

ENSAIOS SÓNICOS PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE ESTACAS DE BETÃO*

Integrity Pile Testing by Sonic Methods

por

J. MOURA ESTEVES**

L. FIALHO RODRIGUES***

RESUMO — Apresentam-se as bases do método sónico para avaliação da integridade de estacas e descrevem-se as técnicas de ensaio com o equipamento disponível no LNEC. São apresentados registos correspondentes a diversas estacas com irregularidades físicas ao longo do seu fuste.

Salientam-se as potencialidades do método e o seu interesse para o controlo de grande número de estacas, por se tratar de um método bastante rápido e económico.

SYNOPSIS — The paper presents the sonic method for pile integrity testing. The theoretical bases of the method, the equipments and field procedures are described.

Some records corresponding to piles with distinct structural features are presented and commented.

Finally, the capabilities and limitations of the method for integrity pile testing are described.

1 — INTRODUÇÃO

A execução de estacas de betão como elemento de fundação de estruturas de grande porte (pontes, instalações fabris e portuárias, etc.), implantadas em zonas de ocorrência de terrenos muito brandos sobre um substrato rochoso, tem conhecido um apreciável incremento em Portugal.

As situações em que se recorre com maior frequência a este tipo de fundação estão relacionadas com a ocorrência de formações aluvionares recentes que, perto da foz dos principais rios portugueses, chegam a atingir cerca de 70 a 80 m de espessura.

As estacas quase exclusivamente utilizadas são as moldadas *in situ*, já que as prefabricadas e depois cravadas no terreno não são hoje em dia praticamente usadas entre nós.

Um dos processos mais utilizados na fabricação de estacas moldadas consiste em executar um furo com extracção do terreno, contendo as suas paredes por meio de lamas pesadas, e em seguida substituir estas lamas pelo betão que irá constituir a estaca.

* Trabalho recebido em Dezembro de 1987. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Engenheiro Civil, Investigador-Coordenador do LNEC.

*** Geólogo, Investigador Principal do LNEC.

Outro processo também utilizado em Portugal consiste em cravar um tubo sem extracção do terreno, através de pancadas com um pilão aplicadas: a) numa bucha de betão colocada na base do tubo e que penetra ligeiramente no terreno e cuja parte superior fortemente comprimida contra as paredes do tubo o vai arrastando por atrito; b) ou na parte superior do tubo, por ter sido vedada logo de início a sua parte inferior com uma chapa metálica apropriada. Atingida a profundidade pretendida procede-se à execução de uma base alargada através da adição de betão que é fortemente apiloado. Em seguida executa-se o fuste da estaca apiloando o betão em camadas sucessivas com arrancamento progressivo do tubo.

Embora se faça habitualmente o controlo do betão usado na fabricação e também do seu modo e volume de colocação, ficam sempre algumas dúvidas sobre a estrutura final da estaca, pois ela fica inacessível e não é possível a sua inspecção visual. Por outro lado, a "carotagem" sistemática das estacas não parece ser norma a recomendar, já que, além do seu elevado custo e dificuldades de execução, pode não fornecer resultados representativos nas estacas de grande diâmetro, da ordem de 15 vezes o diâmetro da sondagem.

Pelos motivos apontados procede-se quase sempre, pelo menos nos projectos mais importantes, a ensaios de carga estática para ajuizar do comportamento estrutural das estacas. No entanto, como estes ensaios são de execução relativamente demorada e de elevado custo, dadas as grandes cargas que é necessário mobilizar, acaba por se realizar um número muito reduzido de ensaios em relação à quantidade de estacas fabricadas.

Na tentativa de ultrapassar estas limitações têm sido realizados estudos visando o desenvolvimento e implementação de técnicas expeditas e não destrutivas de ensaio de estacas (Rodrigues e Esteves, 1985).

Com a sua aplicação pretende-se, por um lado, detectar as principais singularidades estruturais das estacas e, por outro, levar a cabo, a custo relativamente reduzido e em curto espaço de tempo, um assinalável número de ensaios.

É objectivo do presente trabalho fazer a descrição dos princípios em que se baseia a aplicação deste método na avaliação da integridade de estacas de betão e das técnicas e equipamento usados na execução dos ensaios e apresentar ainda alguns dos resultados mais significativos que têm sido alcançados até ao momento.

2 — PROPAGAÇÃO DE ONDAS SÓNICAS DE TENSÃO

2.1 — Bases do método

A aplicação do método sónico para avaliação da integridade de estacas baseia-se na possibilidade de detecção de descontinuidades no corpo da estaca através da análise das características de propagação de ondas sónicas de tensão originadas na cabeça da própria estaca, constituindo assim como que uma sondagem acústica.

