

ESCAVAÇÕES SUPOSTADAS POR CORTINAS ANCORADAS: CAPACIDADE DE CARGA DO MACIÇO À SOLICITAÇÃO VERTICAL TRANSMITIDA PELA ESTRUTURA DE SUPORTE*

Tied-Back Retaining Walls: Bearing Capacity of the Soil to Vertical Forces Applied by the Anchors

por

M. MATOS FERNANDES**

RESUMO – Aplicando um modelo de cálculo baseado no método dos elementos finitos, é estudado o comportamento de uma cortina ancorada em que são precárias as condições de apoio às cargas verticais. Apontam-se os parâmetros mais influentes no problema e as razões das insuficiências dos métodos por meio dos quais é correntemente avaliada a capacidade de carga do maciço a solicitações daquele tipo. Sugerem-se alterações aos métodos citados.

SYNOPSIS – Using a mathematical model based on the finite element method, the behaviour of a tied-back retaining wall under marginal stability conditions for vertical forces applied by the anchors, is studied. The fundamental parameters in the problem are pointed out, as well as the limitations of the standard methods of computing the bearing capacity of the soil for that type of loading. Modifications of the design methods are suggested.

1 – INTRODUÇÃO

Para além de muitos aspectos que são comuns às cortinas escoradas, a análise das estruturas de suporte flexíveis ancoradas tem algumas facetas que lhe são exclusivas. Uma delas é a importância da componente vertical dos esforços das ancoragens que é transmitida à parede e desta ao solo.

Quando a cortina, como é o caso frequente das paredes moldadas, vai ser integrada na estrutura definitiva, passando posteriormente a funcionar também como fundação, há em geral a preocupação de a prolongar até um estrato rijo, o mesmo, em regra, até onde são levadas as fundações não situadas na periferia da área escavada. Quando, pelo contrário, a cortina é atribuída exclusivamente a função de estrutura de suporte, o seu pé não é necessariamente levado até ao firme, sendo nesse caso

* Manuscrito recebido em Agosto de 1984. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

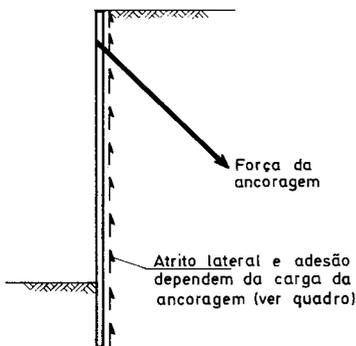
** Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

estabelecida a altura enterrada tendo em conta os diversos aspectos envolvidos no dimensionamento daquela estrutura. Entre esses aspectos conta-se, embora nem sempre seja tomado em devida consideração, o da resistência do maciço à solitação vertical transmitida pela própria cortina.

No que respeita a este último aspecto, a sua abordagem é, em regra, efectuada de forma semelhante à aplicada no caso das fundações profundas: *i)* considerando duas componentes da capacidade de carga, provenientes da resistência lateral e da resistência de ponta, sendo esta, nas cortinas de reduzida secção, habitualmente desprezada; *ii)* admitindo, no que respeita à resistência lateral, a mobilização da resistência ao corte ao longo da totalidade da superfície de contacto com o maciço envolvente, quando concluída a escavação; *iii)* impondo que a solitação vertical transmitida pela cortina ao maciço não ultrapasse determinada parcela da resistência total calculada. A recomendação incluída no Canadian Manual (1978) a este propósito (Figura 1) tem apenas em conta a contribuição para a resistência lateral da face de contacto com o maciço suportado, fazendo dependê-la do pré-esforço das ancoragens.

Num valioso trabalho da autoria de Broms e Stille (1976) sobre oito casos de rotura de cortinas ancoradas, nos três primeiros, que resumidamente se descrevem no Quadro I, aquela é atribuída à insuficiente capacidade de carga do solo às componentes verticais dos esforços instalados nas ancoragens.

Os acidentes citados, muito em especial os dois primeiros, sugerem que importantes lacunas existem no método atrás enunciado para o cálculo da capacidade de carga, já que de contrário se não compreenderia como puderam as roturas ocorrer sem que a solitação vertical ultrapassasse o valor estimado da resistência lateral. A rotura descrita em terceiro lugar no Quadro I parece corresponder a um caso em que pura e simplesmente foi ignorado o cálculo da capacidade de carga, sendo de notar que o



Base do cálculo do pré-esforço	Solos incoerentes δ	Solos coesivos c_a
K_a	0	0
$(K_a - K_0)$	$1/3 \phi$	c_u
K_0	$2/3 \phi$	c_u

Fig. 1 — Critério preconizado pelo Canadian Manual (1978) para o cálculo da capacidade de carga

QUADRO I

MACIÇO Profundidade da escavação	ESTRUTURA DE SUPORTE Relação entre a carga vertical e a capacidade de carga estimada	COMPORTAMENTO NA ROTURA Deslocamentos
Escavação de 6m de profundidade num maciço essencialmente argiloso aparecendo o bedrock aos 25 m.	Cortina de estacas-pranchas monoancorada de 10m de altura. Ancoragens de 40m de comprimento inclinadas a 45°. Componente vertical do pré-estorço igual a 50% da resistência lateral.	Deslocamento brusco da cortina para a escavação entre 5 e 15cm quando a profundidade atingiu 5,5m. Importantes assentamentos no terraplino.
Escavação de 5m de profundidade num maciço essencialmente arenoso.	Cortina de estacas-pranchas monoancorada. As estacas pranchas ligadas às ancoragens tinham 12m de altura tendo sido cravadas até à nega. Componente vertical do pré-estorço igual a 50% da resistência lateral.	Assentamento da cortina entre 5 e 10 cm explicado pela subida das pressões neutras no estrato em que a cortina estava fundada associadas à cravação de estacas no interior do corte. Deslocamento horizontal da cortina da mesma ordem de grandeza do assentamento.
Escavação de 4m de profundidade num maciço constituído por aterro (1.5m), argila (8.5m), areia e cascalho.	Cortina de estacas-pranchas monoancorada de 9m de altura. Componente vertical do pré-estorço igual a 120% da resistência lateral.	Deslocamento brusco da cortina para a escavação entre 51 e 61 cm quando a profundidade atingiu 4m. Assentamento máximo na superfície de 4cm.

comportamento evidenciado na rotura foi qualitativamente semelhante ao dos dois primeiros, embora envolvendo, compreensivelmente, deslocamentos maiores.

Algumas indicações dispersas acerca do mesmo assunto podem ser encontradas em resultados de ensaios em modelo reduzido (Hanna e Matallana, 1970; Hanna e Abu-Taleb, 1972; Plant, 1972; Hanna e Kurdi, 1974), todavia, não tendo tais ensaios como objectivo o estudo do comportamento de uma cortina em que são precárias as condições de apoio às cargas verticais transmitidas ao solo, não foram aquelas indicações aprofundadas e relacionadas pelos respectivos autores em ordem a formular conclusões acerca do mesmo comportamento e dos parâmetros nele mais influentes.

Apresenta-se em seguida uma contribuição para o estudo do assunto em causa aplicando um modelo de cálculo baseado no método dos elementos finitos. Trata-se de um modelo especialmente desenvolvido para a análise em regime não linear de escavações suportadas por estruturas flexíveis admitindo um estado de equilíbrio plano de deformação. Uma descrição pormenorizada do modelo pode ser encontrada noutras publicações (Matos Fernandes, 1983 ab).

