

Processo N.º

Pedido N.º

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E HABITAÇÃO

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

NÚCLEO DE OBRAS DE ATERRO (NBOA)

ENTIDADE **ANÁLISE DOS ENSAIOS DE CARGA NAS ESTACAS DE
FUNDAÇÃO DA FABRICA DA SOPORCEL**

ENSAIO

ANÁLISE DOS ENSAIOS DE CARGA NAS ESTACAS DE FUNDAÇÃO DA FÁBRICA DA SOPORCEL

RESUMO

A presente comunicação tem como objectivo a interpretação dos ensaios de carga estáticos efectuados sobre 7 estacas de fundação da nova fábrica de papel da Soporcel, na Figueira da Foz.

Apresenta-se uma descrição sintética das características das estacas e dos solos de fundação.

A análise de comportamento das estacas procurou contemplar o valor dos deslocamentos e da capacidade de carga.

SYNOPSIS

This paper aims the interpretation of static load tests performed on 7 piles foundations of the new Soporcel paper factory at Figueira da Foz.

A brief description of pile characteristics and soils foundation is presented.

The analysis of pile behaviour has the purposes to calculate the values of displacements and load bearing capacity.

ANÁLISE DOS ENSAIOS DE CARGA NAS ESTACAS DE FUNDAÇÃO DA FÁBRICA DA SOPORCEL

SÊCO E PINTO, PEDRO SIMÃO*
PORTUGAL, JOÃO M. CANDEIAS S.**

1 - INTRODUÇÃO

A presente comunicação tem como objectivo a interpretação dos ensaios de carga estáticos efectuados sobre 7 estacas de fundação da nova fábrica de papel da Soporcel, na Figueira da Foz.

Apresenta-se uma descrição sintética das características das estacas e dos solos de fundação.

A análise de comportamento das estacas procurou contemplar o valor dos deslocamentos e da capacidade de carga.

2 - CARACTERÍSTICAS DAS ESTACAS

As estacas de fundação da nova fábrica da Soporcel foram do tipo moldado no terreno. As técnicas de fabrico utilizadas foram:

- 1 - Com recurso a trado rotativo e lamas bentoníticas (tipo M);
- 2 - Com cravação de tubo moldador em aço e recuperação durante a betonagem (tipo C).

Os comprimentos das estacas variavam de 12 a 18 m e os diâmetros de 450 a 600 mm.

3 - CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS DE FUNDAÇÃO

A geologia do local de implantação da fábrica é caracterizada por "materiais arenosos, de idade quaternária, que recobrem formações de granulometria mais fina, silto-arenosa e argilo-siltosa, atribuídas ao Paleogénio e Miocénio indiferenciados" (Gaproba, 1989).

Constata-se assim que as estacas de ensaio se encontram fundadas num estrato arenoso com espessura variando entre os 12 e 15 metros que recobre substratos arenoso-siltosos e argilo-siltosos.

A caracterização dos solos envolventes das estacas ensaiadas foi feita a partir das sondagens efectuadas. O estudo geotécnico (Gaprobra, 1989) forneceu, para além dos resultados dos ensaios SPT e CPT, os parâmetros geotécnicos necessários para a caracterização dos materiais (ver Quadro I).

* Engº Civil, Investigador do LNEC e Chefe do Núcleo de Fundações

** Engº Civil, Estagiário de Investigação do LNEC

Quadro I - Resumo dos parâmetros geotécnicos

Características	Areias médias soltas	Areias médias a finas	Areias médias a grosseiras	Areias siltosas compactas	Areias siltosas rijas
Profundidade	0 a 2 m	2 a 10 m	10 a 14 m	14 a 20 m	> 20 m
Peso volúmico	$\gamma = 16.5 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 21.0 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 21.0 \text{ kN/m}^3$
Ângulo de Atrito Interno	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 40^\circ$	$\phi = 45^\circ$	$\phi = 0^\circ$
Resistência não Drenada	$c_u = 0 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 0 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 0 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 0 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 300 \text{ kN/m}^2$
Compacidade Relativa	$I_d = 30\%$	$I_d = 50\%$	$I_d = 70\%$	$I_d = 90\%$	
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0.3$	$\nu = 0.3$	$\nu = 0.3$	$\nu = 0.3$	$\nu = 0.35$
Módulo de Elasticidade	$E = 7500 \text{ a } 30\,000 \text{ kN/m}^2$	$E = 35000 \text{ a } 50\,000 \text{ kN/m}^2$	$E = 50\,000 \text{ a } 75\,000 \text{ kN/m}^2$	$E = 90\,000 \text{ kN/m}^2$	$E = 55\,000 \text{ kN/m}^2$

