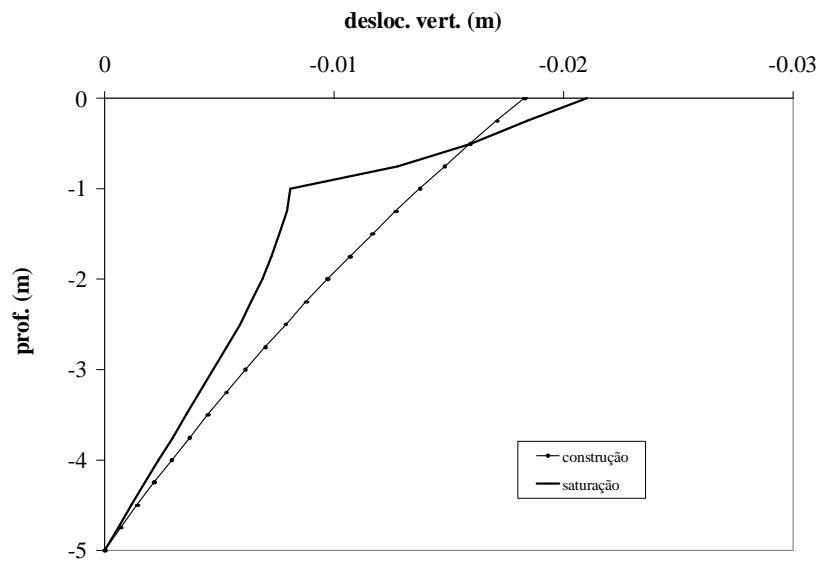


Figura 85. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

Da comparação entre a distribuição da tensão vertical total ao nível da superfície do terreno no final da fase de construção e após os assentamentos por colapso (saturação), constata-se uma redução desta sobre a zona saturada e um aumento sob o resto da fundação da fachada (ver Figura 86), com mais expressão na zona imediatamente adjacente à zona saturada, antes da porta. Verifica-se, portanto, uma transferência de tensão vertical, da zona saturada para a restante superfície de fundação. Os assentamentos superficiais na zona não saturada são devidos essencialmente a esta transferência de tensão, que se deve à rigidez da fachada. A redução da tensão vertical sobre a zona saturada é maior do que no caso de referência.

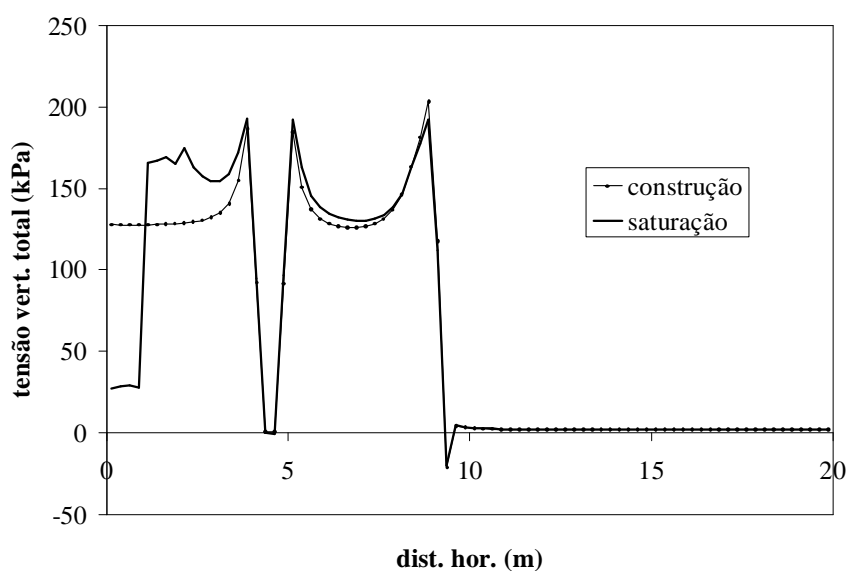


Figura 86. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

Relativamente à variação da tensão vertical total em profundidade sobre o eixo de simetria, constata-se uma redução, que varia entre aproximadamente 100kPa à superfície até um valor de 25kPa no “bedrock” (ver Figura 87).

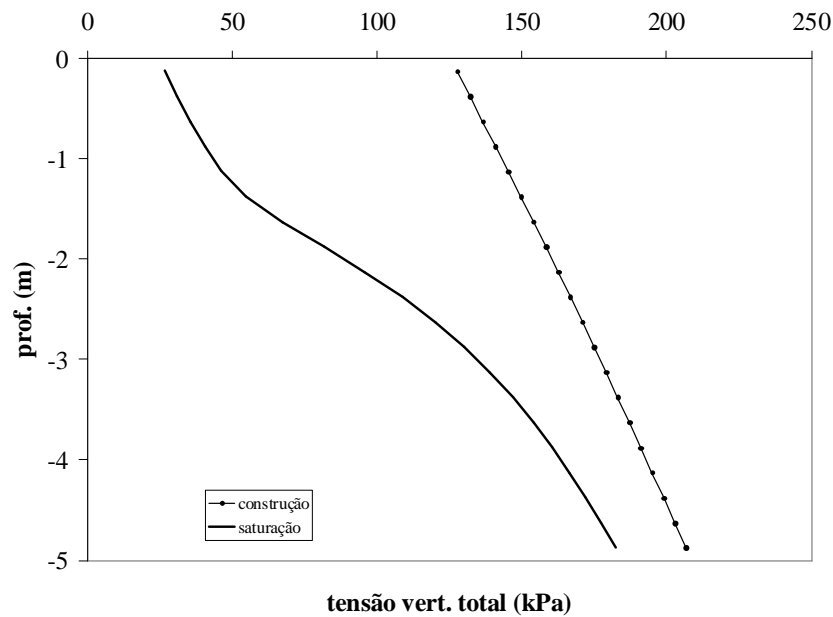


Figura 87. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

3.2.5.5. Zona superficial de 3m de comprimento e 1m de altura afastada 6m do eixo

Neste caso, a zona saturada tem 3m de comprimento e 1m de altura, afastada 6m do eixo de simetria, assumindo a configuração representada na Figura 13g). Verifica-se um assentamento máximo por efeito da saturação de cerca de 9cm. Este assentamento é superior ao do caso de referência. Os assentamentos são mais acentuados sobre a zona saturada. A configuração deformada encontra-se representada na Figura 88. Neste caso a zona da fachada à direita da porta roda como um corpo rígido no sentido horário.

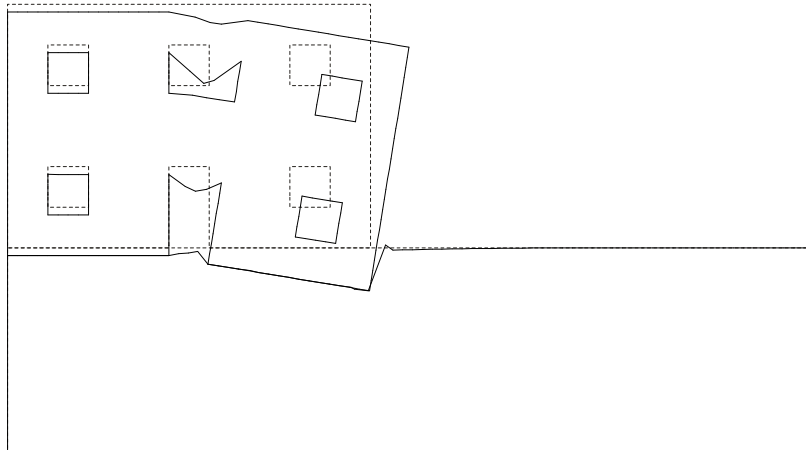


Figura 88. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes.

