

# A GEOTECNIA NOS PAVIMENTOS E VIAS-FÉRREAS E PROSPETIVAS PARA A ERA DIGITAL

## Pavement and rail track geotechnics and prospects for the digital age

António Gomes Correia<sup>a</sup>, José Neves<sup>b</sup>, Eduardo Fortunato<sup>c</sup>, Manuel Parente<sup>d</sup>

<sup>a</sup> ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal

<sup>b</sup> CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

<sup>c</sup> Departamento de Transportes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal

<sup>d</sup> BUILT CoLAB, Portugal

**RESUMO** – O artigo tem como objetivo apresentar as principais contribuições da geotecnia e da era digital nos pavimentos e nas vias-férreas, com importância nas várias fases do ciclo de vida (projeto, construção, operação e manutenção). Neste contexto são apresentados aspetos da caracterização e modelação dos geomateriais e sua influência no desempenho dessas estruturas, através da demonstração de resultados de ensaios de laboratório e “in situ”. No que diz respeito à digitalização que caracteriza a indústria na atualidade (Indústria 4.0), são descritas algumas das maiores potencialidades que as áreas da otimização e das tecnologias de informação e comunicação podem ter na gestão e alocação inteligente de recursos em ambientes dinâmicos, tais como as terraplenagens, bem como nos sistemas de gestão de pavimentos, para além do recurso ao BIM ao longo das fases de projeto. Acresce ainda a integração de materiais com capacidade de auto-sensorização que constituirão as estruturas inteligentes do futuro.

**ABSTRACT** – This paper presents the main contributions in the fields of geotechnics and the digital era in pavements and rail tracks, focusing on the various stages of life cycle of those structures (design, construction, operation, and maintenance). In this context, aspects concerning the characterization and modelling of geomaterials, together with their influence on the performance of these structures, are presented through the demonstration of laboratory and in situ test results. Regarding the digitalization trends that characterize nowadays' industry (Industry 4.0), this paper tackles some of the potential stemming from the application of areas such as optimization, as well as information and communication technologies, in different fields. Among the latter, the management and intelligent allocation of resources in dynamic environments, such as earthworks, as well as in pavement management systems, can be highlighted in tandem with the use of BIM throughout the design phases. Finally, the integration of materials featuring self-sensing capabilities, which will provide the smart structures of the future, is also addressed.

**Palavras Chave** – Geotecnia nos transportes, pavimentos, digital.

**Keywords** – Transportation geotechnics, pavements, digital.

---

E-mails: agc@civil.uminho.pt (A. Correia), jose.manuel.neves@tecnico.ulisboa.pt (J. Neves), efortunato@lnec.pt (E. Fortunato), manuel.parente@builtcolab.pt (M. Parente)

ORCID: orcid.org/0000-0002-0103-2579, orcid.org/0000-0002-7131-7967, orcid.org/0000-0002-9968-0821, orcid.org/0000-0001-5765-2622

## 1 – INTRODUÇÃO

A geotecnia nos pavimentos e nas vias-férreas integra um conjunto de conhecimentos que permite por um lado a caracterização geotécnica dos materiais e, por outro lado, a modelação do comportamento desses geomateriais sob as ações físicas, mecânicas e ambientais nessas estruturas, para além da otimização na gestão desses geomateriais na fundação e nas camadas estruturais. Uma abordagem mecanicista, quer na caracterização dos geomateriais quer no dimensionamento dessas estruturas, permite minimizar a rejeição de geomateriais disponíveis no local e na respetiva envolvente, através da valorização desses e de outros materiais por processos químicos e/ou mecânicos contribuindo desta forma para a economia circular.

Os resultados da caracterização geotécnica dos geomateriais continuarão a ser obtidos por via do recurso a ensaios “in situ” e em laboratório (cada vez mais com capacidades de sensorização e transmissão sem fios dos dados), tendo como desafios do futuro a interpretação desses resultados e a respetiva transmissão praticamente em tempo real. Estes desafios a nível da caracterização aplicam-se também ao nível do controlo de qualidade, de que são exemplo os equipamentos de compactação inteligente.

