

ENSAIOS DE ESTACAS SUBMETIDAS A CARGAS HORIZONTAIS

PILE TESTS UNDER LATERAL LOADS

PEDRO S. SÊCO E PINTO^{*}

FERNANDO A. GUEDES DE MELO^{**}

ANTÔNIO GABRIEL F. DE SOUSA COUTINHO^{***}

SUMÁRIO

Descrevem-se os ensaios realizados, na Ponte do Arade, sobre estacas isoladas, solicitadas horizontalmente, e que visavam uma aferição dos parâmetros geotécnicos do projecto.

As estacas, com 1,10 m de diâmetro e 40 m de profundidade, foram instrumentadas, tendo-se procedido à medição das seguintes grandezas; (1) deslocamentos superficiais das cabeças das estacas; (2) rotações das cabeças das estacas; (3) deslocamentos do fuste; e (4) extensões das estacas.

Os valores calculados, recorrendo-se a formulações elásticas, foram comparados com os valores observados nos ensaios de campo.

SYNOPSIS

Single pile tests under lateral loads performed at Arade Bridge with the purposes to obtain design geotechnical parameters are described in this paper.

The piles with 1,10 m diameter and 40 m of length were instrumented and the following measurements were taken: (1) superficial deflections of head piles; (2) rotations of head piles; (3) displacements distribution along the shaft of the pile; (4) strain distribution along the shaft of the pile.

The computed results using analytical elastic models were compared with the measured values of field tests.

* Eng^o. Civil, Investigador Principal e Chefe do Núcleo de Fundações do LNEC

** Eng^o. Civil, Investigador Coordenador do LNEC

*** Eng^o. Civil, Assistente de Investigação do LNEC

1 - INTRODUÇÃO

Faz-se uma descrição das características estruturais da ponte a construir sobre o rio Arade, bem como das características geotécnicas da fundação. Explicam-se os objectivos da instrumentação, as grandezas medidas e a aparelhagem utilizada. Descreve-se a montagem do equipamento de observação, as características das estacas e dos maciços e o programa dos ensaios. Efectua-se uma análise de comportamento das estacas, recorrendo-se a formulações elásticas, e confrontam-se os valores calculados com as grandezas observadas nos ensaios de campo.

2 - CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DA PONTE

A ponte atirantada a construir sobre o rio Arade, localizada a cerca de 1km a Norte de Portimão, é constituída por um tabuleiro com três tramos de 104-256-104 metros de vão, de suspensão total a partir de duas torres de betão armado, com a forma de um "V" invertido, através de cabos múltiplos repartidos e afastados de 8 m entre si (Rito, 1987).

O tabuleiro compreende uma plataforma, de betão armado pré-esforçado, dotada de duas nervuras longitudinais tubulares que lhe conferem a rigidez necessária para resistir a fenómenos de instabilização longitudinal sob a acção das elevadas forças de compressão axial introduzidas pelos tirantes.

3 - CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DA FUNDAÇÃO

Na zona de implantação da ponte existem formações aluvionares (lodos, areias lodosas e cascalheiras de base) suprajacentes a formações rochosas (calcários do Jurássico e basaltos, em geral muito alterados, com intercalações de tufos e brechas vulcânicas).

Os calcários do Jurássico apresentam qualidade variável entre muito alterado (W4) e o são (W1), bastante diaclasados, sendo a família de diaclases mais representativa a sub-horizontal e exibem depósitos de argilas vermelhas, mais acentuadas nas camadas superficiais.

As características geotécnicas das formações aluvionares foram determinadas através da realização de ensaios SPT, CPT, corte rotativo (Tecnasol, 1987), ensaios com pressiómetro autoperfurador (Sousa Coutinho, 1987) e ensaios geofísicos (Fialho Rodrigues 1987). Foram ainda efectuados ensaios laboratoriais de determinação de índices físicos e ensaios de consolidação unidimensional.

Com base na informação geotécnica foram adoptados os seguintes parâmetros de projecto (GEPLA, 1987):

a - formação lodosa de 0 a - 12 m (SPT de 0 a 2)

$$\gamma \text{ (peso volúmico)} = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$C_u \text{ (resistência não drenada)} = 20 \text{ kPa}$$

$$E \text{ (módulo de deformabilidade estático)} = 2 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{din}} \text{ (módulo de deformabilidade dinâmico)} = 14 \text{ MPa}$$

$$\nu \text{ (coeficiente de Poisson)} = 0,5$$

$$C_v \text{ (coeficiente de consolidação)} = 8 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

b - formação areno-lodosa de 12-24 m (SPT de 10 a 12)

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3 \quad C_u = 50 \text{ kPa}$$

$$E = 5 \text{ MPa} \quad E_{\text{din}} = 35 \text{ MPa}$$

c - cascalheira de 24 - 36 m

$$E_{\text{din}} = 700 \text{ kPa}$$

4 - OBJECTIVOS DA INSTRUMENTAÇÃO

A observação de comportamento de uma estrutura visa fundamentalmente os seguintes objectivos: (i) validação dos critérios utilizados no projecto; (ii) garantia da segurança estrutural durante a sua vida útil; (iii) acúmulo de experiência com repercussões na segurança e economia das estruturas a projectar e construir no futuro.

No presente caso a instrumentação tinha em vista uma aferição dos parâmetros de cálculo devido às dificuldades existentes na compatibilização dos resultados da caracterização geotécnica. Neste contexto foram programados ensaios de divergência em 3 estacas isoladas de $\varnothing = 1,10 \text{ m}$, sendo 2 delas encabeçadas por um maciço único e a 3ª por um dado de encabeçamento. As estacas encabeçadas pelo maciço iriam funcionar simultaneamente como estacas de ensaio e como reacção.

Os eixos das estacas foram localizados no mesmo plano e a distância entre eles foi escolhida de modo a minimizar os efeitos da interacção (Ver Fig. 1).

