

# ESTUDO DUMA PAREDE MOLDADA MULTI-ANCORADA\*

Etude d'une paroi moulée multi-ancrée

por

ANTÓNIO CORREIA MINEIRO\*\*

JOSÉ MATEUS DE BRITO\*\*\*

JOÃO DE SALVADOR FERNANDES\*\*\*

**RESUMO** — Apresenta-se um método de cálculo por elementos finitos numa parede moldada multi-ancorada que tem em conta o comportamento não linear do solo e da interface solo-parede e a execução por fases. Referem-se os resultados mais importantes do dimensionamento numa parede moldada com quatro níveis de ancoragens. Comparam-se esses resultados com os obtidos considerando comportamento elástico e a escavação realizada numa só fase. Salienta-se a importância, quer do cálculo evolutivo simulando as fases de execução dos trabalhos, quer da interacção do conjunto solo-parede-ancoragens, nomeadamente dos elementos de junta solo-parede.

**SYNOPSIS** — On présente une méthode de calcul par éléments finis d'une paroi moulée multi-ancrée qui tient en compte le comportement non linéaire du sol et de l'interface sol-paroi. Les résultats plus importants des calculs concernant une paroi moulée avec 4 nappes d'ancrages sont présentés et on les compare avec ceux obtenus en calcul élastique, la fouille étant réalisée en une seule étape. On remarque l'importance, soit d'un calcul évolutif simulant la suite chronologique des travaux, soit de l'interaction du complexe sol-paroi-ancrages, notamment celle des éléments de joint sol-paroi.

## 1 — INTRODUÇÃO

O edifício Sonangol, a construir em Luanda, será constituído por 7 pisos gerais, dos quais 4 são enterrados, de onde emergirão dois blocos independentes com 31 e 13 pisos.

Para a construção dos 4 pisos enterrados é necessário executar uma escavação com área de  $60 \times 46 \text{ m}^2$  e 13,6 m de profundidade. O suporte da escavação se-

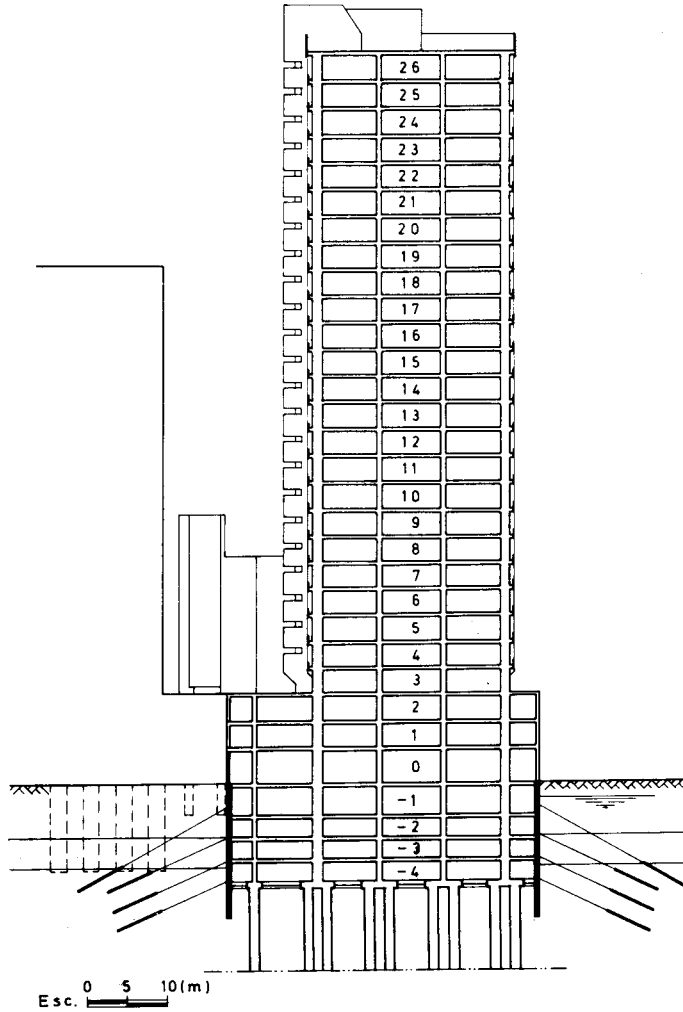
---

\* Trabalho apresentado na 4.<sup>a</sup> sessão X ICSMFE, Stockholm, Junho, 1981.