2 – APLICAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO AO ESTUDO DO PROBLEMA

2.1 – O problema considerado

A malha de elementos finitos referente ao problema estudado representa-se na Figura 2, constando de 483 pontos nodais, 440 elementos quadrangulares subpara-

métricos representando a cortina e o maciço, e um número variável de elementos de junta, oscilando entre 30 e 44, consoante a altura enterrada da cortina, para a representação da superfície de contacto entre esta e o solo envolvente.

A malha referida corresponde a uma escavação simétrica de 12 m de largura e 10 m de profundidade num estrato de argila mole a média de espessura igual à da profundidade da escavação e de resistência não drenada crescente em profundidade. Abaixo daquele estrato, e sobrejacente ao firme rochoso, foi considerado um outro de 14 m de possança, também de argila, com a resistência constante (Figura 2). O nível freático foi admitido à superfície do terreno.

As fronteiras laterais da malha foram colocadas, a esquerda no plano de simetria da escavação, e a direita a uma distância de 35 m da face do corte. A fronteira inferior, por seu turno, foi considerada na superfície de contacto do maciço argiloso com o firme.

A curva tensões-deformações do solo foi representada pelo modelo hiperbólico com os módulos tangente inicial e de descarga-recarga iguais a 400 vezes a resistência não drenada. Aos elementos de junta foi atribuído um comportamento bilinear definido por uma resistência ao corte igual à do solo ao mesmo nível e uma rigidez tangencial correspondente à mobilização da resistência para um deslocamento tangencial de 3 mm.

A cortina é constituída por uma parede moldada de 0,60 m de espessura ancorada a quatro níveis, às profundidades de 2, 4, 6 e 8 m; as ancoragens são inclinadas a 45°, seladas no firme rochoso e exibem comportamento linear coincidente com o teórico. Os correspondentes comprimentos livres oscilam entre 31 e 22 m para os primeiro e quarto níveis, respectivamente. O pré-esforço foi adoptado na base do diagrama

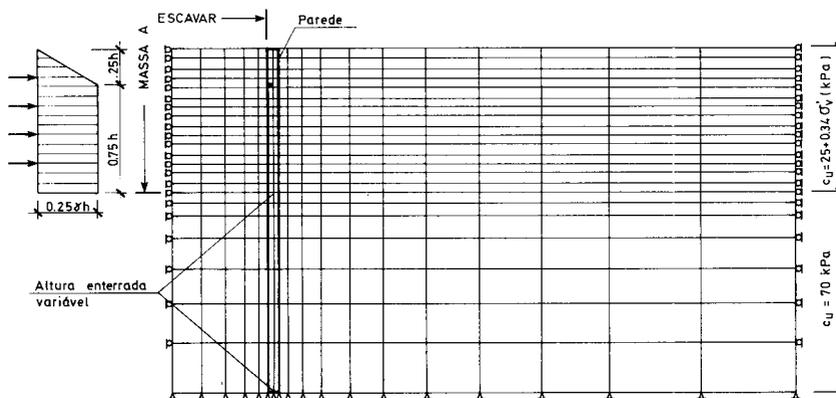


Fig. 2 — Malha de elementos finitos considerada para o estudo do problema

representado na Figura 2, variando entre 196 kN/m no primeiro nível e 229 kN/m no último, o que equivale a uma força vertical total aplicada à cortina de 615 kN/m.

Os cálculos foram efectuados em nove incrementos correspondentes a cinco fases de escavação até às profundidades de 2,6, 4,6, 5,5, 8,6 e 10,0 m, alternados com quatro fases de pré-esforço.

No desenvolvimento do estudo foram introduzidas algumas variações nos dados agora apresentados que oportunamente serão explicitadas.

2.2 – A importância da altura enterrada da cortina

2.2.1 – Comportamento em termos de deslocamentos e esforços nas ancoragens

Uma primeira série de quatro cálculos foi realizada (cálculos A a D) em que se considera quatro valores da altura enterrada da cortina oscilando entre o valor nulo (correspondente a uma parede com a mesma altura total que a profundidade da escavação, isto é, 10 m) e um valor máximo de 14 m, em que a cortina é levada até ao «bedrock» e aí encastrada, como mostra a Figura 3. Nesta indicam-se ainda, para cada caso, a resistência lateral no fim da escavação, R_l , e a razão desta pela resultante das componentes verticais dos pré-esforços das ancoragens, F_v .

Na Figura 4 representam-se os deslocamentos da cortina nos cálculos referidos a partir das fases (nos três primeiros cálculos) em que aquela começou a experimentar assentamentos, já que nas fases iniciais ocorre um ligeiro levantamento em conjunto com o solo subjacente à escavação; no cálculo com a cortina encastrada (cálculo D) os deslocamentos segundo a vertical são nulos, incluindo-se na Figura 4d os movimentos laterais nas quatro últimas fases construtivas.

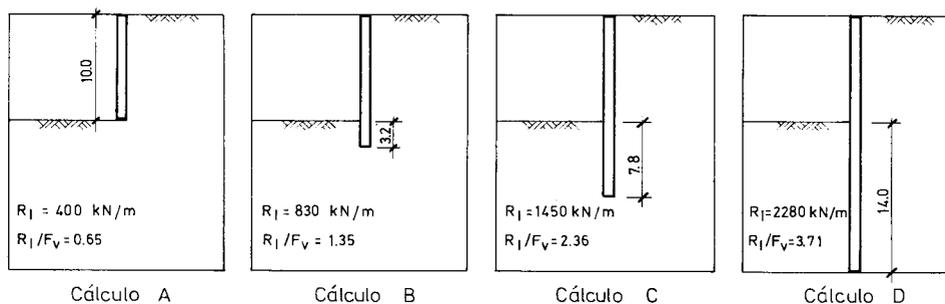


Fig. 3 — Cálculos efectuados para o estudo da importância da altura enterrada da cortina

Pode notar-se, do exame da figura, que os movimentos nas fases mais adiantadas diferem notavelmente entre os três primeiros cálculos, enquanto entre o terceiro e o quarto (cálculos C e D) se verifica uma notória semelhança, sugerindo que a partir de certo valor nada se ganha com o aumento da altura enterrada. Por outro lado, num mesmo cálculo a evolução dos movimentos depende acentuadamente desta altura. Assim, para os seus valores mais elevados (cálculos C e D) os deslocamentos são essencialmente horizontais, aumentando a respectiva grandeza suavemente com o progresso da escavação e conseguindo-se nas fases de pré-esforço (fases 2, 4, 6 e 8) uma certa recuperação dos movimentos laterais das fases anteriores. Pelo contrário,

