

# ESPECIFICAÇÕES DE DESEMPENHO PARA CAMADAS DE AGREGADOS BRITADOS EM FUNDAÇÕES DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE

Eduardo Fortunato<sup>1</sup>, António Pinelo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

email: [efortunato@lnec.pt](mailto:efortunato@lnec.pt) <http://www.lnec.pt>

<sup>2</sup> Centro Rodoviário Português, Praça de Alvalade, 6 - 5º Dto., 1700-036 Lisboa, Portugal

---

## Sumário

*Quando se avalia o desempenho de estruturas de pavimentos e de superestruturas ferroviárias, é reconhecida a importância determinante das condições de fundação nesse desempenho, em particular quando se avalia a fase de operação e manutenção (O&M). Com vista a garantir um adequado comportamento das referidas estruturas, é frequente empregar agregados britados nas camadas de fundação. Neste trabalho apresentam-se resultados de ensaios de caracterização mecânica de camadas compactadas de agregados britados, construídas num modelo físico e em obra; avalia-se a importância das condições de estado nas propriedades mecânicas das camadas e discutem-se aspetos relacionados com a utilização de especificações baseadas no desempenho no controlo da qualidade dessas camadas.*

---

**Palavras-chave:** agregados; especificações de desempenho; módulo de deformabilidade; modelo físico; caracterização in situ.

## 1 INTRODUÇÃO

Quando se avalia o desempenho de estruturas de pavimentos e de superestruturas ferroviárias, é reconhecida a importância determinante das condições de fundação nesse desempenho, em particular quando se avalia a fase de operação e manutenção (O&M). Com vista a garantir um adequado comportamento das referidas estruturas, é frequente o emprego de agregados britados nas camadas de fundação. A utilização deste tipo de materiais é também importante para assegurar adequadas condições de circulação dos equipamentos durante a fase de construção.

Na fase de projeto, a verificação da capacidade de carga da estrutura é correntemente feita considerando modelos de cálculo em que, para os materiais das camadas granulares, se admitem comportamentos elásticos e isotrópicos. As camadas são assim caracterizadas por propriedades mecânicas ( $E$ ,  $\nu$ ), as mesmas que são também utilizadas na fase de O&M, para avaliar a vida restante dessas estruturas e projetar obras de reforço.

No entanto, o comportamento dessas camadas é relativamente complexo, pois é regido por diversos fatores, relacionados, uns, com as propriedades intrínsecas das partículas, com a granulometria, com as condições da compactação, e, outros, com as solicitações e com as condições de estado durante a fase de O&M. Alguns desses fatores podem exibir variações importantes, quer ao longo do tempo, quer ao longo da obra, implicando variações importantes nas propriedades das camadas e, conseqüentemente, no desempenho das estruturas nelas fundadas.

Acontece que as especificações correntemente utilizadas na construção e no controlo da qualidade dessas camadas, ou estabelecem procedimentos construtivos (especificação do método) ou impõem características mínimas a atingir para o produto final (especificação por produto). Em ambos os casos, não são contempladas as propriedades mecânicas adotadas nas fases de projeto e de O&M. Assim, ao longo do ciclo de vida da infraestrutura não há uniformidade nas propriedades consideradas nos modelos de cálculo, afigurando-se ser

desejável adotar os mesmos requisitos nas várias fases do referido ciclo, nomeadamente para garantir a qualidade da infraestrutura.

A utilização de especificações baseadas no desempenho, ainda pouco difundidas – mas se acredita constituir uma tendência de desenvolvimento futuro – requer que, para os materiais utilizados e para a fase de construção, se estabeleçam como requisitos valores de propriedades mecânicas para as camadas. A quantificação dessas propriedades deve ser feita em laboratório e/ou *in situ* através de ensaios específicos, realizados em diferentes condições de estado. Correntemente as propriedades mecânicas visam a caracterização do comportamento elástico (módulo reversível) e da evolução das deformações permanentes, sob a ação de cargas repetidas.

Neste trabalho apresentam-se resultados de ensaios laboratoriais de caracterização de agregados britados, e de ensaios realizados *in situ*, sobre camadas construídas para fundação de infraestruturas de transporte; avalia-se a importância das condições de estado nas propriedades mecânicas dos materiais das camadas e discutem-se aspetos relacionados com a utilização de especificações baseadas no desempenho, no controlo da qualidade dessas camadas, feito durante a fase de construção.

## **2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CAMADAS DE FUNDAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE**

Os pavimentos rodoviários e as vias férreas são das mais simples estruturas de Engenharia Civil, no que se refere à fase de construção. No entanto, tais estruturas são das mais complicadas para projetar e para modelar o seu comportamento, nomeadamente porque é difícil definir com precisão um estado de ruína, o qual, em geral, está ligado a critérios de funcionalidade. A ruína corresponde ao aparecimento de degradações diversas, as quais podem afetar a "qualidade" do transporte (custo de operação dos veículos, conforto e economia) e a segurança da circulação. Acresce estar-se em presença de obras com desenvolvimento linear, construídas sobre o terreno existente, cujas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas podem variar significativamente. Além disso, estas estruturas incorporam frequentemente camadas de materiais naturais, cujas propriedades podem também variar significativamente, nomeadamente em função de distintas condições de estado resultantes das variações climáticas.

