

UMA PERSPECTIVA SOBRE O EFEITO DE ARCO EM ESCAVAÇÕES EM MACIÇOS DE SOLOS ARGILOSOS MOLES

A reappraisal of arching around braced excavations in soft ground

EDUARDO FORTUNATO*

MANUEL MATOS FERNANDES **

ANTÓNIO SILVA CARDOSO **

RESUMO - O trabalho apresenta o estudo de uma escavação escorada num maciço de argila mole simulada numericamente com recurso a um modelo de cálculo elastoplástico baseado no método dos elementos finitos. Na análise dos resultados são postas em destaque as redistribuições de tensões por efeito de arco no maciço interessado pela escavação e identificados os parâmetros que contribuem para tal fenómeno. É proposta uma analogia estrutural simples para interpretar a interacção solo-estrutura.

SYNOPSIS - A typical strutted excavation in soft clay is modelled using an elastoplastic finite element code. The results are analysed with emphasis on earth pressures redistribution by arching and on the parameters that contribute to that phenomenon. A simple structural analogy is proposed to interpret the soil-wall interaction.

1 - INTRODUÇÃO

A execução de escavações profundas em maciços de solos argilosos moles acarreta, em regra, a mobilização da resistência ao corte do solo em amplas zonas do maciço. Para determinadas combinações da profundidade da escavação, h , e da resistência não drenada do solo, c_u (para as quais se usa em geral o chamado número de estabilidade da base, $N_b = \gamma h / c_u$), a execução da obra só é possível por meio do prolongamento da cortina para além da base da escavação, apoiando a extremidade inferior num estrato rijo (Peck, 1969; Bjerrum 1972). Em termos simplificados, pode dizer-se que à altura enterrada da parede cabe suprir o défice de pressões de terras (de tipo "passivo") que o maciço subjacente à escavação, dada a sua precária resistência, não pode fornecer para equilibrar as elevadas pressões (de tipo "activo") do lado das terras suportadas.

Para valores elevados do número de estabilidade da base (digamos, acima de 7 a 9), e quando a espessura do estrato mole entre o fundo da escavação e o estrato rijo é considerável, a estrutura de contenção é muito severamente solicitada, experimentando elevados deslocamentos cujos valores máximos ocorrem em regra abaixo da base da escavação (Finno et al., 1989; Clough e O' Rourke, 1990).

A Figura 1 é extraída de um trabalho pioneiro (Bjerrum et al., 1972) em que o comportamento de escavações escoradas em solos moles foi analisado de forma particularmente feliz na perspectiva do efeito de arco. Os autores sugerem que a variação da grandeza dos deslocamentos ao longo da altura da parede induz um mecanismo de efeito de arco que agrava as pressões de terras nas zonas com deslocamentos mais reduzidos, nomeadamente na zona suportada pelas escoras, e reduz as pressões na zona com maiores

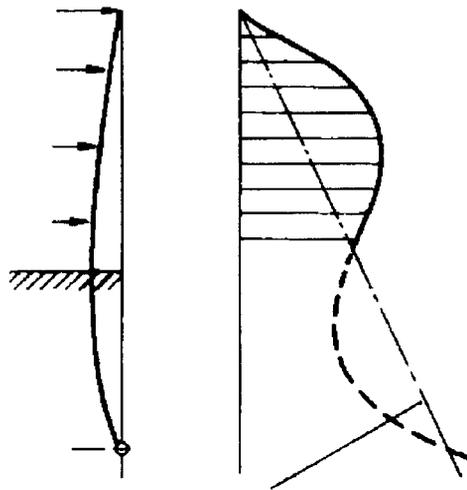
* Mestre em Engenharia Civil, Assistente de Investigação do LNEC

** Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado da FEUP

deslocamentos, onde as mesmas podem atingir valores significativamente inferiores às correspondentes ao estado activo de Rankine.

Tendo em conta as considerações anteriores, é fácil perceber que o dimensionamento estrutural é altamente dependente do efeito de arco que pode ser mobilizado.

Este trabalho apresenta alguns resultados de uma investigação neste tema levada a cabo na Universidade do Porto (Fortunato, 1994). Um modelo elasto-plástico por elementos finitos foi utilizado como ferramenta básica para desenvolver um estudo paramétrico cujas conclusões permitiram uma compreensão mais aprofundada dos fenómenos envolvidos na redistribuição de tensões em escavações escoradas em argilas moles.



Pressões de Rankine

Fig. 1 - Deslocamento lateral típico da cortina e redistribuição das pressões ativas numa escavação em argilas moles (Bjerrum et al., 1972).

2 - EXEMPLO NUMÉRICO

O exemplo numérico considerado para base do estudo paramétrico refere-se a uma escavação de 10,0 m de profundidade num maciço de argila mole, com as características indicadas na Figura 2, suportada por uma parede moldada de 0,6 m de espessura, escorada a três níveis com perfis metálicos tipo HEB espaçados horizontalmente de 3,5 m.

Foram consideradas diversas condições de apoio na extremidade inferior da cortina, pretendendo traduzir, sucessivamente, um encastramento perfeito, um encastramento parcial, uma articulação e a ausência de quaisquer constrangimentos ao seu deslocamento para além dos que resultam do seu embeijimento no estrato argiloso brando, situação que por simplificação adiante será designada por extremidade livre (ver notação para os cálculos efectuados no quadro da Figura 2).

O coeficiente de segurança em relação à rotura do fundo, calculado pelos métodos de Terzaghi (1943) e de Bjerrum e Eide (1956), vale aproximadamente 1,0. É de notar que este valor é apenas um indicador aproximado dos níveis de tensão no maciço, já que aqueles métodos não contabilizam o efeito da altura enterrada da parede.

Nas análises por elementos finitos foi utilizada a malha apresentada na Figura 3. Os cálculos foram realizados em tensões totais, admitindo-se comportamento não drenado para o maciço e um estado plano de deformação. Foi considerado um comportamento elasto-plástico

para o solo e para a interface solo-cortina e adoptado o critério de rotura de Von Mises. Para os materiais da parede e das escoras, admitiu-se comportamento elástico linear.

A resistência ao corte dos elementos de junta representativos da interface solo-parede moldada foi admitida, numa primeira fase, igual à resistência não drenada do solo ao mesmo nível. Por sua vez, aos elementos de junta que constituem a superfície horizontal de contacto entre o estrato de argila e o firme foi-lhes atribuída adesão igual à resistência não drenada dos elementos bidimensionais imediatamente superiores. Em ambos os casos, a resistência é mobilizada para um deslocamento tangencial relativo de 1,0 mm. A rigidez normal dos elementos de junta foi considerada igual a 10^7 kN/m.

