

# ENSAIO DE CARGA HORIZONTAL NO TOPO LIVRE DUMA ESTACA\*

## Horizontal load test on free head pile

por

F. A. GUEDES DE MELO\*\*

M. ESTEVES FERREIRA\*\*

**RESUMO** — A fundação das duas torres da ponte internacional sobre o Rio Guadiana é constituída por grupos de estacas de grande diâmetro que atravessam uma espessa camada aluvial. Para suportar os estudos de projecto, foi realizado um ensaio de carga horizontal numa estaca de betão de 0,80 m de diâmetro, executada exclusivamente para este fim. Apresentam-se neste trabalho os resultados do ensaio e a sua interpretação.

**SYNOPSIS** — The foundation of the two main towers of the international bridge over Guadiana river consists of groups of large diameter piles crossing a thick alluvial layer. In order to give support to the design studies concerning the effect of horizontal loads an in situ test was carried out on a concrete pile, 0.80 m diameter, exclusively built for that purpose. Details on the test performance and the interpretation of results obtained are supplied.

## 1 — INTRODUÇÃO

A ponte internacional sobre o Rio Guadiana entre Vila Real de Santo António e Ayamonte é uma ponte suspensa com tirantes, de 660 m de comprimento, com um vão central de 324 m, dois vãos laterais de 135 m e dois vãos curtos de 36 m junto aos encontros.

O tabuleiro é uma viga contínua de betão, suspensa das duas torres por cabos e apoiada nas vigas transversais das torres, nos pilares localizados nos extremos dos vãos laterais e nos encontros.

As condições geotécnicas da fundação das duas torres, nomeadamente a existência de uma espessa camada aluvionar, compeliram os projectistas a adoptar uma solução em estacas. No entanto, durante os estudos preliminares, foram analisadas outras soluções, v. g., caixões, estacas de diferentes diâmetros e paredes moldadas.

A solução final do projecto foi escolhida pelo Comité Técnico Luso-Espanhol e é constituída por estacas de betão de 1,5 m de diâmetro.

---

\* Versão em português de uma comunicação apresentada na 12.<sup>a</sup> Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro, Agosto de 1989.

\*\* Engenheiro Civil, Investigador-Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

A caracterização geotécnica das condições locais permitiu a definição dos valores de projecto dos parâmetros geotécnicos. Apesar disso, foi considerado vantajoso basear a análise de projecto, no que respeita ao comportamento das estacas sob forças horizontais, nos resultados do ensaio *in situ* de estacas. Com este objectivo foi especialmente construída uma estaca próxima do local da fundação de uma das duas torres.

Na presente comunicação são apresentados pormenores respeitantes às condições geotécnicas locais, às características da estaca e à instrumentação utilizada e destacados alguns aspectos relacionados com a interpretação dos resultados.

## 2 — CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS

Do ponto de vista geotécnico, o local da ponte do Guadiana é um vale aluvial escavado numa formação rochosa de xistos e grauvaques, actualmente cheio com um depósito aluvionar de lodo, areia e areia lodosa, com uma espessura máxima de cerca de 70 m.

Para obter um conhecimento adequado das condições locais foi realizado um programa de reconhecimento, dando particular atenção à caracterização do comportamento da aluvião. Este programa incluía prospecção sísmica, sondagens, ensaios SPT e CPT, ensaios de corte rotativo e também ensaios laboratoriais.

A interpretação do conjunto da informação respeitante à zona da torre do lado de Portugal, onde o ensaio da estaca foi executado, é apresentada na Fig. 1.

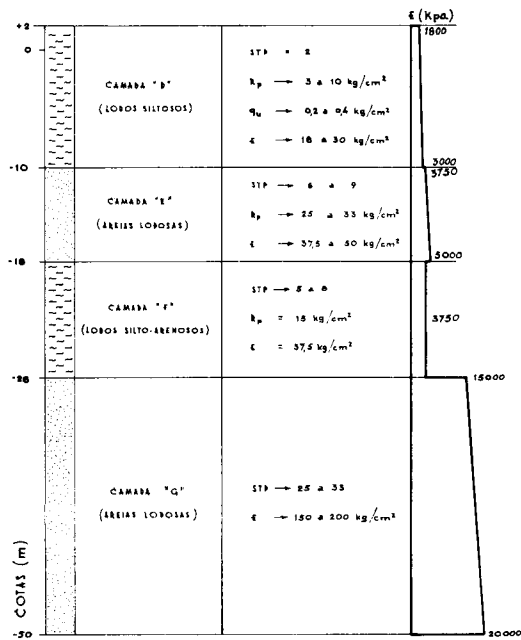


Fig. 1 — Modelo geológico-geotécnico definido para o local do ensaio

### 3 — ESTACA

A estaca de betão armado ensaiada foi moldada *in situ* e atravessou toda a espessura dos aluviões, pelo que o seu comprimento foi de 42 m.