A previsão do comportamento das infraestruturas de transporte face às solicitações que lhe serão transmitidas é de grande importância, quer para garantir as necessárias condições de circulação, quer para permitir uma adequada gestão da sua conservação. No entanto, o comportamento destas estruturas é difícil de modelar matematicamente, pelo facto de serem constituídas por diversos elementos com características distintas e, normalmente, não existir informação suficiente sobre o comportamento de cada um desses elementos e do seu conjunto. Por outro lado, as solicitações aplicadas são cargas rolantes, variáveis e repetidas, que induzem estados de tensão sucessivamente distintos.

Os requisitos da qualidade exigidos às modernas infraestruturas de transportes, visando as condições de circulação do tráfego, aconselham a uma nova abordagem relativamente ao controlo da qualidade e à garantia da qualidade de todas as camadas, e em particular das camadas de fundação, pois o desempenho e os custos de O&M dependem muito do comportamento destas.

Com base nos conhecimentos atuais, as camadas de fundação das infraestruturas de transporte podem ser consideradas no dimensionamento, como nas outras estruturas de engenharia civil, recorrendo a modelos mecanicistas que incluem relações da física dos meios contínuos, nomeadamente leis constitutivas que traduzam o comportamento dos materiais nas condições de serviço. Assim, a avaliação das propriedades das camadas, quer nas fases de projeto e de construção, quer na de O&M, deve ser feita recorrendo a métodos que determinem propriedades mecânicas que sejam as consideradas nos modelos de dimensionamento.

No entanto, a aplicação de tais métodos requer cuidados especiais, quer pela dificuldade associada à caracterização das solicitações e dos elementos da estrutura, quer pela dificuldade em modelar adequadamente o sistema constituído por camadas. Os elementos da estrutura podem degradar-se, não só devido a fatores externos, como as solicitações do tráfego e os fatores ambientais, como também em consequência do comportamento (deficiente) dos outros elementos da estrutura.

Tem havido importante investigação com o objetivo de desenvolver métodos que possibilitem a caracterização das camadas de fundação com base em parâmetros mecânicos, nomeadamente o módulo de deformabilidade (E)

das camadas. Em consequência disso, na fase de construção, surgem cada vez mais obras em que se inclui no controlo da qualidade das camadas de fundação a medição de características mecânicas, quando são adotadas no Caderno de Encargos especificações baseadas no desempenho [1].

Este tipo de especificações tem sido utilizado em complemento, ou em alternativa, aos processos tradicionais de controlo, nomeadamente por estabelecimento de características mínimas a atingir para o produto final (especificação por produto). De facto, devido a fundamentarem-se predominantemente em dados da experiência, as especificações tradicionais podem não garantir o bom desempenho das estruturas, uma vez que pressupõem similitude entre as condições em que foram estabelecidas e aquelas em que são aplicadas.

Em particular, a aplicação destes procedimentos não permite, em algumas circunstâncias, obter valores representativos dos que exibem os materiais que constituem as camadas, quer devido às características granulométricas desses materiais (dimensão máxima das partículas), quer devido à espessura das camadas. Acresce que a experiência recente mostra que a construção de camadas com alguns tipos de agregados compactados com cilindros vibradores, recorrendo a fortes energias de compactação, pode conduzir a elevados valores da compacidade e ao aparecimento de tensões internas importantes, devidas aos fenómenos de sucção que têm lugar aquando da secagem do material. Assim, quando o teor em água dos materiais é muito baixo torna-se difícil executar ensaios de determinação do peso volúmico por métodos intrusivos (garrafa de areia ou sonda nuclear), devido à dificuldade de abrir a cavidade.

As especificações baseadas no desempenho assentam normalmente no estabelecimento de valores mínimos do módulo de deformabilidade das camadas, determinados em condições de ensaio pré-estabelecidas, por interpretação de resultados de ensaios não destrutivos. De facto, é o valor do módulo estabelecido em projeto e a sua manutenção, ao longo do tempo e em toda a camada, que garantem a adequada distribuição das cargas aplicadas pelos veículos para as camadas inferiores.

No controlo da qualidade feito durante a construção, o recurso às especificações baseadas no desempenho, além de permitir verificar a conformidade do respectivo processo, permite a validação dos pressupostos de projeto relativos às propriedades da fundação e, se caso for, permite proceder em tempo útil à sua reformulação, nomeadamente no que se refere aos materiais utilizados, às espessuras e aos processos construtivos das camadas. Na ótica do Dono da Obra, a adoção de especificações baseadas no desempenho pode transferir para o Empreiteiro a responsabilidade da obtenção das características adequadas e permitir a utilização de materiais não tradicionais, que normalmente estariam fora das especificações correntes [2].

Também nos projetos de reabilitação e de renovação de infraestruturas, a caracterização físico-mecânica *in situ*, visando a adoção de especificações baseadas no desempenho, tem vindo a assumir um papel determinante na identificação de zonas com patologias e na escolha das soluções construtivas. Com efeito, nas situações em que a estrutura a renovar é muito antiga – em alguns casos centenária, como acontece com linhas de caminho de ferro portuguesas – a fundação é, normalmente, muito heterogénea, o que torna mais difícil a recolha de amostras representativas, e discutível a representatividade das características determinadas em ensaios laboratoriais. Estes aspetos, e o volume de informação de que é necessário dispor quando se procede à renovação da fundação ao longo de extensões significativas, podem ser determinantes para que se torne técnica e economicamente mais favorável dar maior enfoque aos métodos de caracterização *in situ*, relativamente aos de caracterização laboratorial, ainda que com meios sofisticados.