Como se sabe, a vibração longitudinal numa estaca pode ser estudada através da equação de onda para uma barra prismática. Mas constituindo o método sónico um processo para avaliar qualitativamente as condições de integridade da estaca bastará, neste trabalho, evidenciar qualitativamente também como se processa a propagação das vibrações na estaca.

Como se disse, a estaca pode, fundamentalmente, trabalhar por ponta (transferindo as acções que lhe são aplicadas para uma base bastante rígida) ou por atrito lateral (designada por estaca flutuante). De acordo com estas condições de fronteira ocorrerão diferentes tipos de ondas de vibração.

Uma interpretação física simples, devida a Timoshenko and Goodier (1970), dos tipos de onda que surgem na estaca pode conduzir a uma melhor interpretação dos fenómenos vibratórios surgidos durante os ensaios.

Aplicando uma pancada na cabeça da estaca esta será assim percorrida por uma onda de compressão, que irá reflectir-se na sua extremidade inferior, o pé da estaca.

Esta onda reflectida chegará à cabeça da estaca ou com a mesma polaridade da onda incidente ou com polaridade inversa, dependendo das características mecânicas do pé da estaca.

Considere-se então o caso de uma barra prismática que é percorrida por uma onda de compressão (no sentido x da figura 1) e por uma onda de tracção, com o mesmo comprimento e o mesmo valor da tensão, movendo-se em sentido oposto.

Quando as ondas se encontram elas anulam-se mutuamente, mas a velocidade de vibração das partículas duplica pelo facto de esta se verificar no sentido da propagação para as ondas de compressão e em sentido inverso aquando das ondas de tracção.

Ultrapassada esta secção de encontro as ondas voltam a ter as suas características iniciais, conforme se mostra na figura 1c.

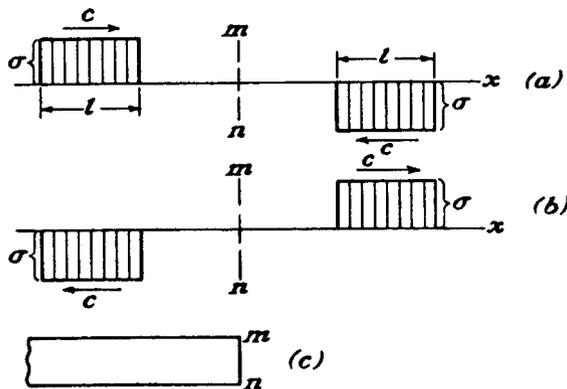


Fig. 1 — Propagação simultânea de ondas de compressão e de tracção numa barra prismática

Na secção intermédia \overline{mn} ocorrerá sempre a situação de tensão nula, equivalente por isso à extremidade livre de uma barra. Conclui-se assim que numa extremidade livre uma onda de compressão reflectir-se-á como onda de tracção semelhante.

Esta é a situação que se verifica para uma estaca flutuante. A polaridade da onda reflectida será, ao nível da cabeça da estaca, igual à da onda de compressão incidente.

No caso de a barra ser percorrida por duas ondas idênticas, de compressão ou de tracção, mas em sentidos contrários, na secção intermédia \overline{mn} verificar-se-á uma tensão dupla da de cada onda e será nula a velocidade de vibração. Depois de as ondas passarem uma pela outra elas voltarão a apresentar as suas características iniciais.

A secção intermédia \overline{mn} manter-se-á sempre imóvel durante a passagem das ondas e por isso se considera como uma extremidade fixa de uma barra (figura 2).

Nesta situação uma onda de compressão reflectir-se-á na extremidade fixa de uma barra como uma onda de compressão, com a mesma forma e amplitude da onda incidente.

Corresponde esta condição à estaca a trabalhar por ponta e a polaridade do "eco" será inversa da da onda de compressão incidente.

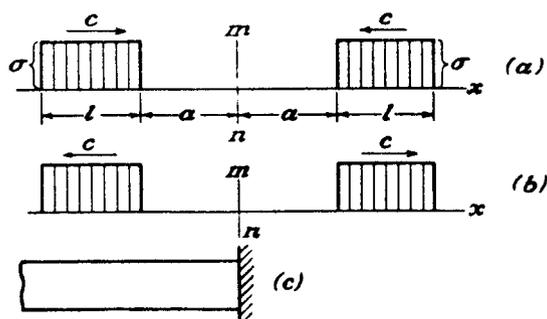


Fig. 2 — Propagação de ondas idênticas (compressão ou tracção) numa barra prismática

2.2 — Técnica de condução dos ensaios

O método de ensaio, em que foi utilizado um equipamento comercializado pelo Instituto TNO de Delft (Holanda), está esquematicamente indicado na Fig. 3 e consiste na aplicação, com um martelo, de uma pancada no topo da estaca e no registo da sua resposta por meio de um acelerómetro colocado pelo operador na cabeça da estaca. Na Fig. 4 apresenta-se um aspecto do conjunto do equipamento disponível no LNEC.