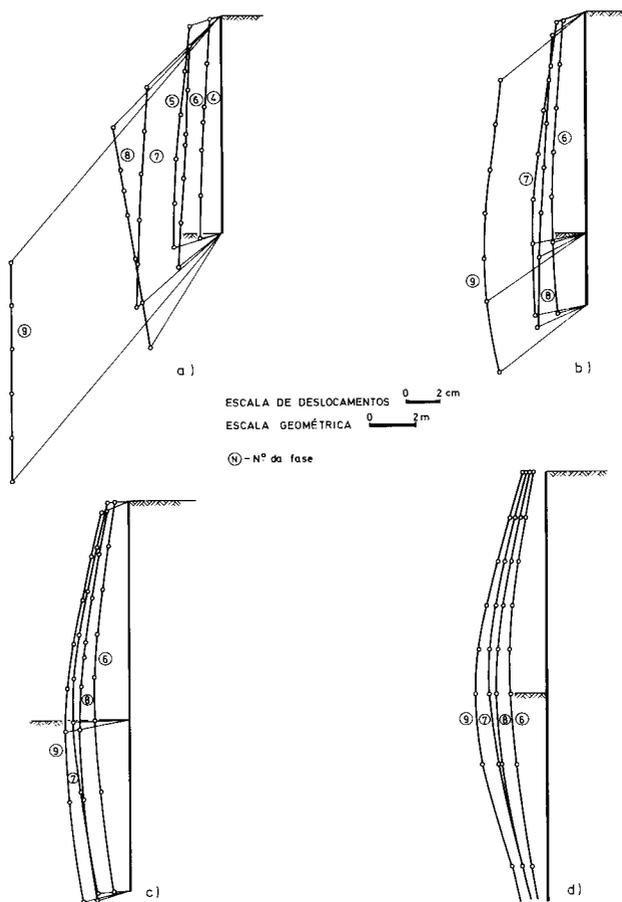


Fig. 4 — Deslocamentos da cortina: a) cálculo A; b) cálculo B; c) cálculo C; d) cálculo D

quando é mais pequena a altura enterrada, nas fases mais adiantadas ganha importância crescente a componente vertical dos deslocamentos da parede, tendendo o seu movimento para uma translação a 45°; nota-se ainda, que no cálculo A o pré-esforço do quarto nível de ancoragens (fase 8) além de aumentar substancialmente o assentamento, não consegue já diminuir a componente horizontal dos deslocamentos.

Na Figura 5 relacionam-se, para todas as fases de escavação, com excepção da primeira, os valores das componentes horizontais máximas dos deslocamentos da cortina, expressos em percentagem da profundidade projectada para a escavação, com a altura enterrada em cada fase, expressa em percentagem da altura total da cortina; na parte esquerda da figura as linhas correspondem a fases construtivas enquanto na parte direita se referem a cálculos.

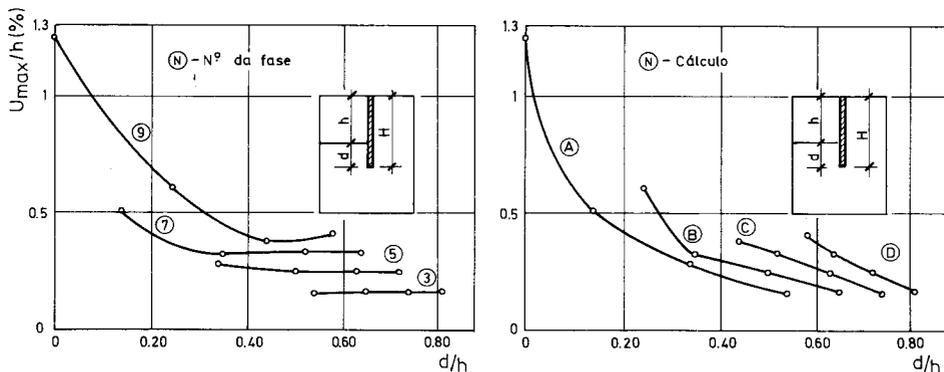


Fig. 5 — Relação entre os deslocamentos horizontais da cortina e a altura enterrada: a) fases 3, 5, 7 e 9; b) cálculos A a D

A Figura 5a mostra que nas terceira e quinta fases (segunda e terceira fases da escavação) os deslocamentos são praticamente independentes da altura enterrada, passando nas fases seguintes, em especial na última, a depender de forma extremamente acentuada da mesma altura. A Figura 5b, por seu turno, evidencia que nos cálculos em que é grande a altura referida os deslocamentos crescem de forma aproximadamente linear com o progresso da escavação, sendo esse crescimento muito mais rápido para os casos em que a altura enterrada é insuficiente.

Na Figura 6 representam-se os deslocamentos finais da cortina e do terrapleno resultantes dos cálculos A, B e C. Neste último a superfície do terreno exhibe uma suave concavidade, com um assentamento máximo de 20 mm a cerca de 10 m da face do corte; pelo contrário, no cálculo A, com altura enterrada nula, os assentamentos são máximos (144 mm) junto à cortina, apresentando a superfície do terreno uma forma convexa. Esta forma é devida essencialmente à inversão das forças tangenciais mobili-

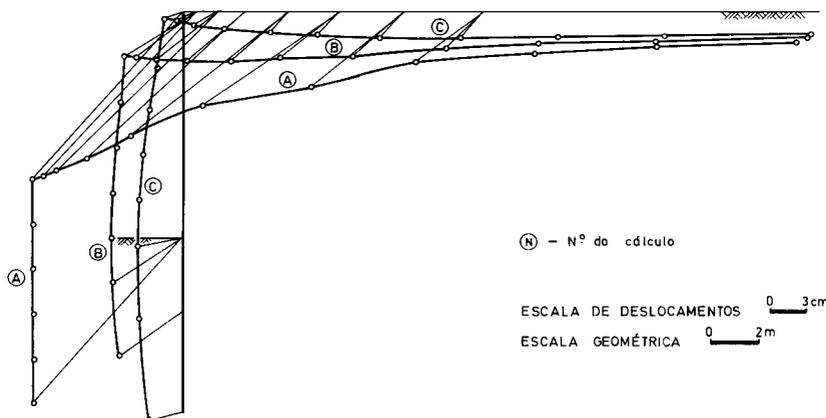


Fig. 6 — Deslocamentos finais da cortina e do terrapleno (cálculos A a C)

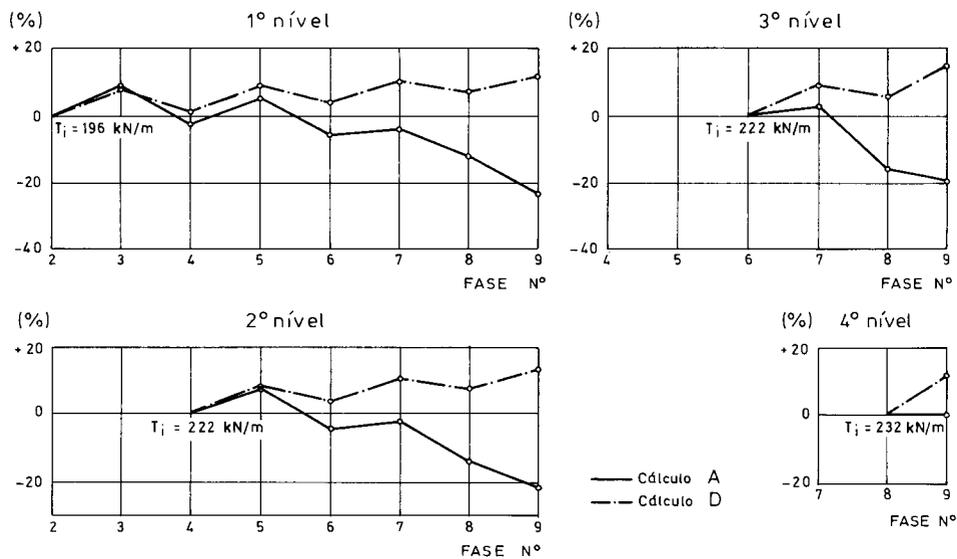


Fig. 7 — Variações dos pré-esforços das ancoragens (cálculos A a D)

zadas na face de contacto da parede com o maciço suportado, inversão determinada pelo elevado assentamento da cortina (ver 2.2.2).

