

Dimensionamento analítico de camadas de reforço em plataformas ferroviárias

João Marcelino

Núcleo de Barragens e Obras de Aterro, Departamento de Geotecnia, LNEC, Lisboa, Portugal

Eduardo Fortunato

Grupo de Infra-Estruturas Ferroviárias, Departamento de Transportes, LNEC, Lisboa, Portugal

António Pinelo

Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, Portugal

RESUMO: Durante a renovação Linha do Norte em Portugal é necessário melhorar as características da plataforma ferroviária por forma a adequá-la às exigências relacionadas com o aumento das cargas máximas por eixo, com o aumento do volume de tráfego e com a necessidade de permitir a circulação a alta velocidade. O tipo de acções a levar a cabo depende, em boa medida, das características da plataforma existente e das características pretendidas para a plataforma final. Nos casos em que a plataforma é inadequada torna-se necessário sanear uma determinada espessura do material existente para possibilitar a colocação de camadas de reforço que permitam obter as características finais pretendidas. Neste trabalho analisa-se a problemática do dimensionamento das camadas de reforço da plataforma, nomeadamente da determinação da sua espessura e dos materiais que as constituem; apresenta-se uma metodologia de cálculo passível de ser utilizada no dimensionamento, tendo em consideração o comportamento não linear dos materiais.

PALAVRAS-CHAVE: Plataforma ferroviária; renovação; dimensionamento.

1 INTRODUÇÃO

Durante a renovação Linha do Norte (LN) em Portugal é necessário melhorar as características da plataforma ferroviária por forma a adequá-la às exigências relacionadas com o aumento das cargas máximas por eixo, com o aumento do volume de tráfego e com a necessidade de permitir a circulação a alta velocidade.

O tipo de intervenção depende das características da plataforma existente e das características desejadas para a plataforma renovada. Nos casos em que a plataforma existente é inadequada, torna-se necessário sanear uma determinada espessura do material existente para possibilitar a colocação de camadas de reforço que permitam obter as características finais pretendidas.

Independentemente da qualidade da plataforma existente, foi ainda considerado indispensável colocar uma camada de sub-balastro e implementar sistemas de drenagem.

As espessuras das diversas camadas e o tipo de materiais que as constituem devem ser estabelecidas de forma a que os valores do módulo de deformabilidade equivalente (calculados no segundo ciclo do ensaio de carga estática com placa- EV_2) a obter ao nível da plataforma renovada e no topo da camada sub-balastro sejam superiores a 80 e 120 MPa, respectivamente (UIC, 1994).

Relativamente à qualidade da plataforma existente foram tipificadas três situações distintas, conjugando os dados da caracterização física e mecânica da plataforma com a frequência das operações de manutenção por parte da entidade responsável pela conservação. As situações consideradas foram: plataforma sem indícios de mau comportamento com $EV_2 \geq 80$ MPa; plataforma sem indícios de mau comportamento com $EV_2 < 80$ MPa; plataforma com indícios de mau comportamento.

No primeiro caso considerou-se que a camada de sub-balastro poderia ser colocada

directamente sobre a plataforma existente. No segundo caso procedia-se ao melhoramento da plataforma colocando uma camada de leito construída com solos adequados ou materiais granulares britados de boas características mecânicas (Fig. 1). No terceiro caso, preconizou-se o saneamento do material existente (balastro contaminado com solo e/ou material da fundação), e a colocação de uma camada de substituição (LNEC, 2000a) para além da camada de leito (reforço) com espessura adequada.

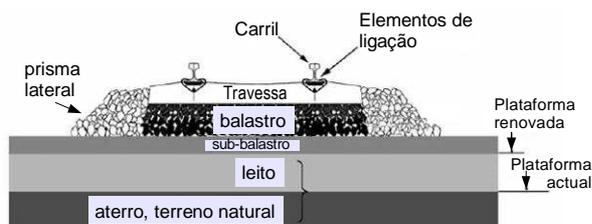


Figura 1. Corte esquemático da via renovada.

Foram realizados diversos estudos paramétricos (LNEC 2000b; LNEC 2004) onde se procurou estabelecer metodologias de dimensionamento destas camadas em função das diversas condições que poderiam surgir no decorrer das obras de renovação. Neste trabalho apresenta-se uma síntese desses estudos e outros novos em que se considera o comportamento não linear dos materiais usados nas camadas de sub-balastro e nas camadas de reforço.