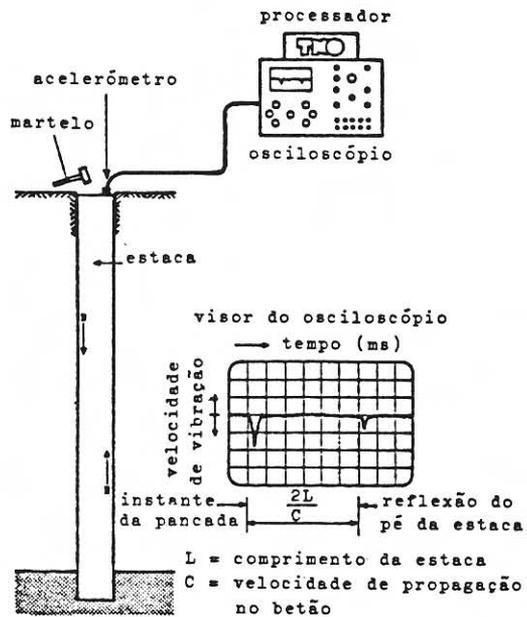


Fig. 3 — Método sónico para avaliação da integridade de estacas (representação esquemática)



Fig. 4 — Aspecto do equipamento disponível no LNEC

Nos primeiros ensaios realizados com este método procedia-se à regularização do topo das estacas com argamassa a fim de permitir um contacto uniforme do acelerómetro com a cabeça da estaca. Rapidamente se verificou que a vibração desta camada de argamassa introduzia perturbações nos registos que dificultavam a sua interpretação e por isso passou a fazer-se aquela regularização, com resultados satisfatórios, simplesmente por meio da picagem da cabeça da estaca com um martelo.

O sinal obtido em cada impacto é passado a um processador que corta as frequências não significativas e amplifica o resultado a uma escala crescente, à medida que diminui a amplitude do sinal, com a finalidade de compensar a atenuação de energia provocada por fenómenos de atrito estaca-terreno envolvente.

Os sinais são em seguida projectados no visor de um osciloscópio e, depois de inspeccionados, são finalmente fotografados para interpretação posterior.

A pancada com o martelo na cabeça da estaca origina uma onda de compressão que se propaga com uma velocidade de propagação dada pela expressão:

$$C = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2}$$

em que:

C = velocidade de propagação da onda de tensão

E = módulo de elasticidade do betão

ρ = massa volúmica do betão

Para os betões correntemente utilizados as velocidades de propagação determinadas em cubos de betão, por meio de ultra-sons, variam entre cerca de 4000 e 4200 m/s.

A onda originada na cabeça da estaca é captada, depois de reflectida no pé da estaca sem discontinuidades, ao fim do tempo $T = 2L/C$, conforme se indica na Fig. 3 (sendo L o comprimento da estaca).

Caso exista outra descontinuidade (para além do pé da estaca) entre a cabeça e o pé, ela produzirá igualmente uma reflexão que será eventualmente registada antes da reflexão final correspondente ao pé da estaca.

Conhecido o tempo de propagação (T) a determinação da localização da descontinuidade em relação à cabeça da estaca é obtida directamente da expressão $L' = CT/2$.

Como se viu no parágrafo 2.1 a polaridade do sinal reflectido, relativamente à do sinal emitido, fornece uma indicação do tipo de onda captada, consequência das condições físicas da estaca.

Recebendo-se uma onda reflectida com a mesma polaridade da da onda incidente isso será devido a uma onda de tracção resultante da ocorrência de uma significativa diminuição de rigidez do meio, que poderá ser devida a uma fractura, diminuição acentuada do diâmetro da estaca, etc.

No caso contrário poder-se-á estar na presença de uma base rígida onde descarrega a estaca ou da ocorrência de um significativo alargamento do seu fuste, etc.

Em situações intermédias com fortes ondulações do fuste (alargamentos e estreitamentos), torna-se bastante mais difícil a interpretação dos registos das ondas.

Em geral o método não permite detectar pequenas descontinuidades ou irregularidades da estaca, mas as anomalias registadas constituem, conforme mostra a experiência, uma indicação significativa das suas condições de integridade.