4 - ANÁLISE EM TERMOS DE DEFORMABILIDADE

4.1 - Introdução

Os deslocamentos axiais das estacas ensaiadas foram calculados através da Teoria da Elasticidade com base nas seguintes hipóteses:

- 1 - Admitindo que a estaca funciona por atrito lateral (estaca flutuante, δ_f);
- 2 - Considerando que a estaca funciona de ponta (estaca de ponta δ_p).

A presente análise incide no comportamento de uma estaca isolada, não entrando em linha de conta com os efeitos de grupo.

4.2 - Análise de Assentamentos em Estacas Isoladas

O cálculo dos deslocamentos axiais das estacas foi efectuado a partir das formulações de Poulos e Davis (1980). Foram considerados três tipos de situações distintas:

- 1 - Funcionamento misto da estaca (flutuante e ponta) - O assentamento do topo superior de uma estaca (δ) é dado pela expressão (L.N.E.C., 1981):

$$\delta = w \frac{Pl}{E_e A_e} \quad (1)$$

em que os símbolos têm o seguinte significado:

- P - Valor da carga axial sobre a estaca;
- l - Comprimento da estaca;
- E_e - Módulo de elasticidade da estaca;
- A_e - Área da secção transversal da estaca;
- w - Factor multiplicativo do deslocamento elástico da estaca considerando o solo volumetricamente incompressível.

- 2 - Estaca flutuante - O assentamento superior da estaca é (δ_f) dado pela equação (Poulos e Davis, 1980):

$$\delta_f = \frac{P I}{E_{sl} d} \quad (2)$$

em que,

- P - Valor da carga axial sobre a estaca;
E_{sl} - Módulo de elasticidade do solo lateral;
d - Diâmetro de estaca;

e,

$$I = I_0 R_k R_h R_v \quad (3)$$

com,

- I₀ - Factor de influência da esbelteza da estaca;
R_k - Factor de influência da compressibilidade relativa estaca-solo lateral;
R_h - Factor de influência da distância ao firme.
R_v - Factor de influência do coeficiente de Poisson do solo lateral.

- 3 - Estaca de Ponta - A expressão proposta por Poulos e Davis (1980) é:

$$\delta_p = \frac{P I}{E_{sp} d} \quad (4)$$

em que,

- P - Valor da carga axial sobre a estaca;
E_{sp} - Módulo de elasticidade do solo na ponta da estaca;
d^{sp} - Diâmetro da estaca;

$$I = I_0 R_k R_b R_v \quad (5)$$

com I₀, R_k e R_v definidos como anteriormente com a ressalva para o valor de E_{sl} na determinação de E_{sp} (módulo de elasticidade do solo na ponta)

e,

- R_b - Factor correctivo do assentamento devido ao solo de ponta.

4.3 - Comparação entre os Deslocamentos Calculados e Observados

4.3.1 - Estacas Cravadas

Apresenta-se na Figs 1 e 2 uma análise comparativa entre os valores dos deslocamentos previstos pelas equações (1), (2) e (4) e os valores observados para as estacas T₂, 212 e 694. No Quadro II apresentam-se os resultados obtidos.

Constata-se assim que os deslocamentos observados à carga admissível respeitam largamente os limites máximos estabelecidos no Caderno de Encargos (deslocamentos máximos da ordem dos 8 a 15 mm respectivamente para estacas de 15 e 12 metros de comprimento).

