

O COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ANCORAGENS NA ANÁLISE DE CORTINAS ANCORADAS*

Ground anchors on anchored diaphragm walls analysis

por

ANTÓNIO PINELO**

M. MATOS FERNANDES***

RESUMO — Quando comparados com os métodos tradicionais usados no projecto de cortinas ancoradas, os métodos estruturais baseados na técnica dos elementos finitos oferecem as seguintes vantagens: i) o cálculo dos deslocamentos; ii) a simulação e o estudo das diferentes fases construtivas; iii) a consideração de equações constitutivas representando os diferentes comportamentos dos materiais envolvidos no problema; iv) a avaliação dos efeitos do nível de pré-esforço, inclinação e rigidez das ancoragens. Tais métodos exigem, porém, que o comportamento mecânico dos elementos representativos do solo e da estrutura seja cuidadosamente considerado. Este trabalho trata, sobretudo, do comportamento não linear das ancoragens em solo. Analisam-se as suas causas e a forma como pode ser considerado nas análises baseadas no método dos elementos finitos (m.e.f.). Referem-se os modelos habitualmente empregues para a simulação das ancoragens e apontam-se as suas limitações. É proposto um modelo aperfeiçoado, particularmente adequado para a representação do comportamento não linear das ancoragens. São apresentados alguns exemplos de cálculos em que a influência daquela não linearidade no comportamento de cortinas ancoradas é posta em relevo.

SYNOPSIS — When compared to the classical methods traditionally used in design of tied-back diaphragm walls, the structural methods using finite element techniques offer the following advantages: i) computation of displacements; ii) simulation and study of different construction stages; iii) consideration of constitutive equations in order to represent different behaviour of the materials; iv) evaluation of the effects of the prestress level, tie-back inclination and stiffness. For this purpose the mechanical behaviour of the elements involved in the structures must be carefully considered. This paper deals, moreover, with the nonlinear behaviour of ground anchors, its reasons and the way how it can be considered in the f.e.m. analysis. The models generally used for anchor simulation are summarized and their limitations pointed out. A refined model of anchor behaviour is proposed particularly aduated to the representation of the nonlinear behaviour as shown by "in situ tests". Some examples are presented.

* Trabalho apresentado na 5.^a sessão do X ICSMFE, Stockolm, Junho, 1981

** Engenheiro Especialista (LNEC)

*** Assistente, Faculdade de Engenharia, Porto

INTRODUÇÃO

1 — Com o objectivo de conseguir a redução dos movimentos associados a escavações, as ancoragens, que associadas às cortinas constituem a estrutura de suporte, são geralmente pré-esforçadas (Clough e Tsui, 1974). Tendo em consideração a geologia do local, as zonas de selagem são localizadas a certa distância da cortina para que a estabilidade global seja assegurada.

2 — O comportamento das ancoragens em solos é geralmente não linear, Fig. 1. A diferença entre os deslocamentos teóricos e os medidos num ensaio au-

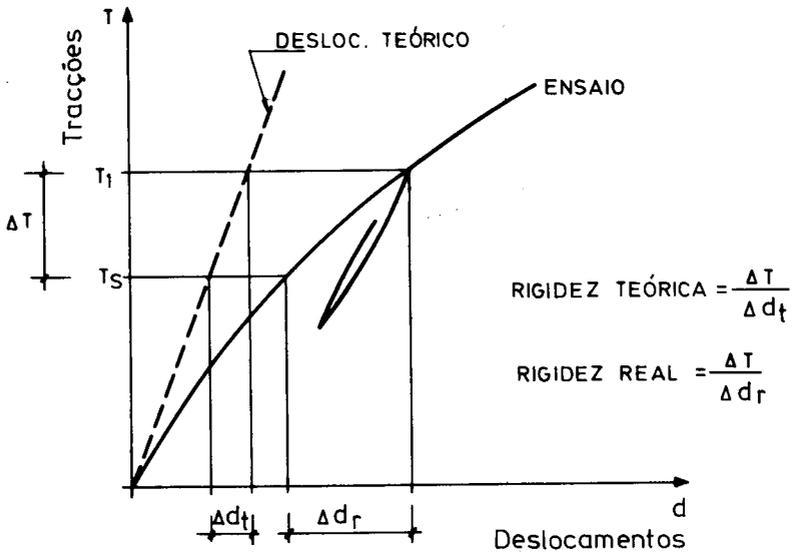


Fig. 1 — Caracterização do comportamento não linear das ancoragens

menta com o crescimento dos esforços de tracção. Os deslocamentos teóricos são iguais aos de uma barra de aço fixa numa extremidade, de comprimento igual ao comprimento livre teórico da ancoragem e de secção igual à da armadura, solicitada pelas mesmas tracções.

3 — Este artigo apresenta alguns resultados de um programa de investigação em curso no LNEC, no campo do projecto e da “performance” de ancoragens e de estruturas ancoradas, (Pinelo, 1980; Pinelo e Matos Fernandes, 1980).

CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE ANCORAGENS EM SOLOS

4 — As ancoragens em solos podem ser projectadas com base num critério de rotura e/ou de deslocamento. No primeiro caso, válido quando os deslocamentos não são relevantes, a máxima carga de serviço pode ser estabelecida a partir da carga de rotura determinada quer por ensaios prévios, quer por métodos semi-empíricos: fórmulas (Kramer, 1977; Schneebeli, 1971) ou diagramas (Ostermayer, 1974; Ostermayer e Scheele, 1977). Quando se adopta um coeficiente de segurança para as ancoragens em determinado caso, terá que atender-se à forma como as cargas de rotura foram determinadas, ao seu carácter provisório ou definitivo e ao tipo de solo. Quando são empregues métodos semi-empíricos, valores mais altos dos coeficientes de segurança terão que ser considerados.