Como o diâmetro da estaca previsto no projecto era de 1,5 m, este seria também naturalmente o valor mais apropriado para diâmetro da estaca de ensaio. Contudo, devido ao alto custo envolvido na construção de uma única estaca com este diâmetro, foi decidido realizar o ensaio com uma estaca de diâmetro 0,80 m. A armadura foi constituída por 6 varões de 20 mm e 6 de 16 mm.

### 4 — SISTEMA DE CARGA

O sistema de carga incluiu uma segunda estaca, a 2,40 m (entre eixos) da outra, e uma estrutura metálica que se apoiava nas duas estacas. Na parte central desta estrutura havia um varão de 32 mm que atravessava não só as estacas mas também as barras transversais da estrutura. As forças horizontais eram aplicadas por um macaco hidráulico ligado ao varão num dos seus extremos.

### 5 — INSTRUMENTAÇÃO DA ESTACA

A análise teórica do comportamento esperado da estaca enterrada na camada aluvionar mostrou que, para profundidades superiores a 12 m, não haveria momentos flectores, pelo que se instrumentaram apenas os primeiros 20 m de estaca. Pretendeu-se medir deslocamentos horizontais, rotações e extensões.

Os deslocamentos horizontais foram medidos com um inclinómetro eléctrico operando dentro de um tubo metálico embebido no betão da estaca. Os deslocamentos da cabeça da estaca foram medidos simultaneamente por meio de métodos topográficos.

As rotações ao longo da estaca foram medidas também por meio do inclinómetro, tendo as da cabeça da estaca tendo sido simultaneamente medidas com clinómetros de alta precisão.

Fez-se uma tentativa para medir extensões por meio de extensómetros eléctricos colados directamente em dois varões da armadura. Estes varões, cada um com 20 extensómetros afastados 1 m, foram instalados na estaca em posições diametralmente opostas e no plano das forças actuantes. Numa barra metálica foram colados os 40 extensómetros compensadores das pontes Wheatstone com ligações que só permitiam ler tracções ou compressões; esta barra foi colocada num tubo metálico embebido no betão da estaca quando da betonagem.

### 6 — PROGRAMA DE ENSAIOS

Foram aplicados sucessivos ciclos de carga e descarga à cabeça das estacas, fazendo-as mover em direcções opostas. O número de passos de carga foi de 38 e a máxima carga aplicada foi de 2500 kN.

7— ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A análise dos resultados mostrou que os valores dos deslocamentos horizontais e das rotações da cabeça da estaca sob acção das forças horizontais, quando medidos com o inclinómetro, eram muito próximos dos obtidos pelo método topográfico e pelo clinómetro, como pode ser observado nas Figs. 2 e 3. Esta confirmação das medições na cabeça da estaca dá grande confiança às medidas de rotações e de deslocamentos ao longo dela.

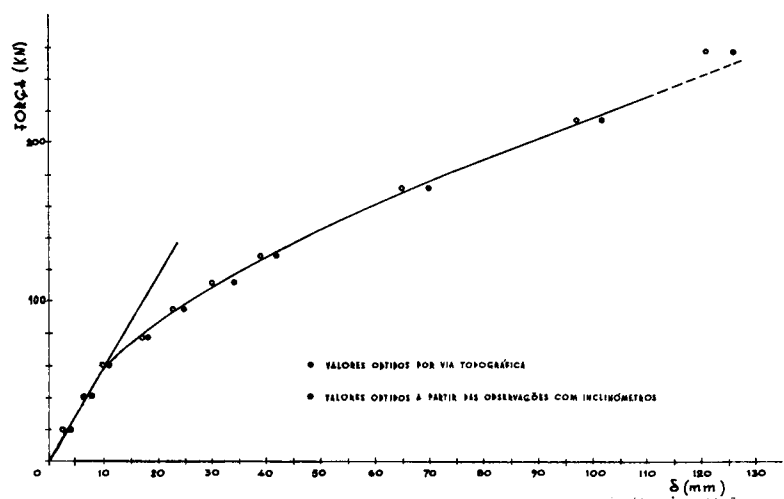


Fig. 2 — Deslocamentos na cabeça da estaca: comparação de valores obtidos por via topográfica e valores deduzidos a partir de observações com inclinómetro