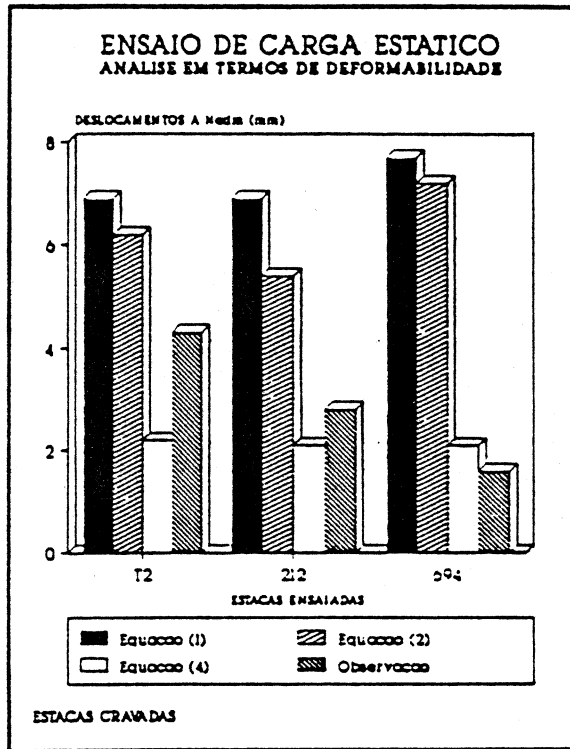


Fig. 1 - Deslocamentos a carga admissível
(Estacas Cravadas)

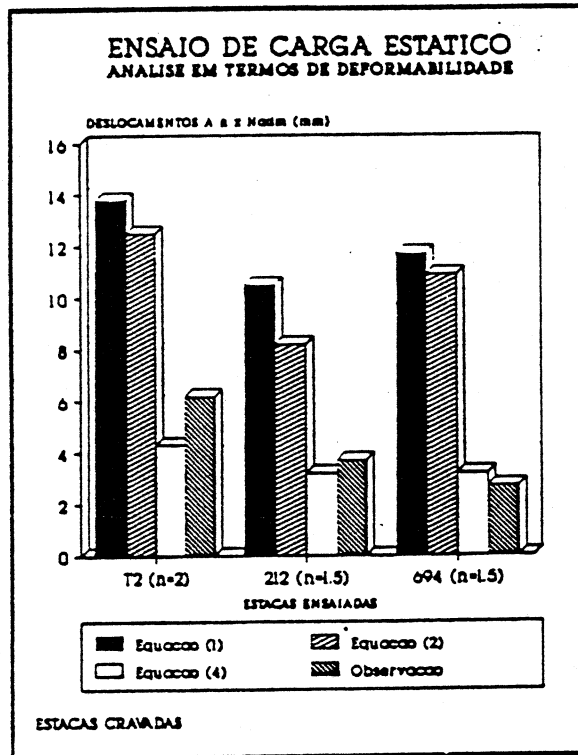


Fig. 2 - Deslocamentos a n vezes a carga admissível
(Estacas Cravadas)

4.3.2 - Estacas Moldadas

Apresenta-se nas Figs. 3 e 4 uma análise comparativa entre os valores dos deslocamentos previstos pelas equações (1), (2) e (4) e os valores observados para as estacas T₁, T₃, 30 e 74. O Quadro II ilustra os resultados obtidos.

5 - CAPACIDADE DA CARGA

5.1 - Determinação da Capacidade Resistente - Formulação Estática

A resistência à rotura tem duas parcelas: uma que representa a resistência de ponta e outra a resistência lateral. Admitindo que

$$P_u = P_u^{ponta} + P_u^{lateral} - W \quad (6)$$

com,

- P_u - Carga última da estaca;
- P_u^{ponta} - Carga última da estaca funcionando apenas de ponta;
- $P_u^{lateral}$ - Carga última da estaca funcionando apenas por atrito lateral;
- W - Peso da estaca - $W = 25 \frac{\pi d^2 l}{4}$ (kN)

foram utilizadas as formulações de Meyerhof (L.N.E.C., 1981) e Poulos e Davis (1980) para o cálculo das parcelas intervenientes na expressão (6).

5.2.1 - Proposta de Meyerhof

Na determinação da resistência de ponta da estaca recorre-se aos valores fornecidos pelo ensaio do cone penetrómetro

$$P_u^{ponta} = I_p^{ponta} \cdot A_p \quad (7)$$

em que A_p representa a secção da estaca na zona inferior.