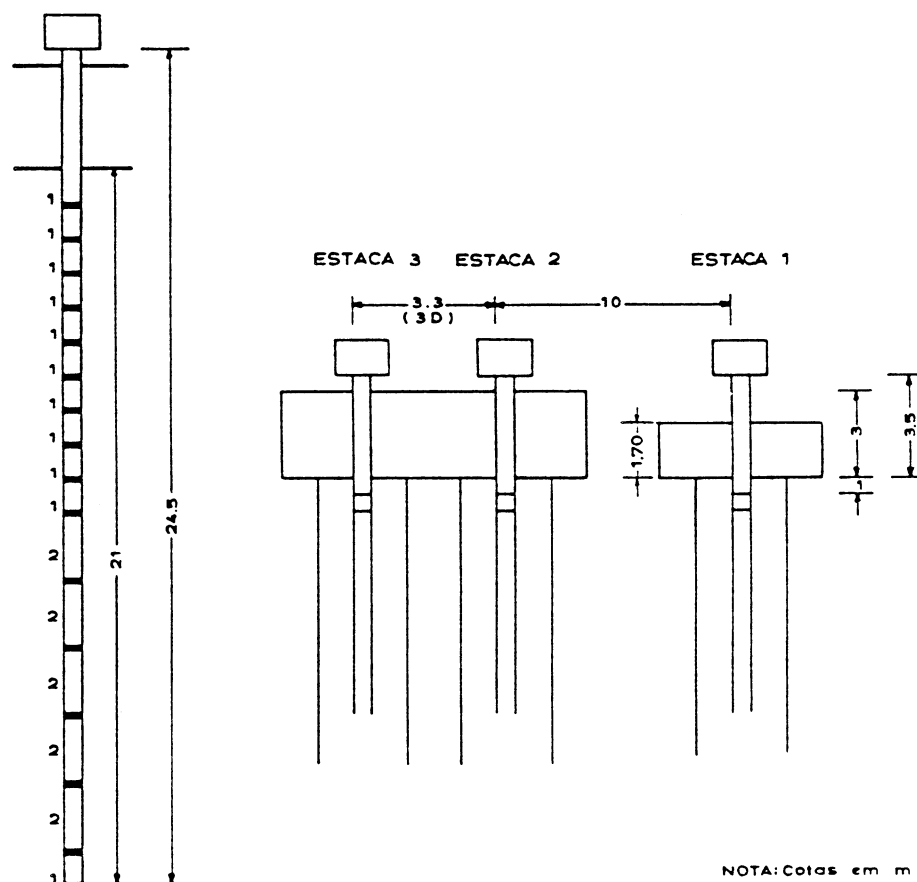


Fig. 1 - Localização esquemática das estacas.

5 - GRANDEZAS A MEDIR E APARELHAGEM UTILIZADA

Na definição do programa de instrumentação procurou-se compatibilizar dois aspectos antagónicos: alcançar os objectivos propostos na instrumentação e provocar o mínimo de perturbação nos trabalhos da obra.

Considerando que a zona das estacas em que a distribuição dos momentos fletores é significativa se circunscreve à região superior das estacas, com cerca de duas dezenas de metros, preconizou-se a colocação de extensómetros e tubos de inclinómetro nessa zona e a medição dos deslocamentos superficiais e rotações das cabeças das estacas.

Os deslocamentos superficiais das cabeças das estacas foram determinados através de 2 teodolitos electrónicos, com compensador automático da inclinação do eixo vertical e resolução angular de 1 grau, e alvos de ponteira óptica.

As rotações das cabeças das estacas foram obtidas por clinómetros com uma sensibilidade de 2 segundos sexagesimais.

A medição das rotações ao longo do fuste das estacas e o cálculo dos valores dos deslocamentos horizontais em profundidade foram efectuados pela introdução de um sensor "digitilt", com a precisão de 10^{-4} radianos, em tubos de inclinómetro rigidamente ligados à armadura da estaca.

Na medição das extensões foram colocados extensómetros, espaçados de 1 m nos 10 m iniciais e de 2 m nos restantes 10 m, perfazendo 15 pontos de medida ao longo do varão instrumentado (Tavares Cardoso et al., 1989).

Considerando ser necessário efectuar um grande número de leituras de extensões, num pequeno intervalo de tempo, foi utilizado um sistema de aquisição e processamento de informação automático constituído por 1 microcomputador, 1 unidade de disco rígido, 1 selector de canais e 1 impressora.

6 - MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE OBSERVAÇÃO

As células extensométricas foram ligadas a alongas, com diâmetro exterior de 38 mm, comprimento de 1 m (nos 10 m iniciais) e de 2 m (nos restantes 10 m), por intermédio de roscas métricas, de 30 mm de diâmetro e passo de 1 mm, constituindo assim um varão extensométrico (Fig. 2).

Não foi possível instalar o tubo de inclinómetro numa posição coincidente com o eixo da estaca pelas dificuldades que a betonagem iria provocar, tendo-se optado pela ligação do tubo à armadura da estaca numa posição mais periférica.

Não dispondo os varões extensométricos de rigidez própria e tendo sido montados na horizontal, por razões de simplicidade, tornou-se necessário posicioná-los na vertical para serem introduzidos no furo. Os varões e o tubo de inclinómetro foram instalados numa treliça, susceptível de ser colocada na vertical, através de uma grua. Apresenta-se na Fig. 3 um aspecto da introdução da treliça no furo.

A Fig. 4 ilustra um pormenor da operação de amarração dos varões extensométricos e do tubo de inclinómetro à armadura da estaca, durante a operação do levantamento da armadura. Esta foi em seguida descida para o interior do furo.



Fig. 2 - Vista geral do varão extensométrico.



Fig. 3 - Introdução da treliça no furo.