Os danos na fachada por efeito da saturação consistem em fendas subverticais numa faixa da fachada localizada sobre a porta (ver Figura 89). A abertura máxima das fendas é de 5cm. As fendas definem uma separação efectiva da parte exterior da fachada, à direita da porta.

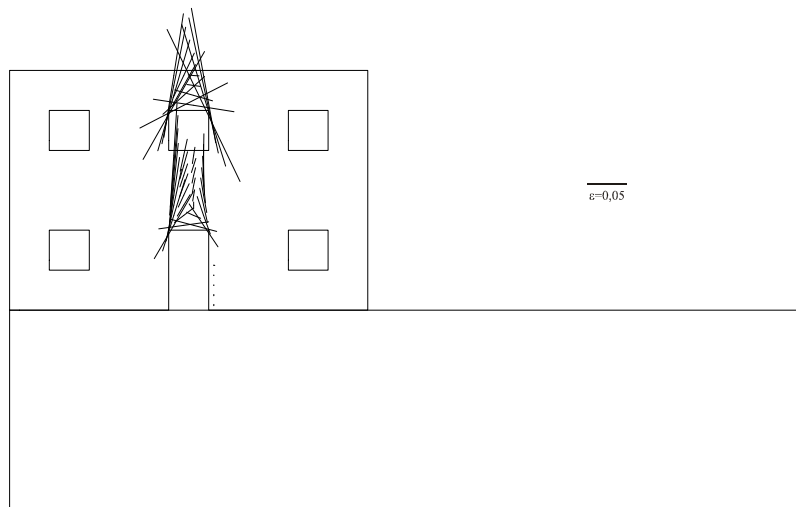


Figura 89. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05).

Na Figura 90, pode observar-se uma redução da tensão média efectiva na zona saturada relativamente à fase construtiva.

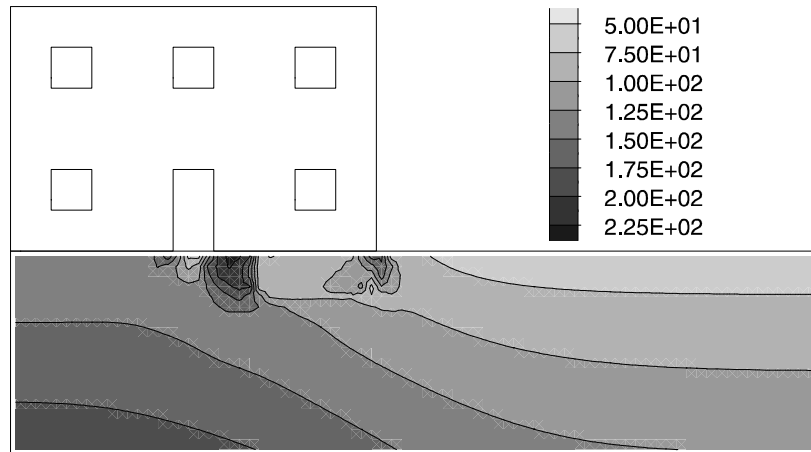


Figura 90. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva.

As deformações volumétricas compressivas (Figura 91), concentradas na zona saturada da fundação, são um pouco superiores às do caso de referência. A abertura de fendas, que assume maior expressão sobre a porta, manifesta-se também sob a forma de importantes deformações volumétricas de natureza dilatante.



Figura 91. Deformação volumétrica (compressão negativa).

As direcções principais de tensão no final da fase de saturação distribuem-se de acordo com o ilustrado na Figura 92.

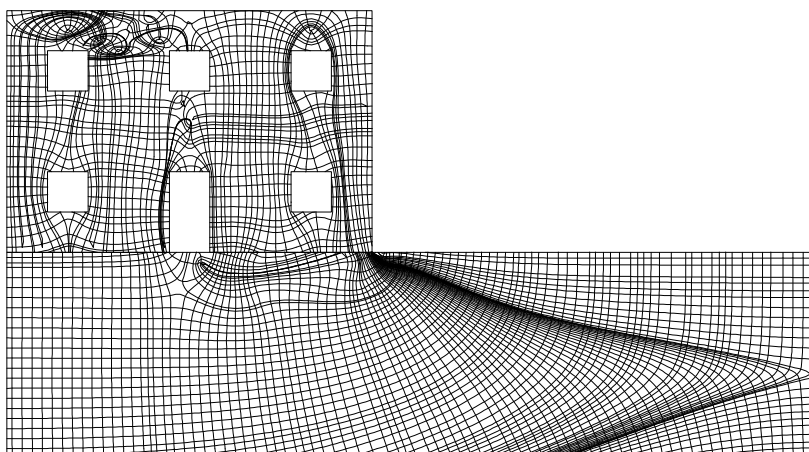


Figura 92. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto.

3.2.5.6. Efeito da saturação

A Figura 93 mostra que os assentamentos devidos à saturação, localizam-se sobre a zona saturada, variando entre 9cm, na extremidade da fachada, e 2cm, junto à porta. Valores superiores aos do caso de referência. O perfil de assentamentos da fachada indica uma rotação de corpo rígido do bloco exterior da fachada, à direita da porta, na direcção horária. A esta rotação soma-se um deslocamento vertical de 2cm.

Em profundidade, sobre o eixo de simetria, os assentamentos são muito reduzidos (Figura 94).