\*\* Eng.º Civil (IST); Msc (Eng.); D.I.C. (London); Doutor em Engenharia (Estruturas). Da Hidrotécnica Portuguesa. Professor da Universidade Nova de Lisboa (Faculdade de Ciências e Tecnologia).

\*\*\* Eng.º Civil (IST). Da Hidrotécnica Portuguesa.

rá assegurado por uma parede moldada, com 0,60 m de espessura e 17,0 m de altura, ancorada por quatro níveis de ancoragens provisórias (Fig. 1).



*Fig. 1 — Corte segundo o bloco de 31 pisos*

Tendo em conta a existência de edifícios de 17, 6 e 3 andares, fundados em pilares, e das Avenidas dos Restauradores e 4 de Fevereiro (Fig. 2), adjacentes à escavação, recorreu-se ao método dos elementos finitos com simulação do pro-

cesso de execução e tendo em conta o comportamento não-linear do solo e da interface solo-parede, de forma a poder prever o comportamento daquelas obras.

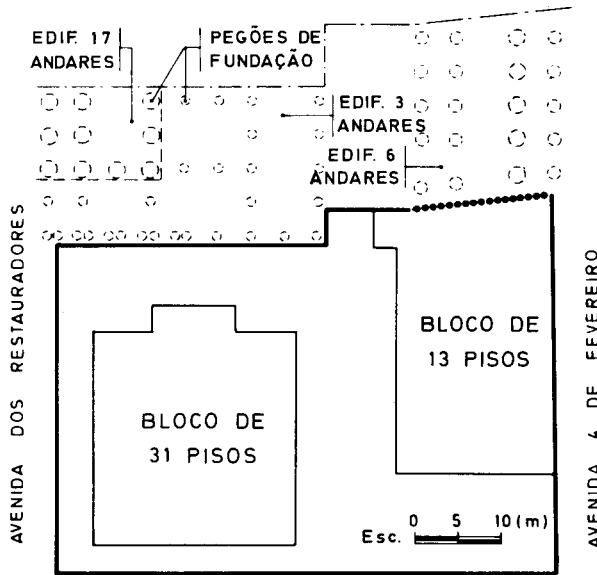


Fig. 2 — Planta do edifício Sonangol, da parede moldada e dos pegões dos edifícios vizinhos

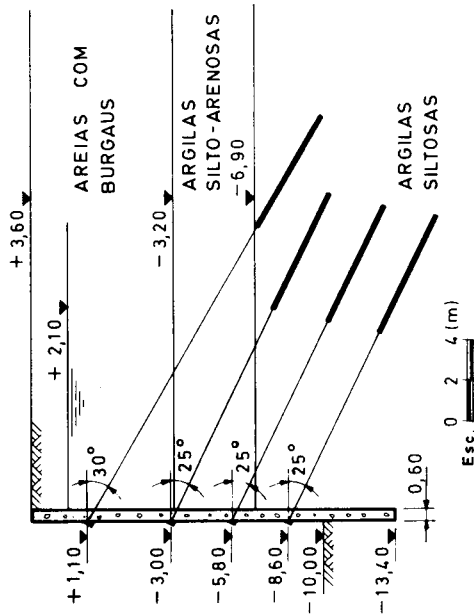
Na Fig. 3 esquematiza-se a parede moldada com os 4 níveis de ancoragens e indicam-se as características geotécnicas dos solos.

Efectuou-se a previsão do comportamento para duas situações críticas:

- situação A, representativa das zonas sem edifícios confinantes;
- situação B, considerando as cargas mais desfavoráveis dos pegões dos edifícios de 3 pisos (adjacente) e de 17 pisos (a partir de 8 m de distância da parede).

A localização e os comprimentos livres e de selagem das ancoragens foram definidos por forma a que resultasse mínima a interferência com os pegões dos edifícios confinantes. Situou-se a zona de selagem na camada de argila mais consistente, ou seja, a partir de 10,5 m de profundidade.