Não se dispondo de resultados de ensaio com penetrómetro estático para este cálculo foram utilizadas correlações com o ensaio SPT. Adoptou-se:

$$I_p^{ponta} [kN/m^2] = n \cdot N_{SPT}^{ponta}, \text{ com } n \in [200; 800] \quad (8)$$

em que n depende do tipo de material em causa.

Em relação à resistência lateral, Meyerhof assume um valor 200 vezes menor do que a resistência de ponta de penetrómetro, ou seja,

$$P_u^{lateral} = \frac{1}{200} \cdot \sum_i I_{P_i}^{lateral} \cdot A_i^{lateral} \quad (9)$$

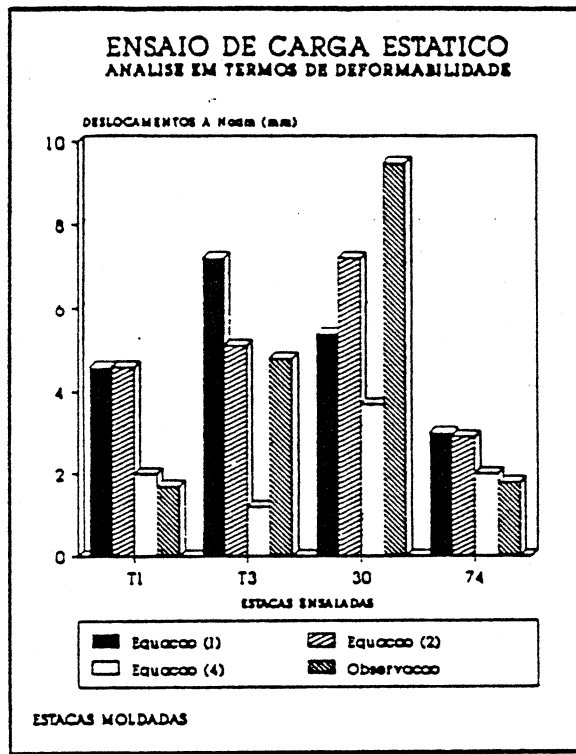


Fig. 3 - Deslocamentos a carga admissível
(Estacas moldadas)

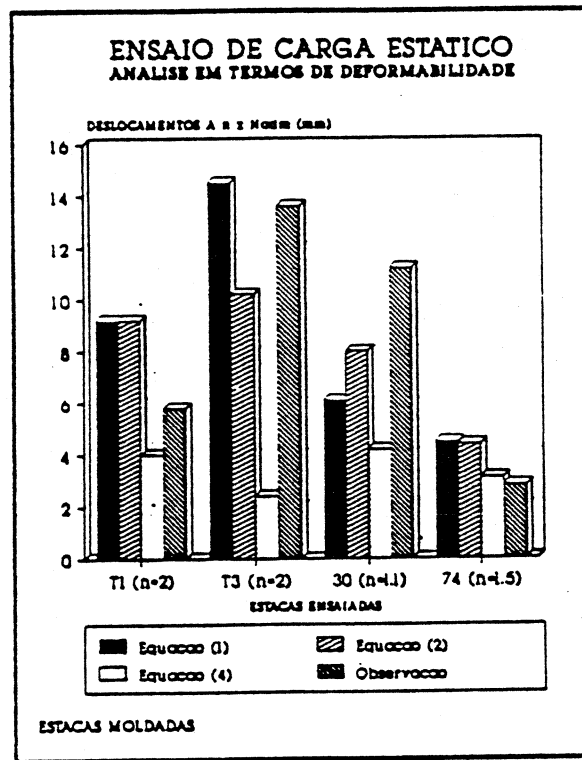


Fig. 4 - Deslocamentos a n vezes a carga admissível
(Estacas Moldadas)

5.2.2 - Proposta de Poulos

No caso do solo envolvente da ponteira ser uma argila, para a resistência de ponta virá

$$P_u^{ponta} = A_p (c_u N_c + \sigma_{vb}) \quad (10)$$

- A_p - Área da estaca na zona inferior;
- c_u - Coesão não drenada do solo na zona da ponteira;
- σ_{vb} - Tensão vertical no solo na zona da ponteira;
- N_c - Factor de capacidade de carga: $N_c = 9$ para $l/d > 4$.