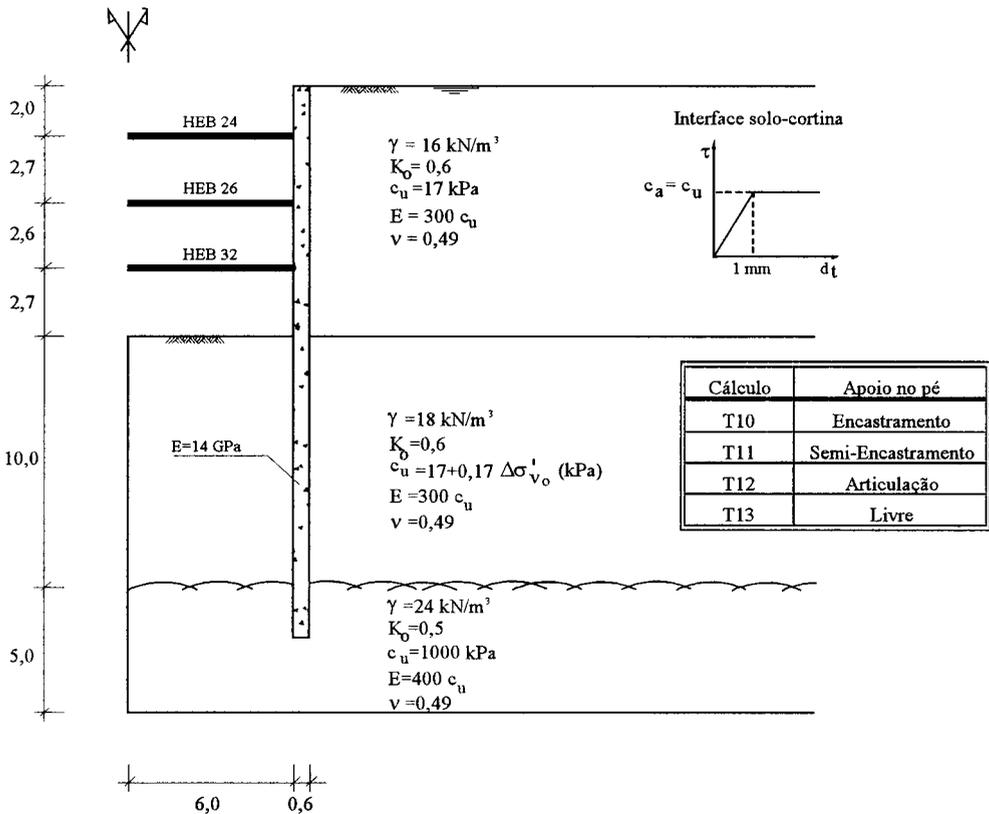
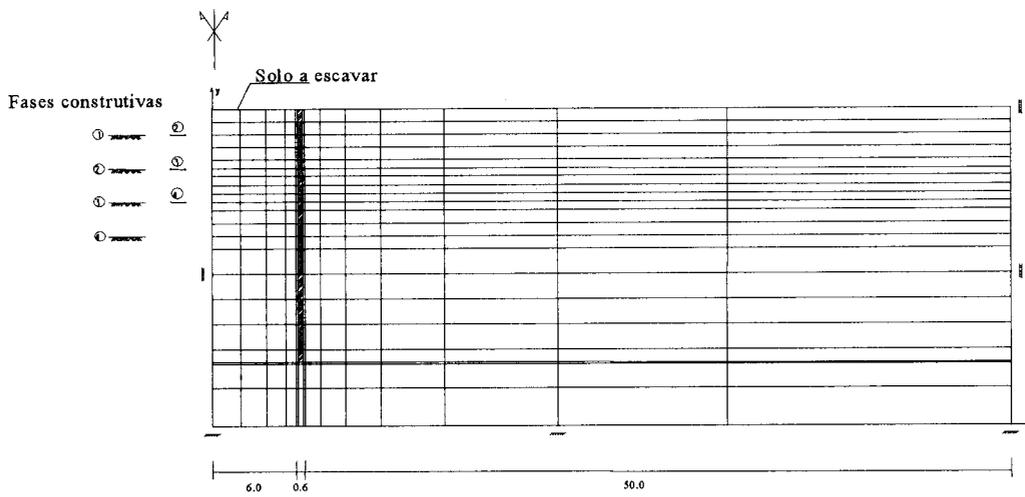
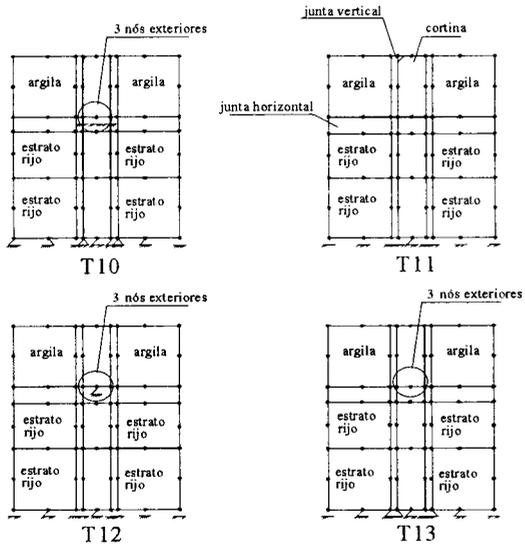


Fig. 2 - Características da escavação analisada



— Escora
 ○ Fase

Pormenor de apoio do pé da cortina



- Malha de elementos finitos:
- 240 elementos bidimensionais isoparamétricos de 8 nós (maciço e cortina)
 - 52 elementos de junta de 6 nós e espessura nula (interfaces solo-cortina e argila-bedrock)

Fig. 3 - Malha de elementos finitos e fases de cálculo

É conveniente referir que, no início do trabalho ligado à modelação numérica, a utilização de elementos de junta foi apenas imaginada para a representação da interface solo-cortina, como aliás tem sido corrente em praticamente todos os trabalhos publicados em que este tipo de obras é estudado pela via dos elementos finitos. Todavia, uma criteriosa análise dos resultados, em particular junto da extremidade inferior da cortina, sugeriu a conveniência em considerar igualmente elementos de junta para a representação da interface entre o maciço brando argiloso e a camada firme subjacente (Fortunato et al., 1995).

As escoras foram simuladas por elementos barra. A rigidez efectiva das escoras foi tomada igual a metade da rigidez teórica, sendo esta a rigidez axial dos perfis propriamente ditos. Estes foram adoptados com base em cálculos de pré-dimensionamento, tendo em consideração a encurvadura e admitindo contraventamento a meio vão e um coeficiente de segurança de 2,0 (Fortunato, 1994).

Como indica a Figura 3, as análises foram realizadas em 4 fases simulando a retirada do terreno até às profundidades de 2,0; 4,7; 7,3 e 10,0 m. Nas fases 2, 3 e 4 foram introduzidos na malha de elementos finitos os elementos barra representativos dos 1º, 2º e 3º níveis de escoras, respectivamente. No início do cálculo admite-se que a parede moldada já está construída e que a sua instalação não alterou o estado de repouso no maciço.

3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 - Deslocamentos

Da comparação das configurações de deslocamentos horizontais no plano da parede no fim da escavação, ilustradas na Figura 4, conclui-se que até à profundidade da última escora os deslocamentos não são significativamente alterados pela variação das condições de apoio do pé da cortina. Abaixo desse nível, todavia, passam a existir diferenças substanciais. Em todos casos o deslocamento horizontal máximo ocorre abaixo do fundo da escavação.

Quando a extremidade inferior da cortina está livre (Cálculo T13), ocorrem deslocamentos significativos no pé para o interior da escavação, acompanhados de deslocamentos ascensionais da cortina e do maciço imediatamente adjacente.

Os perfis dos assentamentos da superfície apresentam a concavidade que é típica quando a parede exerce sobre o maciço suportado forças tangenciais ascendentes na respectiva interface. Pode, de igual modo, verificar-se que as grandezas dos assentamentos máximos exibem ainda maior sensibilidade do que a dos deslocamentos laterais homólogos em relação às condições de apoio no pé.

3.2 - Esforços no escoramento e na cortina

Na Figura 5 estão representados os diagramas de pressões aparentes obtidos dos cálculos e o diagrama de Terzaghi-Peck admitido para pré-dimensionamento.

O intervalo de variação das forças máximas mobilizadas nas escoras nos primeiro e segundo níveis é relativamente estreito. No que respeita ao esforço no terceiro e último nível verifica-se um crescimento praticamente contínuo à medida que as condições de apoio do pé da cortina se degradam.

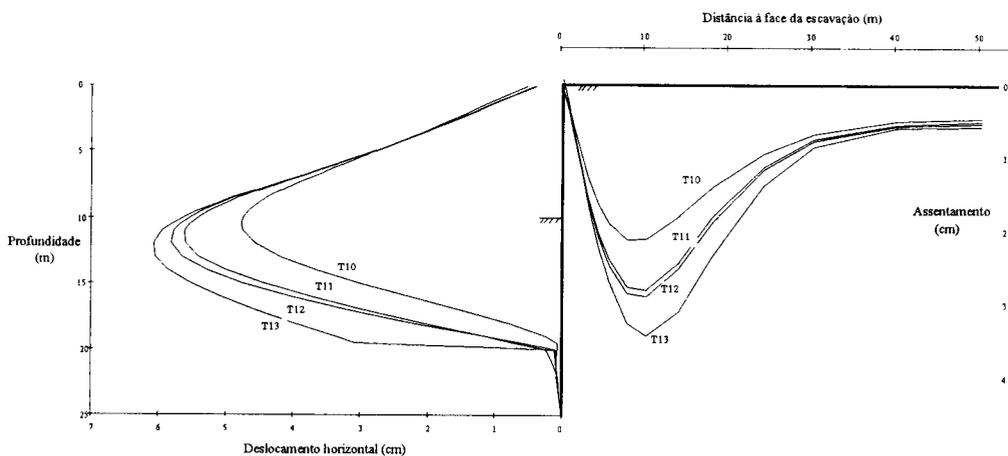


Fig. 4 - Deslocamentos horizontais no plano da cortina e assentamentos da superfície no fim da escavação (cálculos T10 a T13).