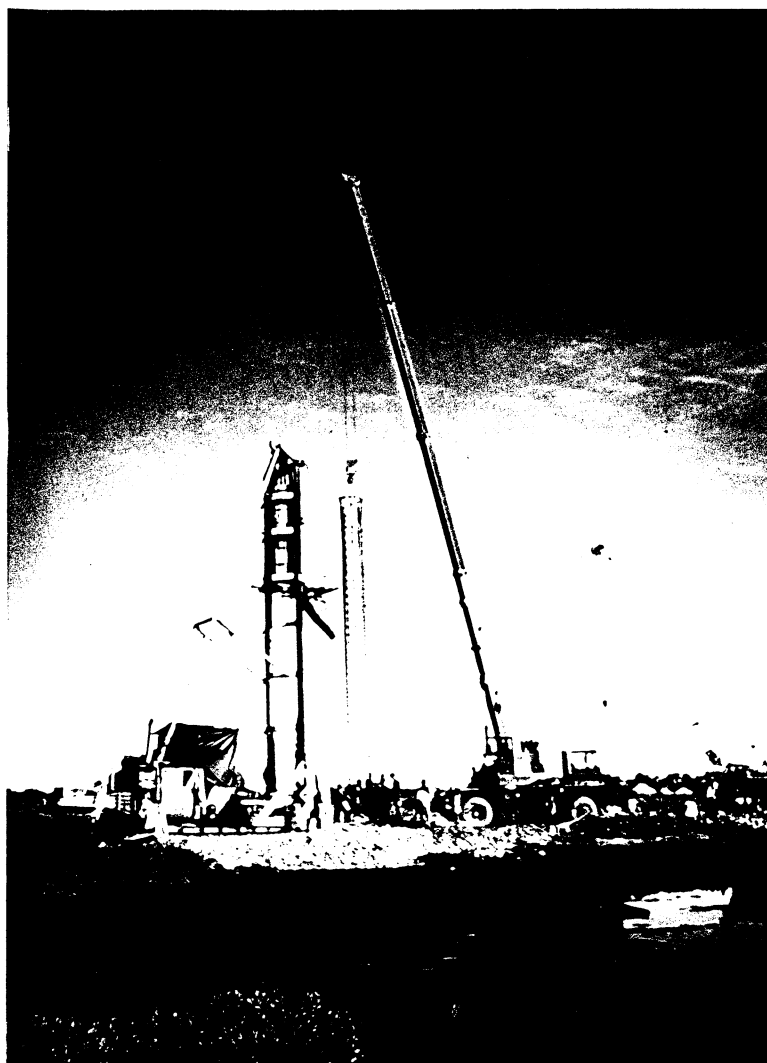


Fig. 4 - Amarração dos varões extensométricos e do tubo de inclinômetro à armadura da estaca.

7 - CARACTERÍSTICAS DAS ESTACAS E DOS MACIÇOS

Na construção das estacas utilizou-se o sistema Benotto que consiste na execução de um furo com descida de um tubo de revestimento de aço, neste caso com diâmetro exterior = 1,10 m e espessura de 5,0 mm. A extracção do solo no interior do tubo metálico foi efectuada com uma colher e a limpeza do fundo furo processou-se através de um trépano.

Após a abertura do furo procedeu-se à introdução da armadura da estaca, constituída por $12 \varnothing 25 + 2 \varnothing 8$ passo 30 e armadura helicoidal.

A betonagem das estacas foi efectuada, sem apiloamento, por um sistema de colocação em obra de betão submerso à medida que o tubo de revestimento era extraído. As estacas foram betonadas com um betão B30 BD 2.1, tendo-se procedido ao controlo do volume de betão visando uma comparação entre o volume real e o volume teórico. A Fig. 5 ilustra o aspecto das estacas instrumentadas após a betonagem.



Fig. 5 - Aspecto das estacas instrumentadas após a betonagem.

O maciço de encabeçamento das 2 estacas tem 5 m de comprimento, 1,70 m de largura e 3,0 m de altura e dispõe de uma armadura na parte superior e inferior constituída por $4 \varnothing 20 + 5 \varnothing 25$, de $\varnothing 16$ af. 0.20 na zona lateral, e de estribos $\varnothing 12$ af. 0.20.

O dado de encabeçamento da estaca isolada tem a geometria de um cubo com 1,70 m de lado e dispõe de uma armadura de $\varnothing 16$ af. 0.20 e estribos de $\varnothing 12$ af. 0.20.

As Figs. 6 e 7 apresentam, respectivamente, pormenores das armaduras do maciço e uma vista geral do maciço e do dado.

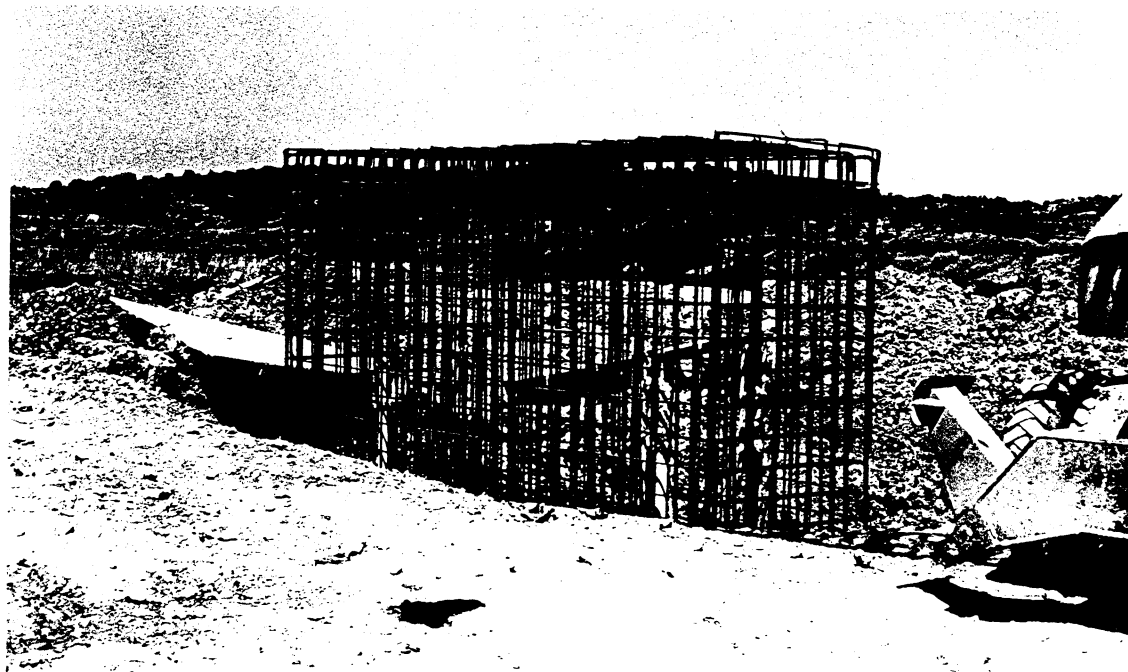


Fig. 6 - Pormenores das armaduras do maciço.