No caso de areias ter-se-á,

$$P_u^{ponta} = A_p \bar{\sigma}_{vb} N_q \quad (11)$$

em que,

- $\bar{\sigma}_{vb}$ - Tensão efectiva vertical no solo ao nível da extremidade inferior da estaca;
- N_q - Factor de capacidade de carga - o valor de N_q depende do valor do ângulo de atrito interno do solo e do método construtivo (estacas cravadas ou moldadas).

O valor da resistência é dado por:

$$P_u^{lateral} = \int_0^1 F_w C \bar{\sigma}_v k_s \tan \phi_s' dz \quad (12)$$

em que,

- F_w - Factor correctivo das imperfeições geométricas (adota-se $F_w = 1.0$ - estaca de diâmetro constante);
- C - Perímetro da estaca à profundidade considerada ($C = \pi d$);
- $\bar{\sigma}_v$ - Tensão efectiva vertical no contacto solo estaca à profundidade z ;
- $k_s \tan \phi_s'$ - Atrito lateral - função do ângulo de atrito interno do solo lateral e do processo construtivo.

5.2.3 - Determinação da Carga Admissível

Para a definição da carga admissível das estacas assume-se um coeficiente de segurança de 3.0, obtendo-se,

$$N_{adm} = \frac{P_u^{ponta}}{3} + \frac{P_u^{lateral}}{3} - W \quad (13)$$

5.4 - Determinação da Capacidade Resistente à Luz dos Ensaios Estáticos

A determinação da capacidade de carga de estacas a partir de ensaios estáticos "in situ" reveste-se de algumas dificuldades, sendo a literatura pródiga na apresentação de

critérios de condução e interpretação de ensaios de carga vertical em estacas (Sêco e Pinto, 1979).

No presente caso adoptou-se o método proposto pelo "Laboratório Central de Ponts et Chaussées" (LCPC) que preconiza a determinação da capacidade de carga a partir da análise das curvas de carregamento vs assentamentos de fluência. Não foi no entanto possível chegar a valores fiáveis uma vez que os ensaios realizados não conduziram a deformações, quer totais, quer de fluência, que permitissem a extrapolação de um valor na rotura.

5.5 - Análise dos Resultados Obtidos

Na Fig. 5 e no Quadro II são apresentados os resultados obtidos em termos de carga admissível das estacas ensaiadas.

As formulações estáticas utilizadas conduzem a valores de carga admissível muito próximos. Todas as estacas ensaiadas apresentam valores de N_{adm} iguais ou superiores aos especificados no Caderno de Encargos (120 tf, 85 tf e 55 tf respectivamente para estacas de 600, 500 e 400 mm).

Como foi anteriormente referido os ensaios realizados não permitiram definir um valor fiável da carga de rotura das estacas ensaiadas, não sendo portanto possível inferir, a partir dos ensaios, um valor de N_{adm} .