Atendendo ao anteriormente referido, é necessário dispor de métodos para caracterização *in situ* do estado da fundação que sejam simultaneamente fiáveis, económicos, versáteis e rápidos, no que respeita à execução de ensaios, e respetiva interpretação. A sua utilização permitirá obter valores de referência relativos ao módulo e a outros parâmetros físicos utilizados na análise estrutural. Atualmente existem diversos métodos, distintos entre si no tipo de solicitação e na forma como esta é aplicada [3], o que pode conduzir a resultados também distintos, nomeadamente no que se refere ao valor do módulo de deformabilidade medido no topo das camadas. A escolha do método a utilizar depende, entre outros fatores, dos objetivos, do tipo de estrutura e das condições existentes em projeto (restrições físicas, económicas e de prazos), dos materiais a testar e do modelo de análise. É ainda recomendável recolher dados em quantidade significativa, que possam ser objeto de tratamento estatístico, de modo a obter informação robusta para a tomada de decisão (Fig. 1).

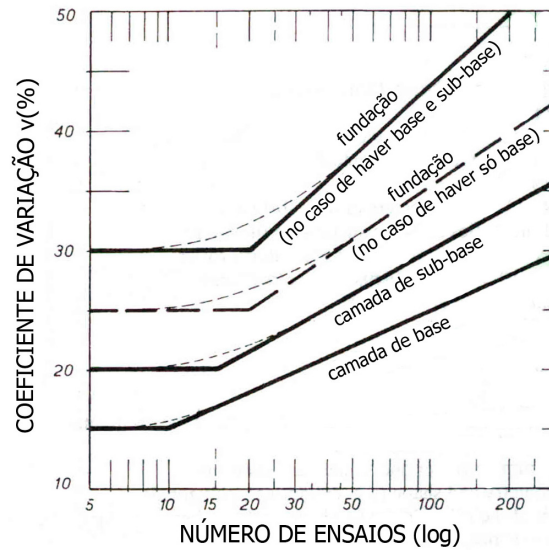


Fig.1. Valores recomendados para o coeficiente de variação do módulo de deformabilidade obtido no ensaio de carga com placa em camadas de materiais granulares de pavimentos rodoviários [4, adaptado].

Tradicionalmente a determinação do módulo de deformabilidade *in situ* é feita com recurso ao ensaio de carga estática com placa (ECP). Frequentemente o módulo é medido no segundo ciclo de carga ( $EV_2$ ). Porém, as dificuldades associadas à execução deste ensaio têm conduzido ao desenvolvimento de equipamentos de carga dinâmica, de avaliação pontual ou em contínuo [5], para determinação do referido módulo. Entre os do primeiro tipo refere-se o defletómetro de impacto portátil (DIP). Uma das vantagens de utilizar este tipo de equipamento reside no facto de com ele ser possível realizar um muito maior número de ensaios, de forma expedita e económica, o que permite fazer um tratamento estatístico dos valores obtidos. Alguns estudos têm demonstrado que é possível estabelecer relações entre os resultados obtidos pelos dois métodos (Fig. 2).

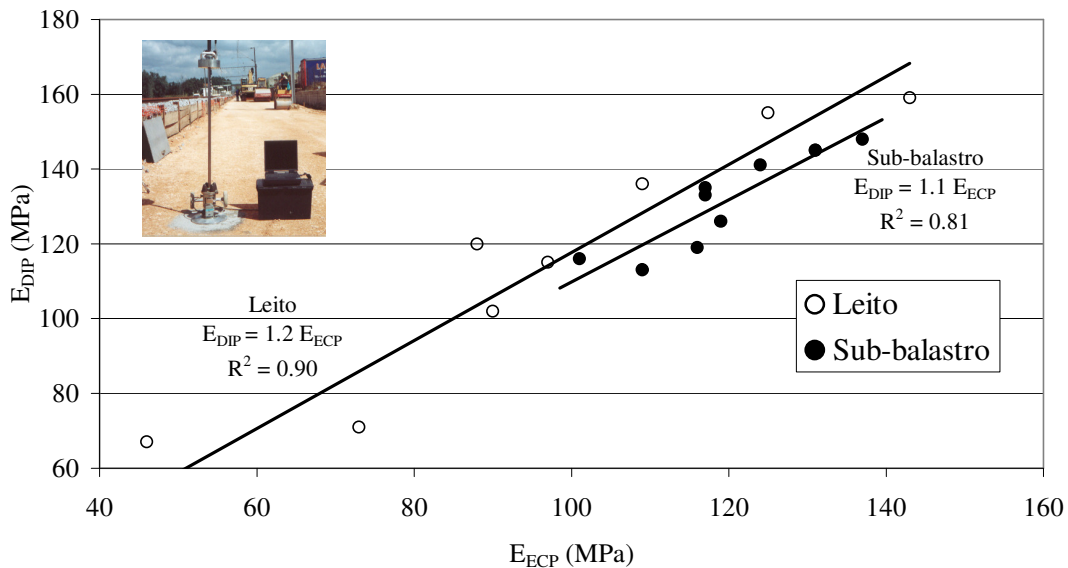


Fig.2. Relação entre o módulo medido com o ensaio de carga com placa e com o DIP [5, adaptado].

Observa-se que estas relações devem ser calibradas para cada situação tendo em conta o tipo de material, o tipo de solicitação aplicada no ensaio, as dimensões das placas utilizadas e a espessura das camadas ensaiadas.

No caso de estudo que se apresenta na secção seguinte foi utilizado o DIP para determinar o módulo de deformabilidade das camadas num modelo físico de grandes dimensões, construído em laboratório.