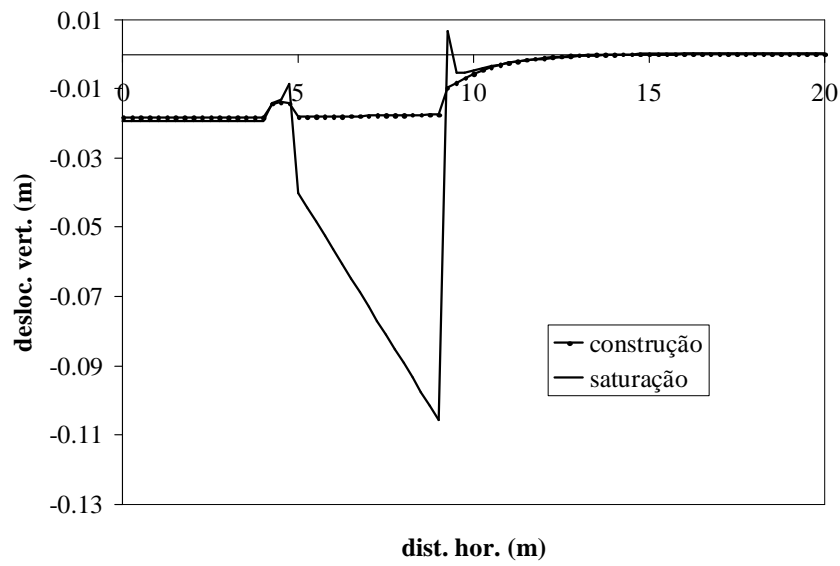


Figura 93. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

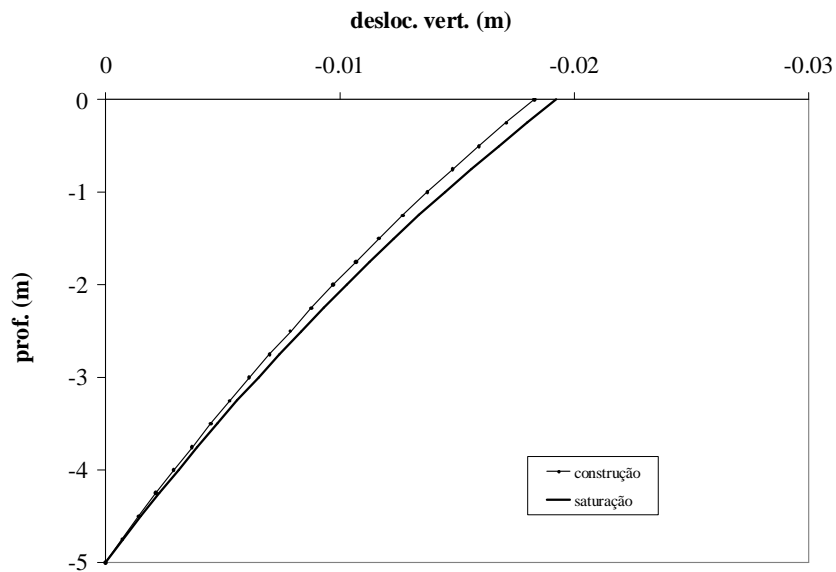


Figura 94. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

Da comparação entre a distribuição da tensão vertical total ao nível da superfície do terreno no final da fase de construção e após os assentamentos por colapso (saturação), constata-se uma redução desta sobre a zona saturada e um aumento sob o resto da fundação da fachada (ver Figura 95), com mais expressão na zona imediatamente adjacente à zona saturada. Na extremidade da fundação verifica-se um ligeiro aumento da tensão vertical que permite estabilizar a rotação do bloco da fachada.

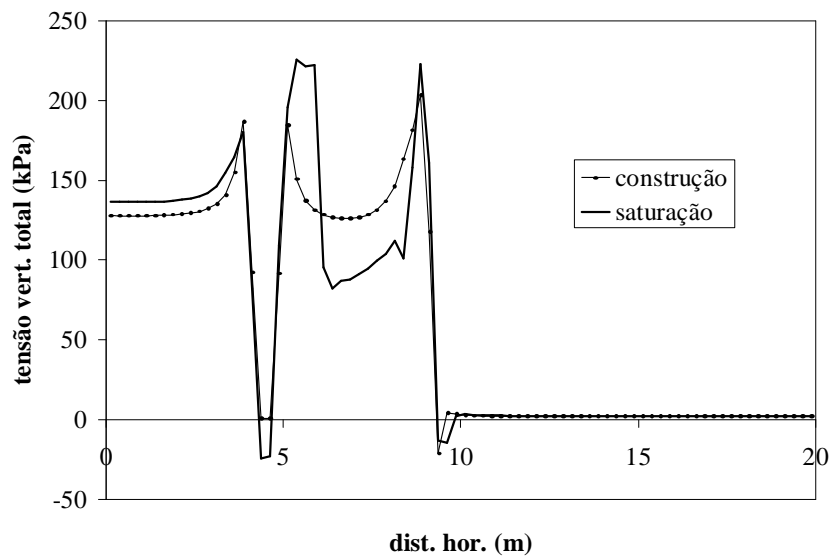


Figura 95. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

Relativamente à variação da tensão vertical total em profundidade sobre o eixo de simetria, constata-se um ligeiro aumento praticamente constante desta (ver Figura 96).

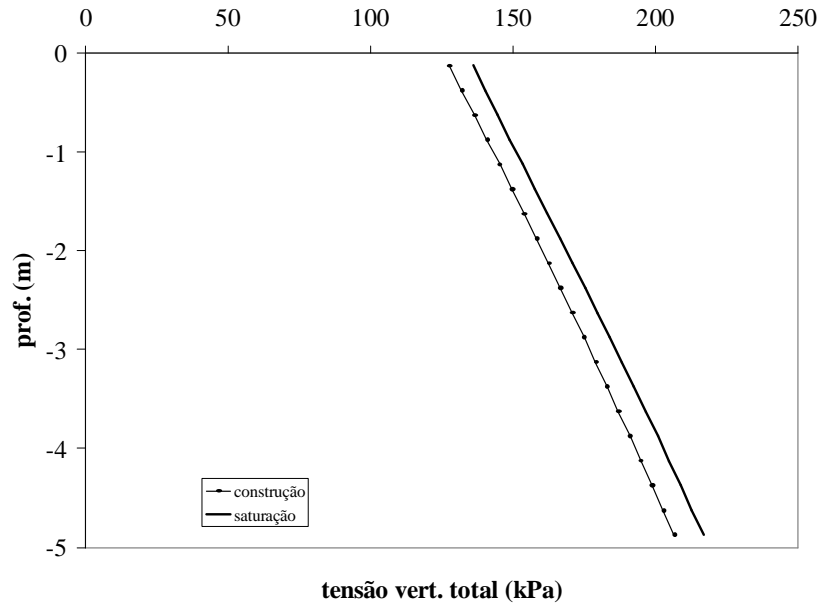


Figura 96. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação. Distância vertical medida a partir da superfície.

3.2.5.7. Zona superficial de 20m de comprimento e 1m de altura

Neste caso, a zona saturada tem 20m de comprimento e 1m de altura, ou seja, abrange toda a camada superficial do terreno com a espessura de 1m, assumindo a configuração representada na Figura 13h). Neste caso, a saturação dá origem à ruína da zona exterior da fachada com a largura de 1m. Esta faixa da fachada destaca-se do resto da fachada devido à abertura de fendas verticais sobre as janelas exteriores. A faixa é esbelta, e contrariamente ao caso anterior, a fundação não consegue resistir à instabilidade rotacional. O mecanismo de rotura encontra-se representado na Figura 97, através dos vectores de velocidade.

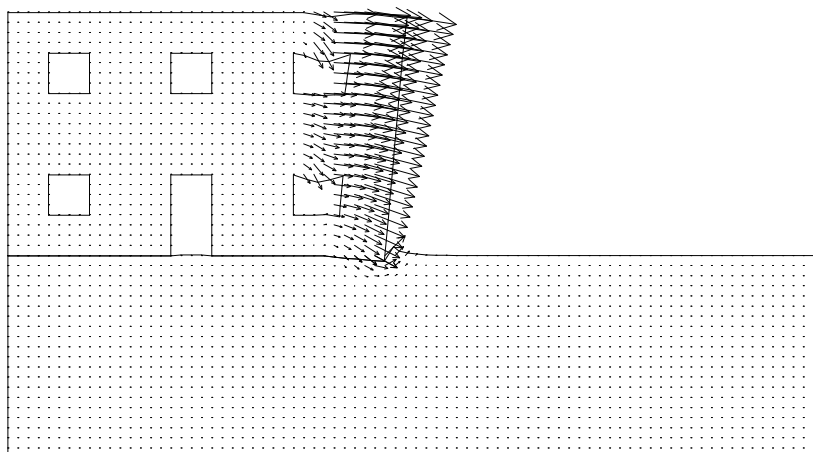


Figura 97. Mecanismo de rotura da fachada (vectores de velocidade).

3.2.5.8. Zona de 3m de comprimento e 1m de altura a diferentes profundidades

A seguir são apresentados 3 casos, em que a zona saturada tem 3m de comprimento e 1m de altura, que são as dimensões do caso de referência, mas diferem deste por se situarem a profundidades superiores, como se representa na Figura 13b), na Figura 13c) e na Figura 13d). Pretende-se assim avaliar a influência da profundidade da zona saturada. Na Figura 98 apresenta-se a configuração deformada após a saturação correspondente à zona saturada situada a 1m de profundidade (Figura 13b)). Na Figura 99 apresenta-se a configuração deformada após a saturação correspondente à zona saturada situada a 2m de profundidade (Figura 13c)). Na Figura 100 apresenta-se a configuração deformada após a saturação correspondente à zona saturada situada a 4m de profundidade (Figura 13d)).