2 METODOLOGIA DE ANÁLISE

A necessidade de avaliar as tensões e deformações induzidas na subestrutura da via pelas acções impostas durante a construção, ou por solicitações de carácter diverso, nomeadamente as que decorrerem da exploração da estrutura, prende-se, essencialmente, com a necessidade de estimar os assentamentos. Em geral, considera-se que o maciço é um meio elástico linear e utilizam-se as soluções obtidas no âmbito da Teoria da Elasticidade. Os assentamentos são obtidos através da integração das extensões verticais, as quais são calculadas atendendo às tensões incrementais e às constantes elásticas do maciço. Em determinados casos, de geometria e

condições de carregamento relativamente simples, é possível deduzir as expressões que fornecem as componentes dos estados de tensão e de deformação no meio elástico. As primeiras soluções analíticas com uso prático na determinação do estado de tensão no interior de maciços terrosos foram as expressões publicadas por Boussinesq em 1885, deduzidas para o caso de um meio elástico, isotrópico e semi-indefinido carregado à superfície por uma carga vertical concentrada. Posteriormente, outros autores desenvolveram formulações para meios estratificados, mais concordantes com as situações que se verificam nas subestruturas das vias de comunicação (Fox, 1948; Hank e Scrivner, 1948; Odemark, 1950; Nascimento, 1962; Jeuffroy e Bachelez, 1962).

O advento dos meios informáticos, especialmente a partir da década de 60, possibilitou a consideração de meios geometricamente complexos, a par de comportamentos reológicos mais realistas, nomeadamente pelo recurso ao método dos elementos finitos ou ao método das diferenças finitas.

No caso do maciço homogéneo semi-indefinido em que as características são constantes em profundidade o cálculo do deslocamento à superfície pode ser feito através do integral:

$$s = \int_0^{\infty} \frac{1}{E} [\Delta\sigma_z - \nu (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)] dz \quad (1)$$

em que $\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma_x$ e $\Delta\sigma_y$, nos casos simples, são obtidos por expressões analíticas, em função da pressão q aplicada à superfície do meio elástico, das coordenadas do ponto, das dimensões da área carregada, D , e do coeficiente de Poisson. A solução do integral nas condições indicadas conduz a:

$$s = qD \frac{1 - \nu^2}{E} \cdot I_s \quad (2)$$

em que I_s é um coeficiente que é função da geometria da área carregada e da localização do ponto para o qual se pretende obter o assentamento. Note-se que esta solução corresponde ao que se designa habitualmente por “sapata

infinitamente flexível”, isto é, corresponde à solução obtida para um carregamento tipo sobrecarga (Matos Fernandes, 1995). As soluções para o caso de assentamentos de elementos infinitamente rígidos sobre os meios elásticos semi-indefinidos e homogêneos não são soluções exactas. No entanto, encontram-se desenvolvidas soluções numéricas aproximadas para as geometrias de carga mais comuns, em que se incluem a circular, e para a qual o coeficiente I_s toma o valor $\pi/4$, se D for o diâmetro da placa. Neste trabalho, o parâmetro I_s foi determinado, para as condições geométricas e de carregamento, calculando o módulo de elasticidade, de um meio em que este parâmetro é conhecido à partida.

A prática actual de avaliação da capacidade de carga de plataformas e de controlo de qualidade na execução de terraplenagens, no âmbito da construção de fundações para vias de comunicação, baseia-se, cada vez mais, no estabelecimento de valores mínimos a obter para o módulo de deformabilidade equivalente a medir no topo das camadas (AASHTO, 1986; UIC, 1994; AIPCR, 1995; LCPC, 1994). O ensaio de carga estática com placa permite calcular o valor do módulo de deformabilidade equivalente de um maciço, através da determinação do assentamento da placa, considerada rígida, atendendo a que, pela equação (2) se tem:

$$E = q.D. \frac{1 - \nu^2}{s} \cdot \frac{\pi}{4} \quad (3)$$

A determinação da espessura das camadas de reforço necessárias para se obter os valores de EV_2 requeridos para a plataforma ferroviária renovada (superfície superior da camada de sub-balastro) pode ser feita através da realização de estudos paramétricos que simulem o ensaio de carga com placa num maciço elástico estratificado, fazendo variar o módulo de deformabilidade dos materiais e a espessura das camadas. Os resultados permitem então elaborar ábacos que indicam o módulo de deformabilidade equivalente no topo do maciço, considerando uma determinada distribuição de materiais na fundação. Estabelecendo o módulo

pretendido para a plataforma ferroviária, determina-se com recurso aos ábacos a espessura da camada de reforço necessária. Na Figura 2 apresenta-se um dos modelos geométricos usado nos estudos que considera a fronteira inferior rígida a 3 m de profundidade e uma camada de sub-balastro de 0,15 m de espessura.