### 3 CASO DE ESTUDO

#### 3.1 Requisitos de projeto e metodologia de dimensionamento

O estudo sumariamente apresentado trata a renovação de uma via-férrea antiga, em Portugal. Para além dos requisitos relativos à superestrutura ferroviária, foram estabelecidos requisitos para as camadas de fundação da via, nomeadamente: a) a construção de uma camada de leito de via que proporcionasse uma plataforma de boa qualidade (classe P3), no topo da qual se deveria obter um valor do módulo de deformabilidade,  $EV_2 \geq 80$  MPa; b) sobre ela seria construída uma camada de 0,15 m de sub-balastro, no topo da qual se deveria medir um valor de  $EV_2 \geq 120$  MPa [6].

Começou por se proceder a um zonamento das extensões em estudo, visando a identificação das zonas com patologias, onde se teria que proceder à reconstrução da plataforma, admitindo-se que nas outras zonas seria possível aproveitar a plataforma existente e reforçá-la com a colocação de uma camada de leito. No zonamento tiveram-se em atenção diversos tipos de dados, nomeadamente das inspeções realizadas, das campanhas de prospeção, da avaliação da geometria da linha, dos relatórios das brigadas de conservação com a indicação das zonas onde eram mais frequentes as intervenções visando a reposição da geometria da linha, etc..

Para determinação da espessura da camada de leito a ser construída recorreu-se à modelação numérica, a qual teve em conta as características de deformabilidade da plataforma existente e dos materiais a colocar nas camadas de leito de via e de sub-balastro, e a espessura desta última. No modelo considerou-se o comportamento elástico dos materiais, de forma a obter um determinado valor para o módulo de deformabilidade equivalente, à superfície, como aquele que é determinado com o ensaio de carga com placa [7]. A aplicação sistemática do modelo, considerando diferentes valores das variáveis atrás referidas, permitiu elaborar diversos ábacos do tipo daquele que é apresentado na Fig. 3, através dos quais é possível determinar a espessura necessária para a camada de leito nas diferentes situações. Assim, neste caso, por exemplo, para se obter uma plataforma com um módulo de deformabilidade de 120 MPa, utilizando um material com um módulo de elasticidade de 200 MPa, é necessário construir uma camada de 0,35 m com esse mesmo material, como se indica na figura.

Nestas circunstâncias, era necessário estimar os valores do módulo de deformabilidade dos materiais a utilizar, considerando solicitações e condições de estado representativas daquelas que se iriam utilizar em obra, pelo que se desenvolveu o estudo laboratorial, em modelo físico, que se apresenta na secção seguinte.

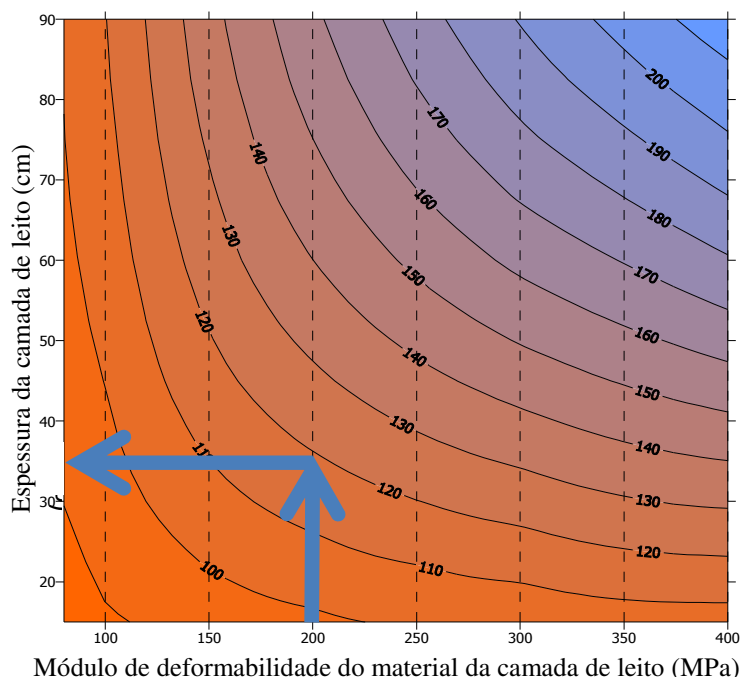


Fig.3. Exemplo de determinação da espessura da camada de leito [7, adaptado]

### 3.2 Caracterização laboratorial de camadas de agregados em modelo físico

Um dos maiores obstáculos à implementação de especificações baseadas no desempenho, está relacionado com a dificuldade em estabelecer procedimentos de execução dos ensaios e critérios de aceitação dos resultados, nomeadamente no que se refere ao teor em água das camadas granulares. Com efeito é conhecido a grande influência do teor em água no módulo. Para estudar, em condições controladas, o comportamento estrutural de camadas de agregados britados compactadas, realizaram-se estudos laboratoriais em modelo físico. A realização deste tipo de ensaios tem vantagens relativamente à construção de trechos experimentais em obra, já que permite realizar estudos com maior controlo das variáveis intervenientes, sem interferir com o desenrolar dos trabalhos, e de forma mais económica.