O pré-esforço (por metro de desenvolvimento de parede) a introduzir em cada nível de ancoragem foi obtido por tentativas ao longo dos cálculos de forma a assegurar o comportamento desejado. Assim, obteve-se um pré-esforço de 200 kN/m e 250 KN/m, respectivamente, para as situações A e B.



IDENTIFICAÇÃO	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	PARÂMETROS DE DEFORMABILIDADE
$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$	$c = 0$ $\phi = 30^\circ$ $\delta = 25^\circ$	$E_h = E_v = 15000 \text{ kPa}$ $\nu = 0,3$
$\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ $w_L = 30 \text{ a } 40$ $w_P = 21 \text{ a } 23$	$c_u = 100 \text{ kPa}$ $a = 50 \text{ kPa}$ $\phi_u = \delta = 0^\circ$	$E_h = E_v = 40000 \text{ kPa}$ $E_h = E_v / 2 = 20000 \text{ kPa}$ (Do lado da escavação) $\nu = 0,45$
$\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ $w_L = 45 \text{ a } 65$ $w_P = 21 \text{ a } 26$	$c_u = 150 \text{ kPa}$ $a = 75 \text{ kPa}$ $\phi_u = \delta = 0^\circ$	$E_h = E_v = 60000 \text{ kPa}$ $E_h = E_v / 2 = 30000 \text{ kPa}$ (Do lado da escavação) $\nu = 0,45$

Fig. 3 — Corte da parede e características dos solos

Efectuou-se também um cálculo para as mesmas condições da situação A mas considerando o solo com comportamento elástico e a escavação realizada numa só fase.

## 2 — PROCESSO DE CÁLCULO

O programa “NONLIN”, desenvolvido para cálculos em comportamento não-linear, utiliza o método dos elementos finitos com elementos sub-paramétricos de 4 nós do tipo “non-conforming Co quadrilateral element”, elementos de junta, no contacto solo-parede, com 4 nós e espessura nula e elementos de tirante lineares.

Para os elementos do solo o cálculo não-linear baseia-se no método de “stress-transfer”. Para os elementos de junta adoptou-se um critério misto de “stress-transfer” e de elasticidade variável.

Os critérios de rotura adoptados são os de tracção, de corte (Coulomb) e de tracção-corte.

Para as relações tensões-deformações o programa considera a não-linearidade seguindo curvas pré-determinadas.

Os testes de rotura efectuam-se não somente para a direcção mais desfavorável relativamente às tensões, mas também para as direcções correspondentes à deformação principal de compressão mais elevada no círculo de Mohr das deformações.

Quando, entre os diferentes testes, resultam roturas em mais duma faceta, o programa escolhe o círculo de Mohr reduzido de menor raio para fazer a redução das tensões e redistribuição das tensões em excesso.

## 3 — FASES DE EXECUÇÃO

A sequência prevista para as fases de escavação e de introdução do pré-esforço nas ancoragens foi simulada por uma técnica de aplicação incremental de carga. Na Fig. 4 esquematizam-se as fases de execução para as situações de cálculo A e B.

Os primeiros cálculos (fase 0) consistiram na introdução do estado de tensão inicial com coeficiente de impulso em repouso  $k_0 = 0,5$ , seguido da execução da parede moldada.

No que se refere à situação B aplicaram-se também, nos nós da malha, forças correspondentes a cargas uniformemente distribuídas de 24 e 136 kN/m<sup>2</sup> dos pégões de fundação dos edifícios de 3 e 17 pisos.

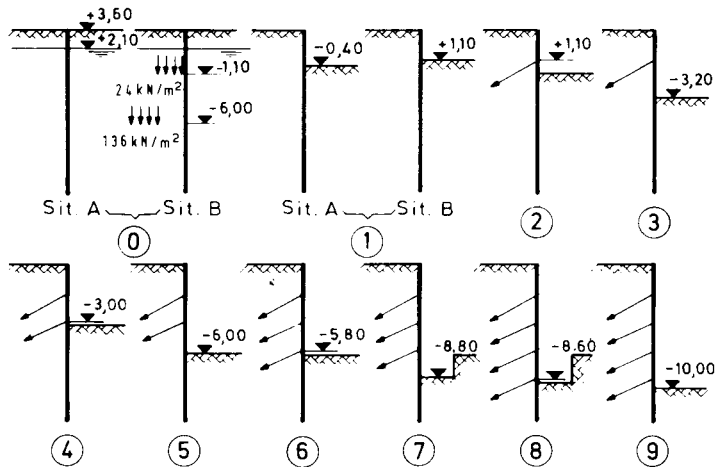


Fig. 4 — Fases de execução

A primeira fase de escavação (fase 1) foi reproduzida retirando os elementos correspondentes da malha.