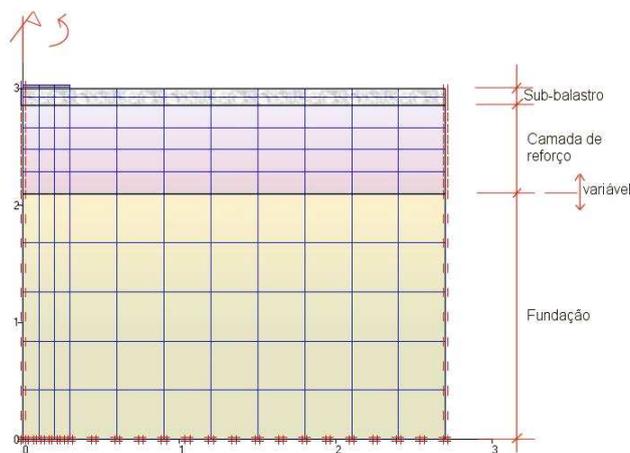


Figura 2. Modelo geométrico para o estudo. Malha de elementos finitos.

Na Figura 3 apresenta-se um exemplo de um ábaco de dimensionamento obtido quando a plataforma existente apresenta um valor do módulo de deformabilidade equivalente de 40 MPa e o material da camada de sub-balastro tem um módulo de 300 MPa.

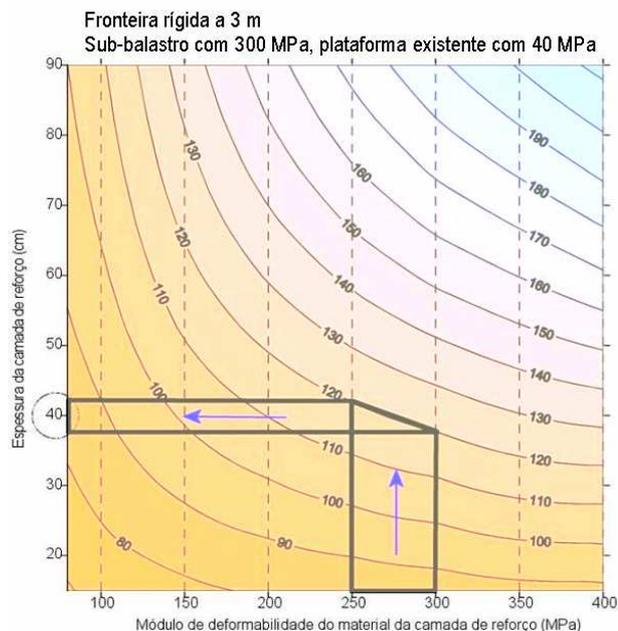


Figura 3. Ábaco de dimensionamento.

Para ilustrar a aplicação do ábaco, admite-se que o material de reforço apresenta um módulo

de deformabilidade de cerca de 250 a 300 MPa. Nestas condições, a espessura de reforço necessária para obter um valor do módulo de deformabilidade equivalente de 120 MPa no topo do sub-balastro será de cerca de 40 cm.