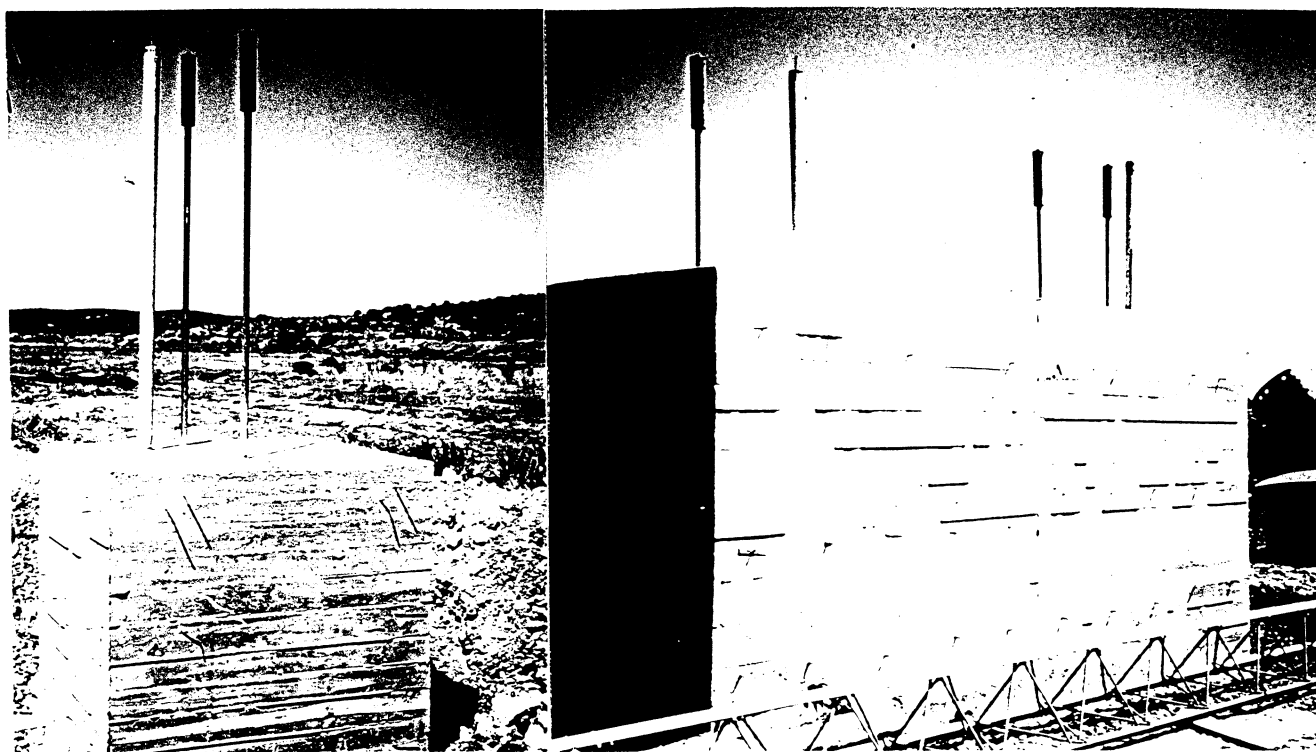


Fig. 7 - Vista geral do maciço e do dado.

8 - PROGRAMA DO ENSAIO

O ensaio realizado foi de divergência, isto é, com aplicações de forças que forçassem o afastamento entre o maciço das 2 estacas e o dado com a 3ª estaca. A aplicação das cargas foi efectuada, através de um sistema resultante de uma viga e um macaco hidráulico (Tavares Cardoso et al., 1989), por escalões, com ciclos de carga e descarga numa fase elástica, tendo o sistema sido conduzido posteriormente à rotura.

Para cada operação de carga ou descarga foram efectuadas leituras dos extensómetros, tendo-se procedido em alguns escalões a leituras dos clinómetros e grandezas topográficas. A leitura dos inclinómetros foi no entanto realizada num reduzido número de escalões devido ao tempo, relativamente elevado, envolvido nesta observação.

Em certos escalões de carga foram efectuadas observações para o mesmo valor da carga aplicada, ao fim de diferentes intervalos de tempo, visando uma análise do efeito da fluência.

A Fig. 8 ilustra uma vista geral do ensaio podendo-se observar as leituras de todos os equipamentos instalados. O ensaio foi conduzido em 87 passos com uma duração cerca de 6,5 horas.

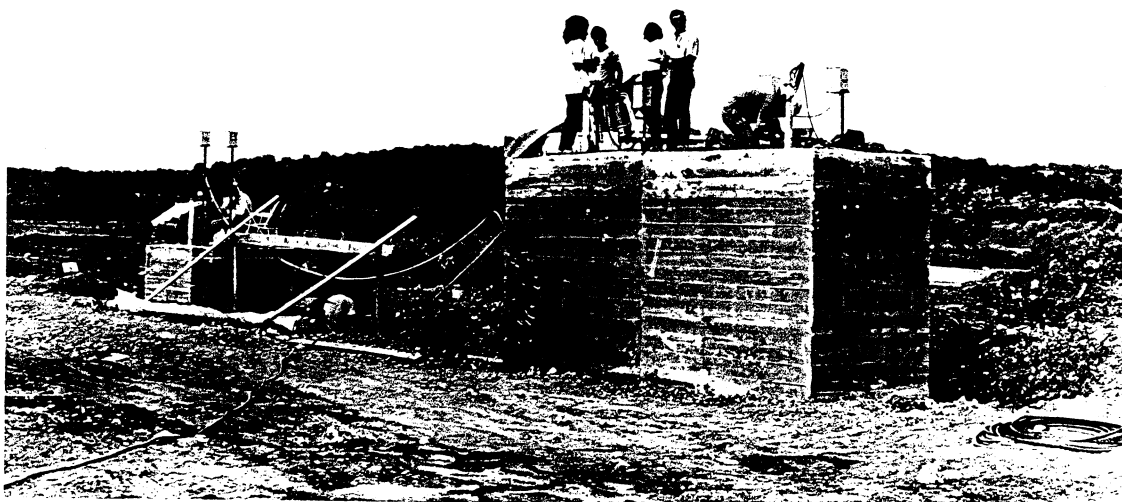


Fig. 8 - Vista geral do ensaio.