Na fase 2 reproduziu-se a aplicação do pré-esforço no primeiro nível de ancoragens.

Continuou-se com esta sequência até ao último nível de ancoragens (fases 3 a 8).

A fase 9 corresponde à última fase de escavação.

Refere-se que para a colocação e aplicação do pré-esforço no nível inferior de ancoragens foi necessário aprofundar uma plataforma de trabalho, com 5 m de largura (fase 7), antes de continuar a escavação geral até à cota — 10,00.

Para simular o pré-esforço em cada nível de ancoragens introduziu-se uma tensão de tracção no elemento de tirante correspondente ao comprimento livre. Esta tensão é transformada pelo programa em forças nodais nas extremidades do elemento.

Em cada fase de escavação produz-se um rebaixamento do nível freático no interior da escavação resultando um desequilíbrio das pressões hidrostáticas na parede. Este efeito foi considerado aplicando, nos nós da face interior da parede, forças equivalentes às diferenças de pressões em cada fase de escavação.

#### 4 — MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

A malha de elementos finitos (Fig.5), com número total de 420 nós, é constituída por 357 elementos subparamétricos de 4 nós, dos quais 12 representam a parede moldada, 22 elementos de junta de 4 nós nos contactos verticais da parede com o solo e 12 elementos de tirante para simular as ancoragens, correspondendo a cada um deles um elemento para o comprimento livre e dois para o comprimento de selagem.

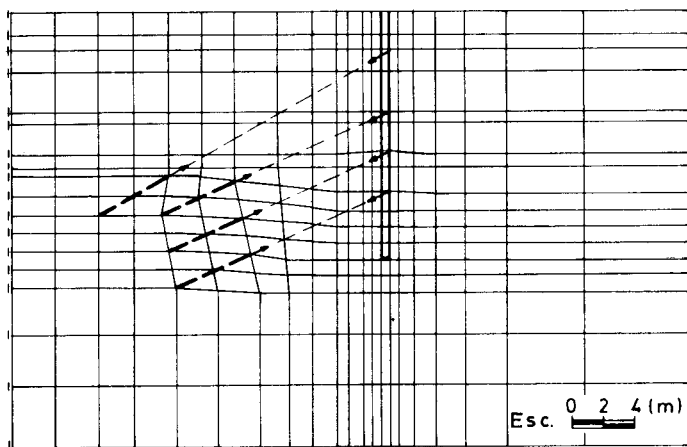


Fig. 5 — Malha de elementos finitos

#### 5 — APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para cada fase de execução o programa de cálculo fornece as tensões principais e respectivas direcções, as tensões verticais e horizontais, os deslocamentos da parede e do terreno, as zonas e as direcções de rotura e os esforços na parede e nas ancoragens. A seguir apresentam-se os resultados principais dos cálculos.

##### 5.1 — Impulsos

As curvas das tensões efectivas horizontais sobre a parede, obtidas quer na última fase de escavação dos cálculos evolutivos (para as situações A e B), quer no cálculo com uma só fase de execução (apenas para situação A), estão representadas na Fig. 6.