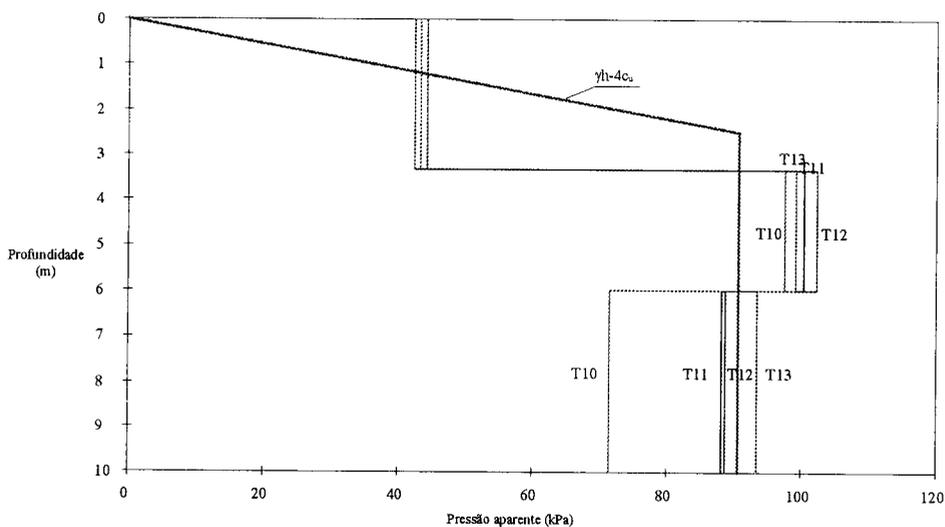


Fig. 5 - Diagramas de pressões aparentes e sua comparação com o diagrama de Terzaghi-Peck (cálculos T10 a T13).

A Figura 6 mostra as envolventes de momentos flectores que devem servir de base à determinação das secções resistentes da cortina. Desta figura, importa reter que :

- os momentos máximos positivos (que provocam tracção na face da cortina voltada para o interior da escavação) ocorrem abaixo do fundo da escavação para profundidades muito semelhantes;
- o valor máximo do momento flector negativo obtido no cálculo T10, proporcionado pela simulação de encastramento perfeito na extremidade da cortina, é extremamente elevado, sendo na prática irrealista e incompatível com a resistência desta; o momento negativo no pé da parede obtido no cálculo T11, de valor muito mais modesto, constituirá aproximação mais realista a situações em que a cortina penetra num estrato inferior resistente (solo rijo ou rocha branda), atingindo cerca de metade do valor do momento máximo positivo;

c) os momentos máximos negativos obtidos acima da base da escavação são relativamente reduzidos.

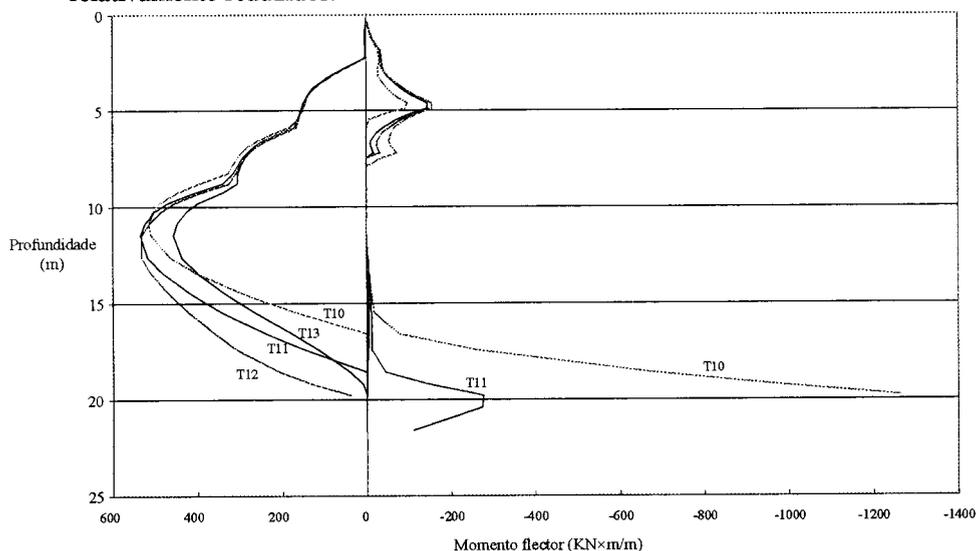


Fig. 6 - Envolventes dos diagramas de momentos flectores (cálculos T10 a T13).

3.3 - Pressões de terras

Na Figura 7 incluem-se os diagramas de pressões de terras sobre a parede no fim da construção, juntamente com os diagramas de repouso e activo de Rankine, atrás da parede, e passivo de Rankine, em frente desta.

Na parte superior da parede as pressões são elevadas, ultrapassando mesmo as de repouso; tendem depois a diminuir em profundidade, descendo significativamente abaixo das pressões activas teóricas nas proximidades e abaixo da base da escavação. As pressões em frente da cortina são superiores às pressões passivas teóricas, com tendência para diminuírem nas zonas mais profundas, nas situações em que existe apoio do pé.

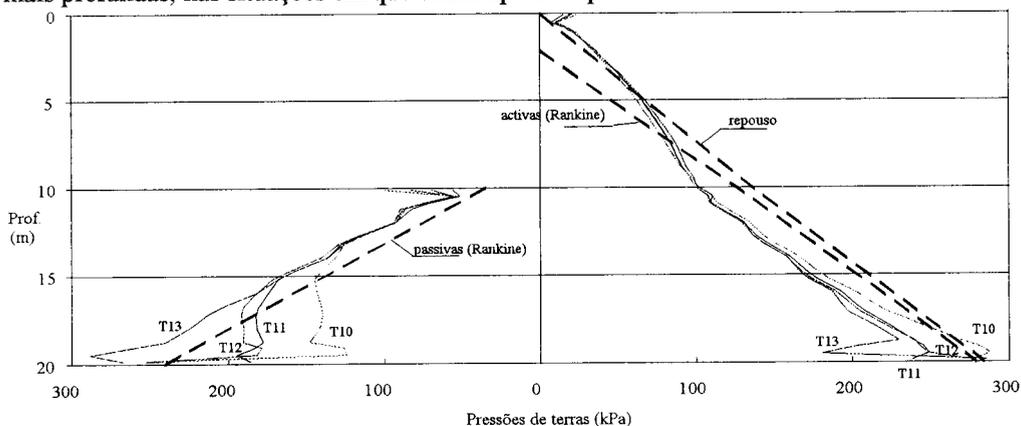


Fig. 7 - Pressões de terras no fim da escavação (cálculos T10 a T13)

4 - ANÁLISE DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES

4.1 - Redistribuição de tensões horizontais

A análise da Figura 8 permite concluir que o integral das pressões de terras atrás da parede acima do fundo da escavação e a resultante dos esforços no escoramento no final da escavação aumentam com a degradação das condições de apoio do pé da parede. Pelo contrário, atrás da cortina o integral das pressões desde a superfície até a base da camada de argila mole tende a diminuir.

O crescimento das duas primeiras grandezas deve-se à transferência de pressões da zona inferior, situada a profundidade maior do que a base da escavação, para a zona superior escorada, quer através da cortina, por aumento do esforço transversal ao nível do fundo da escavação, quer através do próprio maciço suportado. Este comportamento evidencia o desenvolvimento de um efeito de arco durante a escavação, o qual é tanto mais importante quanto mais fracas são as condições de apoio do pé da cortina.