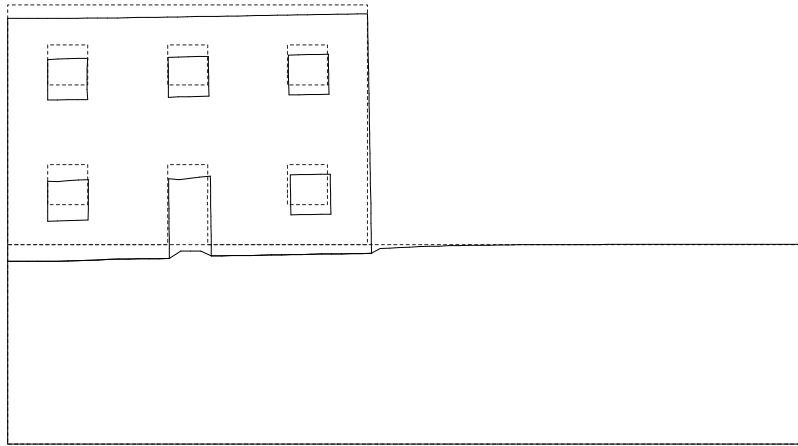


Figura 98. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes. Zona saturada a 1m de profundidade.

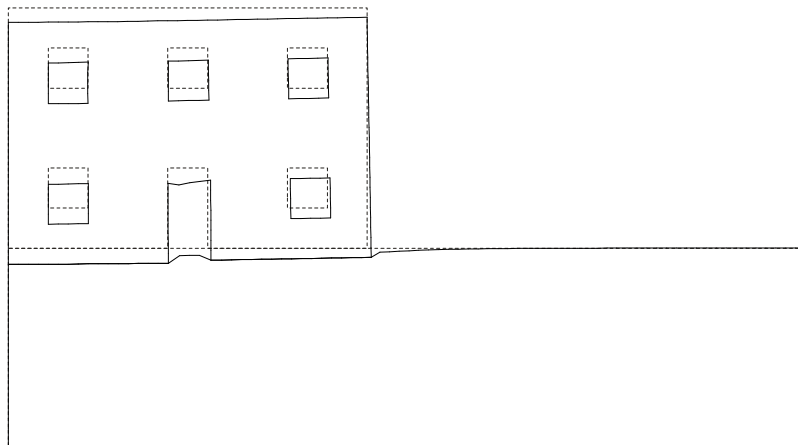


Figura 99. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes. Zona saturada a 2m de profundidade.

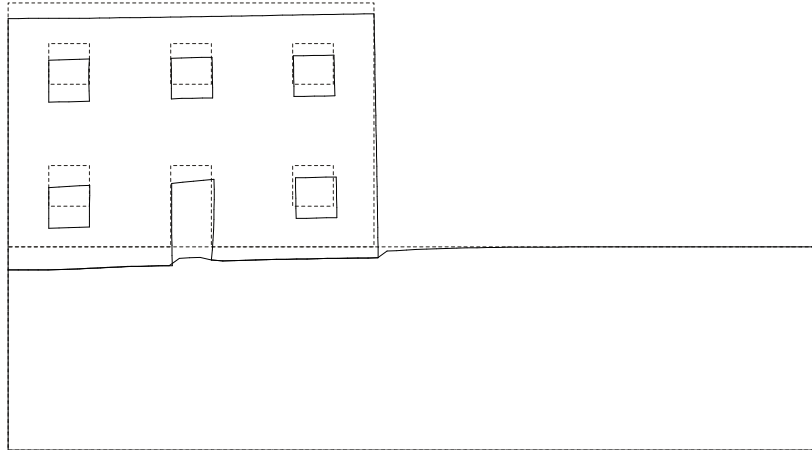


Figura 100. Configuração deformada (traço contínuo). Deslocamentos aumentados 10 vezes. Zona saturada a 4m de profundidade.

A Figura 101 representa os danos na fachada por fendilhação correspondentes à zona saturada situada a 1m de profundidade (Figura 13b)). A Figura 102 representa os danos na fachada por fendilhação correspondentes à zona saturada situada a 2m de profundidade (Figura 13c)). A Figura 103 representa os danos na fachada por fendilhação correspondentes à zona saturada situada a 4m de profundidade (Figura 13d)).

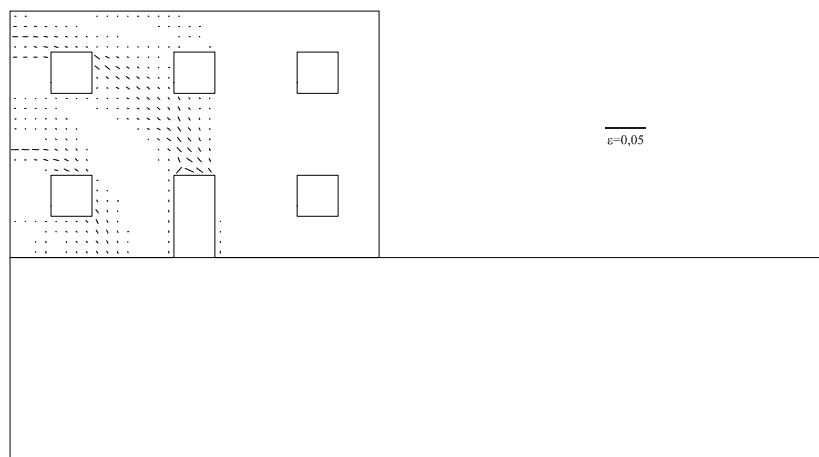


Figura 101. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05).
Zona saturada a 1m de profundidade.

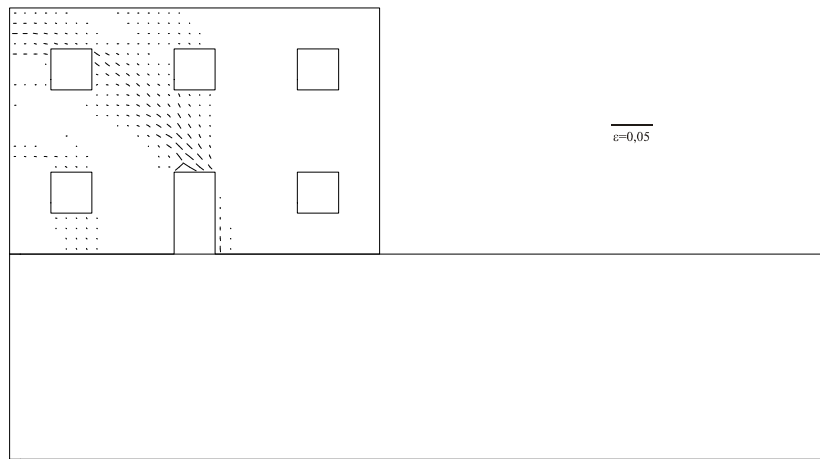


Figura 102. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05).

Zona saturada a 2m de profundidade.