Num desenvolvimento posterior, o estudo acima referido foi alterado no sentido de contemplar o facto de, frequentemente, durante a execução de alguns troços da LN, surgirem dificuldades relacionadas com as fracas características geotécnicas dos materiais, devido, em boa medida, ao elevado teor em água dos solos in situ. Nesses casos, o volume de solos que era necessário movimentar e as dificuldades de execução das obras mantendo uma das vias em exploração levaram a que se admitisse o tratamento da fundação com adição de cal aos solos. Embora os aspectos específicos desse tratamento saiam fora do âmbito da presente comunicação, interessa referir que este processo introduz importantes alterações ao comportamento dos materiais, traduzindo-se por uma melhoria generalizada das suas características físicas e mecânicas (ANCADE, 1997). A extensão do estudo anterior consistiu na contabilização do efeito da cal na melhoria da fundação e na avaliação desse efeito no valor do módulo de deformabilidade equivalente medido no topo da plataforma ferroviária. A Figura 4 ilustra o modelo conceptual considerado no estudo. Neste modelo, considera-se a existência de uma camada adicional sobrejacente ao solo de fundação, a qual corresponde ao solo tratado com cal. As características desta camada são, naturalmente, dependentes do solo de base. Em termos de comportamento mecânico, admitiu-se que o melhoramento correspondia a um aumento do módulo de elasticidade de 2 vezes até um valor máximo de 100 MPa. De acordo com as condições em que o tratamento com cal foi efectuado, admitiu-se ainda que a camada tratada teria uma espessura de 0,35 m. Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos a partir das simulações numéricas. Estes são expressos na forma de um ábaco que permite determinar a espessura da camada de reforço para se obter uma plataforma ferroviária com um valor do módulo $EV_2=120$ MPa. A título de exemplo, supondo que ocorre uma fundação

caracterizada por um valor do módulo EV_2 de 50 MPa e se utiliza um material de reforço com um módulo de deformabilidade de 300 MPa, a espessura necessária da camada construída com este material para obter no topo da plataforma um módulo de 120 MPa será de cerca de 30 cm.

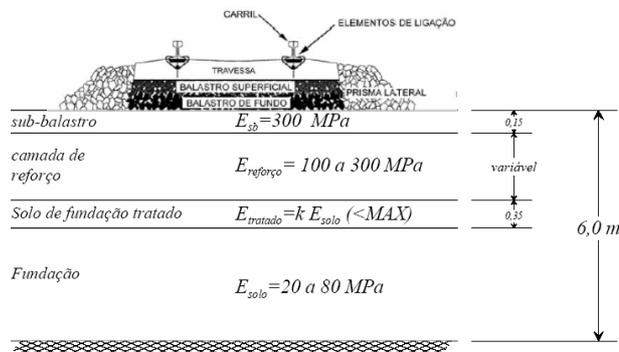


Figura 4. Modelo da subestrutura considerando o tratamento com cal.

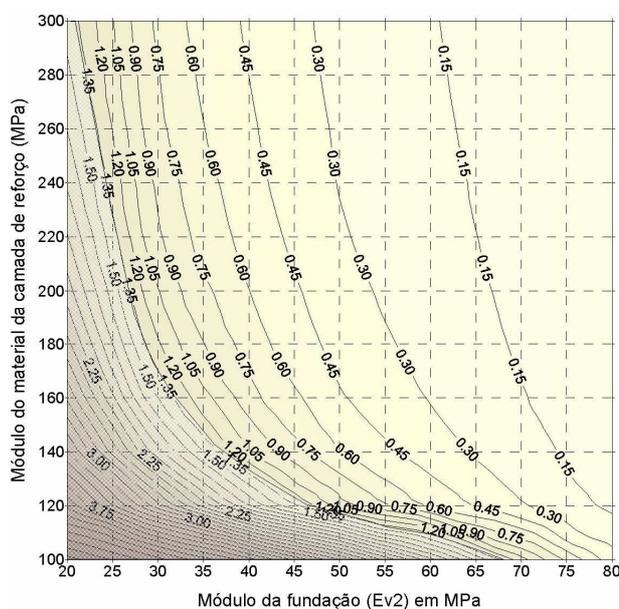


Figura 5. Resultados dos cálculos considerando o acréscimo de resistência devido ao tratamento com cal.

3 COMPORTAMENTO NÃO LINEAR

Os estudos apresentados até agora apresentam em comum o facto de todos os materiais serem considerados com comportamento elástico linear, o que, como é sabido, não traduz de forma correcta a resposta dos geomateriais. Estudos recentes (Fortunato, 2005) tornaram disponíveis resultados de caracterização de diversos materiais empregues durante a renovação da LN, nomeadamente os materiais utilizados nas camadas de sub-balastro e de

reforço; são agregados de natureza granítica e calcária, respectivamente, ambos obtidos por britagem em pedra, bem graduados, com dimensão máxima das partículas de 37,5 mm e uma quantidade máxima de finos de cerca de 9%; no ensaio de Los Angeles obtiveram-se valores de 23% e 32%, respectivamente.