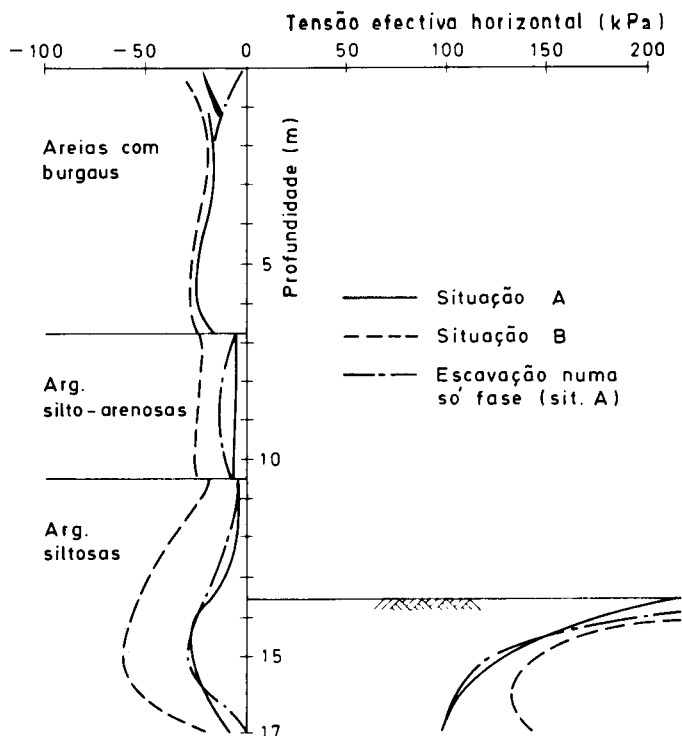


Fig. 6 — Tensões efectivas horizontais na parede

Embora o cálculo com uma só fase de execução não tenha em conta as roturas locais do solo que se verificam nas sucessivas fases de execução, verifica-se que as tensões obtidas são da ordem de grandeza das tensões correspondentes ao cálculo evolutivo para a mesma situação.

As pressões mais elevadas em profundidade obtidas para a situação B são o resultado das cargas dos pegões de fundação dos edifícios adjacentes.

## 5.2 — Deslocamentos

Nas Fig. 7 e 8 representam-se, para as condições A e B, os deslocamentos finais (nos nós mais significativos) da parede e do terreno, bem como a evolução, com as fases de execução, dos deslocamentos horizontais da parede e os assentamentos da superfície do terreno suportado.