Da Figura 7 consta a evolução dos esforços nas ancoragens, expressos em percentagem dos valores inicialmente instalados, para os cálculos A e D. Para o cálculo correspondente à maior altura enterrada detecta-se um comportamento típico de uma estrutura de suporte exibindo bom comportamento e com pré-esforço adequadamente escolhido: *i*) em cada nível de ancoragens ocorrem acréscimos nos esforços nas fases de escavação e decréscimos nas fases de pré-esforço; *ii*) em cada nível de ancoragens o esforço máximo é atingido na fase de escavação seguinte à da sua instalação; *iii*) as variações máximas nos esforços são de grandeza reduzida. No cálculo com a altura enterrada nula, por seu turno, as ancoragens experimentam a partir de certa altura um progressivo decréscimo dos esforços de tracção.

Esta descarga é resultado do rearranjo do sistema, e nomeadamente da cortina, que não possuindo adequadas condições de apoio no pé, procura nova posição de equilíbrio, em que se reduzam, ou pelo menos não cresçam, os esforços verticais aplicados. Sendo as ancoragens inclinadas a 45°, é a translacção da cortina a 45° para a escavação o movimento que não acarreta acréscimos nos esforços, podendo estes decrescer quando, como aliás acontece nas últimas fases nos cálculos com menor altura enterrada, os deslocamentos incrementais têm uma componente vertical superior à horizontal. Devido à acção do maciço suportado e às forças associadas à retirada do solo, não é, porém, compatível com o comportamento global que seja apreciável a diferença entre aquelas componentes. Resulta assim como movimento típico de uma cortina em que é insuficiente a capacidade de carga do solo às forças verticais por ela transmitidas, um assentamento acompanhado de um deslocamento lateral da mesma ordem de grandeza de encontro à escavação.

2.2.2 – A mobilização das resistências lateral e de ponta

A forma como evolui o nível médio de tensão (razão da máxima tensão de corte instalada pela respectiva resistência ao corte) nos elementos do maciço imediatamente subjacentes à ponta da cortina nos três cálculos em que aquela não foi prolongada até à fronteira inferior da malha ilustra-se na Figura 8. Note-se que quando aquele nível atinge 100% isso não significará, em rigor, que a resistência de ponta se esgotou, já que a solicitação transmitida ao maciço através da extremidade inferior da parede poderá ser equilibrada pelas tensões de corte mobilizadas noutros elementos mais distantes, o que é feito, evidentemente, à custa de deformações adicionais.

O exame da figura citada evidencia alguns aspectos curiosos que interessa comentar.

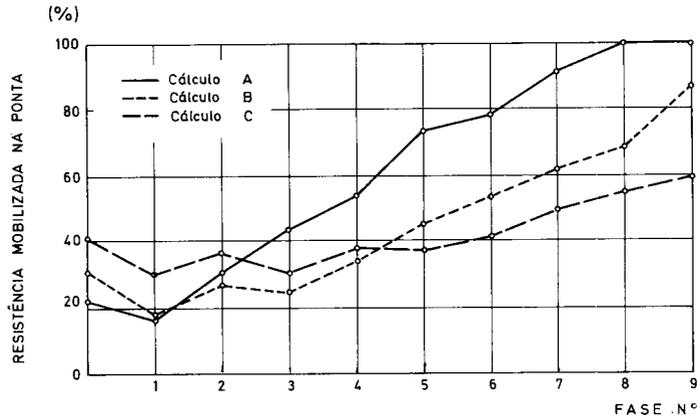


Fig. 8 — Mobilização da resistência nos elementos subjacentes à ponta da cortina (cálculos A a C)

Em primeiro lugar, a altura enterrada condiciona de forma extremamente importante o nível de tensão atingido pelos elementos de fundação da parede. Isso pode ser explicado, quer porque a resistência lateral aumenta com a altura enterrada, quer porque os níveis de tensão tendem a decrescer quando os elementos mais se afastam do fundo da escavação.

Um segundo aspecto a referir relaciona-se com o facto de o nível de tensão na ponta poder decrescer nas fases de escavação. Estas têm sobre o estado de tensão dos elementos subjacentes à cortina dois efeitos contraditórios: por um lado, traduzem-se na retirada de certo peso, que tende a provocar um levantamento do solo remanescente e, juntamente com este, da própria parede; por outro lado, a escavação reduz a resistência lateral, fazendo aumentar a força transmitida ao maciço pela extremidade inferior da cortina. Quando é grande a altura enterrada e a carga vertical aplicada pelas ancoragens ainda não muito elevada, este segundo efeito é menos pronunciado do que o anterior, acarretando as fases de escavação a redução da percentagem mobilizada da resistência na ponta. Daí este fenómeno ser mais duradouro nos cálculos em que é maior a altura da cortina, mas se tornar cada vez menos pronunciado até desaparecer com o avanço das fases construtivas.

Conclusões ainda mais pertinentes se podem tirar do exame da Figura 9 que diz respeito, agora para os quatro cálculos, à percentagem da resistência mobilizada nas faces de contacto da cortina com o maciço suportado (designada como face de «trás») e com o solo subjacente à escavação (face da «frente»). De imediato se pode apreender a razão porque a resistência lateral não foi considerada no seu conjunto.

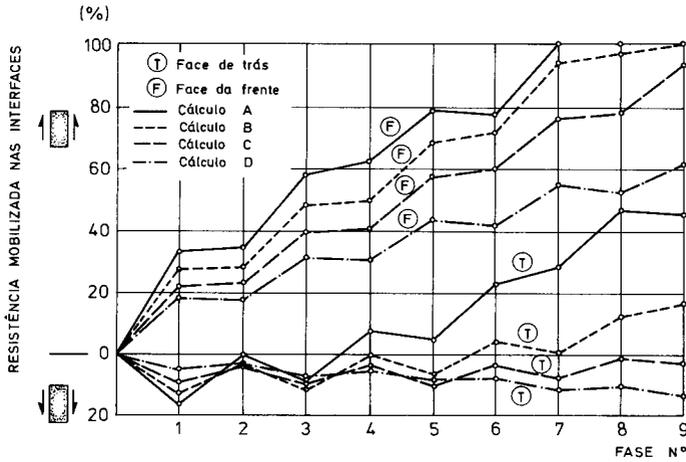


Fig. 9 — Mobilização da resistência lateral (cálculos A a D)

Na face da frente a resistência mobilizada cresce praticamente da primeira à última fases nos quatro casos, atingindo valores tanto mais elevados, tal como na ponta, quanto menor é a altura enterrada. Importa sublinhar que altas percentagens da resistência ao corte podem ser mobilizadas naquela face sem que para tal sejam necessários assentamentos significativos. O mais expressivo exemplo diz respeito ao cálculo com a cortina encastrada, em que, concluída a escavação, o integral das tensões tangenciais na face referida representa 60% da respectiva resistência. Outro aspecto curioso acerca da mobilização da resistência lateral na face da frente reside no facto de os maiores acréscimos se verificarem nas fases de escavação. Duas razões contribuem para isso: *i*) nessas fases, devido à redução da superfície de contacto da cortina com o solo, a resistência total diminui; *ii*) mas, ainda que esta se mantivesse constante aquela percentagem cresceria, já que cresce também a força tangencial total, porque o solo experimenta um levantamento associado à remoção de parte das terras sobrejacentes.