9 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os diagramas da evolução das rotações e deslocamentos das cabeças das estacas, dos deslocamentos horizontais ao longo das estacas e das extensões não são aqui reproduzidos por limitações de espaço. Apresenta-se somente na Fig. 9 um registo tipo das extensões medidas. Uma interpretação pormenorizada de todas as grandezas medidas encontra-se em Sêco e Pinto et al., (1988).

Interessa no entanto efectuar uma análise comparativa entre os valores registados pelas diferentes vias. Neste contexto apresenta-se na Fig. 10 uma comparação entre os deslocamentos da cabeça da estaca nº 1 obtidos pelas via topográfica e através dos inclinómetros, podendo-se constatar uma boa concordância entre os valores observados. A Fig. 11 ilustra uma comparação entre as rotações da cabeça da estaca nº 1 através dos valores obtidos nos clinómetros e os valores observados no tubo de inclinómetro, podendo-se registar também uma boa aderência entre os valores obtidos pelas duas vias.

É ainda de referir que os valores medidos das extensões possibilitaram o traçado do diagrama dos momentos flectores da estaca.

10 - ANÁLISE DE COMPORTAMENTO

A análise de comportamento da estaca foi efectuada através da solução do módulo de reacção que apresenta o inconveniente de considerar o solo como material descontínuo, mas tem a vantagem da simplicidade, da experiência acumulada e da sua grande aplicação na resolução de problemas práticos. Nesta formulação admite-se o modelo de Winkler, em que a pressão p está relacionada com o deslocamento l , através do módulo de reacção k_h , segundo a equação:

$$p = k_h l \quad (1)$$

ESTACA: 1
E m_{dx} : 100 E - 6

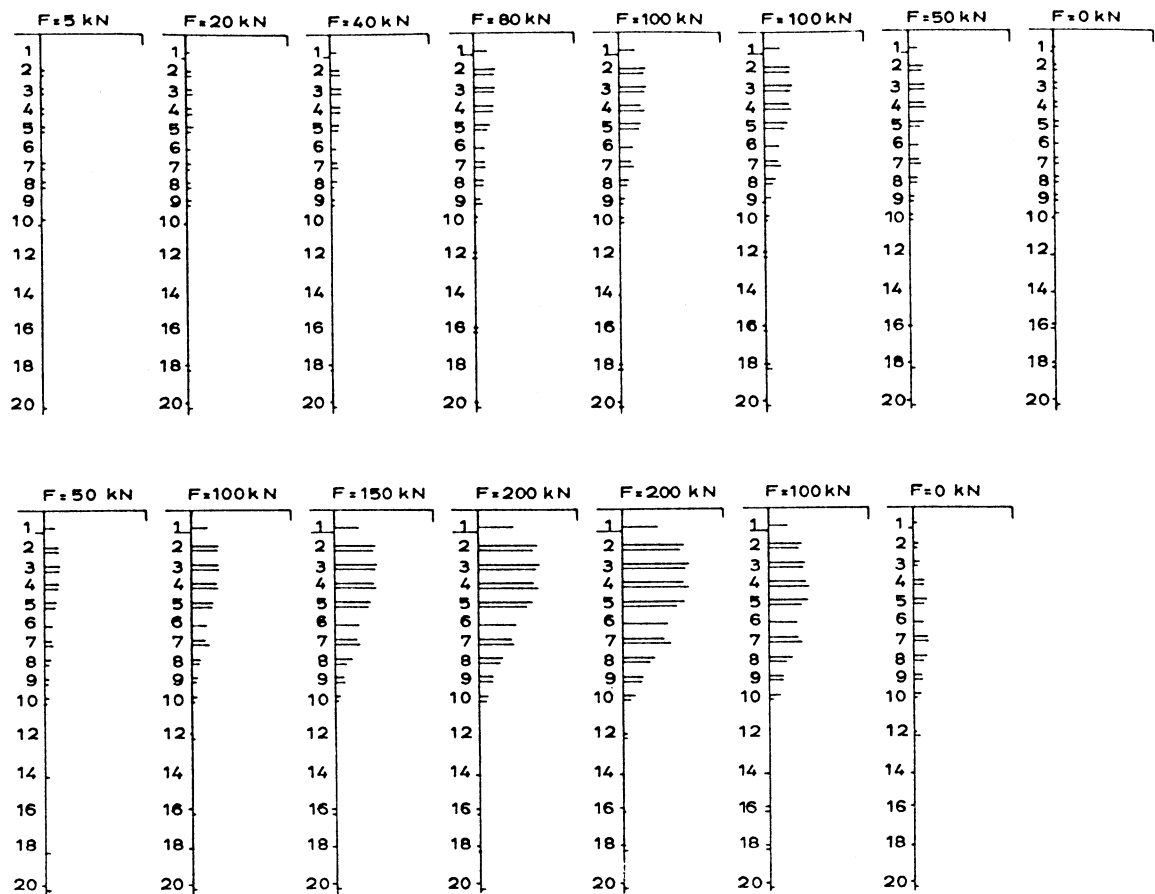


Fig. 9 - Registro tipo das extensões.