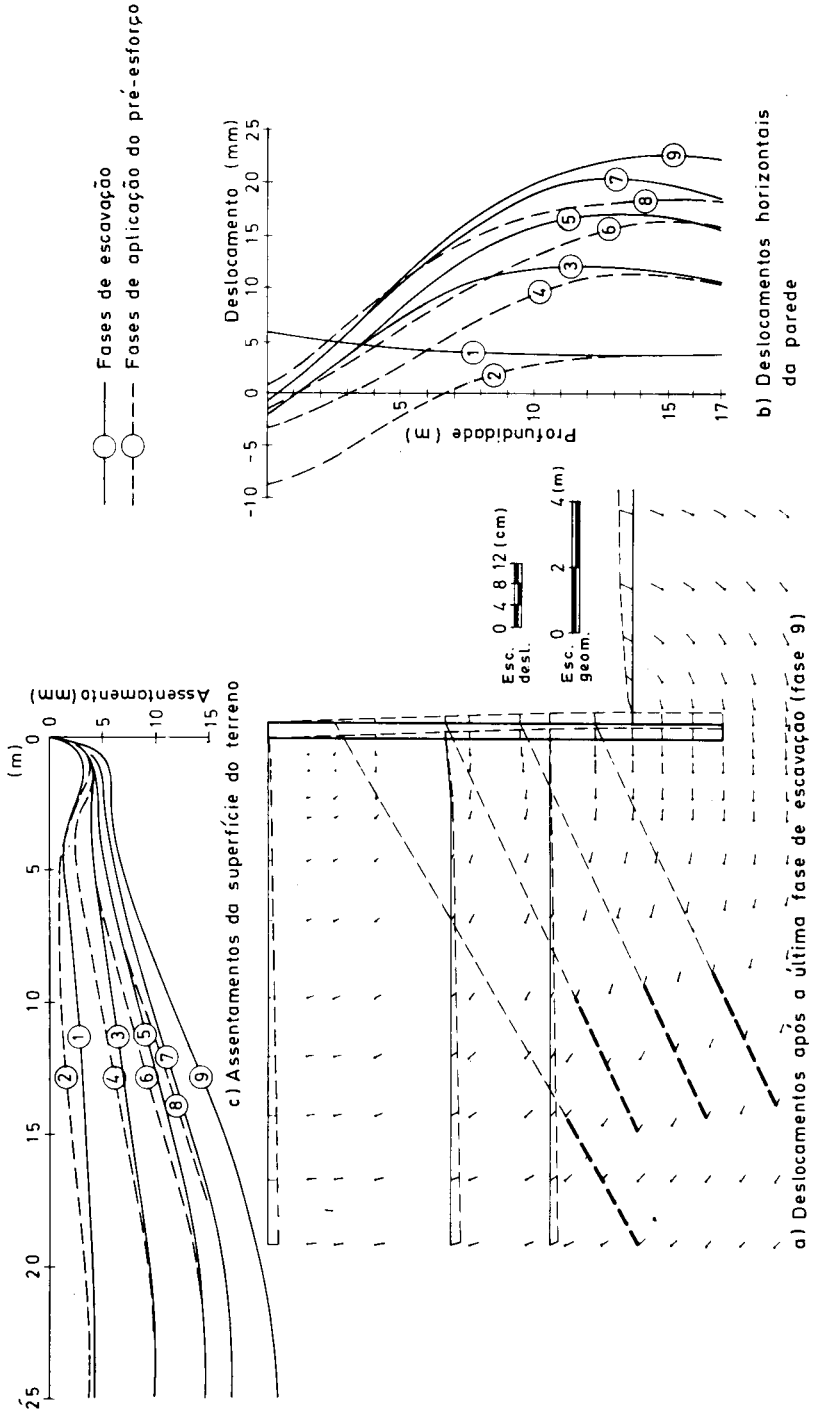


Fig. 8 — Deslocamentos para a situação B

Na Fig. 7 também se comparam os deslocamentos horizontais da parede e os assentamentos do terreno obtidos no cálculo evolutivo e no cálculo com uma só fase de execução.

Os resultados traduzem bem os objectivos pretendidos, ou seja, limitar as deformações pela utilização do pré-esforço admissível nas ancoragens.

Com efeito foi possível limitar a 25 mm o deslocamento máximo horizontal da parede e a 20 mm o assentamento máximo do terreno suportado.

Para a situação B limitou-se a 5 mm o assentamento junto da parede dada a existência nessa zona dos pegões de fundação dos edifícios confinantes. Para atingir este objectivo foi necessário, em relação à situação A, reduzir a altura da primeira fase de escavação (de 4,0 para 2,5 m) e aumentar de 25% o pré-esforço nas ancoragens.

Ainda no que se refere à situação B verificou-se que a forma mais económica de limitar a 25 mm o deslocamento máximo horizontal da parede, sem recorrer a um aumento sensível do pré-esforço, seria a de avançar a escavação com uma plataforma de trabalho para permitir a colocação e aplicação do pré-esforço no último nível de ancoragens.

Faz-se notar que, para a situação A, os resultados dos cálculos evolutivo e para uma só fase, embora globalmente da mesma ordem de grandeza, são muito diferentes na zona superior da parede e terreno adjacente.

Esta diferença de comportamento resulta fundamentalmente da influência dos elementos de junta no cálculo evolutivo em que a interacção solo-parede é essencialmente não-linear (com roturas localizadas).

### 5.3 — *Momentos flectores*

Os diagramas dos momentos flectores da parede, obtidos nas sucessivas fases de execução, estão representados nas Fig. 9 e 10, respectivamente, para as situações A e B. Na Fig. 11 comparam-se as envolventes dos momentos flectores para as duas situações A e B e a envolvente do cálculo com a execução da parede numa só fase (situação A).

Estas figuras evidenciam a importância da altura da primeira fase da escavação no comportamento posterior da parede. Para a situação A reduziram-se ao mínimo os momentos flectores na zona crítica (a meia altura) da parede, pela introdução dum momento flector de sinal contrário induzido pela primeira fase de escavação.