Com base nos resultados desses estudos é possível reformular as metodologias de dimensionamento anteriormente propostas. A reformulação baseia-se na aplicação dos algoritmos desenvolvidos anteriormente mas considerando o comportamento não linear dos materiais de reforço e de sub-balastro ao invés de considerar uma gama de variação possível para os parâmetros elásticos que caracterizariam o seu comportamento. Tendo em consideração os estudos desenvolvidos por Fortunato (op. cit.) e convertendo os parâmetros obtidos dos ensaios laboratoriais de forma a adaptá-los ao modelo hiperbólico implementado no programa de cálculo (Marcelino, 1996), obtiveram-se os valores que se apresentam na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do modelo hiperbólico para os materiais de sub-balastro e da camada de reforço.

	Sub-balastro	Reforço
coesão (c)	5 kPa	5 kPa
ângulo de atrito (ϕ)	55	55
K	2344,3	3393,8
n	0,36	0,32
R_f	0,95	0,95
K_{dr}	4688,7	6787,7
coeficiente de poisson (ν)	0,3	0,3

A modelação do ensaio de carga com placa foi feita, tal como nos estudos anteriores, considerando um equilíbrio axi-simétrico, a geometria já apresentada anteriormente (Figura 2) e aplicando a tensão de 250 kPa, com no ensaio de carga realizado nas plataformas. Para simular de forma correcta o comportamento não linear dos materiais, a carga foi aplicada em 50 incrementos (de 5 kPa). Tal como no ensaio, a determinação do módulo equivalente foi feita na recarga, simulada após a primeira carga.

Não se dispendo de ensaios que permitam obter os parâmetros de um modelo não linear para os materiais constituintes da fundação e dado que se trata de um estudo paramétrico que se pretende aplicável a uma grande diversidade

de situações, optou-se por se considerar para estes materiais um comportamento elástico linear, semelhante ao que se havia considerado nos estudos anteriores. Os valores do módulo de elasticidade considerados para a fundação variaram entre 10 MPa e 40 MPa, muito embora se saiba que os valores mais reduzidos do módulo correspondem a materiais para os quais a metodologia de tratamento por substituição, tal como a que se preconiza, poderá não ser directamente aplicável. Na Figura 6 apresentam-se graficamente os resultados dos cálculos efectuados. Note-se que, neste caso, não é necessário optar por um valor de módulo de elasticidade para o sub-balastro ou para o material de reforço, uma vez que os cálculos efectuados incorporaram já as características dos materiais resultantes dos ensaios efectuados.

Na aplicação do gráfico selecciona-se o valor do módulo de elasticidade da fundação, o valor do módulo de deformabilidade equivalente EV_2 pretendido para a plataforma ferroviária e determina-se a espessura da camada de reforço, admitindo que o sub-balastro terá 0,15 m de espessura. Por exemplo, com uma fundação com 25 MPa, para se obter uma plataforma com 120 MPa de EV_2 , é necessário colocar uma camada de reforço de cerca de 0,55 m.

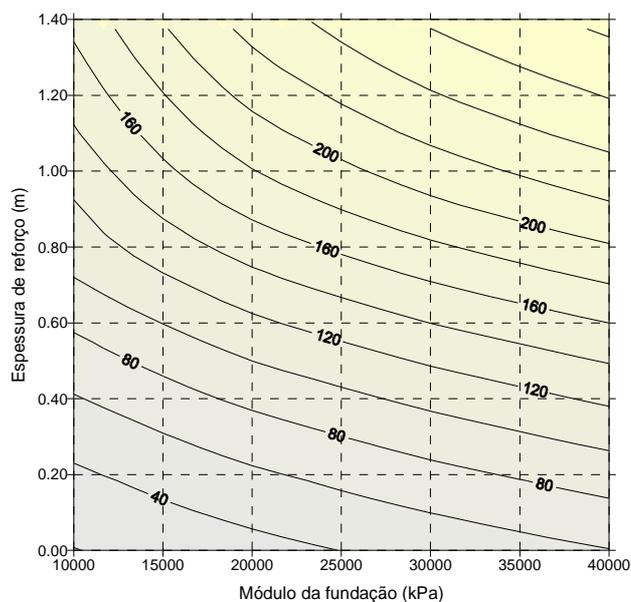


Figura 6. Resultados considerando a não linearidade dos materiais de reforço e de sub-balastro.