Considerando a estaca com um comportamento análogo ao de uma viga obtem-se

$$E_e I_e \frac{d^4 l}{dz^4} = - p d \quad (2)$$

em que E_e é o módulo de elasticidade da estaca, I_e é o momento de inércia da estaca e d é o diâmetro da estaca.

Combinando as equações (1) e (2) resulta

$$E_e I_e \frac{d^4 l}{dz^4} + k_h d l = 0 \quad (3)$$

A solução desta equação pode ser obtida analítica ou numericamente.

Admitindo um módulo de reacção constante com a profundidade fez-se um estudo paramétrico com base nas seguintes hipóteses:

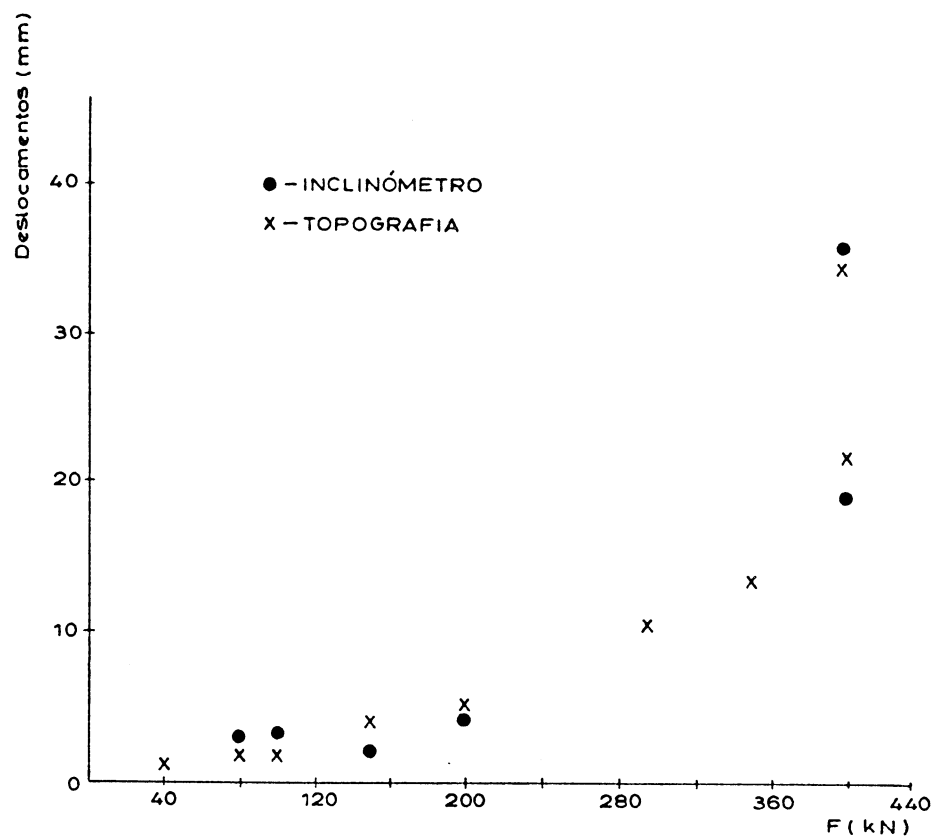


Fig. 10 - Deslocamentos da cabeça da estaca 1 - Comparação entre os valores obtidos por via topográfica e as observações com o inclinômetro.

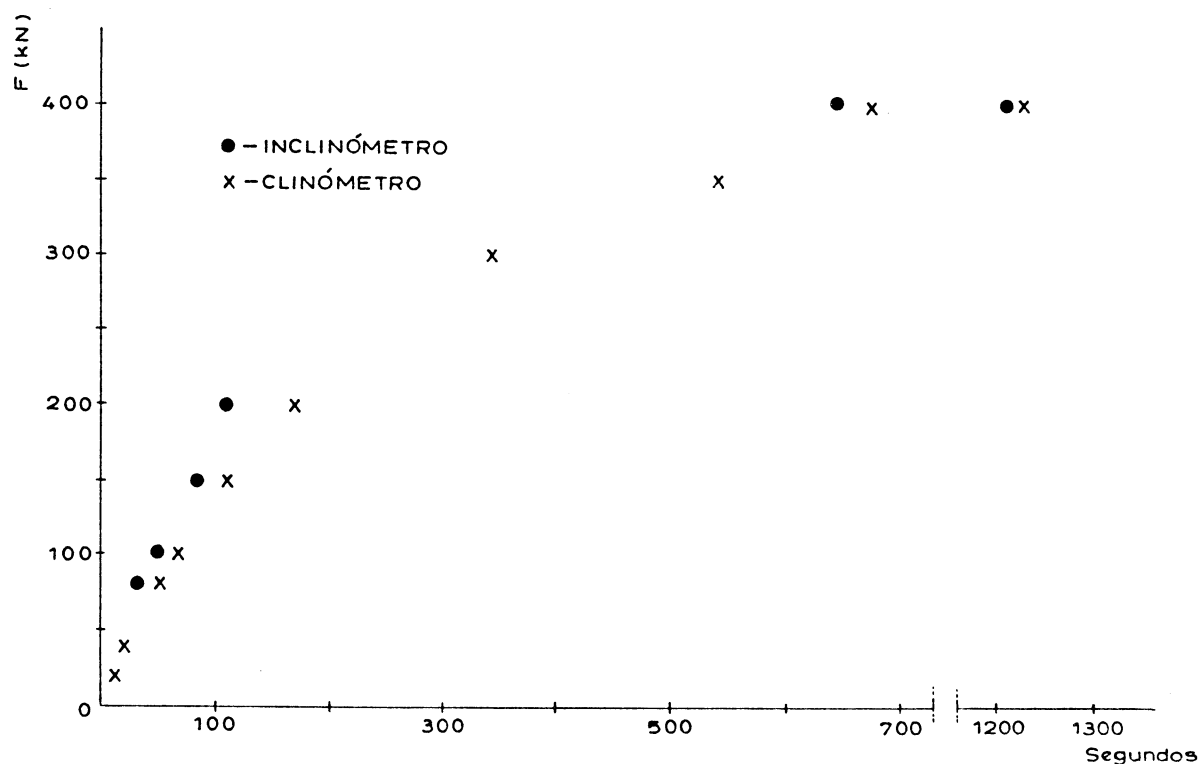


Fig. 11 - Rotações da cabeça da estaca 1 - Comparação dos valores obtidos por medição directa através do clinômetro e dos valores observados no inclinômetro.