O modelo físico, com as dimensões  $2,2 \times 2,2 \times 1,0 \text{ m}^3$  (Fig. 4) foi construído de forma a permitir: i) compactar camadas de agregados com características físicas e mecânicas semelhantes às obtidas em obra, nomeadamente no que se refere à compacidade, ao teor em água e ao módulo de deformabilidade equivalente; ii) variar o teor em água nas camadas. No estabelecimento das dimensões do modelo foram ponderados diversos aspetos, nomeadamente: a) a possibilidade de realizar ensaios de carga com placa com 0,3 m de diâmetro sem uma interferência significativa do fundo e das paredes; b) um volume que permitisse uma exploração económica e fácil, tendo em conta os meios passíveis de serem mobilizados em laboratório; e c) as dimensões mínimas em planta que permitissem a realização de ensaios em zonas distintas. O modelo físico permite drenar as águas que podem ser introduzidas a partir da superfície, aquando da simulação de diferentes estados hídricos.



Fig.4. Aspetto do modelo físico e dos ensaios realizados durante a construção das camadas de agregado calcário.

O material ensaiado foi um agregado calcário britado bem graduado, de granulometria extensa, com a dimensão máxima das partículas de 37,5 mm e cerca de 8% em peso de partículas de dimensão inferior a silte. Trata-se de um material não plástico, com uma resistência à fragmentação das partículas (Los Angeles) não superior a 32%.

Atendendo às características do equipamento utilizado na compactação – uma placa vibradora com 85 kgf de peso estático e frequência de vibração de 75 Hz – foi decidido compactar camadas com espessura de apenas 0,10 m. Durante a construção das várias camadas, o controlo de compactação foi feito pelo método da garrafa de areia e pelo método da sonda nuclear (a duas profundidades, 0,05 e 0,15 m), o qual, em princípio, constitui um método adequado, atendendo aos materiais em análise [8, 9]. Os valores de referência do peso volúmico seco máximo e do teor em água correspondente, a adotar na compactação das camadas e no respetivo controlo da qualidade, foram obtidos pelo ensaio de vibro-compactação realizado sobre provetes cilíndricos [3].

Tendo em atenção os requisitos dos ensaios e as dimensões do modelo, estabeleceram-se nove locais igualmente espaçados para realizar o controlo de compactação e os ensaios de carga. Em cada camada foram realizados 18 ensaios com a sonda nuclear, conduzindo a valores médios de compactação relativa entre 97% e 101%.

Relativamente à comparação entre os resultados obtidos nos ensaios com a sonda nuclear e os obtidos com a garrafa de areia, concluiu-se: i) o valor médio do peso volúmico determinado pelo método da garrafa de areia foi superior ao valor médio determinado pela sonda nuclear em cerca de 2%, nas determinações feitas a 0,20 e 0,40 m de altura de construção e inferior em 1% e 3%, nas determinações feitas a 0,60 e 0,80 m, respetivamente; ii) o valor médio do teor em água determinado pelo método da estufa diferiu do valor médio determinado pela sonda nuclear em cerca de 9% do valor absoluto.

Os valores obtidos permitem concluir que, do ponto de vista da compactação, as camadas são relativamente homogêneas. Em face dos valores do coeficiente de variação dos resultados obtidos com cada um dos procedimentos, e atendendo aos intervalos de variação normalmente aceites para estas grandezas, parece poder concluir-se ser aceitável utilizar a sonda nuclear no controlo de compactação destes materiais.

Durante a construção das diversas camadas realizaram-se ensaios de carga com o DIP, para a determinação do módulo de deformabilidade equivalente, medido no topo da camada. Os ensaios foram realizados a diversas cotas, em três locais distintos em planta, aplicando uma pressão de 200 kPa sobre uma placa 0,30 m de diâmetro (Fig. 4). Na Fig. 5 apresentam-se os valores médios do módulo de deformabilidade determinados com o DIP ( $E_{DIP}$ ) e o intervalo de variação dos mesmos, registados em cada superfície correspondente a uma determinada cota de ensaio. Estes valores, que se apresentam em função do teor em água do material, foram calculados a partir da deflexão observada no centro da placa de carga. O teor em água foi calculado com base na média dos valores do teor em água medidos a 0,05 e 0,15 m abaixo da superfície ensaiada. Os valores de  $E_{DIP}$  variam entre cerca de 200 e 350 MPa e evidenciam a grande influência do teor em água do material no módulo.

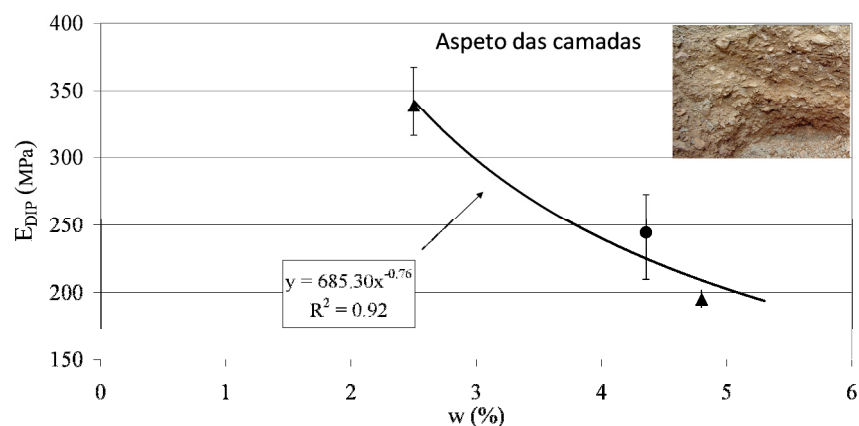


Fig.5. Variação com o teor em água do módulo de deformabilidade equivalente determinado com o DIP.