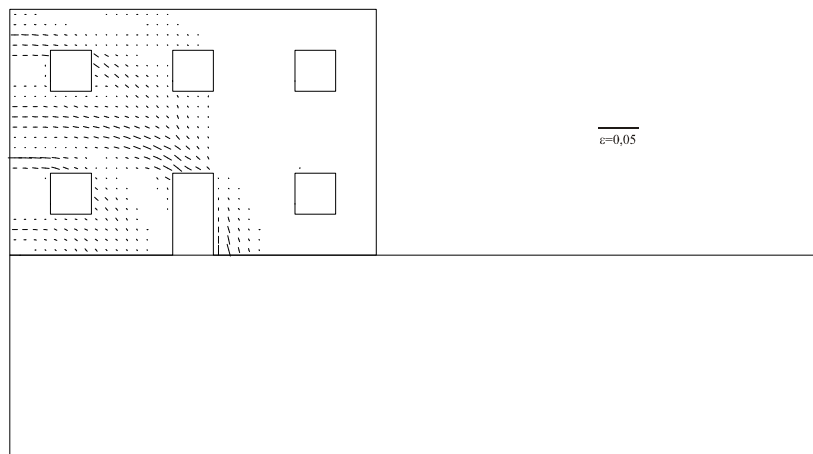


Figura 103. Orientação e distribuição das fendas na fachada. Comprimento das linhas proporcional à abertura das fendas. (Escala: 1m \Leftrightarrow extensão 0,05).

Zona saturada a 4m de profundidade.

A abertura máxima das fendas varia de 4mm no caso da zona saturada à superfície, 3mm para 1m de profundidade, 5mm para 2m de profundidade e 4mm para 4m de profundidade. No entanto dos 0m até aos 2m de profundidade verifica-se um alívio da fendilhação em volta da janela do primeiro piso junto ao eixo em simultâneo com um aumento na zona entre a porta e a janela superior junto ao eixo. Com a zona saturada localizada a 4m de profundidade os danos por fendilhação sofrem um agravamento.

A distribuição da tensão média efectiva correspondente à zona saturada situada a 1m de profundidade (Figura 13b)) encontra-se representada na Figura 104. A distribuição da tensão média efectiva correspondente à zona saturada situada a 2m de profundidade (Figura 13c)) encontra-se representada na Figura 105. A distribuição da tensão média efectiva correspondente à zona saturada situada a 4m de profundidade (Figura 13d)) encontra-se representada na Figura 106. Nestas Figuras observa-se uma zona com tensão média reduzida coincidente com a zona saturada.

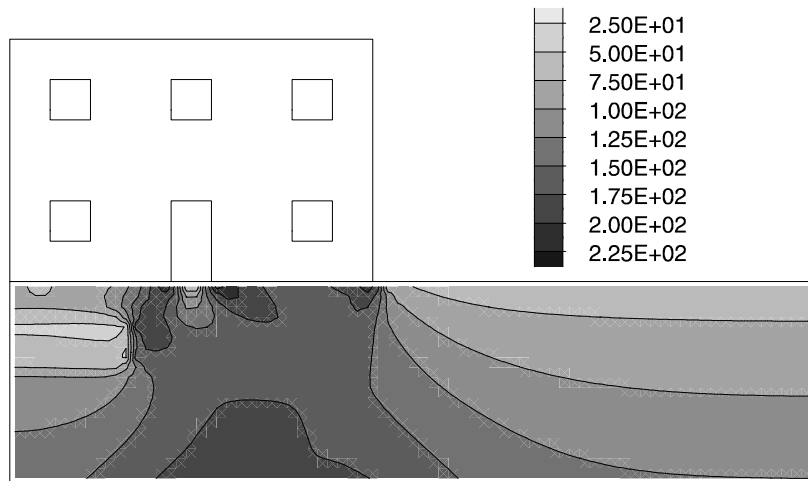


Figura 104. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva. Zona saturada a 1m de profundidade.

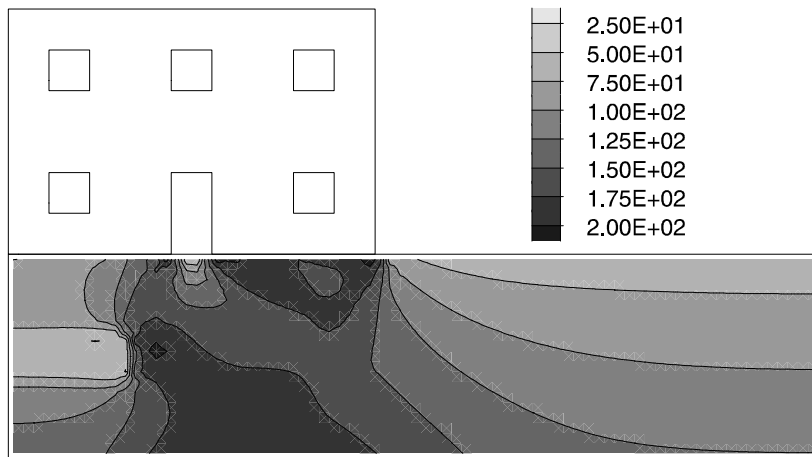


Figura 105. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva. Zona saturada a 2m de profundidade.

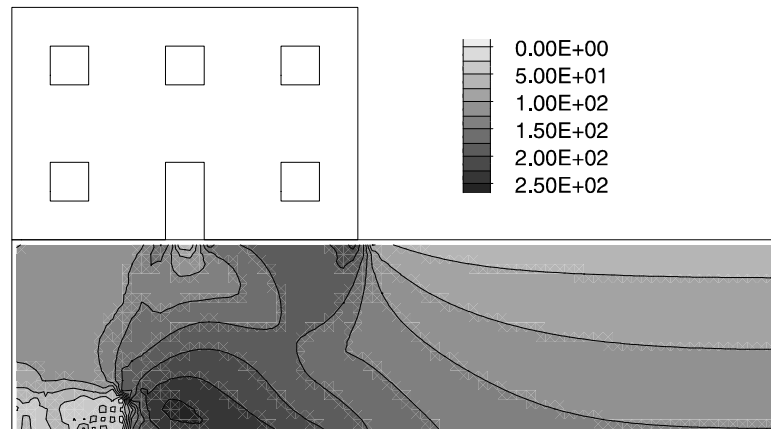


Figura 106. Tensão média efectiva, p' , na fundação (kPa). Compressão positiva. Zona saturada a 4m de profundidade.

A distribuição da deformação volumétrica correspondente à zona saturada situada a 1m de profundidade (Figura 13b)) encontra-se representada na Figura 107. A distribuição da deformação volumétrica correspondente à zona saturada situada a 2m de profundidade (Figura 13c)) encontra-se representada na Figura 108. A distribuição da deformação volumétrica correspondente à zona saturada situada a 4m de profundidade (Figura 13d)) encontra-se representada na Figura 109. Nestas Figuras pode observar-se uma zona com elevada deformação volumétrica compressiva coincidente com a zona saturada. A deformação volumétrica é maior para o caso da zona saturada situada a 4m de profundidade.

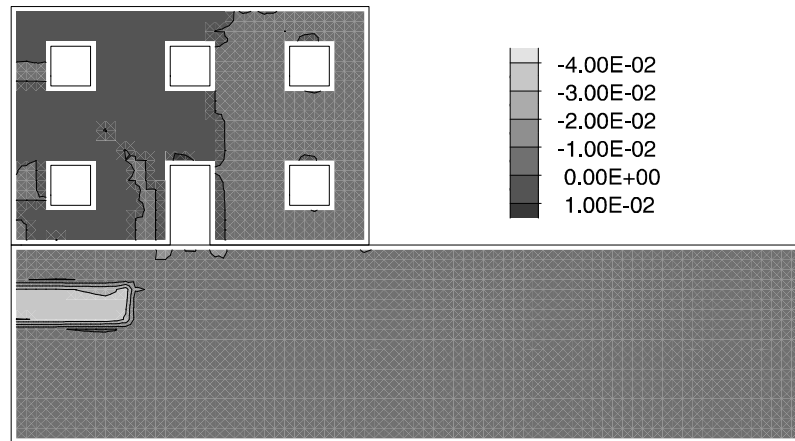


Figura 107. Deformação volumétrica (compressão negativa). Zona saturada a 1m de profundidade.