4 CONCLUSÕES

Os estudos apresentados neste trabalho pretendem promover a aplicação de métodos racionais no dimensionamento da subestrutura das vias férreas, métodos esses que se baseiam no conhecimento das características mecânicas dos materiais, das características geométricas e das condições de fronteira das estruturas.

Atendendo ao facto de as vias férreas serem obras que se desenvolvem linearmente em grandes extensões, a variabilidade das características físico-mecânicas da subestrutura pode ser muito significativa, particularmente quando se trata de infra-estruturas muito antigas, as quais foram projectadas e construídas quando os conhecimentos geotécnicos ou não existiam ou estavam pouco desenvolvidos.

Relativamente às camadas de reforço e de sub-balastro, deve ter-se em conta que o módulo de deformabilidade dos materiais que normalmente as constituem pode variar muito com o estado de tensão e com uma pequena variação das características de estado (compacidade e teor em água) desses materiais.

Nestas condições, o facto de se dispor de ábacos como aqueles que foram apresentados neste trabalho, permite dimensionar de forma expedita a espessura das camadas, atendendo às condicionantes de cada local.

Saliente-se que apesar de os estudos aqui apresentados abrangerem um intervalo relativamente lato no que se refere aos valores do módulo de deformabilidade equivalente da plataforma existente, o dimensionamento das camadas de reforço da plataforma quando esses valores são mais baixos (por exemplo inferiores a 20 MPa) pode ser condicionado por questões construtivas, nomeadamente a necessidade de assegurar a circulação do equipamento e de compactar correctamente as camadas de reforço, o que pode obrigar a melhorar as características dos materiais da fundação.

Por outro lado, a aplicação desta metodologia pressupõe uma caracterização laboratorial adequada dos materiais utilizados nas camadas de reforço e de sub-balastro, de forma a determinar o seu comportamento tensão-deformação e as variações deste com as condições de estado dos materiais.

REFERÊNCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1986). *Design guide for highway pavements*.
- Asociación Nacional de Fabricantes de Cales Y Derivados de Espanha (ANCADE) (1997). *Manual de Estabilización de Suelos con Cal*.
- Association Internationale Permanente des Congres de la Route (AIPCR) (1995). *Évaluation in situ des matériaux de couche de forme*.
- Fortunato, E. (2005). *Renovação de plataformas ferroviárias. Estudos relativos à capacidade de carga*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Fox, L. (1948). Computation of traffic stresses in a simple road structure. H. M. Stationery Office.
- Hank, R.; Scrivner, F. (1948). Some numerical solutions of stresses in two and three layer systems. *Highway Research Board*, Vol. 28.
- Jeuffroy, G.; e Bachelez, J. (1962). Note on a method of analysis for pavements. *1st Int. Conf. on the structural design of asphalt pavements*, Arbor.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) (1994). *Conception et dimensionnement des structures de chaussée – Guide technique*.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (2000a). *Modernização da Linha do Norte. Estudos relativos à reabilitação da plataforma*. Relatório 58/00 – DVC, Lisboa.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (2000b). *Modernização da Linha do Norte. Estudos relativos à renovação da plataforma. Estudo analítico para o dimensionamento das camadas de reforço da plataforma ferroviária*. Relatório 303/2000 – NBOA, Lisboa.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (2004). *Modernização da Linha do Norte. Estudos relativos à renovação da plataforma. Estudo analítico para o dimensionamento das camadas de reforço da plataforma ferroviária considerando a estabilização de solos com cal*. Relatório 198/2004 – NBOA, Lisboa.
- Marcelino, J. M. (1996). *Modelação do colapso e da fluência em aterros*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Matos Fernandes, M. (1995). *Apontamentos de Mecânica dos Solos*. Vol. II. FEUP, Porto.
- Nascimento, U. (1962). *Método analítico simplificado para o dimensionamento de pavimentos de estradas e aeródromos*. Relatório. Proc. VII-II, LNEC, Lisboa.
- Odemark, N. (1950). Research in Sweden in the field of flexible pavements. *Highway Research Abstracts*.
- Union Internationale des Chemins de fer (UIC) (1994). *Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaires*. Code UIC 719 R, 2e édition.