Uma vez construídas as camadas procedeu-se à determinação da evolução do respetivo teor em água ao longo do tempo; a medição foi realizada com o equipamento nuclear, a duas profundidades, nos locais anteriormente referidos. Procedeu-se também ao registo contínuo da temperatura e da humidade da sala onde foi construído o modelo físico, tendo-se registado variações de temperatura entre 24 e 26° C e da humidade relativa do ar entre 50% e 70%, durante quinze dias. Neste período a redução do teor em água das camadas foi de cerca de 2%.

Posteriormente procedeu-se à molhagem superficial do material, numa tentativa de reproduzir condições de pluviosidade intensa, associadas a um mau funcionamento dos sistemas de drenagem, que originasse a inundação da plataforma. Após 24 horas de molhagem mediu-se o teor em água do material em diversos locais, tendo-se obtido um valor máximo de cerca de 4,6%, que é próximo do teor em água de compactação.

Depois de o material secar, e quatro meses após a compactação, o teor em água era de 2%. Procedeu-se novamente a uma outra molhagem de 24 horas, passadas as quais o teor em água subiu para cerca de 4%. Quatro meses passados depois da segunda molhagem, o valor do teor em água era cerca de 1,3% (Fig. 6).

A comparação entre os valores do módulo obtidos no topo da camada superficial durante a secagem do material, com os obtidos após a molhagem, para valores do teor em água semelhantes, permitiu concluir que existe uma tendência de os primeiros serem superiores aos segundos. Este comportamento dos agregados, que tem sido identificado por outros autores [10, 11], deve estar relacionado com a histerese das tensões superficiais que estão na origem da sucção, histerese essa que ocorre durante os ciclos de secagem e de molhagem. Quando o material seca, a água disponível concentra-se nos contactos das partículas, desenvolvendo-se o fenómeno da sucção de forma relativamente homogênea em todos os contactos. Quando o material é sujeito a molhagem, o fenómeno pode não se desenvolver de forma homogênea [12]. A importância deste fenómeno depende da distribuição granulométrica do material e do arranjo das partículas [13]. Associado a este fenómeno pode ainda estar o efeito de cimentação, o qual funciona fundamentalmente durante a fase de secagem. Particularmente para valores baixos do teor em água, a cimentação química do material calcário pode ser um fenómeno determinante no comportamento, dependendo da composição mineralógica e dos elementos dissolvidos na água.

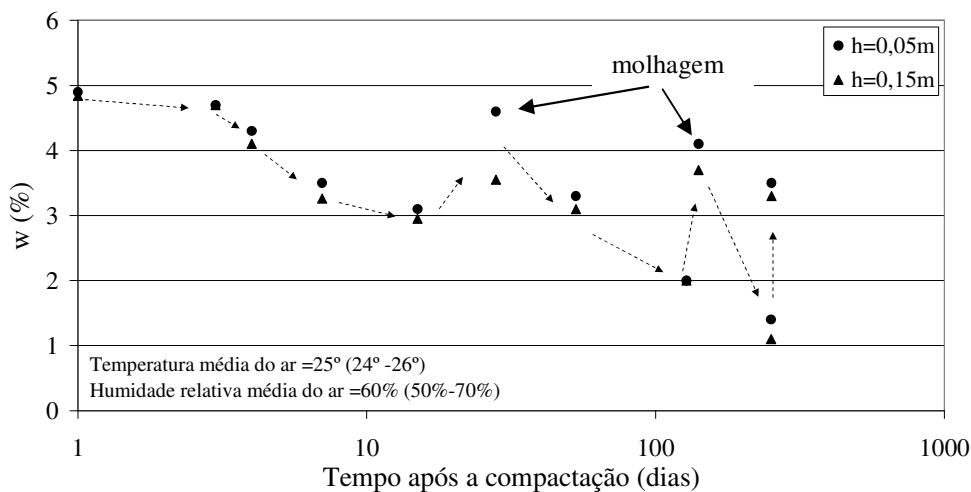


Fig.6. Variação do teor em água na camada de agregado calcário.

### 3.3 Ensaios *in situ*

Durante os trabalhos de renovação do referido trecho de via-férrea, foi levado a cabo um intenso controlo do processo construtivo, com o objetivo de o validar, tendo em conta os requisitos de projeto, nomeadamente os valores de referência a obter em ensaios de carga estática com placa [3]. Neste trecho de linha, o projeto de renovação estabeleceu: i) a construção de uma camada de reforço em agregado britado (constituindo o leito da via), com 0,35 m de espessura; ii) sobre ela, a construção da camada de sub-balastro de 0,15 m de espessura; iii) que no topo das camadas de leito e de sub-balastro, depois de compactadas, deveriam ser obtidos valores mínimos do módulo de deformabilidade equivalente ( $EV_2$ ) de 80 e 120 MPa, respetivamente.

Ao longo do trecho, as características dos solos de fundação da camada de balastro existente variaram significativamente, tendo-se identificado duas situações principais: i) em alguns dos locais existiam materiais inadequados, solos argilosos e silto- argilosos (A-6 da classificação AASHTO), com deficientes características geotécnicas (elevada percentagem de partículas de diâmetro inferior a 0,074 mm e elevado teor em água natural), sobre os quais não era possível compactar, em condições adequadas, a camada de leito da via; ii) noutros locais, o terreno em que assentava a camada de balastro era constituído por solos arenosos (A-3, A-1-b e A 2-4), sobre os quais foi possível realizar ensaios de carga estática com placa, e onde se obtiveram valores de  $EV_2$  superiores a 40 MPa. Estes resultados levaram a considerar altamente desejável o aproveitamento dos materiais existentes, e sobre eles construir as novas camadas.