5 — Se os deslocamentos forem determinantes, por exemplo no caso de ancoragens permanentes em solos coesivos, a máxima carga de serviço terá que ser estabelecida de acordo com os resultados de ensaios prévios. Estes ensaios têm que ser realizados e interpretados com os cuidados devidos, de forma a permitirem a correcta determinação do comportamento da ancoragem em fluência. Nomeadamente, as cargas terão que ser mantidas constantes durante intervalos de vários minutos ou horas (DIN 4125, Part 2, 1976; Bureau Sécurité, 1977). No LNEC foi desenvolvida uma aparelhagem capaz de manter a carga constante nesses intervalos de tempo, Fig.2.

6 — Os métodos semi-empíricos devem ser aplicados apenas para obter uma ideia do valor da carga de rotura da ancoragem. De facto, tais métodos não podem entrar em consideração com: i) as propriedades reais do terreno, com as suas descontinuidades e heterogeneidades; ii) a tecnologia da execução, particularmente a pressão de injeção (Ostermayer, 1974). Portanto, os ensaios prévios são de importância fundamental para correctamente projectar ancoragens em determinado local.

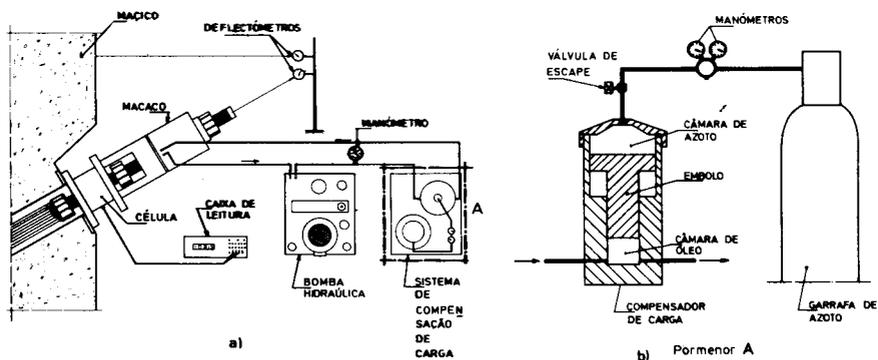


Fig. 2.11 - Ensaio prévio de ancoragens

- a) Dispositivos para medição de forças e deslocamentos.
- b) Sistema desenvolvido para manter constante a tracção.

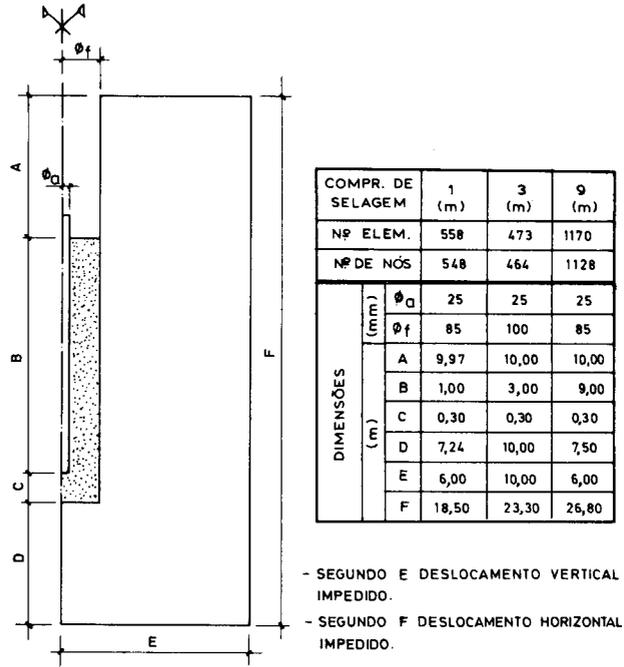
Fig. 2 — Aparelhagem utilizada no LNEC para ensaios prévios de ancoragens

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ANCORAGENS EM SOLOS

7 — Em solos não coesivos a resistência das ancoragens depende do comprimento de selagem, do tipo de solo e da sua compactidade (Ostermayer, 1974). O crescimento da resistência das ancoragens não é, em geral, uma função linear do comprimento de selagem, tal como está implícito em algumas das fórmulas empíricas, como as propostas por Bendel (1966) e Schneebeli (1971). Em solos coesivos a resistência das ancoragens depende do tipo de solo, do comprimento de selagem e é também fortemente dependente da tecnologia de execução, particularmente da pressão de injeção.

8 — Para o estudo do comportamento mecânico das ancoragens e para a interpretação dos ensaios de tracção das ancoragens em função das propriedades mecânicas do maciço onde elas foram executadas desenvolveu-se um modelo analítico baseado no m.e.f. (Pinelo, 1980). Uma estrutura axi-simétrica compreendendo a armadura de aço, a calda de cimento e o solo é discretizada em elementos isoparamétricos e/ou subparamétricos rectangulares (4 pontos nodais) e triangulares (3 pontos nodais). As descontinuidades e interfaces são simuladas por elementos finitos de junta (4 pontos modais). O estado de tensão inicial pode ser calculado na base das condições geoestáticas ou introduzido como um dado. Os materiais da estrutura podem ser considerados como lineares ou não lineares. No primeiro caso a isotropia e ortotropia podem ser consideradas; no segundo caso é admitida a existência de isotropia. A resistência de todos os elementos é expressa pelo critério de rotura de Coulomb, desprezando a influência da tensão principal intermédia. A consideração do comportamento não linear é conseguida através de um método misto: redistribuição de tensões (“stress transfer”) com incrementos de solitação.