Aspecto porventura surpreendente é a evolução das forças tangenciais na face de trás da parede. Nos cálculos com maior altura enterrada, e em especial no caso em que o pé da parede está fixo à fronteira inferior da malha (cálculo D), a força tangencial desenvolvida no contacto com o maciço suportado é dirigida para baixo, o que significa que aquele maciço experimenta um assentamento superior ao da própria cortina; esta está assim submetida a duas forças tangenciais de sentido oposto nas faces em que contacta com o solo. No cálculo com menor altura enterrada (cálculo A), por

seu turno, depois de nas primeiras fases se mobilizarem tensões tangenciais também dirigidas para baixo, já que é ainda elevada a resistência lateral na face oposta e a carga vertical aplicada pelas ancoragens nula ou reduzida, elas invertem o seu sentido com o progresso da escavação, sendo, contudo, importante salientar que apesar do extremamente elevado assentamento da parede (144 mm) tais tensões não chegam a representar sequer 50% da resistência na interface respectiva. No cálculo B observa-se um comportamento intermédio entre os casos extremos analisados; a força tangencial só passa a ser dirigida para cima a partir da fase 6 e a percentagem máxima mobilizada no fim da escavação é somente de 16%, apesar de o assentamento da cortina ser já considerável (40 mm).

Ao contrário do que se passa do lado oposto, na face em causa os acréscimos na mobilização de forças tangenciais de sentido ascendente ocorrem em especial nas fases de pré-esforço, fases em que a cortina é obrigada a deslocar-se contra o maciço suportado, em que os assentamentos deste diminuem, e em que, por seu turno, a cortina assenta devido à componente vertical do pré-esforço aplicado.

A Figura 10 ilustra a questão doutro modo, representando para os cálculos B e C as percentagens da força vertical aplicada à parede equilibradas pela resistência nas interfaces da frente e de trás e pela resistência de ponta ao longo das nove fases construtivas estudadas.

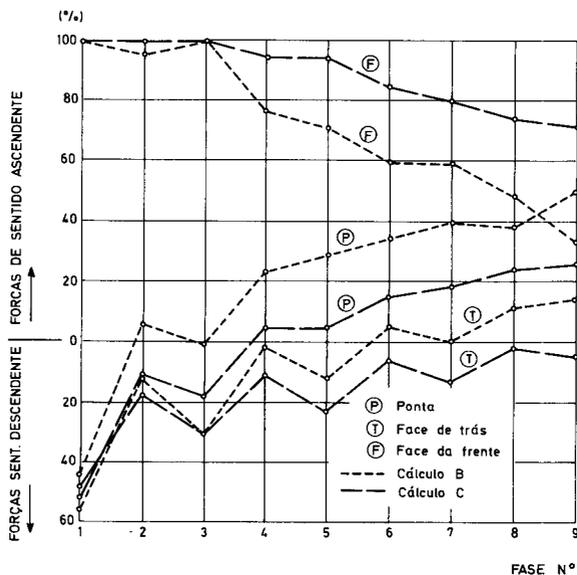


Fig. 10 — Fracções da solicitação vertical equilibradas na ponta e nas interfaces da estrutura com o maciço envolvente (cálculos B e C)

Dado que, como já foi assinalado, nas fases iniciais a tensão vertical na ponta decresce relativamente ao estado de repouso, e as forças tangenciais desenvolvidas na interface posterior têm sentido descendente, as forças mobilizadas na face da frente equilibram 100% da solicitação.

No cálculo, dentre os dois citados, com menor altura enterrada (cálculo B), com o progresso da construção as parcelas equilibradas na ponta e na face de trás vão assumindo sucessivamente maior importância. Concluída a escavação, as percentagens equilibradas à frente, atrás e na ponta são, respectivamente, 34,15 e 51%. Nota-se, assim, a grande importância que acaba por assumir a resistência de ponta, o drástico decréscimo sofrido pela fracção equilibrada na frente e, o que é muito importante, o extremamente reduzido contributo da força desenvolvida na interface posterior para o equilíbrio da solicitação.

Em contraste, no cálculo C, devido à grande resistência lateral da face da frente, aí são equilibrados 72% da solicitação total, sendo os restantes 28% transmitidos à ponta, já que as forças tangenciais desenvolvidas na face de trás se mantêm ao longo de todo o processo construtivo com sentido descendente.

2.2.3 – *Comentário*

A razão da impossibilidade de desenvolvimento de grandes forças tangenciais na interface posterior em oposição ao assentamento da parede, não obstante este atingir valores extremamente elevados, está certamente relacionada com o tipo de movimento que caracteriza a rotura por falta de capacidade de carga. Como atrás se verificou, tal rotura não se manifesta exclusivamente por um assentamento exagerado da cortina; em associação com aquele ocorre um movimento lateral, da mesma ordem de grandeza, de encontro à escavação. Esse movimento permite que, por sua vez, o maciço suportado sofra assentamentos igualmente elevados, acompanhando a cortina, não se verificando na interface posterior os deslocamentos relativos indispensáveis para o desenvolvimento de tensões tangenciais que correspondam a elevadas parcelas da respectiva resistência ao corte. Extremamente significativo a tal respeito é o que se passa na interface em questão nas duas últimas fases no cálculo com menor altura enterrada: na oitava fase estão mobilizados 46% da resistência para um assentamento de 66 mm; apesar de o assentamento crescer na fase seguinte 78 mm, a percentagem da resistência ao corte mobilizada desce para 45%, porque em simultâneo com aquele assentamento a cortina se desloca cerca de 70 mm de encontro à escavação.

De referir que resultados doutros cálculos (Matos Fernandes, 1983 b), cuja inclusão alongaria em demasia o presente trabalho, mostram que a mobilização da resistência na interface da cortina com o maciço suportado não aumenta significativamente atribuindo aos elementos de junta correspondentes uma rigidez tangencial muito supe-

rior à considerada nos cálculos em discussão (acréscimos da ordem dos 2% na resistência mobilizada para uma rigidez tangencial 30 vezes superior).

Aliás, a convicção de que o fenómeno posto em evidência não resulta de quaisquer parâmetros de cálculo eventualmente fantasiosos, é reforçada com alguns interessantes resultados de ensaios em modelo reduzido publicados por Plant (1972). Nos ensaios em que a escavação num maciço arenoso de ângulo de atrito igual a 37° era levada até uma profundidade igual à altura da cortina ancorada, ocasionando movimentos do tipo dos obtidos nos cálculos A e B (Figura 4), o máximo ângulo de atrito mobilizado na face de contacto da parede com o maciço suportado foi de apenas, aproximadamente, 11° .

Pode assim compreender-se porque nos dois primeiros casos apresentados por Broms e Stille (1976), aliás de forma análoga ao cálculo B, ocorreram roturas ou comportamentos pouco satisfatórios a despeito de a resistência lateral ser superior à resultante das componentes verticais dos pré-esforços das ancoragens.

Haverá portanto que distinguir entre a resistência lateral total e a resistência mobilizável, isto é, aquela que pode contribuir para o equilíbrio da sollicitação vertical sem que tal contribuição exija a ocorrência de grandes assentamentos. Parece claro, pelo menos em casos semelhantes ao estudado, que a resistência lateral mobilizável é apenas a resistência na face de contacto da parede com o solo do lado da escavação. Desta forma, no cálculo B, o comportamento é deficiente porque apesar de a razão da resistência lateral total pela sollicitação ser de 1,35, a resistência lateral mobilizável corresponde apenas a 35% da mesma sollicitação. Já no cálculo C o comportamento passa a ser satisfatório, porque ao aumentar a altura enterrada para 7,8 m a resistência lateral mobilizável passa a representar 90% da resultante das componentes verticais do pré-esforço.