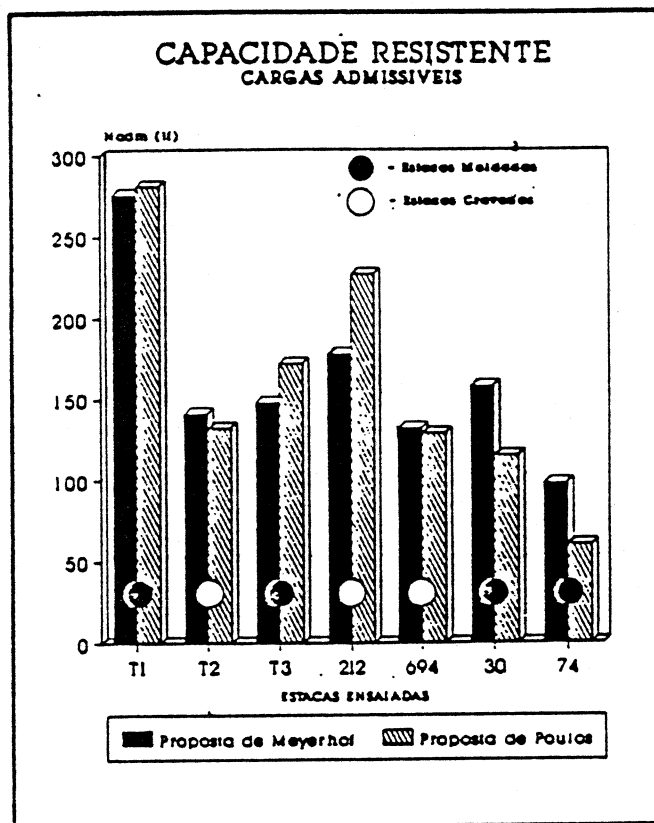


Fig. 5 - Esforços axiais admissíveis

Quadro II - Resumo dos resultados obtidos

CARACTERÍSTICAS DAS ESTACAS						DEFORMABILIDADE					RESISTÊNCIA			
Estaca	Tipo	d (mm)	l (m)	N _{SPTL}	N _{SPTL}	P (kN)	δ (1) (mm)	δ (2) (mm)	δ (4) (mm)	δ _{obs} (mm)	P _u ^{Mey} (tf)	N _{adm}	P _u ^{Pou} (tf)	N _{adm}
T ₁	Moldada	600	15,0	41,4	55,5	1203	4,6	4,6	2,0	1,7	850	276	865	281
						2407	9,2	9,2	4,0	5,8				
T ₂	Cravada	457	12,5	39,6	45,5	1201	6,9	6,2	2,2	4,3	434	141	407	132
						2403	13,8	12,5	4,3	6,2				
T ₃	Moldada	500	16,0	28,9	54,0	860	7,2	5,1	1,2	4,8	460	148	533	172
						1719	14,5	10,2	2,4	13,6				
30	Moldada	600	13,0	27,1	55,0	1203	5,4	7,2	3,7	9,5	489	158	360	115
						1341	6,1	8,0	4,2	11,2				
74	Moldada	400	18,0	32,9	60,0	549	3,0	2,9	2,0	1,8	307	98	190	60
						824	4,5	4,4	3,1	2,8				
212	Cravada	450	14,0	46,2	60,0	1201	6,9	5,4	2,1	2,8	546	178	692	227
						1819	10,5	8,2	3,2	3,7				
694	Cravada	450	12,0	34,6	47,5	1201	7,7	7,2	2,1	1,6	405	132	397	129
						1819	11,7	10,9	3,2	2,7				

6 - CONCLUSÕES

Do anteriormente exposto é possível retirar as seguintes conclusões:

A) - Análise dos deslocamentos:

- 1 - Os valores dos deslocamentos observados das estacas cravadas apontam para um comportamento elástico do solo e um funcionamento de ponta.
- 2 - As estacas moldadas T₁ e 74 exibem um comportamento idêntico ao anterior. A estaca T₃ tem um comportamento de estaca flutuante, com incursões na zona não linear. A estaca 30 apresenta um comportamento não linear, registrando, à carga de serviço, deslocamentos mais elevados do que nos casos anteriores. O seu comportamento terá de ser encarado com algumas reservas, face às dificuldades surgidas no ensaio.

B) - Capacidade de carga

- 1 - As formulações de Meyerhof e Poulos conduziram a valores idênticos da capacidade de carga.
- 2 - Os valores de capacidade de carga obtidos, são superiores aos valores preconizados no Caderno de Encargos.
- 3 - Não foi possível a determinação dos valores da capacidade de carga a partir das curvas de fluência, face aos níveis baixos de deformação registados nos ensaios realizados.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gapobra (1989) - "Soporcel, Fábrica de Papel - Estudo Geotécnico".
- L.N.E.C. (1981) - "Acerca do Projecto de Fundações em Estacas de Betão Armado" - Memória nº 488.
- Poulos, H. G. e Davis, E. H. (1980) - "Pile foundation Analysis and Design" - John Wiley and Sons, Inc.
- Sêco e Pinto, P. S. (1979) - "Revisão dos Métodos Utilizados nos Ensaios de Carga de Estacas". Geotecnia nº 29.



www.lnec.pt

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL
tel. (+351) 21 844 30 00
lnec@lnec.pt www.lnec.pt