9 — Alguns estudos paramétricos elásticos foram realizados respeitantes a ancoragens com comprimentos de selagem de 1.0 , 3.0 e 9.0 metros e a diferentes valores dos quocientes E_a/E_m e E_a/E_c , Fig. 3 (Pinelo, 1980) (E_a , E_m e E_c sendo, respectivamente, os módulos de deformabilidade do aço, do maciço e da calda de cimento). As distribuições de σ_z/α_0 ao longo das armaduras de aço de ancoragens de 3.0 e 9.0 de comprimento de selagem para vários valores de E_a/E_m e E_a/E_c estão representadas nas figuras 4 e 5, respectivamente (σ_z e α_0 são, respectivamente, as tensões de tracção instaladas no comprimento de selagem em cada ponto e no comprimento livre). Da análise desta figura pode avaliar-se como a distribuição de tensões é influenciada pelas deformabilidades do maciço e da calda: para o maciço com alto módulo de deformabilidade, o esforço de tracção aplicada ao aço é equilibrado elasticamente num curto troço do comprimento de selagem; à medida que E_m decresce, σ_z/α_0 estende-se progressivamente a todo o comprimento de selagem. Para os valores mais baixos de E_m , a variação de σ_z/α_0 é aproximadamente linear além dos primeiros 30-40 cm da zona de selagem. A distribuição das tensões de corte (τ_{rz}/α_0) na interface aço-calda de cimento e calda de cimento-maciço depende da variação de σ_z/α_0 . Condições de equilíbrio levam à conclusão que a variação de τ_{rz}/α_0 na interface aço-calda de cimento é a primeira derivada de σ_z/α_0 . Então, nessa interface, a distribuição das tensões de corte é aproximadamente constante ao longo do comprimento de selagem apenas para solos com baixos valores de E_m . A influência de E_a/E_m e do comprimento de sela-



MATERIAL (M)	E_M (kg/cm ²)	ν	E_a/E_M
Aço (M = a)	2×10^6	.3	1
Maciço (M = m)	1×10^6	.2	2
	1×10^5	.2	20
	1×10^4	.2	200
	1×10^3	.2	2000
	5×10^2	.2	4000
	2×10^2	.2	10000
Calda (M = c)	1×10^5	.2	20
	2×10^5	.2	10

Fig. 3 — Geometrias e propriedades mecânicas admitidas nos estudos elásticos de ancoragens pelo método dos elementos finitos.

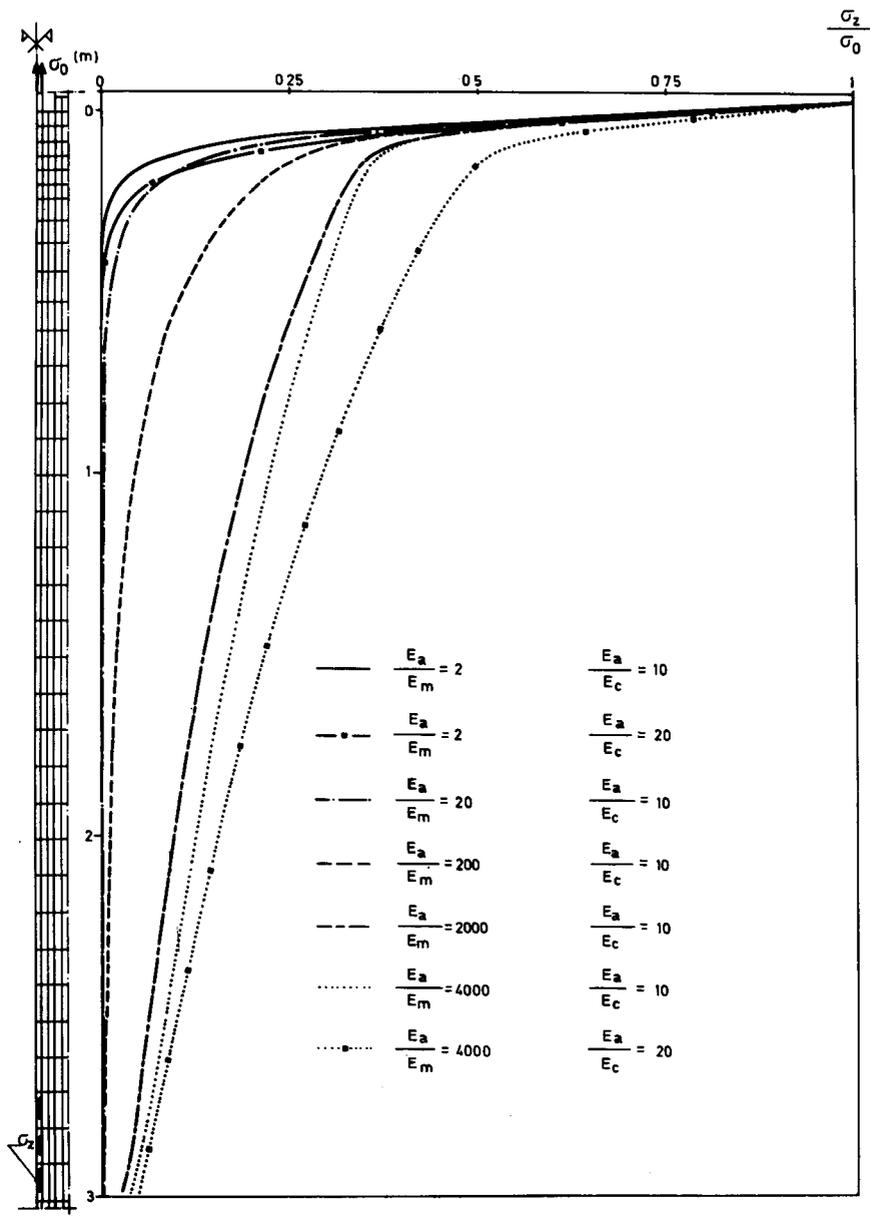


Fig. 4 — Variação das tensões normais na armadura (σ_2/σ_0) com as deformabilidades do maciço e da calda para uma ancoragem de 3,0 m de selagem.