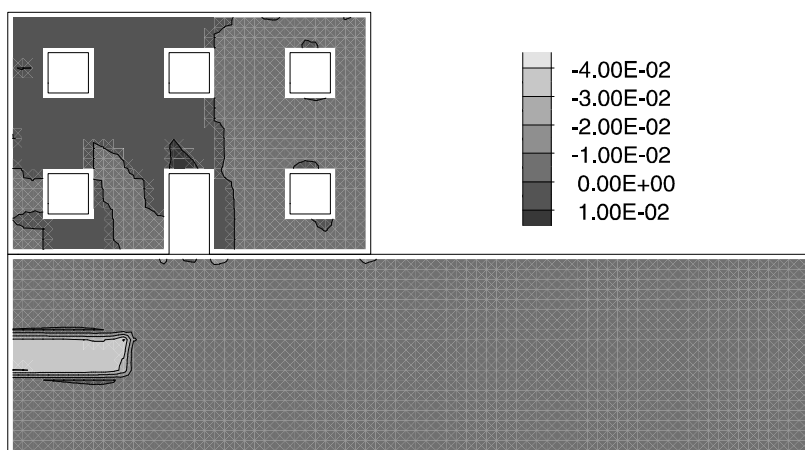


Figura 108. Deformação volumétrica (compressão negativa). Zona saturada a 2m de profundidade.

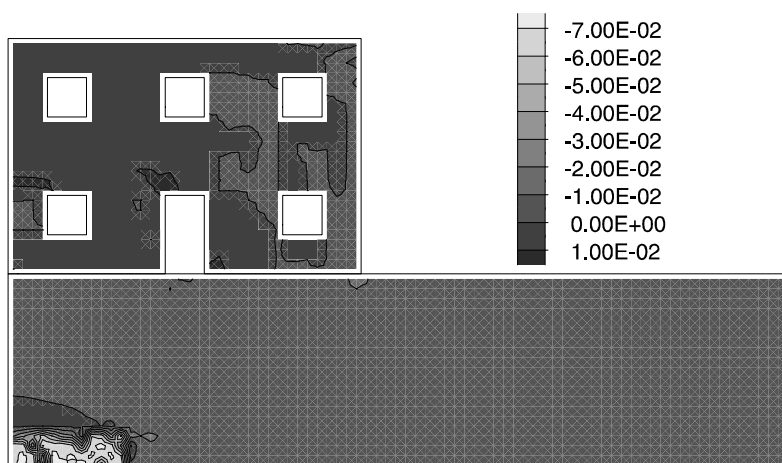


Figura 109. Deformação volumétrica (compressão negativa). Zona saturada a 4m de profundidade.

A distribuição espacial das direcções principais de tensão correspondente à zona saturada situada a 1m de profundidade (Figura 13b)) encontra-se representada na Figura 110. A distribuição espacial das direcções principais de tensão correspondente à zona saturada situada a 2m de profundidade (Figura 13c)) encontra-se representada na Figura 111. A distribuição espacial das direcções principais de tensão correspondente à zona saturada situada a 4m de profundidade (Figura 13d)) encontra-se representada na Figura 112.

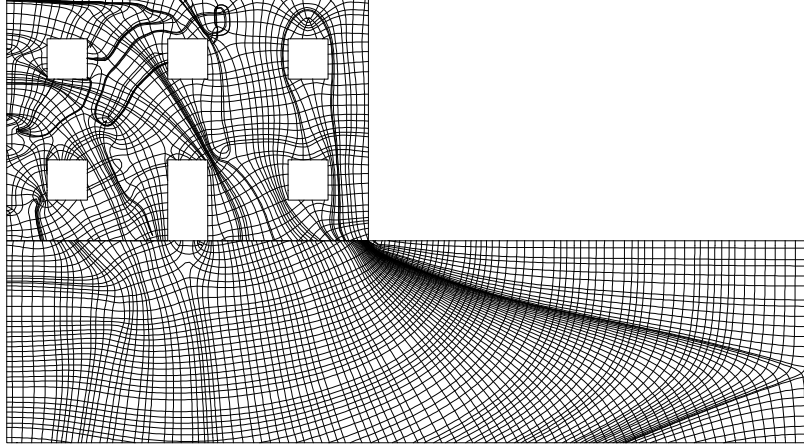


Figura 110. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto. Zona saturada a 1m de profundidade.

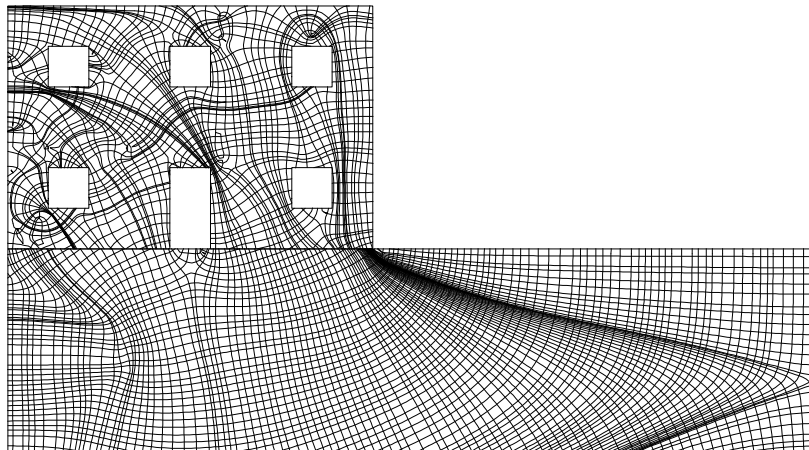


Figura 111. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto. Zona saturada a 2m de profundidade.

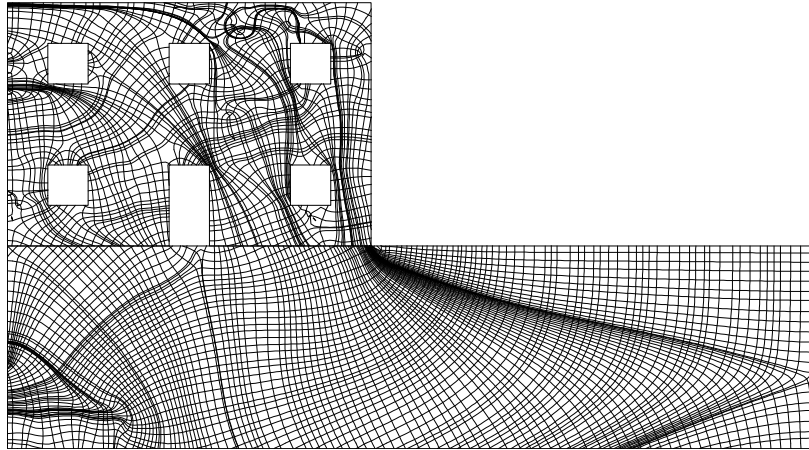


Figura 112. Trajectórias espaciais de tensão. Curvas tangentes às tensões principais em cada ponto. Zona saturada a 4m de profundidade.

3.2.5.9. Efeito da saturação

A Figura 113 permite comparar os assentamentos na base da fachada correspondentes à zona saturada situada junto à superfície (caso de referência, Figura 13a)), situada a 1m de profundidade (Figura 13b)), situada a 2m de profundidade (Figura 13c)) e situada a 4m de profundidade (na base da camada de fundação, Figura 13d)).