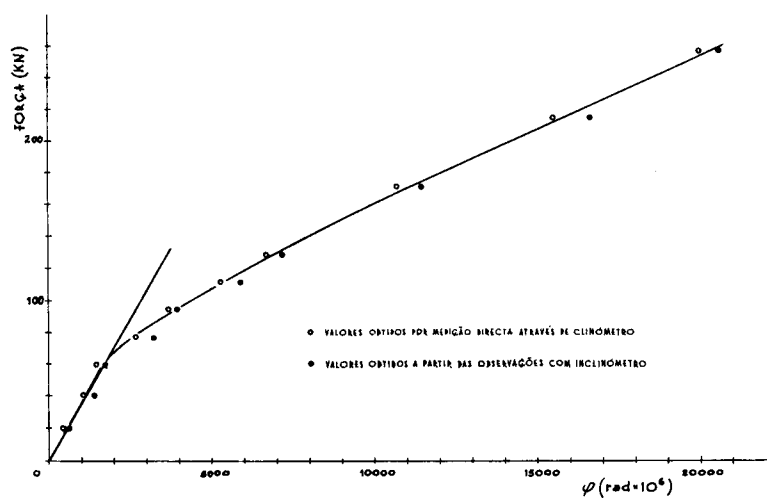


Fig. 3 — Rotações da cabeça da estaca: comparação de valores obtidos por medição directa através de clinómetro e de valores deduzidos a partir de observações com inclinómetro

Os deslocamentos horizontais para cada nível de carga aplicada são apresentados na Fig. 4.

De acordo com os resultados apresentados nas Figs. 2 e 3 o comportamento estaca-solo foi aproximadamente elástico até 60 kN. Na Fig. 5, que mostra o andamento dos deslocamentos sob força unitária ( $d/f$ ) ao longo da estaca, a zona correspondente ao comportamento elástico ( $f < 60$  kN) é mostrada a sombreado. Na mesma figura são apresentados os diagramas obtidos a partir da solução teórica baseada no modelo de Winkler para o comportamento do solo, correspondendo cada diagrama a um valor particular do coeficiente de reacção  $k$ . Estes foram obtidos multiplicando o módulo da elasticidade  $E$  (previamente definido para as diferentes formações geológicas identificadas no estudo geotécnico) por um parâmetro  $\alpha$  ( $K = \alpha E$ ). Como se pode ver, a curva obtida com  $\alpha = 1,10$  fica, aproximadamente, no centro da área correspondente às cargas até 60 kN, principalmente na zona superior da estaca.

Na Fig. 6 apresenta-se uma análise semelhante para as rotações. Neste caso, o esquema de abordagem mostra-se igualmente adequado, embora só na parte superior.

Os deslocamentos horizontais e as rotações mostram que a estaca não exhibe praticamente flexões a profundidades superiores a 13 m, mesmo para os mais altos níveis de carga horizontal (Fig. 4).

As extensões obtidas a partir dos extensómetros eléctricos não permitiram extrair qualquer conclusão. Julga-se que para tal concorreram a técnica usada para a colagem e isolamento dos extensómetros e, eventualmente, as más condições atmosféricas que teriam afectado o sistema de leitura e aquisição de dados de que então se dispunha.