3 — TIPOS DE SINGULARIDADES ESTRUTURAIS QUE PODEM SER DETECTADAS. CASOS DE OBRA

3.1 — Introdução

O método descrito foi já aplicado em Portugal na avaliação da integridade de largas dezenas de estacas moldadas *in situ*, com comprimentos entre 6 a 30 m e executadas em ambientes geológicos diferenciados.

O conjunto de resultados obtidos permitiu a identificação de diversos tipos de singularidades estruturais que podem ser detectadas pelo método, as quais serão seguidamente referidas, juntamente com os registos que lhes correspondem.

3.2 — Estacas sem descontinuidades

Nas estacas sem descontinuidades nem fracturas os registos obtidos são do tipo do apresentado na Fig. 5, na qual é captada a reflexão correspondente ao pé da estaca.

Os sinais obtidos caracterizam-se pela ocorrência de uma primeira chegada correspondente à onda de superfície que se propaga na cabeça da estaca e que é rapidamente atenuada pelo processador.

Ao fim do tempo necessário para a onda viajar até ao pé da estaca e voltar de novo até ao acelerómetro colocado na sua cabeça, regista-se a correspondente deflexão.

Refere-se, porém, que um dos principais problemas sentidos na aplicação do método a estacas moldadas *in situ* consistiu na dificuldade de detecção da reflexão correspondente ao pé da estaca, devido à elevada absorção de energia por atrito estaca-terreno.

Na Fig. 6 apresenta-se um registo tipo correspondente a esta situação e no qual se nota que, após a primeira deflexão correspondente à onda de superfície, não se regista nenhum outro sinal significativo durante o tempo de duração do registo.

Estes registos ilustram, ainda, a boa reprodutibilidade obtida nos ensaios, correspondendo os sinais apresentados à repetição do mesmo ensaio realizado com amplificações crescentes.

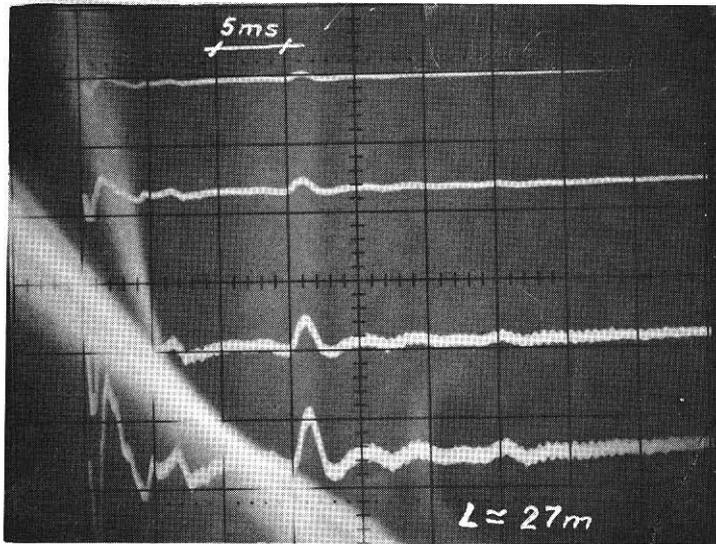


Fig. 5 — Reflexão correspondente ao pé da estaca

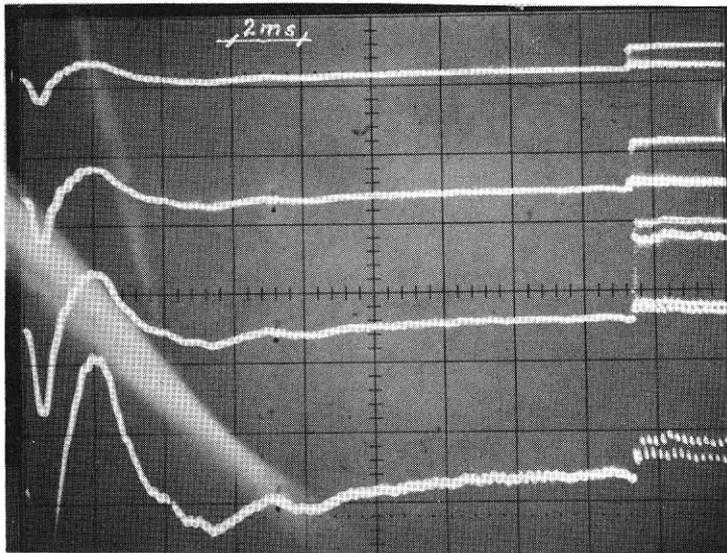


Fig. 6 — Estaca sem singularidades estruturais e com elevado atrito estaca-terreno

3.3 — Estacas com um alargamento localizado do diâmetro

A um aumento localizado do diâmetro da estaca corresponde geralmente um registo do tipo do apresentado na Fig. 7, surgindo uma onda que se reflecte no corpo mais rígido, que constitui o alargamento, em forma de onda de compressão, constituindo esse corpo uma descontinuidade acústica com o terreno envolvente.