2.3 – As diferenças entre o carregamento vertical de uma cortina ancorada e de uma fundação profunda flutuante

Com o intuito de pôr em destaque as diferenças entre o carregamento vertical de uma fundação profunda e de uma cortina ancorada, efectuou-se, aproveitando a mesma malha de elementos finitos, uma série de cálculos analisando o comportamento de uma barra de desenvolvimento infinito, com espessura igual à da parede moldada considerada anteriormente, a mesma altura total que esta assume no cálculo B (13,2 m), inserida no mesmo maciço.

Nesse estudo consideraram-se diferentes características mecânicas para a superfície de contacto entre a fundação e o maciço. No Quadro II incluem-se as referências dos cálculos efectuados com o objectivo citado, juntamente, para cada um deles, com os parâmetros relativos aos elementos de junta e o valor da resistência lateral total.

QUADRO II

Cálculo	Resistência dos elementos de junta	Deslocamento tangencial correspondente à rotura (mm)	Resistência lateral total (kN/m)
E	C_u	3	1240
E1	C_u	0.1	1240
E2	$0.5 C_u$	1.5	620

O carregamento foi efectuado em quatro incrementos de, por ordem de aplicação, 550, 250, 150 e 100 kN/m, totalizando 1050 kN/m.

Os diagramas de carga referentes aos três cálculos efectuados constam da Figura 11. Os diagramas respeitantes aos cálculos com maior resistência dos elementos de junta exibem uma muito reduzida curvatura, sinal de que o comportamento é ainda essencialmente elástico; o diagrama correspondente ao cálculo E2, pela sua acentuada curvatura a partir do segundo incremento, revela que a capacidade de carga está já praticamente esgotada. Por outro lado, pode ainda notar-se que no problema estudado a rigidez dos elementos de junta não desempenha papel relevante, já que o comportamento da barreta nos dois primeiros cálculos é bastante semelhante.

Na Figura 12a representam-se, para os cálculos E e E2, as percentagens da força total equilibradas em cada incremento pelas resistências lateral e de ponta. A resistência lateral é considerada, na figura, no seu conjunto, porque, como seria aliás de esperar, são iguais os contributos das duas faces laterais da barreta para o equilíbrio da solicitação.

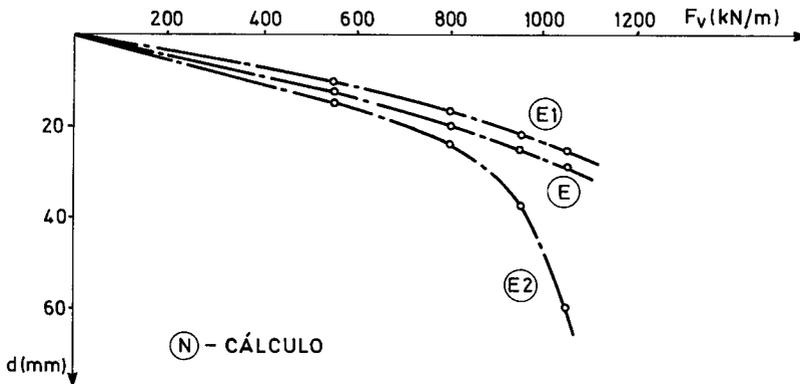


Fig. 11 — Diagramas solicitação vertical-assentamentos (cálculos E, E1 e E2)

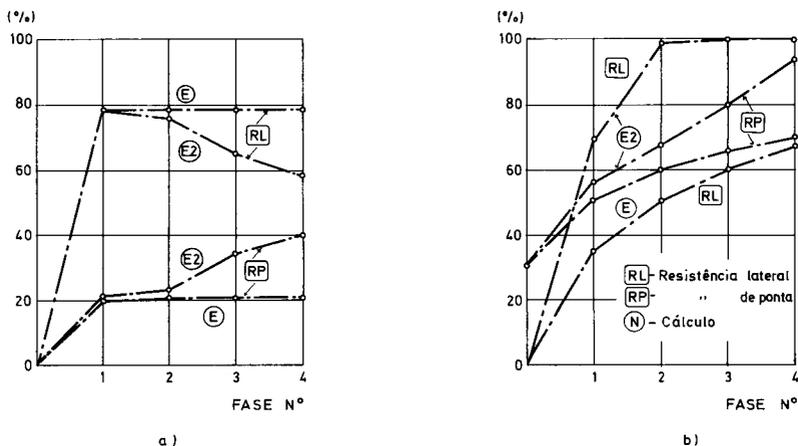


Fig. 12 — Cálculos E e E2: a) Frações da solicitação vertical equilibradas pelas resistências lateral e de ponta; b) mobilização das componentes da capacidade de carga

Passando à análise da figura, verifica-se que o primeiro dos cálculos citados revela um comportamento típico de uma fundação profunda flutuante ainda longe da carga de rotura: a maior parte da solicitação é equilibrada pela resistência lateral e as frações da solicitação equilibradas por aquela resistência e pela de ponta mantêm-se sensivelmente constantes. No cálculo E2, pelo contrário, a fração transmitida à ponta cresce do primeiro ao último incrementos, pelo facto de mais cedo se esgotar a resistência lateral, como se pode verificar pelo exame da Figura 12b, onde se ilustra a evolução com o carregamento da mobilização das duas componentes da capacidade de carga para os dois casos em análise.

Atingindo com o último incremento de carga, nos cálculos E e E1, a razão R_l/F_v , entre a resistência lateral e a solicitação vertical, o valor de apenas 1,18, nem por isso a barreta experimenta assentamentos que se possam considerar muito elevados, já que a resistência lateral é igual e integralmente mobilizável nas duas faces da fundação. Note-se que pelo facto de o mesmo não acontecer com a cortina ancorada, no cálculo B, para uma razão R_l/F_v igual a 1,35, os assentamentos são consideravelmente mais elevados.

Em resumo, numa fundação profunda flutuante submetida a cargas verticais, e ao contrário do que se passa com as cortinas associadas a ancoragens inclinadas:

- a) a resistência nas duas faces laterais é mobilizada em percentagens iguais com a aplicação da solicitação;

- b) a resistência lateral pode ser esgotada sem que ocorram assentamentos exagerados (veja-se 23 mm no cálculo E2);
- c) a resistência de ponta só é mobilizada em altas percentagens após a resistência lateral estar esgotada, e aquela mobilização faz-se à custa de assentamentos extremamente elevados (este último aspecto é, aliás, comum ao comportamento das cortinas ancoradas);

2.4 – Medidas destinadas a melhorar o comportamento do sistema

Neste ponto contempla-se a análise de dois cálculos tendentes a pôr em relevo soluções que poderão ser adoptadas para, em casos em que sejam deficientes as condições de apoio da parede às cargas verticais, assegurar o comportamento satisfatório do sistema.

Em complemento com o cálculo A consideraram-se duas alternativas que se designarão por A1 e A2. A alteração relativa ao cálculo A1 consistiu na substituição do quarto nível de ancoragens por um nível de escoras com igual espaçamento na horizontal e de pré-esforço igual à componente horizontal do pré-esforço das ancoragens citadas; as escoras são constituídas por perfis metálicos GREY DIN 22. No cálculo A2, por sua vez, foi pura e simplesmente suprimido o quarto nível de ancoragens.