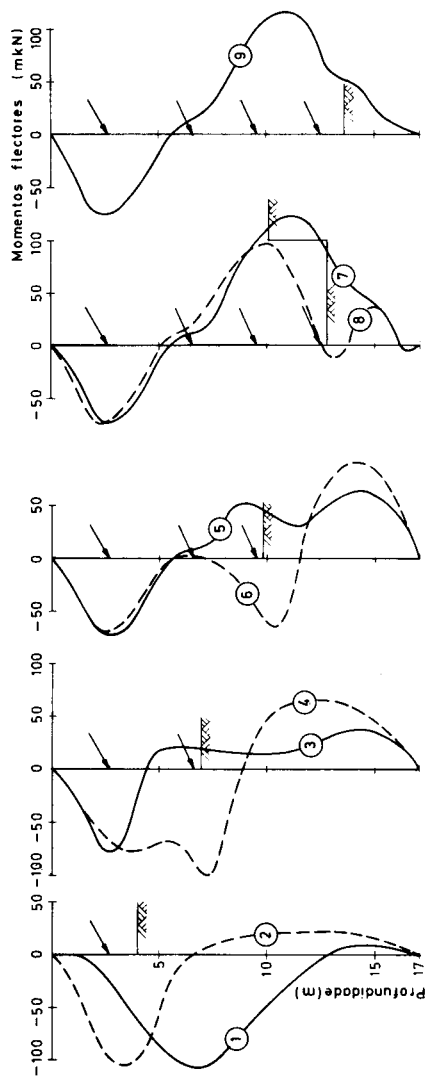


Fig. 9 — Variação dos momentos flectores com as fases de execução (situação A)

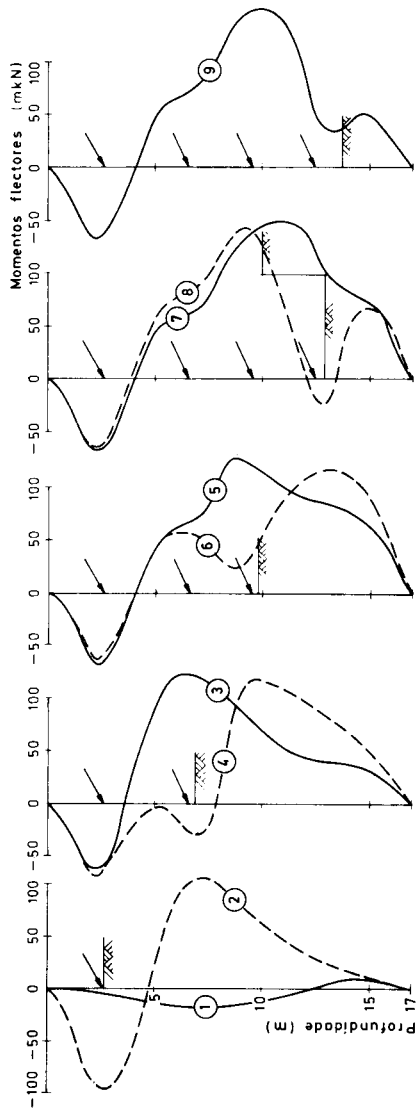


Fig. 10 — *Variação dos momentos flectores com as fases de execução (situação B)*

A curva obtida considerando a execução numa só fase mostra claramente que este tipo de cálculo pode conduzir a valores dos momentos flectores muito discordantes dos obtidos num cálculo evolutivo.

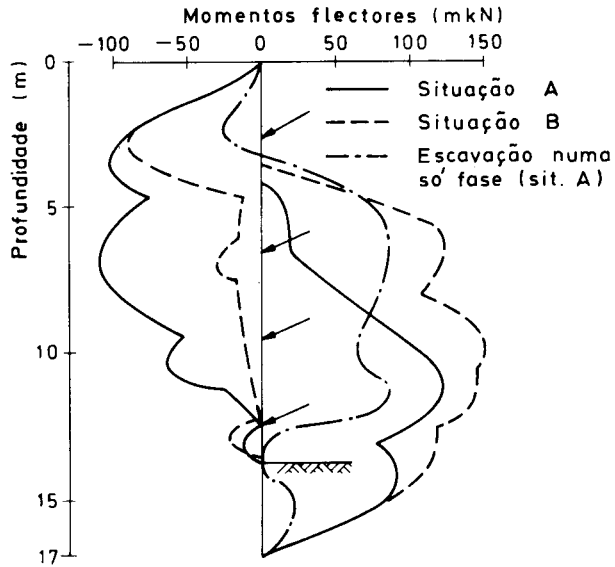


Fig. 11 — Envolventes dos momentos flectores

#### 5.4. — Forças de ancoragem

Na Fig. 12 apresenta-se a evolução das forças nas ancoragens com as sucessivas fases de execução.