Nos trechos com materiais inadequados, devido às limitações da cota da superestrutura, foi necessário sanear parte do material existente e substituí-lo por uma camada de enrocamento calcário (blocos com diâmetro máximo igual a 300 mm), com 0,30 a 0,45 m de espessura. Sobre o enrocamento, ou sobre o solo de fundação existente, se adequado, foi construída a camada de leito de via com uma espessura de 0,35 m, com agregado britado semelhante ao estudado em laboratório. Sobre este material foi colocada e compactada a camada de sub-balastro de agregado granítico (0/37,5 mm), com uma espessura de 0,15 m.

Em geral, os materiais foram compactados com teor em água ligeiramente inferior ao ótimo. Na camada de leito de via a compactação relativa variou entre 97% e 105% e na camada de sub-balastro entre 97% e 101%. Os valores médios foram de 99,2% e 98,7%, com coeficientes de variação de 10% e 1%, respetivamente. O recurso à distribuição *t* de *Student* para determinação dos limites do intervalo de confiança para a média da compactação relativa, para um nível de confiança de 95%, conduziu a intervalos de [97,6%; 100,9%] e de [98,5%; 98,9%], para as camadas de leito e de sub-balastro, respetivamente. Parece relativamente elevado o coeficiente de variação associado aos valores da compactação relativa obtidos na camada de leito, quando comparado com o obtido no sub-balastro. No entanto, é necessário considerar que as condições de fundação da camada de leito variam de forma mais importante do que as da camada de sub-balastro, uma vez que esta foi sempre construída sobre a primeira, o que torna distintas as condições de compactação.



Os resultados dos ensaios de carga com placa ( $EV_2$ ) constituíram uma informação muito importante na avaliação da metodologia seguida no processo de renovação da fundação da via. Sobre a camada de leito de via, em geral, foram obtidos valores de  $EV_2$  superiores ao especificado (80 MPa). Em 78 ensaios realizados sobre a camada de sub-balastro, apenas 19 conduziram a valores de  $EV_2$  inferiores a 120 MPa; no entanto, considerando a tolerância de 10% em relação àquele valor, apenas 3 ensaios evidenciaram a não conformidade da camada de sub-balastro. A referida tolerância foi previamente estabelecida, e é razoável, atendendo às características dos materiais e do próprio ensaio de carga. Os ensaios foram realizados pouco tempo após a compactação, quando os materiais tinham um teor em água próximo do da compactação; nestas circunstâncias, de acordo com o que se referiu anteriormente, os valores do módulo de deformabilidade exibidos pelos materiais seriam próximos do valor mínimo que eles podem assumir (Fig. 6). Em complemento aos ensaios de carga com placa, foram também realizados ensaios com o DIP, cujos resultados foram correlacionados com os obtidos naquele ensaio.

Na Fig. 7a apresenta-se a variação dos valores do módulo  $EV_2$  medidos no topo da camada de leito de via, em função dos determinados no topo da fundação existente; na Fig. 7b apresenta-se a relação entre os valores do módulo  $EV_2$  determinados no topo da camada de sub-balastro, e os determinados no topo da camada de leito.

Por se tratar de uma estrutura construída por camadas com diferentes materiais, o módulo equivalente medido a cada nível depende, naturalmente, do módulo das camadas subjacentes. Em termos gerais, verifica-se que existe um incremento considerável do módulo em cada local, a cotas sucessivamente distintas, primeiro associado à colocação da camada de leito sobre a fundação existente e, depois, à colocação da camada de sub-balastro sobre o leito. No primeiro caso, o acréscimo variou entre aproximadamente 30% e 300%; no segundo é possível considerar que a colocação de uma camada de sub-balastro conduziu a um aumento de  $EV_2$  que variou entre 10% e 70%, com um valor máximo de cerca de 40 MPa.

Portanto, em alguns casos, a colocação da camada de sub-balastro não contribuiu significativamente para aumentar o módulo de deformabilidade equivalente, o que pode ser explicado pelo facto de o módulo de deformabilidade do material utilizado no leito ser relativamente superior ao do sub-balastro [3] e de, em algumas situações, a fundação existente apresentar um módulo equivalente elevado.

A relação apresentada na Fig. 7a tem um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) muito mais baixo do que a apresentada na Fig. 7b, o que deve estar relacionado com a variação relativamente importante do tipo e das condições de estado dos solos da fundação existente. A análise dos resultados obtidos permitiu concluir que, aparentemente, a variação do peso volúmico seco e do teor em água dos agregados, dentro dos intervalos obtidos durante a compactação, não influenciou significativamente o valor de  $EV_2$ .