O comportamento nas sete primeiras fases construtivas é, assim, comum aos três cálculos (A, A1 e A2). A última fase construtiva no cálculo A2, a escavação de 8,6 para 10,0 m de profundidade, continuará a ser designada por fase 9 para mais fácil comparação com as fases similares dos dois restantes cálculos.

A Figura 13 ilustra a grande eficácia do escoramento na redução dos movimentos da cortina. Com efeito, e em completo contraste com o último nível de ancoragens no cálculo A, no cálculo A1, o pré-esforço do nível de escoras, não provocando qualquer assentamento, reduz significativamente os deslocamentos laterais da cortina. Verifica-se, por outro lado, que no mesmo cálculo, fruto da elevada rigidez do escoramento, os movimentos aumentam apenas muito ligeiramente da oitava para a nona fases. É, aliás, interessante constatar que o seu maior acréscimo se verifica precisamente na vertical, possivelmente devido à anulação da resistência lateral na face da frente da cortina.

Os deslocamentos finais relativos ao cálculo A2 têm apenas o interesse de evidenciar que o quarto nível de ancoragens, para a altura enterrada da cortina que foi considerada, é inteiramente prejudicial.

Na Figura 14 mostram-se os movimentos finais da cortina e do terrapleno obtidos nos três casos. As diferenças são notáveis apesar de sete das nove fases construtivas serem comuns.

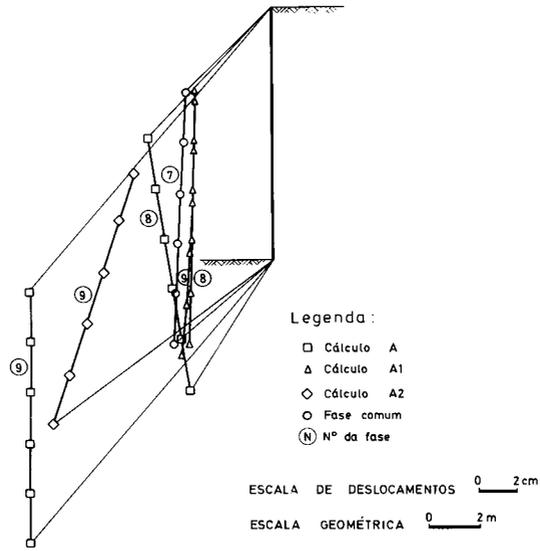


Fig. 13 — Deslocamentos da cortina (cálculos A, A1 e A2)

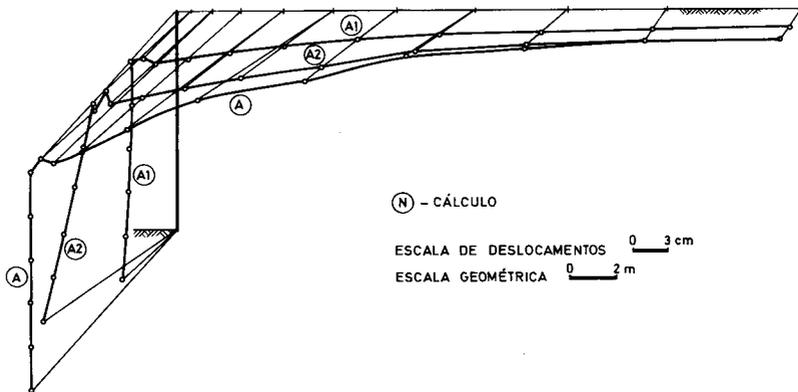


Fig. 14 — Deslocamentos finais da cortina e do terrapleno (cálculos A, A1 e A2)

A eficiência da substituição do quarto nível de ancoragens por escoras está bem patente no que se refere à evolução, representada na Figura 15, do nível de tensão nos elementos da ponta, por um lado, e na interface posterior, por outro. Particularmente importante é notar que no cálculo A1 a percentagem mobilizada da resistência naquela face cresce na fase 8 (fase em que o nível de escoras é pré-esforçado) apesar de nela não ter aumentado perceptivelmente o assentamento da parede; na fase 9 a força desenvolvida na mesma interface sofre novo acréscimo, representando 41% da resistência total, quando, no cálculo A, na mesma face, aquela percentagem é de apenas mais 4%, apesar de o assentamento da cortina ser 98 mm maior. Este resultado constitui mais uma evidência de que a causa da impossibilidade de mobilizar forças tangenciais elevadas na face de contacto de parede com o maciço suportado reside no tipo de movimento associado à insuficiente capacidade de carga do solo às forças verticais transmitidas pela cortina, movimento que a par de um assentamento extremamente elevado acarreta deslocamentos laterais da mesma ordem de grandeza para a escavação. No cálculo A1, o facto de o escoramento reduzir drasticamente os deslocamentos horizontais, oferece a possibilidade de o movimento da cortina ser essencialmente vertical; mas tal movimento acarreta automaticamente a mobilização de tensões tangenciais na interface em questão, que por sua vez obstam ao seu progresso.

Os resultados citados põem em relevo uma forma extremamente eficiente de, numa situação imprevista, garantir o comportamento satisfatório do sistema. De facto, não são raros os casos em que se verificam importantes alterações ao projecto inicial

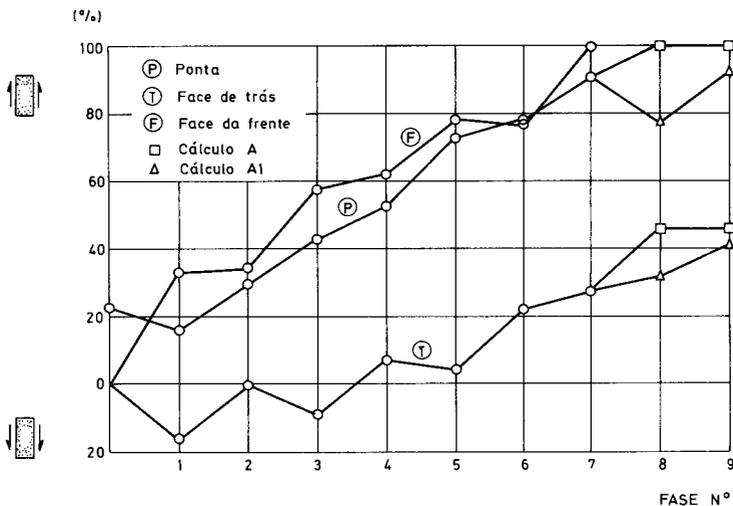


Fig. 15 — Mobilização das componentes da capacidade de carga (cálculos A e A1)

que obrigam, com a cortina já construída, a levar a escavação a uma profundidade superior à prevista. Menos invulgar será ainda o caso de, ao aplicar o pré-esforço de determinado nível de ancoragens, se manifestarem os sinais típicos da insuficiente capacidade de carga do maciço às componentes verticais dos esforços instalados. Os resultados apresentados indicam que a inserção de um nível de escoras em adição ou substituição dos níveis de ancoragens projectados pode resolver cabalmente o problema daquela forma colocado.

3 – CONCLUSÕES

O estudo pelo método dos elementos finitos de uma cortina associada a ancoragens inclinadas não fundada numa formação rija apresenta-se cheio de interesse, já que existem indícios claros acerca da inadequação dos métodos de avaliação da capacidade de carga do maciço às forças verticais a ele transmitidas, inadequação que se tem repercutido em roturas ou comportamentos pouco satisfatórios.