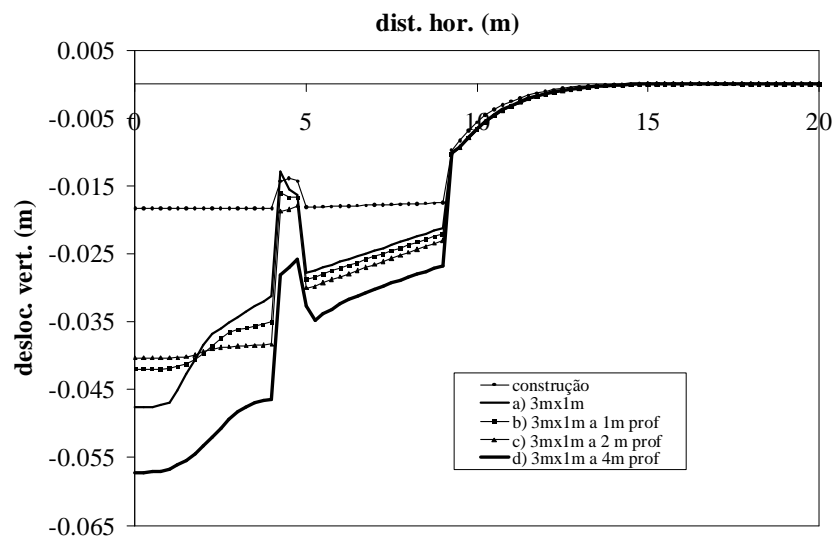


Figura 113. Assentamentos (valores negativos) da superfície do terreno para a fases de construção e de saturação a diferentes profundidades. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

Entre os 0m e os 2m de profundidade verifica-se uma redução dos assentamentos sobre a zona saturada e um aumento dos mesmos sobre o resto da base da fachada. Ou seja, os assentamentos apresentam uma tendência para a uniformização. Na passagem para os 4m de profundidade os assentamentos agravam-se e esta tendência inverte-se.

A Figura 114 permite comparar os assentamentos em profundidade sobre o eixo de simetria da fundação correspondentes à zona saturada situada junto à superfície (caso de referência, Figura 13a)), situada a 1m de profundidade (Figura 13b)), situada a 2m de profundidade (Figura 13c)) e situada a 4m de profundidade (na base da camada de fundação, Figura 13d)).

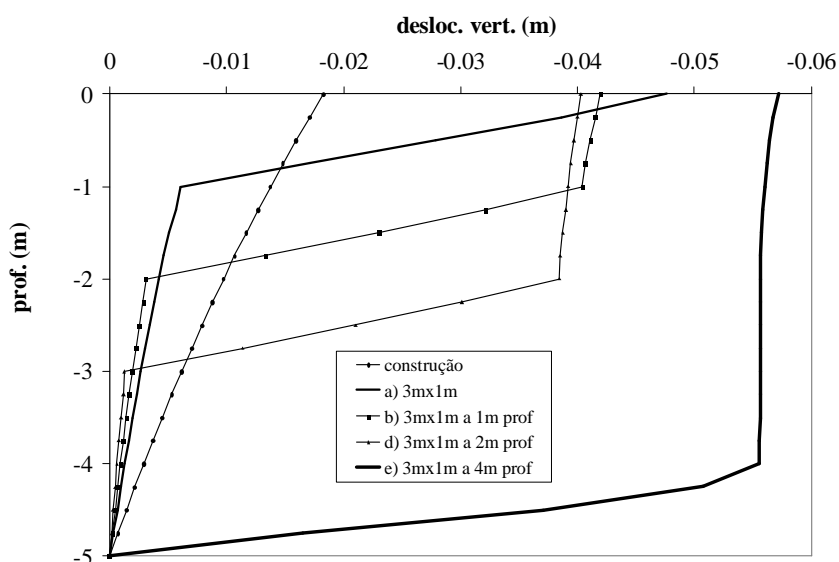


Figura 114. Assentamentos da fundação (valores negativos) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação a diferentes profundidades. Distância vertical medida a partir da superfície.

Verifica-se em todos os casos uma redução acentuada dos assentamentos em profundidade com o atravessamento da zona saturada. Entre a profundidade 0m e 2m os deslocamentos verticais passam de assentamentos a empolamentos sob a zona saturada. No caso da zona saturada localizada a 4m de profundidade, tal não pode ocorrer, porque a zona saturada assenta sobre o “bedrock”. Os empolamentos que ocorrem abaixo da zona saturada contribuem para a redução dos assentamentos na base da fachada.

A Figura 115 permite comparar as tensões verticais totais na base da fachada correspondentes à zona saturada situada junto à superfície (caso de referência, Figura 13a)), situada a 1m de profundidade (Figura 13b)), situada a 2m de profundidade (Figura 13c)) e situada a 4m de profundidade (na base da camada de fundação, Figura 13d)).

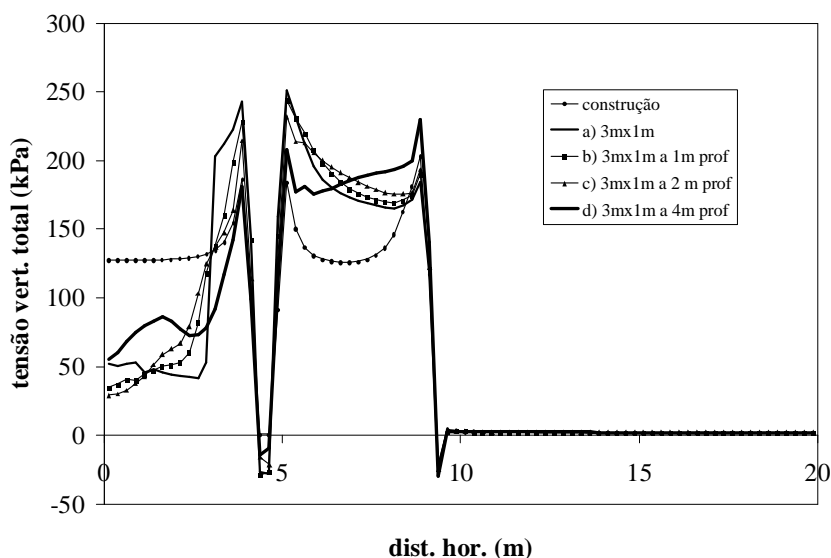


Figura 115. Tensão vertical total (compressão positiva) à superfície do terreno para as fases de construção e de saturação a diferentes profundidades. Distância horizontal medida ao eixo de simetria.

A variação da distribuição da tensão vertical na base da fachada não é muito significativa entre para a zona saturada situada entre os 0m e os 2m de profundidade. A distribuição é significativamente diferente para 4m de profundidade. Isto poderá estar relacionado com o efeito à superfície abranger uma extensão maior com a profundidade e o padrão de danos que isso provoca na fachada.

A Figura 116 permite comparar os assentamentos em profundidade sobre o eixo de simetria da fundação correspondentes à zona saturada situada junto à superfície (caso de referência, Figura 13a)), situada a 1m de profundidade (Figura 13b)), situada a 2m de profundidade (Figura 13c)) e situada a 4m de profundidade (na base da camada de fundação, Figura 13d)).