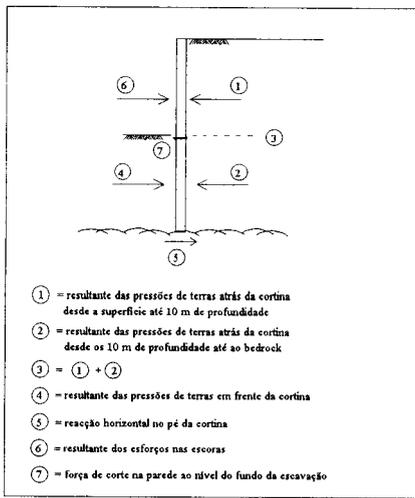
É importante notar que a resultante das pressões atrás da parede (calculada até à base da camada de argila) é menor que o impulso activo de Rankine em todos os cálculos. Do lado oposto o integral das pressões de terras é, com a excepção do cálculo T10, superior ao impulso passivo de Rankine. Estes interessantes resultados só podem compreender-se pelo facto de as redistribuições de tensões horizontais que foram constatadas estarem associadas a redistribuições de tensões verticais. Com efeito, se assim não fosse, a obtenção de tensões inferiores às activas de Rankine ou, do lado oposto, de tensões superiores às passivas de Rankine (calculadas com base no peso das terras sobrejacentes e admitindo que as direcções principais de tensão se mantêm na vertical e horizontal) significaria que a lei de cedência do solo não estaria a ser adequadamente respeitada no algoritmo não linear, o que naturalmente não é o caso.

4.2 - Redistribuição de tensões verticais

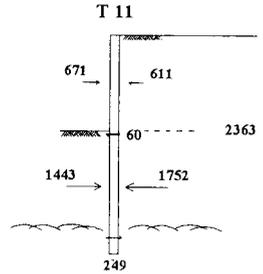
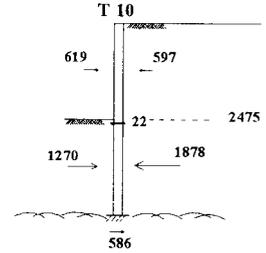
Na Figura 9 ilustra-se a distribuição de tensões verticais em três profundidades distintas (1,2 m, 11,4 m e 17,4 m) na última fase de construção para o Cálculo T12 (cortina articulada no pé).

Em primeira análise, é possível constatar que a tensão vertical de repouso é significativamente alterada com o processo de escavação. Com efeito, no interior do maciço suportado e na proximidade da escavação, detectam-se, nos dois níveis mais profundos, significativos decréscimos em relação à tensão vertical correspondente ao peso do solo sobrejacente, acompanhados de acréscimos nas zonas do maciço suportado mais afastadas. No maciço subjacente à escavação, em frente da parede, ocorrem igualmente modificações nas tensões verticais em relação às correspondentes ao peso das terras sobrejacentes, agora com acréscimos consideráveis junto da face da escavação.

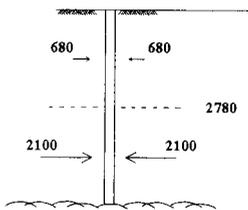
Estas constatações revelam a ocorrência de um fenómeno de transferência de tensões verticais entre distintas zonas do maciço e entre este e a cortina.



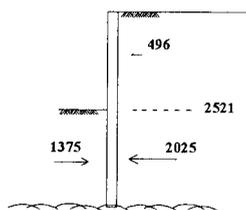
Impulsos calculados (kN)



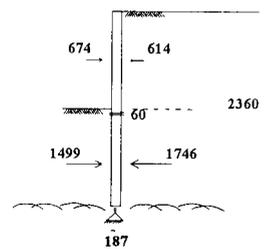
Impulsos de repouso (kN)



Impulsos activos e passivos de Rankine (kN)



T 12



T 13

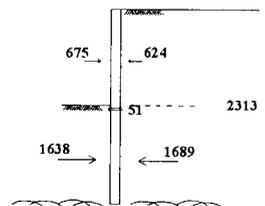


Fig. 8 - Análise detalhada das forças na parede: resultantes de pressões de terras e de esforços nas escoras, reacção no pé da cortina e esforço transversal ao nível do fundo da escavação (cálculos T10 a T13).

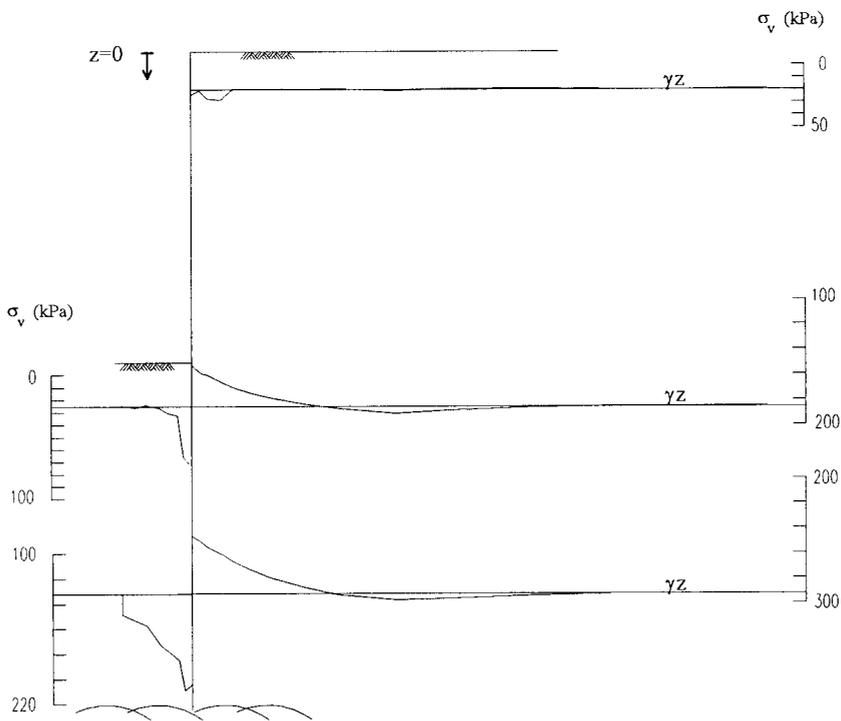


Fig. 9 - Tensões verticais a três profundidades (Cálculo T12, $c_a=c_u$).

Para melhor ilustrar este fenômeno de transferência de tensões verticais, incluem-se na Figura 10, para a fase final do Cálculo T12, os seguintes diagramas: i) o diagrama de tensões verticais médias na cortina (isto é, excluindo as associadas à flexão); ii) os diagramas das tensões verticais correspondentes ao peso do solo sobrejacente atrás e em frente da cortina (calculados pelo produto da profundidade respectiva pelo peso volúmico do solo); iii) os diagramas das tensões verticais calculadas para os pontos de Gauss dos elementos mais próximos da parede de ambos os lados desta. É de notar que o peso específico do material da cortina foi tomado igual ao peso específico do solo, pelo que o diagrama de tensões verticais correspondente ao peso do solo atrás da escavação representa igualmente as tensões verticais na cortina associadas apenas ao peso próprio desta.

Constata-se em primeiro lugar que são substanciais as variações das tensões verticais nos elementos próximos da parede em relação às correspondentes ao peso próprio, como aliás foi já comentado.

No que respeita às tensões médias na própria parede, estas são superiores às correspondentes ao peso próprio em quase todo o desenvolvimento da mesma. Abaixo do fundo da escavação ocorre um decréscimo gradual destas tensões, sendo este associado às tensões tangenciais ascendentes que o solo subjacente à escavação comunica à parede.