A polaridade do sinal reflectido é assim oposta à do sinal emitido.

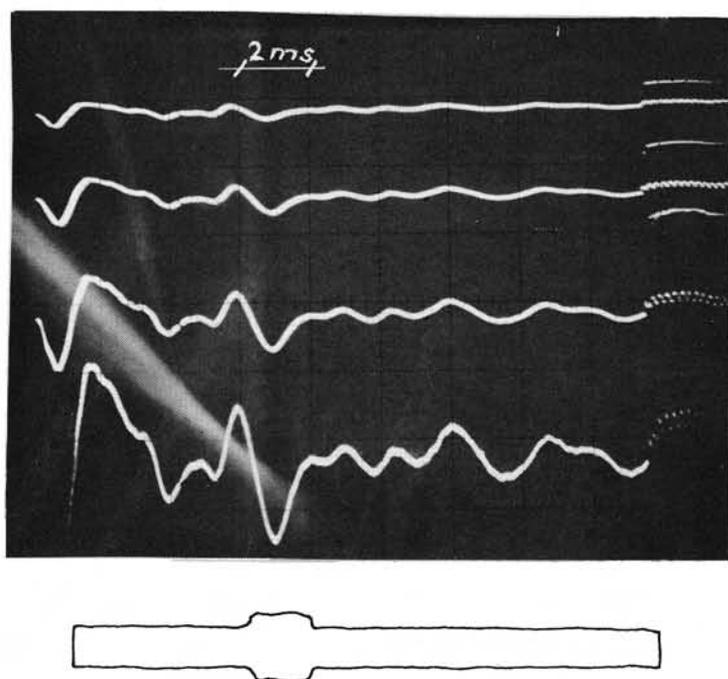


Fig. 7 — Estaca com alargamento localizado do diâmetro

3.4 — Estacas com estreitamento localizado do diâmetro

Os registos característicos desta situação são do tipo do apresentado na Fig. 8, que mostra uma reflexão originada por uma onda de tracção criada pela diminuição da rigidez da estaca.

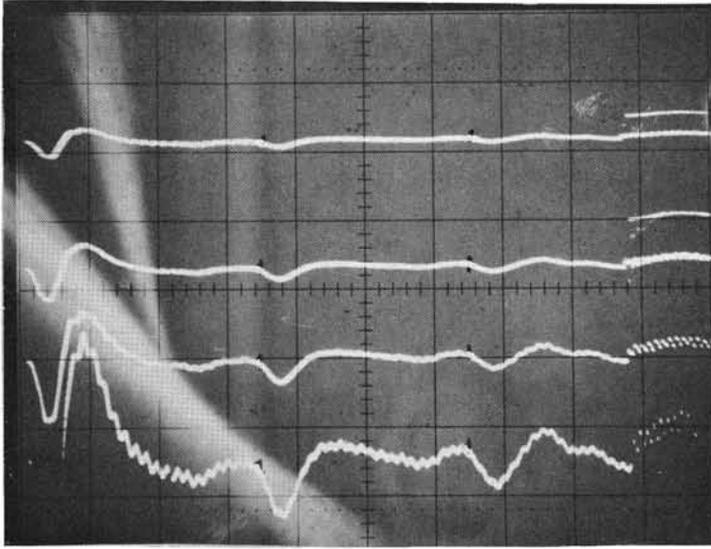


Fig. 8 — Estaca com estreitamento localizado do diâmetro

3.5 — Estacas com diâmetro irregular

Nas estacas com variações irregulares do diâmetro mas sem descontinuidades bem marcadas os registos normalmente obtidos são do tipo apresentado na Fig. 9.

Estes registos caracterizam-se por variações acentuadas da amplitude do sinal, sem definição clara de qualquer reflexão.

3.6 — Estacas com descontinuidades tipo fractura

Os registos relativos a estacas com descontinuidades tipo fractura mostram geralmente reflexões caracterizadas por elevada amplitude conforme se pode verificar na Fig. 10.

Por vezes a reflexão primária correspondente à descontinuidade pode ser acompanhada por diversos múltiplos, conforme se mostra na referida figura.