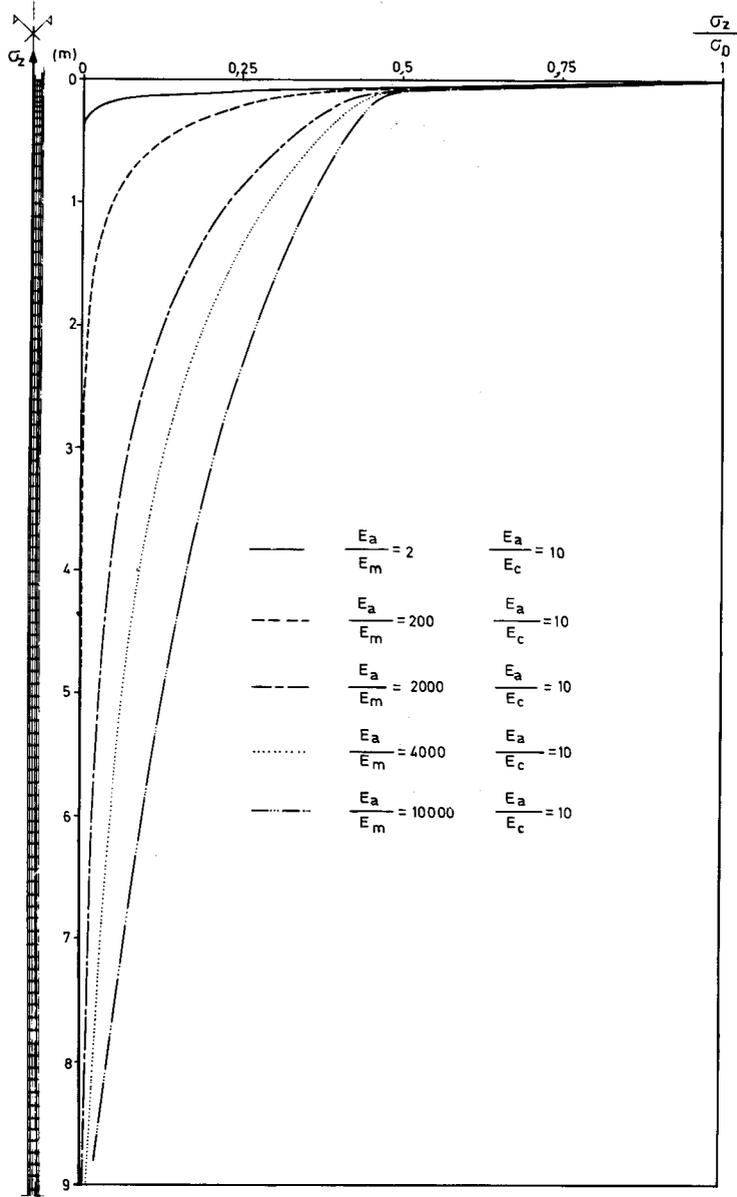


Fig. 5 — Variação das tensões normais na armadura (σ_z/σ_0) com as deformabilidades do maciço e da calda para uma ancoragem de 9,0 m de selagem.

gem na distribuição de tensões mostra-se na Fig. 6. Nesta, variação de σ_z/σ_0 está representada para diferentes comprimentos de selagem e diferentes valores de E_a/E_m .

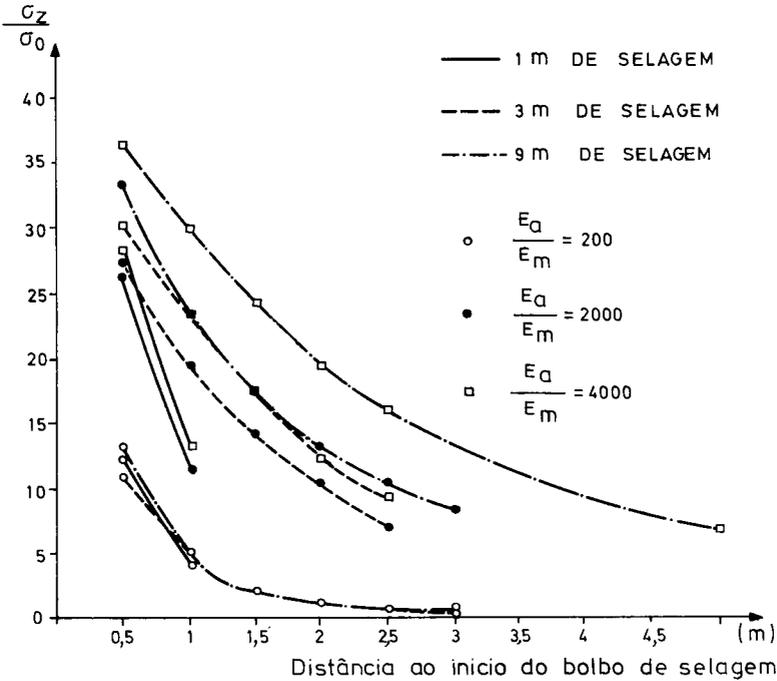


Fig. 6 — Variação da tensão na armadura (σ_z/σ_0) com o comprimento de selagem e a deformabilidade do maciço.

10 — A figura 7 mostra os deslocamentos elásticos da extremidade livre da armadura resultantes dos deslocamentos elásticos do maciço. A grandeza destes últimos é função de E_a/E_m e do comprimento de selagem. Ao calcular o comprimento livre real a partir dos resultados de ensaios “in situ” os deslocamentos elásticos do maciço têm que ser tidos em conta. De facto, a sua grandeza pode ser da ordem dos deslocamentos elásticos da armadura, para ancoragens rígidas em maciços com valores de E_m elevados.