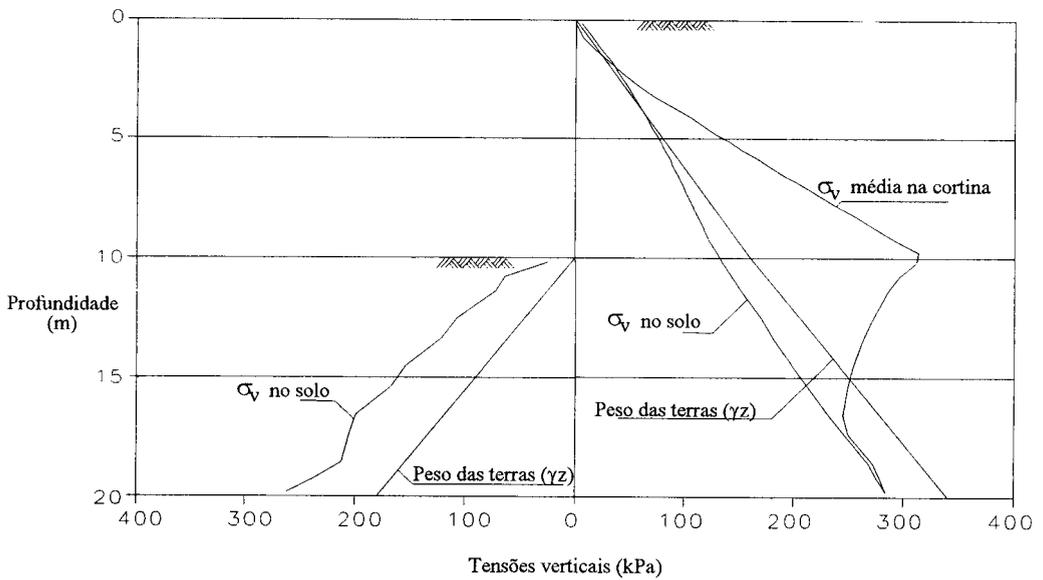


Fig. 10 - Tensões verticais no solo adjacente à parede e na parede (Cálculo T12, $c_a=c_u$).

As redistribuições de tensões verticais que foram constatadas exigem a mobilização de tensões tangenciais, logo uma rotação das tensões principais (a qual é mais pronunciada nas proximidades da parede) que deixam de coincidir com as tensões vertical e horizontal. A Figura 11 mostra, para o Cálculo T12, a evolução em profundidade das tensões principais e das tensões vertical e horizontal no solo suportado na fiada de pontos de Gauss imediatamente adjacentes à cortina. Na mesma figura mostra-se ainda as tensões normais nos elementos de junta da interface da parede com o solo suportado, isto é, as pressões de terras atrás da parede, que são praticamente coincidentes com as tensões horizontais nos pontos de Gauss vizinhos, e ainda as pressões activas de Rankine.

Nos elementos em cedência plástica, situados aproximadamente entre o fundo da escavação e o estrato inferior mais rijo, como se pode ver na Figura 12, as tensões horizontais são, de facto, usando a terminologia dos problemas de pressões de terras, "tensões horizontais activas". O facto de se obterem no cálculo em certas zonas pressões de terras inferiores às pressões activas de Rankine, como mostra a Figura 11b, não é mais do que o resultado das pronunciadas redistribuições de tensões verticais junto da parede, ilustradas nas Figura 9, 10 e 11a.

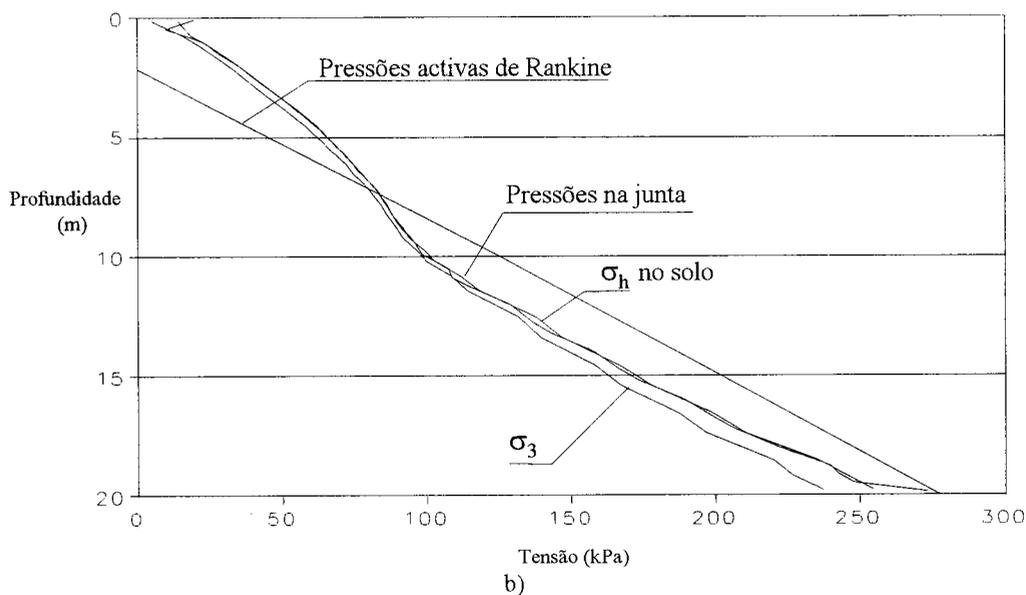
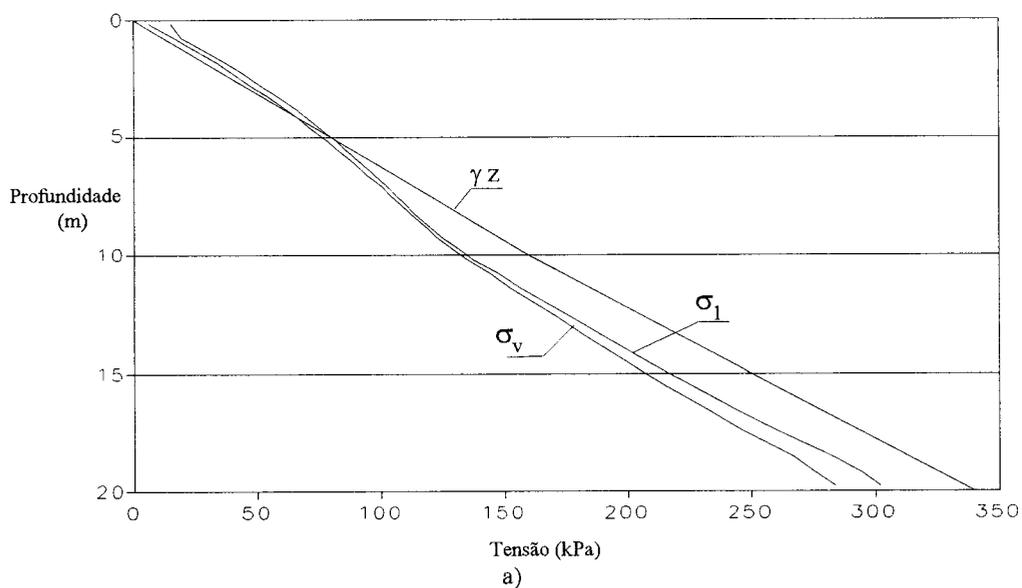


Fig. 11 - Tensões atrás da cortina (Cálculo T12): a) tensões verticais e tensões principais máximas nos pontos de Gauss dos elementos 2D adjacentes à parede; b) tensões horizontais e tensões principais mínimas nos mesmos pontos e tensões normais nos elementos de junta (pressões de terras)

O efeito de arco responsável pelas redistribuições de tensões horizontais é pois indissociável do efeito de arco referente às tensões verticais agora analisado.