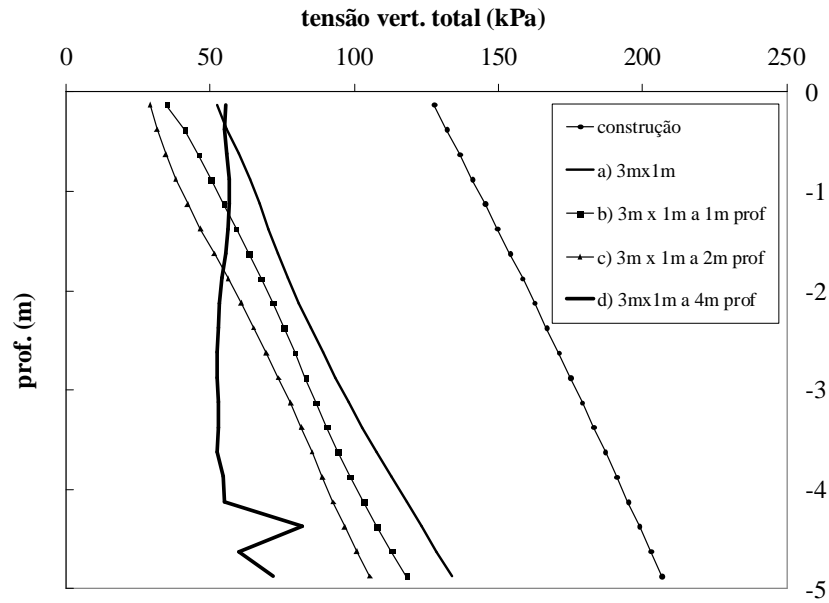


Figura 116. Tensão vertical total na fundação (compressão positiva) em profundidade sobre o eixo de simetria para as fases de construção e de saturação a diferentes profundidades. Distância vertical medida a partir da superfície.

Entre os 0m e os 2m de profundidade, a tensão vertical sofre uma redução crescente e aproximadamente constante ao longo do eixo de simetria. No caso da zona saturada a 4m de profundidade, a tensão vertical passa a ser aproximadamente constante em profundidade com um valor ligeiramente superior a 50kPa.

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O método proposto para modelar os assentamentos por colapso mostrou-se eficaz na análise numérica dos efeitos da ocorrência de saturação no terreno de fundação em fachadas de edifícios em alvenaria. Esta interacção complexa solo-estrutura, em que o solo e a fachada têm comportamento não linear, depende de vários factores, em particular: da geometria da fachada, do tipo de solo de fundação, do estado de tensão e pré-consolidação iniciais do solo, do valor da sucção matricial presente no solo durante a fase de construção e da configuração e localização da zona da fundação submetida a saturação. A influência destes factores, com excepção do primeiro foram objecto de estudo neste trabalho.

Descrevem-se de seguida as principais conclusões destas análises.

O caso de referência apresenta um grau de sobreconsolidação decorrente da erosão de 40m superficiais do terreno, uma sucção de 300kPa e uma zona saturada com 3m desenvolvimento horizontal e 1m de altura, localizada à superfície junto do eixo de simetria. Este caso deu origem a assentamentos por colapso de aproximadamente 3cm e danos por fendilhação na fachada com algum significado, quer em termos de extensão, quer em termos de abertura de fendas (valor máximo de 4 mm).

Com uma sucção inicial (100kPa) inferior à do caso de referência, verificaram-se maiores assentamentos na fase de construção (3cm em vez de 2cm) e também maiores assentamentos por colapso (cerca de 5cm). Os danos na fachada por fendilhação foram também mais acentuados, com maior extensão e abertura máxima de 1,5cm.

No caso com maior grau de sobreconsolidação, derivada da erosão de 80m superficiais de terreno, os assentamentos da fase construtiva são similares aos do caso de referência. No entanto, a saturação não dá origem a assentamentos por colapso, mas sim a um ligeiro empolamento devido à descarga elástica do solo por efeito da redução da tensão efectiva. Neste caso, a superfície de cedência do solo saturado, devido ao elevado grau de sobreconsolidação, apresentou uma extensão suficiente para acomodar as trajectórias de tensão na zona saturada.

Para um menor grau de sobreconsolidação, com a erosão de apenas 25m superficiais de terreno, os assentamentos da fase construtiva (valor máximo de 7cm) são significativamente superiores aos do caso de referência. Os assentamentos devidos à saturação são também superiores, com 15cm. Os danos na fachada por fendilhação foram também mais acentuados, com maior extensão e abertura máxima de 2,9cm.

Os resultados apresentados permitem constatar uma influência muito significativa das dimensões e posição da zona saturada nos assentamentos e danos na fachada. Num dos casos, com a saturação em toda a extensão de 1m superficial da fundação, verificou-se a rotura de parte da fachada.

Relativamente a desenvolvimentos futuros dos estudos efectuados neste trabalho, sugere-se:

- 1) a utilização de leis constitutivas para solos não-saturados formuladas em termos da generalização do conceito de tensão efectiva e incluindo o endurecimento associado à sucção matricial.
- 2) a utilização de leis constitutivas para alvenaria, com capacidade para modelar de forma mais rigorosa a fendilhação.
- 3) utilização de modelos tri-dimensionais.
- 4) diferentes vãos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E. E., Gens, A. e Josa, A. (1990) “A constitutive model for partially saturated soils”, *Géotechnique*, 40, pp. 405 – 430.
- Bishop, A. W. (1959) “The principle of effective stress”, *Teknisk Ukeblad*, 106 (39), pp. 859-863.
- Duncan, J. M. e Chang, C. Y. (1970) “Non-linear analysis of stress and strain in soils”, *J. Soil Mech. And Found. Div.*, ASCE, 96 (SM5), pp. 1629-1654.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2000) “FLAC user’s guide, version 4”, Minneapolis, Minnesota.
- Lawton, E. C., Fragaszy, R. J. e Hardcastle, J. H. (1991) “Stress ratio effects on collapse of clayey sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117, pp. 714 – 730.
- Li, X., Thomas, H. R. e Fan, Y. (1999) “Finite element method and constitutive modeling and computation for unsaturated soils”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 169, pp. 135 – 159.
- Liu, G., Houlsby, G. T. e Augarde, C. E. (2000) “2-dimensional analysis of settlement damage to masonry buildings caused by tunneling”, *The Structural Engineer*, Vol. 79, No. 1, pp. 19-25.
- Loret, B. e Khalili, N. (2002) “An effective stress elastic-plastic model for unsaturated porous media”, *Mechanics of Materials*, 34, pp. 97-116.
- Lourenço, P. B. (1996) “Computational Strategies for Masonry Structures”, PhD Thesis, Delft University of Technology.
- Maranha, J. R. (1997) “Analysis of Embankment Dams: Computational Aspects”, PhD Thesis, University of Wales, Swansea.

- Nobari, E. S. e Duncan, J. M. (1972) “Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams”. Technical report, College of Engineering, University of California, Berkeley, Report No. TE-72-1 – Prepared for U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Noorany, I., Frydman, S. e Detournay, C. (1999) “Prediction of soil slope deformation due to wetting”, in Detournay & Hart (eds), *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, Balkema, Rotterdam.
- Nuth, M. e Laloui, L. (2008) “Effective stress concept in unsaturated soils: clarification and validation of a unified framework”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32, pp. 771 – 801.
- Rodrigues, R. A. (2007) “Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático”, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Roscoe, K. H. e Burland, J. B. (1968) “On the generalised stress-strain behaviour of ‘wet’ clay”, in Heyman, J. e Leckie, F. A. (Eds.), *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, Cambridge, U. K., pp. 535-609.
- Souza Neto, J. B. (2004) “Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso)”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.