Verificam-se acréscimos das forças nos diferentes níveis de ancoragens, em cada fase de escavação, e reduções após a aplicação do pré-esforço num nível de ancoragem.

Os acréscimos variaram de cerca de 4 a 17%, para a situação A, e de cerca de 3 a 13%, para a situação B. As reduções foram sempre inferiores aos acréscimos. Os valores dos acréscimos e das reduções das forças nas ancoragens são, evidentemente, menores que os que se teriam obtido se se tivesse fixado o comprimento de selagem das ancoragens.

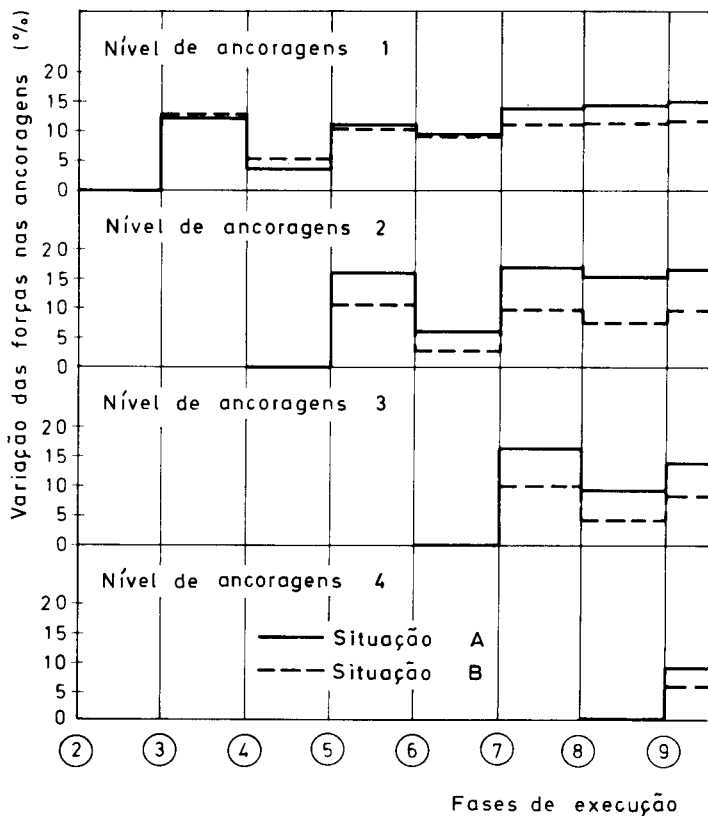


Fig. 12 — Variação das forças nas ancoragens com as fases de execução

## 6 — CONCLUSÕES

O cálculo pelo método dos elementos finitos tendo em conta o comportamento não-linear do solo, da interface solo-parede, da zona de selagem das ancoragens e da execução por fases, permitiu pôr em evidência os mecanismos mais realistas do comportamento da obra e do terreno circundante.

Todos os refinamentos de cálculo introduzidos para ter em conta o comportamento não-linear parecem ter uma influência sensível nos resultados.

Em particular, verifica-se que a caracterização dos elementos de junta solo-parede é crítica para o cálculo não linear tendo em conta as fases de execução sucessivas.

A observação do comportamento da obra durante a execução permitirá aferir o método de cálculo e a caracterização do terreno indicando os parâmetros mais críticos.

Embora o estudo efectuado respeite apenas a casos particulares de paredes moldadas ancoradas a 4 níveis, crê-se que os refinamentos de cálculo utilizados representam um contributo considerável para a compreensão do comportamento das paredes ancoradas a vários níveis.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à HIDROTÉCNICA PORTUGUESA o suporte para a publicação deste trabalho.

Exprimem ainda o seu reconhecimento à SONANGOL que autorizou a sua publicação.