A valorização da geotecnia nas várias fases de planeamento, projeto, construção e operação das infraestruturas de transporte pode contribuir muito significativamente para a sustentabilidade geral das obras, ao permitir as escolhas mais adequadas em cada uma dessas fases do ponto de vista técnico, económico, social e ambiental (Gomes Correia et al., 2016). No âmbito das terraplenagens e das estruturas de pavimentos e vias-férreas, os grandes desafios da geotecnia envolvem a aplicação de ideias inovadoras, sobretudo da ciência dos materiais e da era digital, relacionadas com estratégias, materiais e tecnologias aos diferentes níveis do projeto, construção, operação e manutenção.

## 2 – ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS E VIAS-FÉRREAS

### 2.1 – O pavimento

A estrutura de um pavimento é constituída por camadas que se constrói sobre o terreno resultante das terraplenagens de forma a satisfazer critérios, por um lado, de comportamento estrutural (capacidade de carga e durabilidade adequadas às solicitações previsíveis do tráfego) e, por outro lado, de comportamento funcional (superfície final adequada às condições de circulação dos veículos), dentro de limites de custos de construção e manutenção aceitáveis e para determinado período do ciclo de vida da obra. Em geral, a estrutura dos pavimentos é constituída por camadas de superfície (camada de desgaste e camada de regularização ou ligação) e camadas de fundação (camada de base e camada de sub-base). O pavimento assenta sobre a fundação, na designada plataforma de apoio do pavimento.

A camada de desgaste é a camada superior do pavimento que está diretamente sujeita ao tráfego e aos agentes atmosféricos, devendo garantir a circulação dos veículos em condições de segurança (resistência à derrapagem, visibilidade, etc.), conforto (ótico, acústico e dinâmico) e economia (em termos de consumo de combustíveis, desgaste de pneus e outros componentes dos veículos e de duração do tempo de viagem). As camadas de base e sub-base têm como função principal a degradação das cargas dos veículos de modo a que os valores transmitidos à fundação do pavimento sejam compatíveis com a capacidade de suporte desta.

A fundação do pavimento é constituída pelo conjunto da camada de leito do pavimento e dos terrenos subjacentes que podem condicionar o seu comportamento. O leito do pavimento visa adaptar as características aleatórias e dispersas dos materiais existentes em aterro ou em escavação às características consideradas em fase de projeto. O leito do pavimento pode ser constituído por solos naturais selecionados ou por agregado britado de granulometria extensa. Pode-se, ainda, considerar a hipótese de construir o leito do pavimento em materiais tratados com cal ou com

ligantes hidráulicos (como por exemplo o cimento), para obter a fundação com as características pretendidas. Os terrenos subjacentes podem existir em escavação (terreno natural) ou em aterro. Em escavação, a fundação inclui os terrenos existentes “in situ” que, nos casos de não terem as características geotécnicas adequadas, deverão ser substituídos ou tratados. Em aterro, a zona em que irá assentar a camada de leito do pavimento constitui a parte superior do aterro. Pela função que vão desempenhar, a gestão da fase de terraplenagens deve recomendar para esta zona os materiais de melhor qualidade de entre os disponíveis em obra, de modo a se conseguirem as melhores características possíveis para a fundação do pavimento a um baixo custo. As condições de fundação, em especial da camada de leito do pavimento, são importantes na escolha do tipo de pavimento e no seu comportamento a médio e longo prazos. É recomendável que seja possível optar pelas melhores soluções de fundação, segundo critérios técnicos e económicos razoáveis, mesmo que tal exija a substituição ou tratamento dos materiais disponíveis no local. Este procedimento permitirá não só reduzir a espessura das camadas superiores do pavimento, que são construídas com materiais mais nobres e caros, à custa de materiais mais económicos, mas também tornar mais eficientes as futuras intervenções de manutenção ou reabilitação.