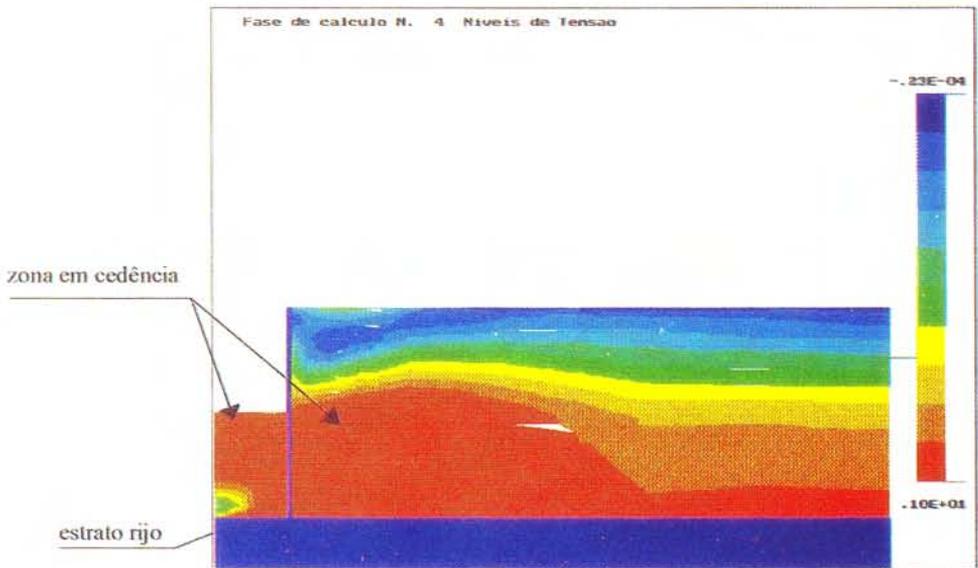


Fig. 12 - Níveis de tensão no final da escavação (Cálculo T12).

4.3 - Influência da adesão da interface solo-cortina na redistribuição de tensões

Na sequência da análise dos resultados que acabam de ser discutidos, pareceu pertinente avaliar a influência da adesão da interface solo-cortina no modo como se realiza a transferência de tensões. Para o efeito foram realizados dois cálculos, tendo como base o cálculo T12, em que se considerou a adesão solo-cortina com valor nulo e com valor igual a metade da resistência não drenada do solo ao mesmo nível.

Como ilustra a Figura 13, quando se reduz ou anula a resistência da interface solo-cortina ($c_a=0,5c_u$ ou $c_a=0$, cálculos T12B e T12A, respectivamente), o perfil dos deslocamentos horizontais desta não sofre especial alteração. No entanto, os valores máximos desses deslocamentos são significativamente afectados, crescendo com a redução daquela resistência.

No que se refere aos assentamentos, observam-se igualmente importantes alterações quando se reduz ou anula a adesão, podendo neste último caso constatar-se a ocorrência de um significativo deslocamento relativo entre o solo suportado e a cortina. Em consequência deste facto e ainda do crescimento dos deslocamentos laterais da parede, o assentamento máximo é significativamente superior ao registado quando a adesão foi considerada não nula.

A Figura 14 mostra que os valores máximos dos momentos flectores sofrem também alterações significativas quando se modificam as características dos elementos de interface solo-betão: na situação em que a cortina está articulada no pé, o momento máximo positivo aumenta cerca de 50% quando se anula a adesão na interface. Os esforços máximos no escoramento são também significativamente alterados, como é possível constatar pelo quadro da mesma figura.

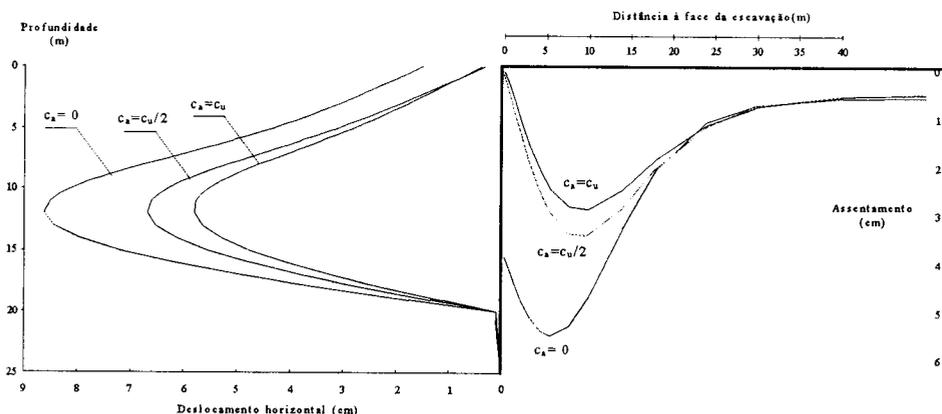


Fig. 13 - Influência da adesão solo-cortina nos deslocamentos horizontais finais no plano da cortina e nos assentamentos da superfície (cálculos T12, T12A e T12B)

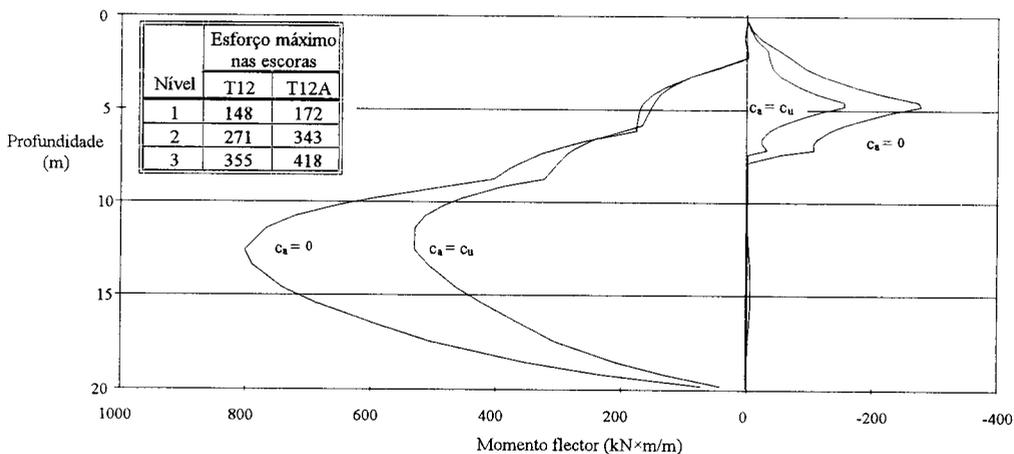


Fig. 14 - Influência da adesão solo-cortina nos momentos flectores máximos (cálculos T12 e T12A)

No que se refere à transferência de tensões verticais no sistema solo-cortina para o cálculo T12A, ilustrada na Figura 15, é agora menos pronunciado o decréscimo daquelas tensões no maciço imediatamente atrás da cortina, não obstante ser mais significativo o aumento nos pontos mais para o interior do maciço suportado. Estes fenómenos devem-se naturalmente ao facto de, neste caso, não serem permitidas transferências de tensões verticais para a cortina através de mobilização de tensões tangenciais na interface, daí a necessidade de o equilíbrio ser realizado no maciço, através de uma maior migração de tensões da zona adjacente ao corte para a zona interior, que sofre menos deslocamentos. Pela mesma razão, constata-se que do lado oposto as tensões verticais são praticamente coincidentes com as correspondentes ao peso das terras sobrejacentes.

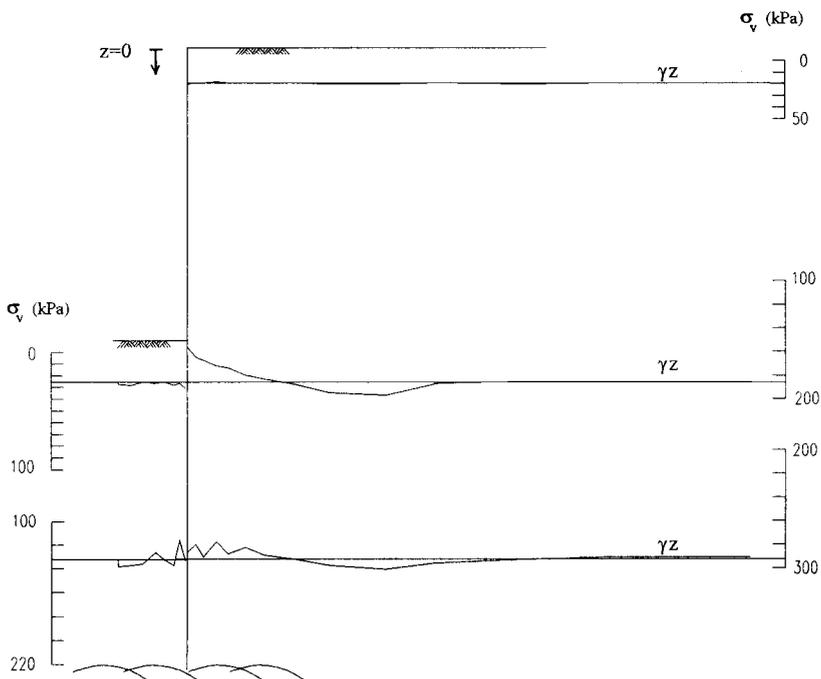


Fig. 15 - Tensões verticais a três profundidades (Cálculo T12A, $c_a=0$).