Os resultados obtidos reproduzem, confirmam e completam de forma francamente positiva o comportamento detectado nas obras que sofreram rotura e resultados dispersos provenientes de ensaios em modelo reduzido. Tal facto permite esperar que sejam, no essencial, válidas as conclusões que em seguida se procurarão resumidamente enunciar.

A primeira e mais importante de todas elas é que o problema da capacidade de carga é muito diferente numa cortina ancorada e numa fundação profunda. Este facto tem como consequência que os métodos generalizadamente empregues para o cálculo da capacidade de carga de paredes ancoradas, que implicitamente admitem que tais problemas são semelhantes, não podem deixar de ser considerados inapropriados. Embora tais métodos sejam habitualmente usados em complemento com coeficientes de segurança relativamente elevados, deve ser notado que estes não devem servir para ter em conta modelos mentais incorrectos, mas tão só problemas como as incertezas na avaliação das propriedades do maciço e da superfície de contacto entre este e a cortina, a necessidade de controlar dentro de certos limites os assentamentos, etc.

O comportamento associado à deficiente capacidade de carga do solo às forças verticais que lhe são transmitidas pela estrutura manifesta-se não só por elevados assentamentos da mesma, mas ainda por deslocamentos horizontais, da mesma ordem de grandeza, de encontro à escavação. Os esforços nas ancoragens tendem simultaneamente a sofrer substanciais reduções, enquanto a superfície do terreno experimenta também elevados assentamentos assumindo uma forma grosseiramente convexa. O tipo de movimento indicado para a cortina, nomeadamente a sua considerável componente horizontal, não permite que na interface da estrutura com o maciço suportado ocorram

os deslocamentos relativos indispensáveis para que nela se desenvolvam forças tangenciais que contribuam significativamente para o equilíbrio da solitação.

Na interface da parede com o maciço subjacente à escavação, pelo contrário, os movimentos relativos são elevados devido ao levantamento do solo associado ao alívio de tensões; em consequência, a mobilização da resistência naquela interface ocorre em altas percentagens mesmo sem significativos assentamentos da cortina.

Assim, ao contrário do que é típico em fundações profundas carregadas verticalmente, são muito diferentes as contribuições das forças tangenciais mobilizadas em cada interface para o equilíbrio da solitação. Ainda pela mesma razão, a contribuição da resistência de ponta, que nas fundações profundas flutuantes e diminuta, ganha nas cortinas ancoradas uma importância considerável, embora a sua mobilização exija assentamentos que na maior parte dos casos serão inaceitáveis.

Sendo diminuta a contribuição da resistência lateral na interface posterior, e não sendo possível mobilizar a resistência de ponta sem grandes assentamentos, o aumento da altura enterrada, ao aumentar automaticamente a resistência lateral na face da frente da cortina, será uma das formas mais indicadas de garantir que o comportamento do sistema seja satisfatório. Em alternativa, ou em complemento com o acréscimo da altura da parede, verificou-se que a substituição de um (o último, no caso estudado) nível de ancoragens por escoras é extremamente eficaz para atalhar o problema da insuficiente capacidade de carga do maciço, não só porque reduz a solitação vertical, mas também porque, obstando, pela grande rigidez do escoramento, a significativos deslocamentos laterais, favorece a mobilização das forças tangenciais na interface posterior.

Tendo em atenção tudo o que ficou exposto, julga-se não ser descabido afirmar que o cálculo da capacidade de carga será mais correcto caso seja feito de acordo com as seguintes indicações:

- a) desprezar a resistência lateral na face de contacto da cortina com o maciço suportado, considerando como resistência mobilizável apenas a correspondente à face oposta;
- b) estabelecer a altura enterrada de modo que a resistência lateral mobilizável corresponda a um valor entre 75% e 100% da solitação vertical, consoante se trate de uma cortina de secção significativa, como uma parede moldada do tipo da considerada nos cálculos efectuados, ou de uma cortina de estacas-pranchas, em que a contribuição da resistência de ponta é desprezável;
- c) o coeficiente de segurança a afectar a resistência mobilizável deve estar essencialmente relacionado com as dúvidas eventualmente existentes acerca dos parâmetros de resistência do contacto entre o solo e a cortina, já que a mobilização praticamente integral da resistência na face da frente não exige assentamentos significativos.

4 – NOTA SOBRE O CASO DAS CORTINAS NÃO INSTALADAS PREVIAMENTE À REALIZAÇÃO DA ESCAVAÇÃO

As considerações expostas referem-se, obviamente, às cortinas cuja construção ou instalação é efectuada antes do início da escavação propriamente dita (cortinas de paredes moldadas ou de estacas-pranchas).

Contudo, têm vindo a conhecer uso muito frequente, em particular no nosso país, em terrenos de boas características mecânicas, cortinas de betão armado, construídas por troços de cima para baixo, betonadas contra a face do corte à medida que o progresso da escavação o permite, e posteriormente ancoradas.

Sendo nula, neste tipo de cortinas, a altura enterrada, a respectiva resistência lateral mobilizável é diminuta. O mesmo acontece, aliás, com a resistência de ponta, não só porque a secção das mesmas é em regra reduzida, mas também porque é corrente a inserção, aquando da betonagem dos painéis, de uma almofada de areia entre a parte inferior daqueles e o fundo do corte, almofada cuja posterior remoção facilita a ligação com as armaduras dos painéis inferiores.

Sendo assim, entende-se ser fortemente aconselhável que a cortina seja fundada num sistema de perfis metálicos verticais levados até ao firme e instalados antes do início da escavação, prática aliás há muito largamente consagrada sob a designação de «entivação Berlim». A tendência para a dispensa daqueles perfis, invocando a resistência lateral na face de contacto da cortina com o maciço suportado, resistência cuja mobilização se viu já ser muito problemática, deve, pois, ser combatida, até porque já tem tido consequências funestas em obras no nosso país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROMS, B. B. e STILLE, H. (1976) – *Failure of anchored sheet pile walls*. Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE, GT3, pp. 235-251.
- CANADIAN FOUNDATION ENGINEERING MANUAL (1978) – Foundations Committee of the Canadian Geotechnical Society. Montreal, Canada
- HANNA, T. H. e MALLANA, G. A. (1970) – *The behaviour of tied-back retaining walls*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 7, N. 4, pp. 372-396.
- HANNA, T. H. e ABU-TALEB, M. G. (1972) – *Anchor supported walls: research and practice*. Ground Engineering, Vol. 5, N. 2, pp. 16-20.
- HANNA, T. H. e KURDI, I. (1974) – *Studies on anchored flexible retaining walls in sand*. Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE, GT 10, pp. 1107-1122.
- MATOS FERNANDES, M. (1983 a) – *Modelo de cálculo para o estudo pelo método dos elementos finitos de escavações suportadas por estruturas flexíveis*. LNEC, Relatório, Proc. 55/1/7380, Lisboa.
- MATOS FERNANDES, M. (1983 b) – *Estruturas flexíveis para suporte de terras. Novos métodos de dimensionamento*. Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil – Estruturas na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- PLANT, G. W. (1972) – *Anchor inclination – its effects on the performance of a laboratory scale tied-back retaining wall*. Proc. ICE, Vol. 53, Part 2, pp. 257-274.