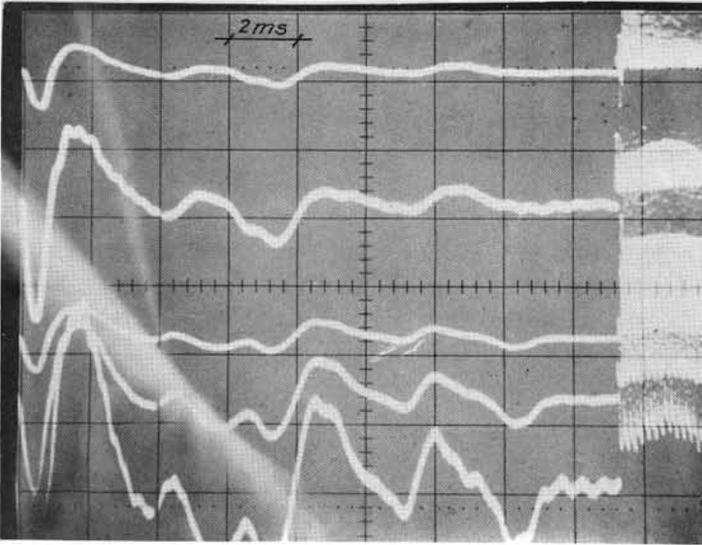


Fig. 9 — Estaca com diâmetro irregular

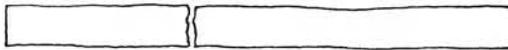
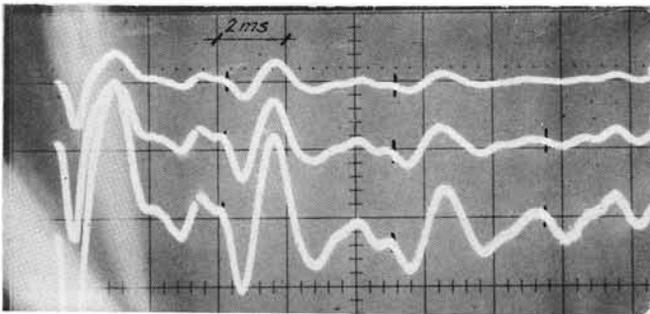


Fig. 10 — Estaca com descontinuidade tipo fratura

3.7 — Estacas com betões de diferente qualidade

Durante a execução das estacas podem ser eventualmente utilizados betões de qualidades diferentes, originando contactos entre zonas de impedâncias acústicas distintas, nas quais surgem reflexões dos sinais incidentes.

Na Fig. 11 apresentam-se os tarolos, até cerca dos 11 m de profundidade, de uma estaca onde se detectou a partir dos 7,80 m um betão de qualidade mecânica inferior em relação ao betão sobrejacente. Esta situação originou o registo apresentado na Fig. 12 no qual se evidenciam reflexões múltiplas correspondentes àquele contacto, as quais são do mesmo tipo das originadas em descontinuidades tipo fracturas.

A referida fronteira evita a transmissão da energia para o corpo inferior da estaca, não permitindo, por isso, detectar a reflexão correspondente ao seu pé.