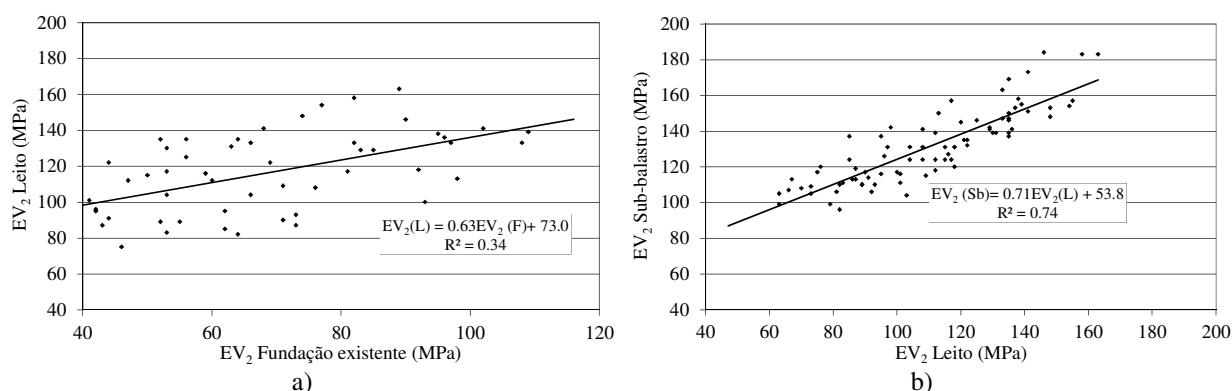


Fig.7. Valores de  $EV_2$ : a) relação entre os valores medidos sobre o leito de via e os medidos sobre a fundação que existia; b) relação entre os valores medidos sobre o sub-balastro e os medidos sobre o leito de via.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível aplicar uma abordagem mecanicista no dimensionamento e controlo da qualidade de camadas de agregados construídas para fundação de infraestruturas de transporte, nomeadamente estabelecendo valores mínimos para o módulo de deformabilidade das camadas, medido *in situ*. Os resultados obtidos em ensaios de

carga permitirem confirmar se os materiais utilizados, as espessuras das camadas e o processo construtivo são os indicados para satisfazer os requisitos de projeto.

A adoção de especificações de desempenho permite ainda considerar a hipótese de se utilizarem agregados não tradicionais na construção das camadas de fundação das infraestruturas de transporte.

Em qualquer caso, é necessário proceder à caracterização mecânica dos materiais a utilizar, recorrendo aos mesmos métodos que se utilizam no controlo da qualidade em obra, e considerando as condições de estado dos materiais, em particular as variações do teor em água.

A aplicação da mesma abordagem à avaliação do desempenho das infraestruturas de transportes durante a fase de operação e manutenção permite a determinação da evolução das propriedades mecânicas após a entrada em serviço e desse modo estimar a vida restante das infraestruturas. Caso esta seja insuficiente, é possível projetar medidas de reforço, com base nos valores das propriedades mecânicas medidas.

Para além disso, poderá ainda ser possível identificar situações de deficiente conservação, ou de mau funcionamento do sistema de drenagem, uma vez que os valores do módulo das camadas são muito sensíveis às variações do teor em água.

A adoção de especificações de desempenho permite, assim, considerar o mesmo tipo de propriedades ao longo do ciclo de vida da infraestrutura, estabelecendo como que um fio condutor comum às fases de projeto, de construção e de operação e manutenção.

A realização sistemática de campanhas de ensaios de carga não destrutivos, nas fases de construção e de operação e manutenção, permitirá obter informação sobre os valores do módulo das camadas construídas com diferentes materiais e em condições climáticas diversas. A análise desta informação poderá permitir ajustar as propriedades adotadas no projeto de obras similares.

## 5 REFERÊNCIAS

1. COST 337. Unbound granular materials for road pavements. *Final Report*. EU Comm. Luxembourg, 2000.
2. Gomes Correia, A.; Roque, A. J., Reis Ferreira, S. M., Fortunato, E., Case Study to Promote the Use of Industrial Byproducts: The Relevance of Performance Tests. *Journal of ASTM International*, 9(2), 2012.
3. Fortunato, E., *Renovação de plataformas ferroviárias. Estudos relativos à capacidade de carga*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2005.
4. Brandl, H., Compaction of soil and other granular material – interactions. *Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures. ECT 11-ISSMGE*, pp.3-11, Balkema, 2001.
5. Fortunato, E.; Mateus da Silva, J.; Pinelo, A., Caracterização de camadas de reforço de plataformas ferroviárias, *Actas do 8º Cong. Nacional de Geotecnia*, pp.1475-1486 (3), Lisboa, 15 a 18 de Abril de 2002.
6. Union Internationale des Chemins de fer (UIC), *Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaires*, 1994.
7. Fortunato, E.; Pinelo, A.; Mateus da Silva, J., The strengthening and upgrade of railway infrastructures. Geotechnical aspects, *Proc. XVth ICSMGE*, pp.2069-2072, (3), Istanbul, Agosto 2001. Balkema.
8. Gabr, M.; Gray, C.; Taylor, H., Nuclear gage tests on soils containing various sized aggregates. *Geotechnical Special Publication No. 56*, ASCE, pp. 35-47, 1995.
9. Macdonald, R.; Lund, J., A comparison of nuclear gauge and sand replacement test methods for monitoring compaction densities with two Danish unbound granular road materials. *Proc. 5th BCRA*, Trondheim, 1998.
10. Thom, N. H., Design of road foundations. *Ph.D. Thesis*. University of Nottingham, UK, 1988.
11. Heath, A. C.; Pestana, J. M.; Harvey, J. T., Normalizing behaviour of unsaturated granular pavement materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (9), pp.896-904, ASCE, 2004.
12. Kolisoja, P., Resilient deformation charact. of granular materials. *Ph.D. Thesis*. Tampere UT, Finland, 1997.
13. Likos, W. J.; Lu, Ning., Automated measurement of total suction characteristics in high-suction range. *TRR 1755*, pp.119-128, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, 2001.