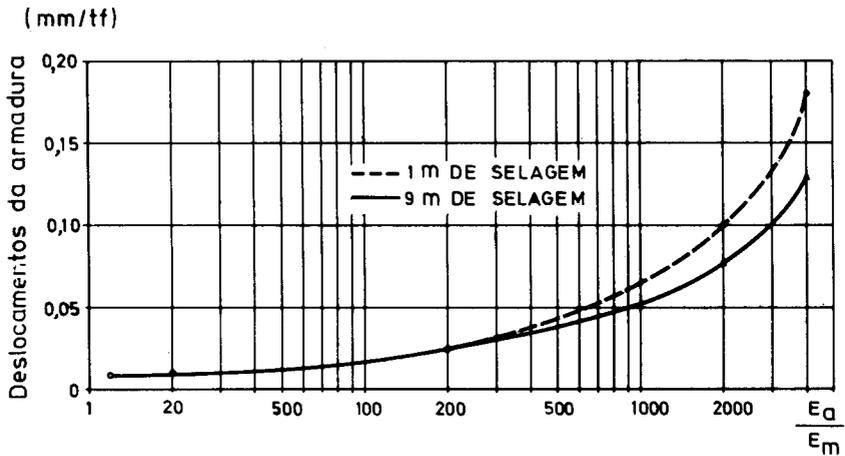


Fig. 7 — Variação dos deslocamentos elásticos no maciço com a sua deformabilidade e com o comprimento de selagem

11 — Na figura 8 estão representados alguns resultados de cálculos não lineares. A distribuição do esforço de tracção na armadura ao longo do comprimento selado, medida por Ostermayer e Scheele (1977) em ensaios de ancoragens em areia densa, é comparada com os valores calculados.

Para efeitos de cálculo, o comportamento mecânico de toda a calda de cimento foi simulada por elementos finitos de junta. A rigidez tangencial e a resistência ao corte desses elementos foram determinados por ensaios de corte directo em amostras de calda. A deformabilidade do solo foi estabelecida a partir de correlações com os valores dos ensaios SPT. Para tracções de 235, 425 e 625 KN os valores calculados e medidos denotam uma razoável concordância. Parece, pois, que as propriedades mecânicas dos materiais adoptadas nos cálculos estão correctas. Para as restantes tracções os valores calculados são inferiores aos medidos. Isto significa que os valores reais da resistência são superiores aos calculados. É nossa opinião que essa diferença se deve, em parte, ao facto de a dilatação não ser tida em conta no modelo de cálculo, sendo bem conhecida a sua influência no comportamento de ancoragens em areia (Wernick, 1978). Para 850 KN foi atingida a rotura em todos os elementos de junta.

Na figura 8 está igualmente representada a evolução da distribuição das tensões de corte com o crescimento dos esforços de tracção.

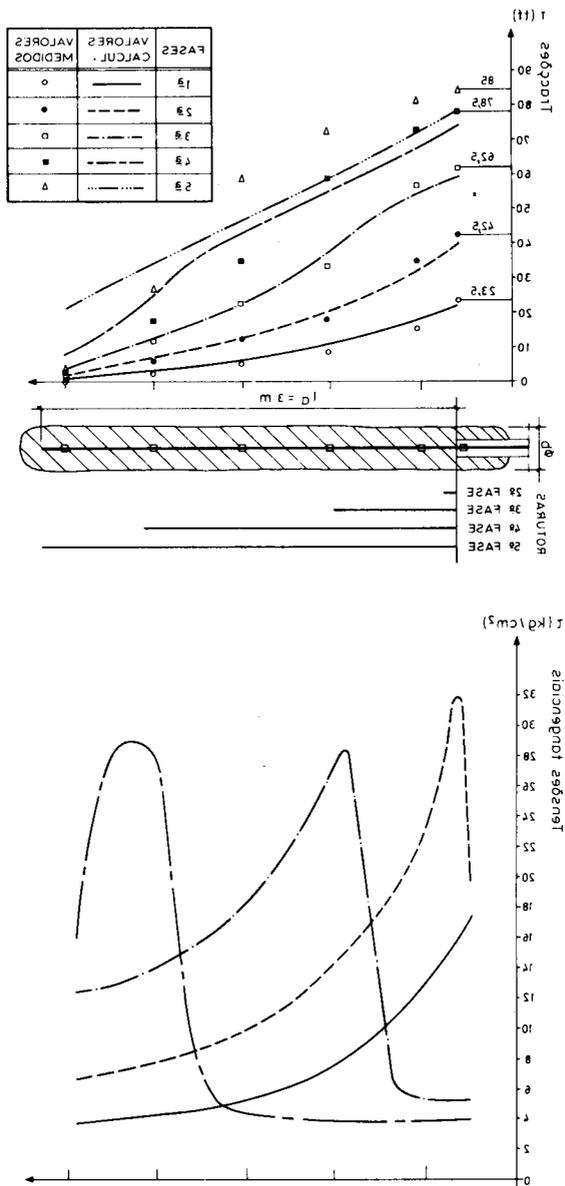


Fig. 8 — Ancoragem com 3,0 m de selagem em areia densa. Comparação das distribuições das tracções medidas na armadura com as calculadas em regime não linear e distribuições das tensões tangenciais no contacto armadura-ligante, para níveis de tracção

12 — Três diagramas forças deslocamentos estão representados na figura 9, correspondendo aos: i) deslocamentos teóricos; ii) deslocamentos calculados admitindo comportamento elástico do solo e da calda; iii) deslocamentos calculados considerando comportamento não linear tal como atrás foi referido. A curva relativa ao caso iii) é característica do comportamento das ancoragens em maciços mais deformáveis. Tal como se pode deduzir da figura, a diferença entre os deslocamentos medidos e teóricos é o resultado de dois factores: o primeiro relacionado com o comportamento não linear do solo e da calda; o segundo dependente dos deslocamentos elásticos da calda e do solo.