Na Figura 16 estão representadas as mesmas grandezas que foram apresentadas na Figura 10, mas em relação ao Cálculo T12A (adesão nula). Como seria de esperar, neste caso, as tensões médias na cortina no fim da escavação são semelhantes às tensões devidas ao peso próprio. As tensões verticais dos elementos próximos da parede, atrás e em frente desta, embora distintas do valor do peso das terras, são em geral mais próximas deste, comparativamente com o que acontece no Cálculo T12.

Particularmente interessante é ainda constatar que, como se mostra na Figura 17, os valores das tensões verticais e horizontais são, no Cálculo T12A, praticamente coincidentes com as tensões principais máximas e mínimas, respectivamente.

Assim, a adesão entre o solo e a cortina constitui um parâmetro extremamente relevante no desempenho da estrutura de suporte e no equilíbrio final do sistema solo-cortina.

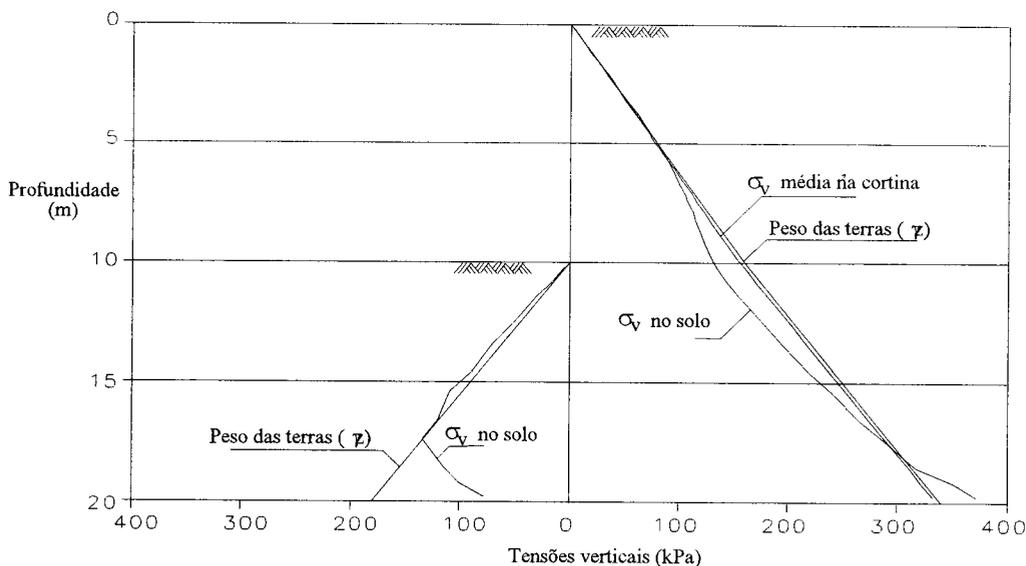
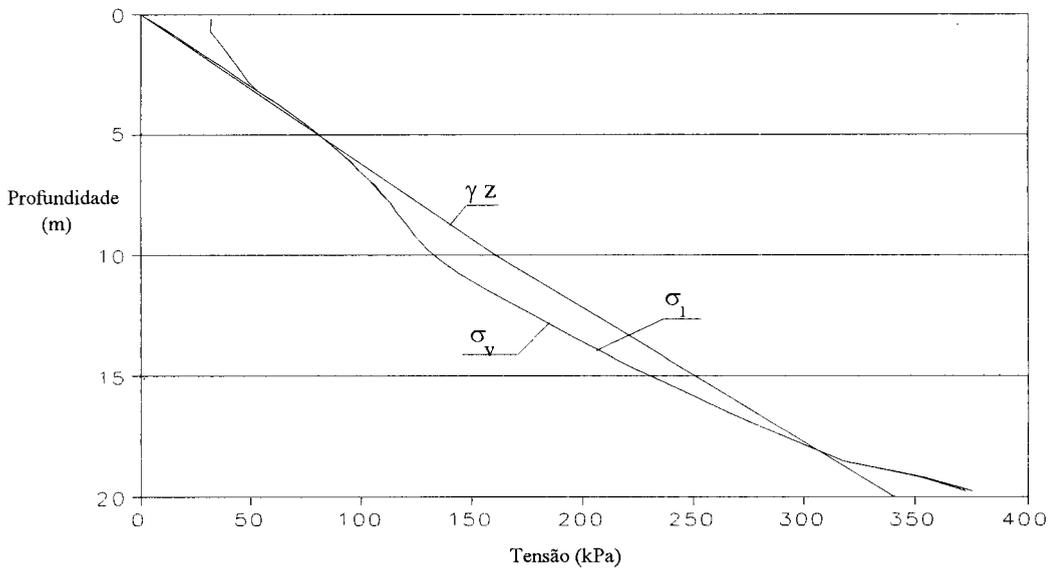


Fig. 16 - Tensões verticais no solo adjacente à parede e na parede (Cálculo T12A, $c_a=0$).

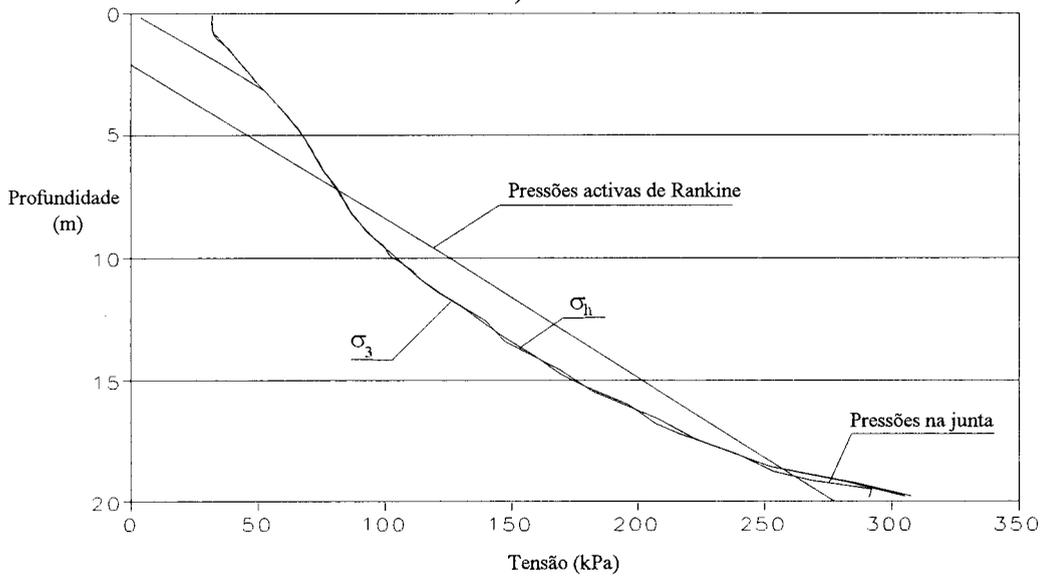
4.4 - Analogia estrutural

A Figura 18 representa a interpretação do funcionamento estrutural do sistema solo-cortina. A distribuição das tensões de corte em ambas as faces da parede é resultado da associação de diferentes fenômenos que, por simplificação, se podem decompor nas tensões induzidas pelos movimentos verticais relativos entre o maciço e a cortina (assentamento atrás e levantamento à frente) e pelas tensões associadas aos deslocamentos horizontais do sistema solo-parede.