Dados geométricos e físicos da estaca

Comprimento da estaca - 20,0 m

Diâmetro da estaca - 1,10 m

Módulo de elasticidade - 29×10^6 kPa

Acções na cabeça da estaca

Força transversal ao eixo da estaca

80, 100, 150, 200, 300, 400 kN

Momento 24, 30, 45, 60, 90, 120 kNm

Condições da reacção do terreno

Módulo de reacção constante em profundidade

Módulo mínimo - 1500 kN/m^2

Módulo máximo - 6500 kN/m^2

Incremento - 250 kN/m^2

Coeficiente de Poisson - 0.5

Para as diferentes combinações das acções na cabeça da estaca e dos módulos de reacção foram obtidos os valores dos deslocamentos, rotações, momentos fletores, esforços de corte e reacções do terreno com a profundidade.

Apresenta-se, na Fig. 12, a título exemplificativo, os resultados para um módulo de reacção do terreno de $k = 6000 \text{ kN/m}^2$ e acções na cabeça da estaca de $T = 400 \text{ kN}$ e $M = 120 \text{ kNm}$.

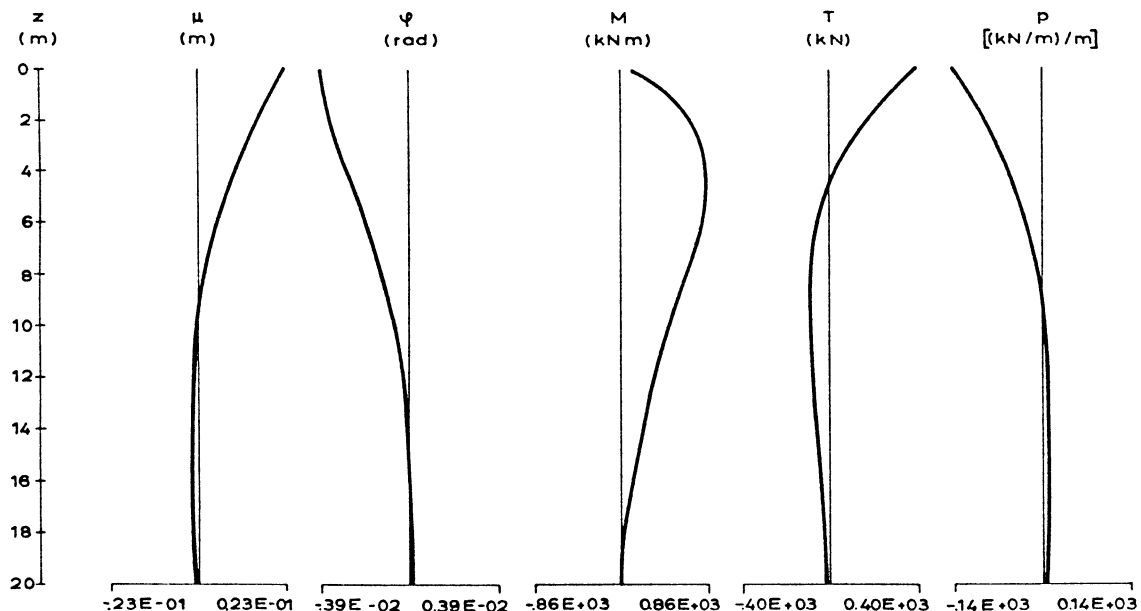


Fig. 12 - Ensaio de carga horizontal de uma estaca. Módulo de reacção constante com a profundidade: $k = 0,60 \text{ E} + 0,4 (\text{kN/m}^2)$

Acções na cabeça da estaca: $M = 0,12 \text{ E} + 0,3 \text{ kNm}$ $T = 0,40 \text{ E} + 0,3 \text{ kN}$

Considerando um modelo estratificado para o solo e a estaca discretizada em elementos finitos de barra foram analisadas as seguintes hipóteses:

1ª. Hipótese

0 a 10 m de profundidade	$k = 2000 \text{ kPa}$
10 - 12 m de profundidade	$k \text{ varia de } 2000 - 5000 \text{ kPa}$
12 - 26 m de profundidade	$k = 5000 \text{ kPa}$
profundidade superior a 26 m	$k = 100\,000 \text{ kPa}$

2ª. Hipótese

0 a 12 m de profundidade	$k \text{ varia de } 4000 - 6000 \text{ kPa}$
12 - 26 m de profundidade	$k = 6000 \text{ kPa}$
profundidade superior a 26 m	$k = 100\,000 \text{ kPa}$

3ª. Hipótese

0 a 12 m de profundidade	$k \text{ varia de } 6000 - 8000 \text{ kPa}$
12 - 26 m de profundidade	$k = 8000 \text{ kPa}$
profundidade superior a 26 m	$k = 100\,000 \text{ kPa}$

Para as forças horizontais actuantes na cabeça da estaca de 80, 100, 150, 200, 300 e 400 kN foram calculados os deslocamentos e as rotações dos nós, bem como os valores dos momentos flectores e esforços transversos nas barras.

A Fig. 13 ilustra os resultados obtidos para a 3ª hipótese de módulo de reacção variável e considerando para acções na cabeça da estaca $T = 400 \text{ kN}$ e $M = 120 \text{ kNm}$.