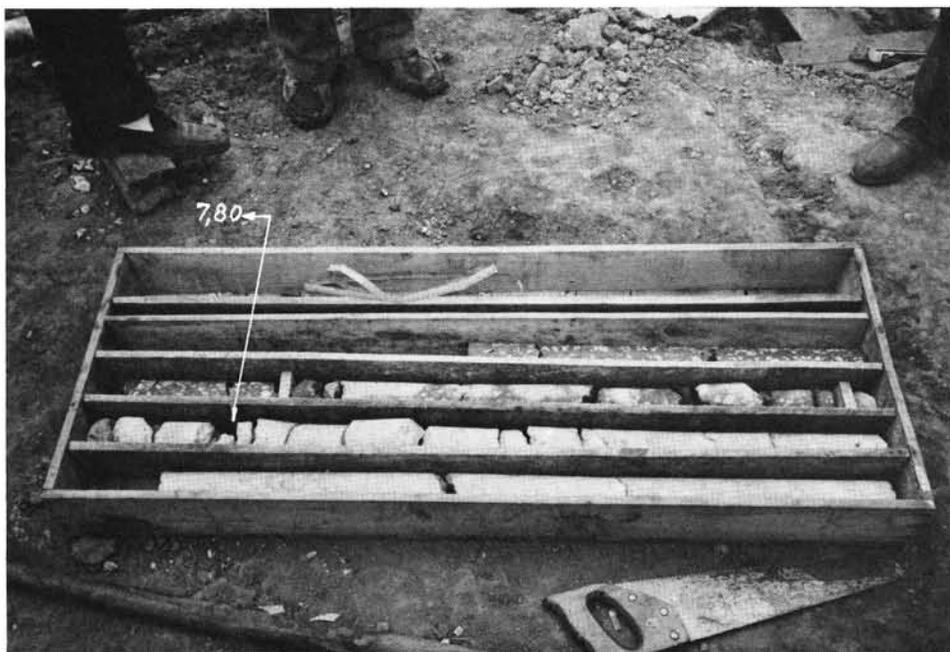


Fig. 11 — Fotografia dos tarolos de uma estaca de betão

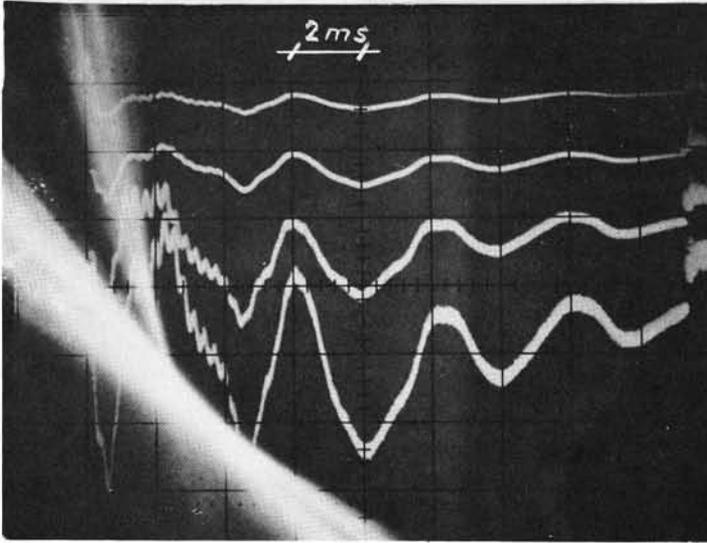


Fig. 12 — Registo correspondente à estaca da figura 11

3.8 — Estacas de ensaio existentes no "campus" do LNEC

No âmbito das suas actividades de investigação o LNEC mandou executar, nos seus terrenos, duas estacas de betão construídas pelo processo de cravação de um tubo com extracção do terreno.

As estacas têm um diâmetro da ordem dos 0,52 m e profundidades de cerca de 10 metros. Uma delas (Estaca 1) foi propositada e francamente interrompida com uma camada de argila para distinção completa da outra que se construiu sem interrupções (Estaca 2).

Na Fig. 13 apresenta-se um esquema destas estacas com indicação dos terrenos interessados, e na Fig. 14 pode apreciar-se um registo da propagação das ondas de tensão com nítida diferenciação para as duas estacas.

A anomalia geofísica que se verifica no registo correspondente à estaca 1 surge à profundidade de

$$L = \frac{4 \times 3,2}{2} = 6,4 \text{ m}$$

sugerindo ainda que a energia não passa para além da descontinuidade.