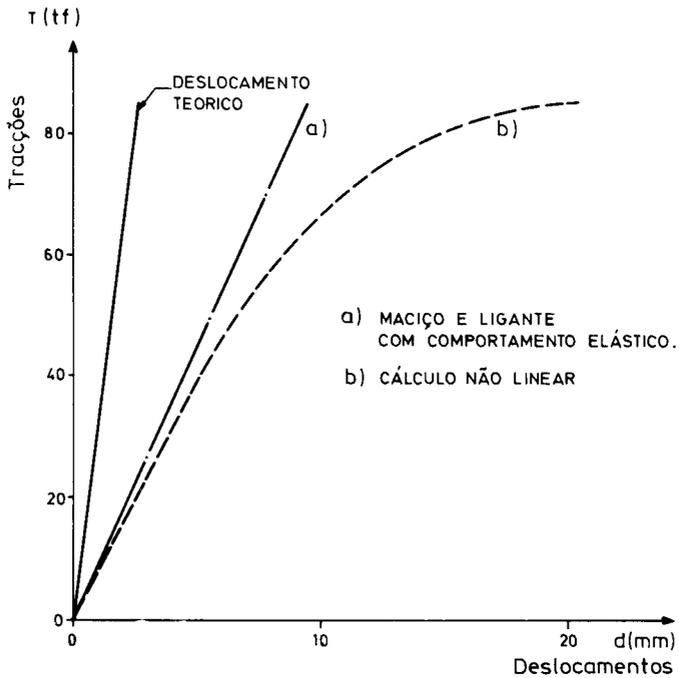


Fig. 9 — Ancoragem de 3,0 m de selagem em areia densa. Diagramas tracções-deslocamentos teóricos e calculados, em regime elástico linear e em regime não linear

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS ANCORAGENS NO CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS DE CORTINAS ANCORADAS

13 — O m.e.f. é particularmente adequado para a análise deste tipo de estruturas porque permite a simulação das diferentes fases de construção e a consideração dos diferentes comportamentos mecânicos dos materiais envolvidos. A estrutura é analisada simultaneamente em termos de tensões e de deslocamentos. Um modelo de cálculo bidimensional foi desenvolvido no LNEC (Pinelo e Matos Fernandes, 1980) para a análise de escavações suportadas por cortinas ancoradas. O solo e a cortina são discretizados em elementos quadrangulares subparamétricos sendo o comportamento não linear do solo representado por uma lei hiperbólica. As interfaces entre o solo e a cortina são simuladas por meio de elementos de junta. Para os elementos representativos do solo e para os elementos de junta a resistência é definida pelo critério de Coulomb. A análise é realizada através de uma técnica incremental, correspondendo os incrementos de solicitação às fases típicas de construção: escavação e pré-esforço das ancoragens.

14 — Na análise de cortinas ancoradas pelo m.e.f. um aspecto que requer especial atenção é o da simulação das ancoragens devido à não linearidade do seu comportamento.

Nas primeiras análises (Clough et al, 1972; Egger, 1972) os comprimentos livre e de selagem eram representados na malha de elementos finitos, o que acarretava os seguintes inconvenientes: i) a complicação excessiva da malha e o aumento da semibanda da matriz de rigidez; ii) a obstrução aos movimentos dos elementos representativos do solo, já que nas análises em estado plano de deformação as ancoragens dessa forma simuladas funcionam como elementos contínuos e planos, paralelos ao desenvolvimento da cortina (Tsui, 1974).

15 — Para tornar tais inconvenientes Tsui (1974) propôs a representação das ancoragens através de elementos-mola ligando as cabeças das ancoragens na cortina a pontos fixos da fronteira. A rigidez desses elementos -mola é calculada com base no comprimento livre teórico da ancoragem e respectiva secção. Assim, este processo será apenas aplicável se a zona de selagem estiver alojada num material essencialmente rígido ou numa massa de solo imóvel (Tsui, 1974).

16 — Quando a zona de selagem não está fixa, é nossa opinião que a simulação das ancoragens pode ainda ser realizada por elementos-mola. Isso é conseguido através de um processo iterativo que ajusta, em cada incremento, a rigidez da mola à rigidez da curva tracções-deslocamentos resultante de ensaios prévios.