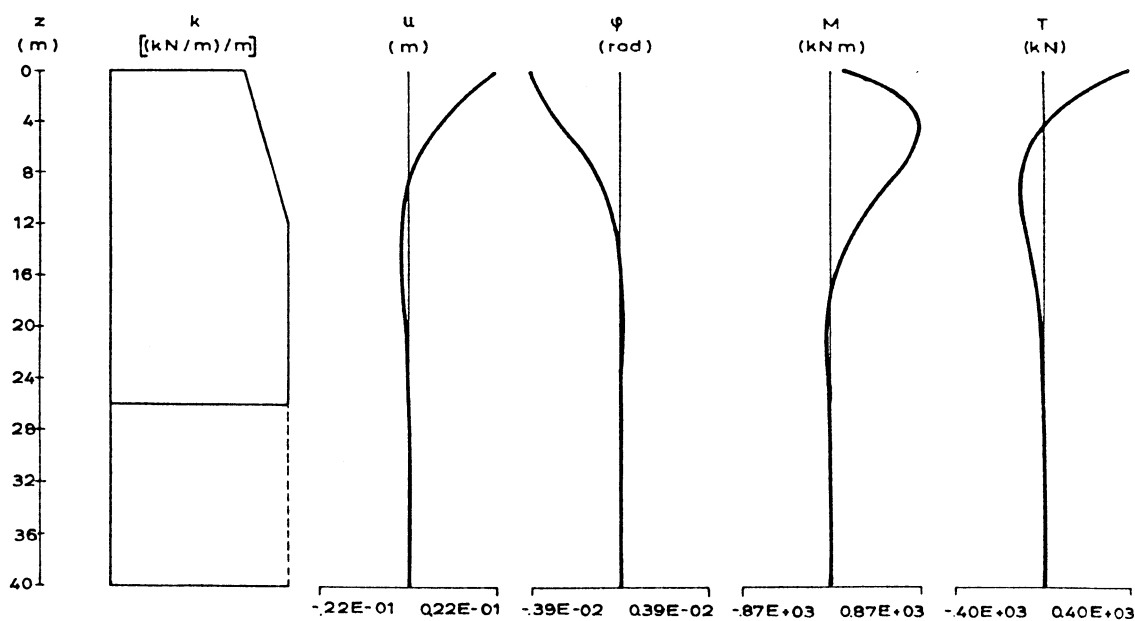


Fig. 13 - Ensaio de carga horizontal de uma estaca. Módulo de reacção variável. Acções na cabeça da estaca: $M = 0,12 \text{ E} + 0,3 \text{ kNm}$ $T = 0,40 \text{ E} + 0,3 \text{ kN}$.

Uma análise detalhada dos resultados explorados pelos dois modelos de comportamento do solo (módulo de reacção constante e módulo de reacção variável) e para as diferentes acções na cabeça das estacas pode encontrar-se em Sêco e Pinto et al. (1988).

Da análise dos resultados obtidos constata-se não ser possível um ajustamento perfeito entre os valores observados e os valores previstos para as hipóteses de módulo de reacção constante e módulo de reacção variável com a profundidade. As curvas que mais se aproximam correspondem a um valor de $k = 6000 \text{ kN/m}^2$. Os desvios observados podem ser explicados pelas limitações inerentes à hipótese do comportamento elástico do solo, que se adoptou na determinação dos valores teóricos, e pelos erros cometidos nas leituras, resultantes da precisão dos equipamentos de observação.

11 - CONCLUSÕES

Do anteriormente exposto explicitam-se as seguintes conclusões:

- 1) Os equipamentos de observação instalados, para a medição das extensões e deslocamentos do fuste da estaca, bem como para a medição dos deslocamentos superficiais e rotações das cabeças das estacas, deram uma resposta satisfatória.
- 2) Os sistemas projectados para posicionar os varões extensométricos e os tubos de inclinómetro, bem como para aplicação das cargas cumpriram integralmente as suas funções.
- 3) Foi conseguida uma boa concordância entre os deslocamentos da cabeça da estaca obtidos pela via topográfica e através dos deslocamentos observados nos tubos de inclinómetro. Para pequenos valores de medida registados essa concordância foi menos boa, o que poderá ser explicada pela grande influência dos erros dos equipamentos de leitura.
- 4) Constatou-se uma boa aderência para as rotações da cabeça da estaca obtidas nos clinómetros e através dos valores observados nos tubos de inclinómetro. É no entanto de referir a existência de uma dispersão para baixos valores de medida em que a influência dos erros dos equipamentos de leitura é elevada.
- 5) Os resultados medidos nos extensómetros foram muito satisfatórios tendo possibilitado o traçado do diagrama dos momentos flectores na estaca.
- 6) O estudo paramétrico efectuado, através da solução do módulo de reacção constante, revelou para $k = 6000 \text{ kN/m}^2$ uma melhor aderência aos valores observados.
- 7) O estudo realizado, considerando um modelo estratificado para o solo e recorrendo a elementos finitos de barra, mostrou a grande influência das características geotécnicas do estrato superior, com cerca de 10 m de espessura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Junta Autónoma de Estradas a autorização para publicar os resultados deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fialho Rodrigues, L. (1987) - "Ensaaios de caracterização dinâmica, por métodos sísmicos, dos terrenos de fundação da nova Ponte sobre o Rio Arade, em Portimão", LNEC - Núcleo de Prospeção. Relatório.
- GEPLA (1987) - "Ponte do Arade", Portimão. Fundações e Aterros.
- Rito, A. (1987) - "Pontes sobre o Rio Arade e sobre a Ribeira de Boia". Anteprojecto. Memória.
- Sêco e Pinto, P.S., Sousa Coutinho, A., Guedes de Melo, F.A., Tavares Cardoso, E., Toco Emílio, F. e Almeida Garrett, J. (1988) - "Ensaaios de carga horizontal em estacas da Ponte do Arade", LNEC - Núcleo de Fundações. Relatório.
- Sousa Coutinho, A.G. (1987) - Ponte sobre o Rio Arade (Portimão). Ensaaios Pres - siométricos", LNEC - Núcleo de Fundações. Relatório.
- TECNASOL (1987) - "Pontes sobre o rio Arade e Ribeira da Boia". Relatório do reconhecimento geológico.
- Tavares Cardoso, E., Toco Emílio, F., e Almeida Garrett, J. (1989) - "Instrumentação de estacas para a realização de ensaios sob cargas horizontais". Comunicação apresentada ao 3º Encontro Nacional de Geotecnia, Porto.