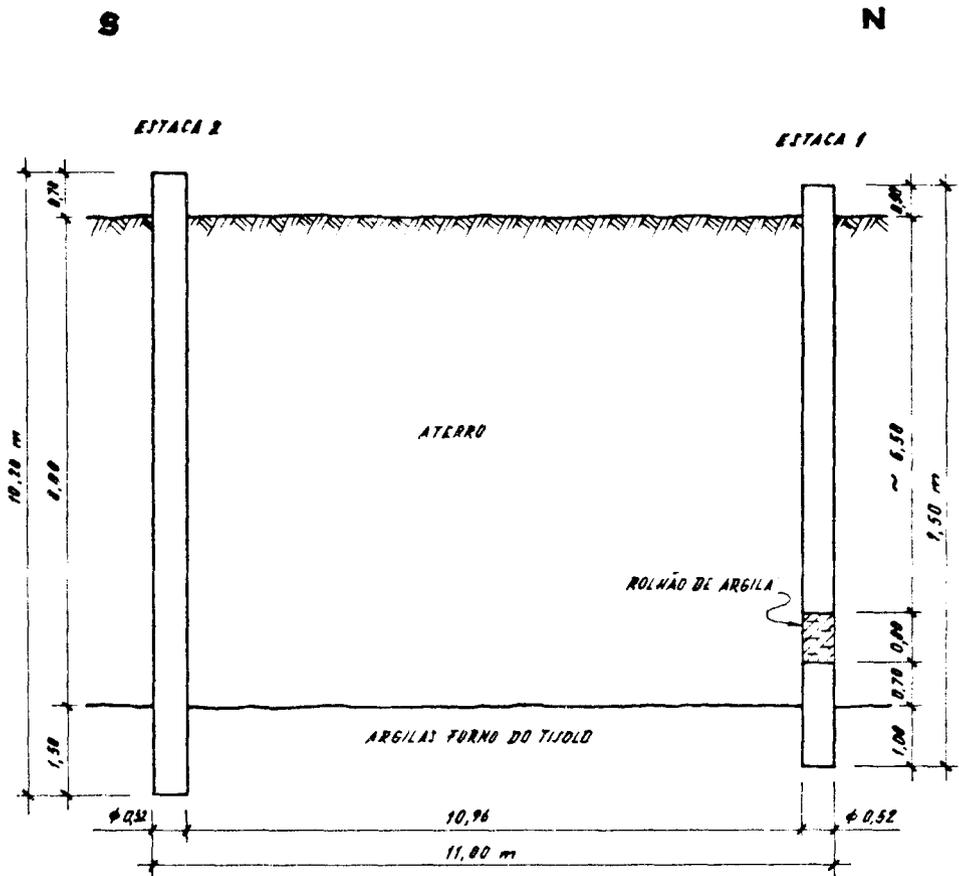


Fig. 13 — Esquema das estacas do "campus" do LNEC

O registo correspondente à estaca 2 não evidencia qualquer anomalia geofísica, revelando além disso existir uma elevada absorção de energia por atrito entre a estaca e o terreno.

Estas estacas de ensaio constituem assim um processo para verificação do estado de funcionamento do equipamento de ensaio bem como dos resultados por ele fornecidos.

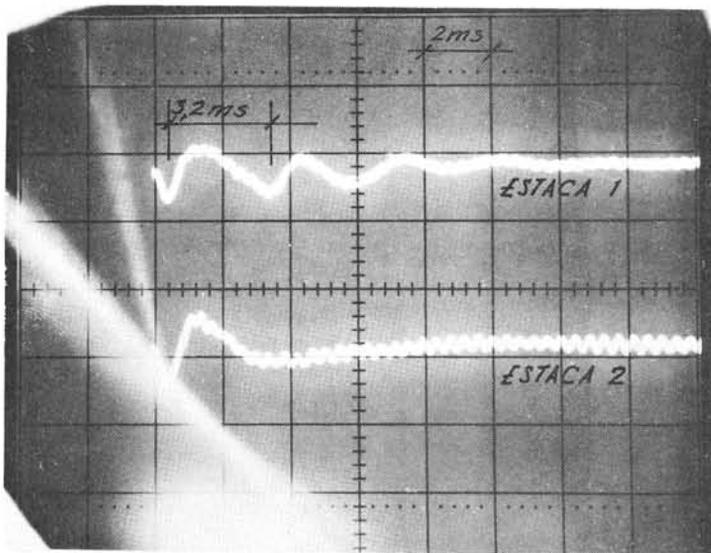


Fig. 14 — Registo correspondente às estacas do LNEC

4 — CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A experiência recolhida no LNEC, na aplicação de ondas sónicas de tenão para avaliação da integridade de estacas de betão, permite formular as seguintes considerações:

- o método possibilita a detecção de singularidades estruturais bem marcadas, como alargamento e adelgaçamento localizados da secção e descontinuidades tipo fractura;

- a relação anomalia geofísica - anomalia estrutural não é, porém, unívoca, podendo a um determinado tipo de anomalia geofísica corresponder mais do que um tipo de anomalia estrutural; assim, a interpretação dos registos por comparação com os obtidos noutras situações deverá ser feita com reservas, desde que não se proceda à aferição do significado da anomalia;
- o método deverá ser utilizado principalmente para identificação de estacas com anomalias geofísicas, as quais permitirão orientar a localização de ensaios de carga estática ou dinâmica ou de carotagem nas estacas suspeitas;
- as principais dificuldades na aplicação a estacas moldadas *in situ* resultam da elevada atenuação de energia por atrito estaca-terreno, impedindo frequentemente o registo das reflexões relativas ao pé da estaca;
- o aperfeiçoamento da interpretação das relações anomalias geofísicas singularidades estruturais aconselha que se realizem ensaios em estacas cuja estrutura seja antecipadamente conhecida ou se proceda à vistoria e até ao arranque de estacas na sequência dos ensaios;
- desde que suficientemente aferido o método poderá ser utilizado para definição de critérios para aceitação ou rejeição de estacas em projectos importantes que exijam a construção de elevado número de estacas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FIALHO RODRIGUES, L. e ESTEVES, J. M. (1985) — *Avaliação da integridade de estacas de betão por métodos não destrutivos*. Relatório do LNEC, Proc.º 54/13/7395 (PIDDAC).
- TIMOSHENKO, S. P. and J. N. GOODIER (1970) — *Theory of Elasticity*. 3rd ed. New York, Mc Graw-Hill Book Co., Inc.
- Instituto TNO (Netherlands organization for applied scientific research). P.O. Box 49. 2600 AA Delft, Holanda.