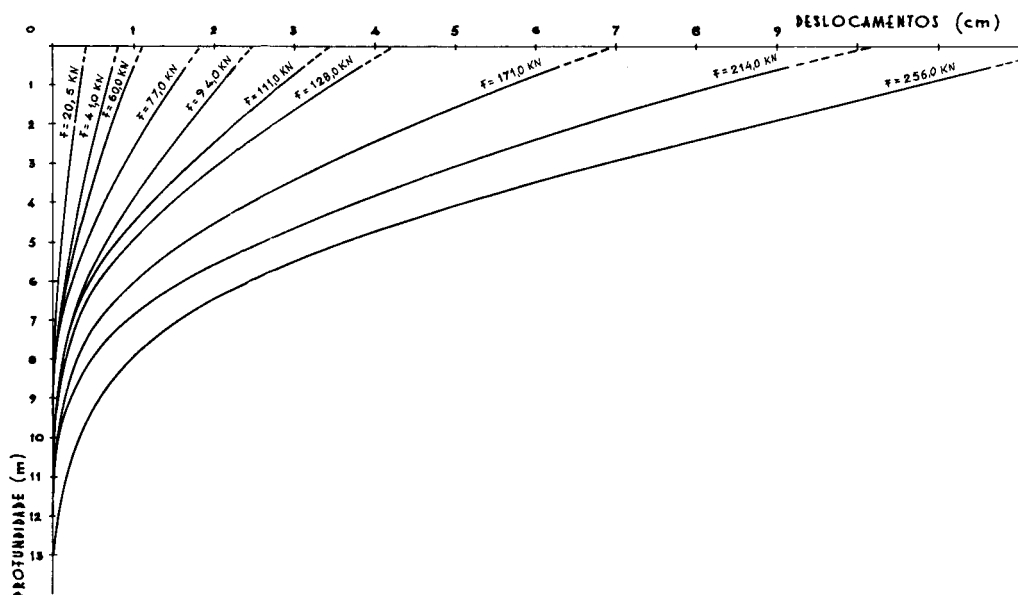


Fig. 4 — Deslocamentos horizontais ao longo da estaca: inclinómetro CL1

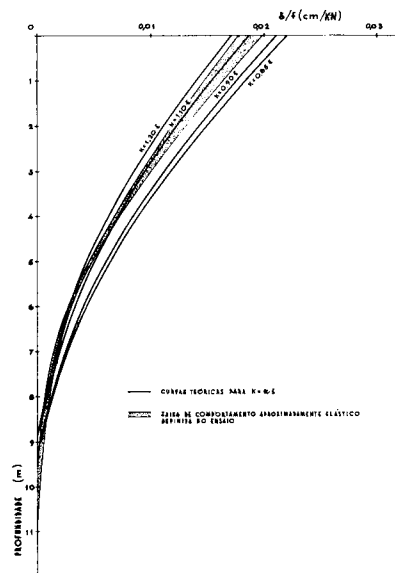


Fig. 5 — Deformações horizontais: comparação dos resultados do ensaio com curvas teóricas correspondentes a  $K = \alpha E$  com  $E$  variável com a profundidade

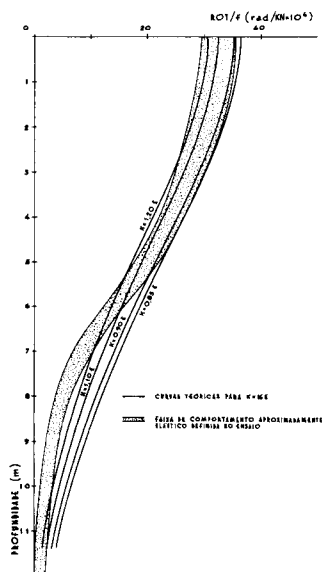


Fig. 6 — Rotações da estaca: comparação de valores medidos com os valores teóricos correspondentes a respostas do solo com  $K = \alpha E$  com  $E$  variável com a profundidade

## 8 — CONCLUSÕES

As conclusões mais importantes extraídas dos ensaios foram as seguintes:

- a) O projecto do sistema de carga foi adequado, pois este exibiu um bom comportamento durante os ensaios;
- b) A qualidade da informação dada pelos inclinómetros foi muito boa como resulta da comparação com os valores obtidos, na cabeça da estaca, para os deslocamentos horizontais medidos por métodos topográficos e para as rotações medidas com os clinómetros de alta precisão;
- c) Os resultados obtidos com extensómetros eléctricos foram muitíssimo fracos, o que impediu qualquer interpretação.
- d) A compatibilidade entre a informação geotécnica obtida a partir dos ensaios habituais e do ensaio da estaca foi boa, o que reforçou a confiança nos parâmetros de projecto deduzidos dos ensaios geotécnicos;
- e) O reconhecimento de que, apesar do grande valor da informação obtida com os ensaios da estaca, nomeadamente para o projecto da fundação da ponte, esta informação teria sido muito mais importante se as medições com extensómetros eléctricos tivessem sido boas.

A interacção estaca-solo só pode ser bem conhecida se se usar um sistema muito preciso de medições. No que respeita às medições na cabeça da estaca, foi possível usar alternativas muito fiáveis; contudo, para as outras secções ao longo da estaca, as alternativas até agora ensaiadas não têm resultado, pelo que o uso de extensómetros eléctricos foi considerado promissor, nomeadamente para o estudo do efeito de grupo nas estacas.

Por estas razões, os autores, em face da experiência obtida com este ensaio, conceberam uma técnica para medir extensões em estacas usando extensómetros eléctricos, colando-os no interior de um curto tubo metálico semelhante aos varões da armadura. Este, prolongado por tubos-alongas exactamente com o mesmo diâmetro exterior, permitia a passagem dos condutores das pontes de Wheatstone e protegia-os. Esta tecnologia foi, entretanto, desenvolvida no LNEC [1] e foi já utilizada com bons resultados num ensaio de estacas realizado para o projecto de uma fundação de outra ponte [2].

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TAVARES CARDOSO, E.; TOCO EMÍLIO, F.; ALMEIDA GARRET, J. L. — *Instrumentação de estacas para a realização de ensaios sob cargas horizontais*. 3º. Encontro Nacional de Geotecnia, vol. 2, Porto, 20 a 22 de Março de 1989.
- [2] SECO PINTO, P.; GUEDES DE MELO, F.; SOUSA COUTINHO, A. — *Ensaio de estacas submetidas a cargas horizontais*. 3º. Encontro Nacional de Geotecnia, vol. 2, Porto, 20 a 22 de Março de 1989.