No entanto, nessa curva, os deslocamentos da zona de selagem induzidos pe-

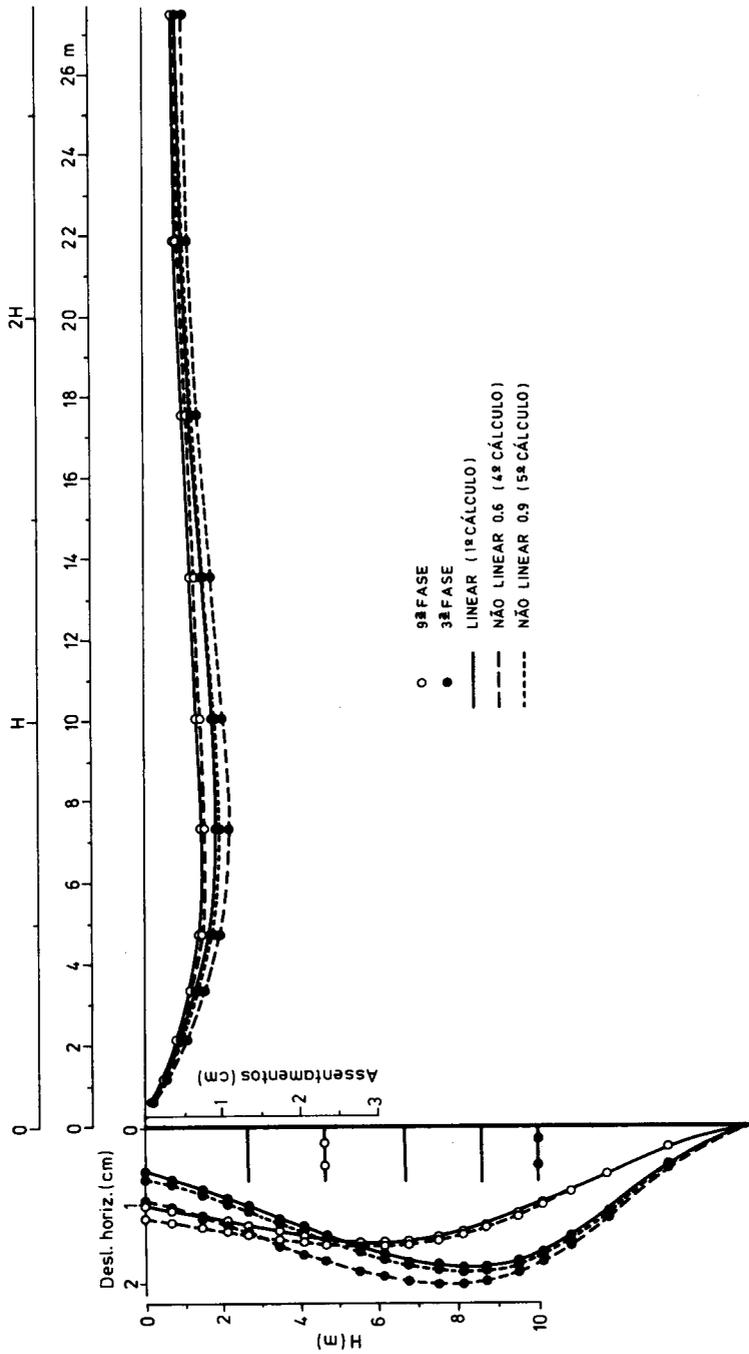


Fig. 10 — Influência do comportamento não linear das ancoragens nos deslocamentos horizontais da cortina e nos assentamentos do terrapleno (3.ª e 9.ª fases de cálculo)

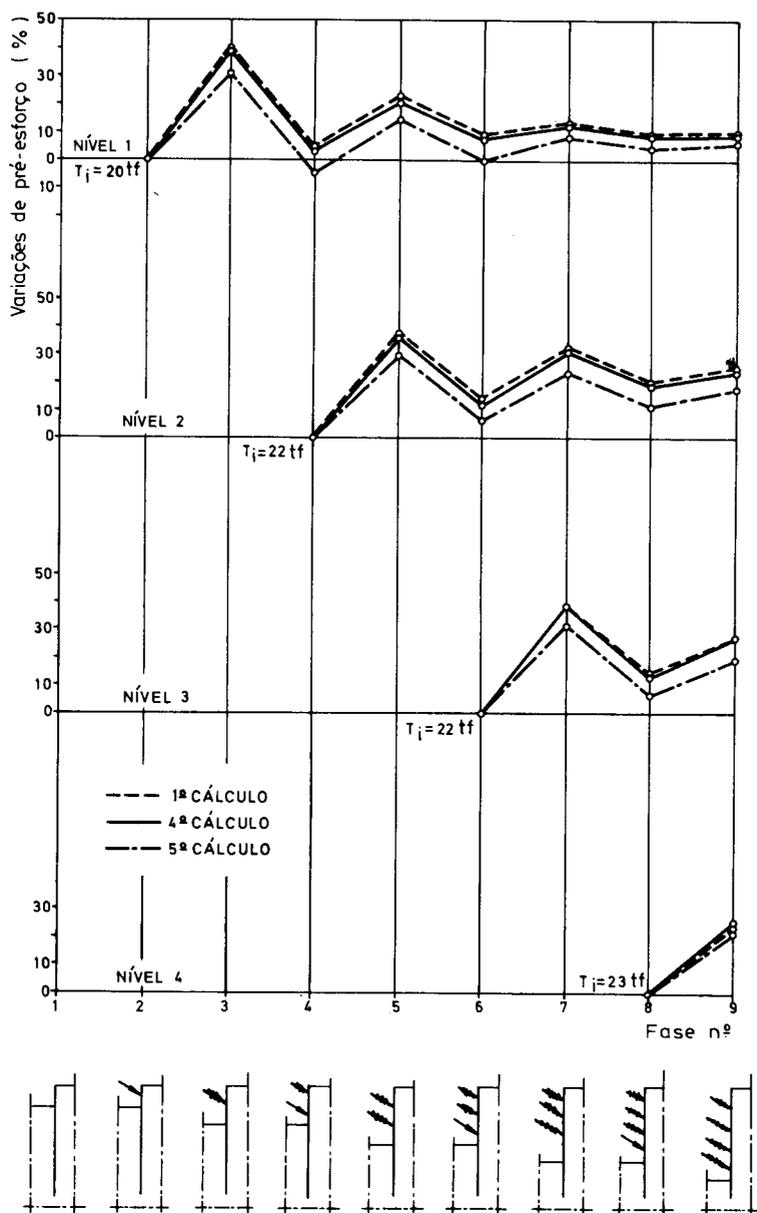


Fig. 11 — Influência do comportamento não linear das ancoragens nas variações dos pré-esforços.

la escavação não estão ainda integrados. Então, nos casos em que tais deslocamentos sejam significativos, será necessário tê-los em conta na correção da rigidez dos elementos-mola.

Já que um processo iterativo é necessário para a consideração do comportamento não linear dos elementos representativos do solo, a técnica proposta não se traduz num acréscimo significativo dos tempos de cálculo.

17 — Nas figuras 10 e 11 apresentam-se os resultados da análise de uma cortina ancorada por meio do modelo analítico que atrás foi sucintamente descrito (Pinelo, 1980).

A figura 10 diz respeito às componentes horizontais dos deslocamentos da parede e aos assentamentos do terrapleno considerando três hipóteses para o comportamento das ancoragens; i) elástico linear, com rigidez calculada a partir do comprimento livre teórico; ii) não linear, com rigidez em carga (isto é, quando a sollicitação se traduz por um aumento do pré-esforço) igual a 90% da rigidez teórica; iii) não linear, com a rigidez em carga igual a 60% da teórica. Para os três casos a rigidez em descarga e segunda carga foi considerada igual à rigidez teórica, já que dos ensaios de ancoragens se verifica que, para essas condições de sollicitação, a rigidez é em geral elevada, aproximando-se do valor teórico. Os diagramas da figura 10 correspondem aos terceiro e nono incrementos de sollicitação (segunda e quinta fases de escavação, respectivamente).

Como seria de esperar, os valores mais altos dos deslocamentos ocorrem para o nono incremento, no terceiro caso estudado (rigidez de carga igual a 60% da teórica); os deslocamentos do topo da parede e os assentamentos do terrapleno são, respectivamente, 70% e 25% mais altos do que os obtidos, para o mesmo incremento, no primeiro caso. A figura 11 mostra as variações dos esforços das ancoragens para os três casos ao longo das várias fases construtivas. Os valores mais baixos das variações correspondem aos valores também mais baixos da rigidez dos elementos representativos das ancoragens.