As tensões tangenciais que o maciço suportado comunica à cortina (calculadas pelo método dos elementos finitos) têm, como mostra em termos qualitativos a Figura 18a, sentido descendente e são crescentes em profundidade. Se a estas tensões se retirassem as associadas exclusivamente ao assentamento do maciço, as quais são naturalmente decrescentes em profundidade e de sentido descendente, obter-se-iam as tensões tangenciais exclusivamente associadas aos deslocamentos horizontais do sistema. Estas tensões representam-se em termos meramente qualitativos no lado direito da Figura 18a. É fácil concluir que na parte superior da parede são de sentido ascendente, decrescem em profundidade até se anularem e passam depois a ser crescentes até próximo da profundidade do pé, agora com sentido descendente.



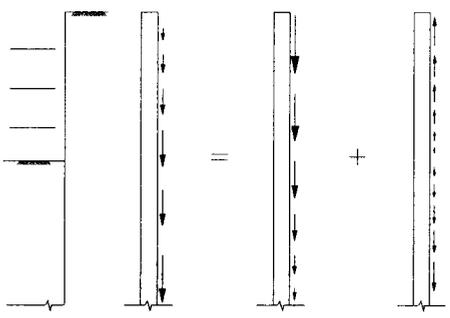
a)



b)

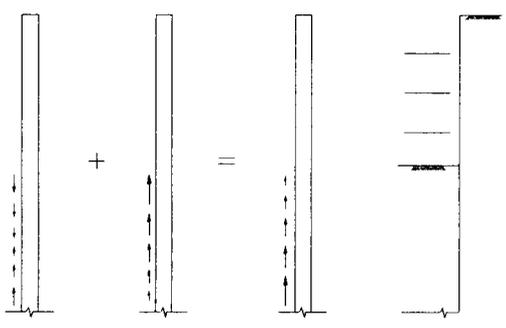
Fig. 17 - Tensões atrás da cortina no cálculo T12A: a) tensões verticais e tensões principais máximas nos pontos de Gauss dos elementos 2D adjacentes à parede; b) tensões horizontais e tensões principais mínimas nos mesmos pontos e tensões nos elementos de junta ao mesmo nível (pressões de terras)

Distribuição de tensões tangenciais fornecidas pelo cálculo Distribuição de tensões tangenciais associadas ao assentamento do terreno suportado Distribuição de tensões tangenciais associadas aos deslocamentos horizontais

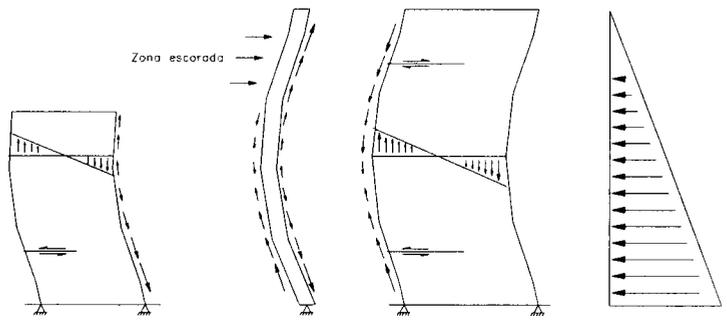


a)

Distribuição de tensões tangenciais associadas aos deslocamentos horizontais Distribuição de tensões tangenciais associadas ao processo de escavação Distribuição de tensões tangenciais fornecidas pelo cálculo



b)



c)

Fig. 18 - Analogia estrutural simples para a interação solo-estrutura

Analisando agora as tensões tangenciais comunicadas à parede do lado oposto, representadas na Figura 18b, constata-se que as tensões calculadas são de sentido ascendente e crescentes em profundidade. Já que as tensões tangenciais exclusivamente associadas ao levantamento do maciço têm o mesmo sentido mas são decrescentes em profundidade, pode concluir-se que as tensões tangenciais associadas aos deslocamentos horizontais do sistema solo-parede têm que ter o aspecto representado do lado esquerdo da Figura 18b: são nulas num ponto intermédio, crescendo para cima e para baixo desse ponto, sendo o sentido dessas tensões descendente na zona superior e ascendente na parte inferior.

Na Figura 18c representa-se uma "analogia estrutural" para o funcionamento "à flexão" do sistema solo-cortina sob a acção dos deslocamentos horizontais. Genericamente, o comportamento do maciço adjacente à cortina de ambos os lados desta pode assimilar-se a duas vigas verticais apoiadas na base, tal como a cortina no caso representado, sob a acção de um carregamento crescente em profundidade, associado ao peso do maciço suportado, e das reacções nas escoras. Os diagramas de tensões no maciço atrás da parede devidos à flexão contribuem para o alívio das tensões verticais junto da cortina na zona suportada e para o seu acréscimo nas zonas interiores. Por sua vez, flexão no solo do lado oposto aumenta as tensões verticais junto da parede, aliviando as mesmas tensões na zona central do corte.

É de notar que as tensões tangenciais na interface solo-parede obtidas das partes a e b da mesma figura, assim como as tensões de corte no interior do maciço em facetas horizontais são consistentes com a flexão acima descrita.

5 - CONCLUSÕES

A evolução quantitativa e qualitativa das grandezas associadas ao comportamento de uma escavação escorada em argilas moles com precárias condições de estabilidade do fundo é altamente dependente das condições de apoio da extremidade inferior da cortina.

Durante a escavação desenvolve-se um complexo mecanismo de transferências de tensões entre as diversas zonas do sistema solo-estrutura, através do efeito de arco. As configurações dos diagramas de pressões de terras são exemplificativas do fenómeno de redistribuição de tensões para as zonas de maior rigidez da estrutura, nomeadamente a zona escorada e o pé da cortina.

Associada à redistribuição das tensões horizontais ocorre igualmente uma redistribuição de tensões verticais no sistema solo-maciço e rotações das tensões principais. A adesão da interface solo-cortina desempenha um papel particularmente relevante no comportamento da estrutura de suporte, pois controla a transferência das tensões verticais entre o solo e a parede.

As redistribuições das tensões verticais podem ser interpretadas como consequência da flexão de um volume de solo (o solo suportado, assim como o solo abaixo do fundo da escavação) funcionando como duas vigas verticais fixas no firme interactuado com a parede escorada.

6 -AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financeiramente apoiado pelo projecto de investigação PRAXIS/2/2.1/CEG/42/94 - "Geotecnia nas Infra-estruturas de Transporte e Energia. Novos Desenvolvimentos", subsidiado pelo Programa PRAXIS XXI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BJERRUM, L. e EIDE, O.- *Stability of strutted excavations in clay*. Géotechnique, Vol. 6, N. 1, pp. 32-47, 1956.
- BJERRUM, L.; CLAUSEN, C. e DUNCAN, J.- *Stability of flexible structures*. Proc. 5th Europ. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Madrid, General Report, 1972.
- CLOUGH, G.W. e O' ROURKE, T.D.- *Construction induced movements of insitu walls. Design and Performance of Earth Retaining Structures*. Edited by P.C. Lambe and L. A. Hansen, ASCE, Geotechnical Special Publication N. 25, pp. 439-470, 1990.
- FINNO, R.J., ATMATZIDIS, D.K. e PERKINS, S.B.- *Observed performance of a deep excavation in clay*. Journal Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 115, pp. 1045-1064, 1989.
- FORTUNATO, E.M.- *Escavações Escoradas em Maciços Argilosos Moles*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, FEUP, 1994.
- FORTUNATO, E.M. MATOS FERNANDES, M. e CARDOSO, A. S.- *Escavações escoradas em solos moles: alguns resultados de análise elastoplásticas*. Actas do IV Encontro Nacional de Mecânica Computacional, Lisboa, Vol.2, pp. 953-964, 1995.
- PECK, R.B.- *Deep excavations and tunneling in soft ground*. Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., México City, General Report, State-of-the-Art Volume, pp. 225-290, 1969.
- TERZAGHI, K.- *Theoretical Soil Mechanics*. John Willey and Sons, Inc., New York, 1943.
- TERZAGHI, K. e PECK, R. B.- *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Second Edition, John Willey and Sons, Inc. New York, 1967.