CONCLUSÕES

18 — O m.e.f. permite o estudo do comportamento mecânico das ancoragens e os principais parâmetros que o determinam. O mecanismo de transferência de carga da armadura para maciço ao longo do comprimento de selagem é estudado a partir do conhecimento do comportamento mecânico do solo e da calda de selagem. Tal como foi demonstrado, as análises elásticas permitem uma pri-

meira abordagem da natureza daquele mecanismo, da mesma forma que fornecem a relação entre os esforços de tracção e os deslocamentos e a distribuição de tensões na massa de solo envolvente. Por isso, o problema da interacção entre ancoragens próximas pode ser igualmente estudado.

Contudo, os resultados das análises elásticas podem ser demasiado conservativos se os esforços de tracção forem altos e se o solo e a calda exibirem reduzida resistência. De facto, e tal como o demonstram as análises não lineares, a rotura na zona de selagem progride à medida que as tracções crescem.

19 — O dimensionamento de ancoragens deve efectuar-se a partir da cuidada interpretação dos resultados de ensaios prévios. Durante esses ensaios é essencial a medição rigorosa das tracções aplicadas às cabeças das ancoragens e dos deslocamentos resultantes. Os ensaios “in situ” de ancoragens são o único processo de avaliar com rigor as tracções limites de ruína. Da mesma forma, durante a construção da estrutura de suporte devem realizar-se ensaios de ancoragens para verificar que os coeficientes de segurança adequados estão garantidos.

Quando duas ou mais ancoragens estão a distâncias mútuas tais que possa ocorrer a sua interacção, deverão ser efectuados ensaios de tracção de grupo.

20 — O diagrama tracções-deslocamentos determinado nos ensaios de ancoragens è, geralmente, não linear. A diferença entre os deslocamentos teóricos e os medidos pode ser interpretada como o resultado de dois efeitos: o primeiro relacionado com os deslocamentos elásticos do maciço e da calda e o segundo consequência da não linearidade do comportamento mecânico daqueles materiais.

21 — Os modelos analíticos baseados no m.e.f. constituem um instrumento de cálculo de excepcional importância no estudo de escavações suportadas por cortinas ancoradas. Processos apropriados para a consideração do comportamento não linear das ancoragens e do solo têm que ser introduzidos no modelo para que o comportamento real seja, de facto, simulado. O cálculo dos deslocamentos associados à escavação é de importância fundamental nas escavações realizadas nos centros urbanos. Através de elementos-mola é possível simular o comportamento não linear das ancoragens. Tal como o exemplo apresentado traduz, e como se poderia esperar, tanto os deslocamentos como as variações dos esforços nas ancoragens são afectados pela rigidez dos elementos-mola que as simulam.

22 — A instrumentação de escavações suportadas por cortinas ancoradas é de grande importância para a prossecução dos 3 seguintes objectivos; i) o controlo de segurança da obra e das estruturas adjacentes durante e após a construção; ii) a obtenção de informações que permitam o aperfeiçoamento do projecto em

resultado das medidas efectuadas e de análises “a posteriori”; iii) a obtenção de informações que sejam úteis em futuros projectos de obras afins.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Eng.º Castel-Branco Falcão, Chefe do Núcleo de Estudos Geotécnicos Especiais do Departamento de Geotecnia do LNEC, a sua orientação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENDEL, H. (1966) — Ancrage en terrain. Systeme Stump Sondage S.A., Zurich.
- BUREAU SÉCURITAS (1977) — Recommendations concernant la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des tirants d'ancrage. Recommendations TA 77, Editions Eyrolles, Paris.
- CLOUGH, G.W., TSUI, Y. (1974) — A study of performance of anchored walls. ASCE J. Geotech. Eng. Div., Vol. 100, GT 12, Dec., 1259-1273.
- CLOUGH, G.W., WEBER, P.R., LAMONT, J. (1972) — Design and observation of a tied-back wall. Proc. ASCE Spec. Conf. on Perf. of Earth and Earth. Supp. Struct., Vol. I, Part 1, 1367-1390, Purdue University, Lafayette, Indiana.
- DIN. 4125, Part 2 (1976) — Soil and rock anchors, permanent soil anchors; analysis, structural design and testing. Fev.
- EGGER, P. (1972) — Influence of wall stiffness and anchor prestressing on earth pressure distribution. Proc. 5th Europ. conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, 259-264, Madrid.
- KRAMER, H. (1977) — Determination of the carrying capacity of grounds anchors with correlation and regression analysis. Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Special Session n.º 4, 76-81, Tokyo.
- OSTERMAYER, H. (1974) — Construction, carrying behaviour and creep characteristics of ground anchors. Proc. ICE Conf. on Diaphragm Walls and Anchorages, 141-151, London.
- OSTERMAYER, H. SCHEELE, F. (1977) — Research on ground anchors in non-cohesive soils. Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. found. Eng., Special Session n.º 4, 92-97, Tokyo.
- PINELO, A. (1980) — Dimensionamento de ancoragens e de cortinas ancoradas. Tese apresentada ao concurso para especialista do LNEC, Lisboa.
- PINELO, A., MATOS FERNANDES, M. (1980) — Modelo de cálculo para o estudo de estruturas de suport flexíveis pelo método dos elementos finitos. LNEC, Proc. 55/13/6187, Relatório, Lisboa.
- SCHNEEBELI, G. (1971) — Les parois moulés dans le sol. Editions Eyrolles, Paris.

- TSUI, Y. (1974) — A fundamental study of tied-back wall behaviour. Thesis presented to Duke University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Durham, N.C.
- WENICK, E. (1978) — Tragfähigkeit zylindrischer anker in sand unter besonder beruscksichtigung des dilatanz verhaltens. Veroffentlichungen des Inst. fur Bodenmechanik und Felsmechanik der Univ. Friedericiana Karsruhe.