Os tipos de pavimentos mais correntes na tecnologia de construção rodoviária em Portugal são os pavimentos flexíveis (os mais representativos, constituídos por misturas betuminosas), seguindo-se os pavimentos rígidos (de betão) e os pavimentos semirrígidos (Neves, 2001). Nestes diferentes tipos de pavimentos a geotecnia interessa sobretudo, além da fundação, as camadas de base e de sub-base constituídas por geomateriais, predominantemente agregado britado de granulometria extensa, naturais ou reciclados, cujo comportamento depende das suas características intrínsecas (propriedades geométricas, físicas, mecânicas e químicas) e das condições de estado (compacidade e teor em água). Os geossintéticos podem igualmente ser utilizados nos pavimentos com as principais funções de separação, filtro, reforço e estabilização de forma a beneficiar favoravelmente o desempenho das estruturas ao longo da sua vida útil.

## 2.2 – A via-férrea

Quanto às diferentes tipologias de estruturas de via-férrea, a via balastrada tradicional é a mais difundida no mundo inteiro e a correntemente utilizada em Portugal (Fortunato, 2016). A via-férrea balastrada é constituída pela superestrutura (carris, fixações e travessas) e pela subestrutura (balastro, sub-balastro e camadas da fundação). Esta estrutura é relativamente simples, mas exhibe um comportamento complexo, em particular devido às solicitações dinâmicas a que está sujeita, e à forma como funcionam e interagem os seus diversos elementos. A geotecnia nas vias-férreas interessa sobretudo os geomateriais das camadas da subestrutura.

Os carris têm como principais funções guiar o material circulante e transmitir aos elementos subjacentes as ações verticais e horizontais (transversais e longitudinais), bem como os esforços de origem térmica. Existem diversos tipos de carril, sendo que o aumento da respetiva inércia permite obter maior resistência à flexão e menor fadiga, conduzindo também à distribuição da carga por um maior número de travessas, reduzindo assim a solicitação nas camadas de apoio.

As travessas, tradicionalmente construídas em madeira, betão ou metal, têm como funções atenuar e distribuir para o balastro os esforços transmitidos pelos carris. Normalmente, aquando da passagem de um eixo sobre uma travessa, cerca de 40% a 60% da carga desse eixo é transferida para as camadas subjacentes por essa travessa (Profillidis, 2006). Para além dos esforços decorrentes das solicitações associadas às cargas estáticas, as travessas têm também de resistir aos esforços originados pelas cargas dinâmicas e pelos que se geram devido a assimetrias de carga, por exemplo no traçado em curva. Em parte, são responsáveis pela manutenção da geometria da via, principalmente pela bitola e inclinação dos carris (“tombo”). As travessas apresentam também um papel importante para a estabilidade da via no seu plano pois é o peso próprio daquelas e o facto de estarem envolvidas pelo balastro que permite à via resistir aos esforços laterais produzidos não só pelo material circulante, mas também associados à variação térmica dos carris de barra longa

soldada. É de notar que nos dias de hoje, particularmente nas linhas de alta velocidade, existe a tendência de instalar travessas de grande resistência, como as do tipo monobloco, de betão armado pré-esforçado, com comprimento de 2,6 m a 2,8 m e peso da ordem dos 300 kg a 400 kg, usualmente colocadas com espaçamento de 60 cm.

As fixações dos carris, para além de garantirem o posicionamento destes elementos, devem apresentar propriedades resilientes, especialmente no caso das travessas de betão. Usualmente, esta resiliência é fornecida pela inclusão de palmilhas elásticas sob os carris, que influenciam a resposta dinâmica da via e reduzem o desgaste das travessas de betão. Em travessas de madeira (pouco utilizadas atualmente), interpõe-se apoios metálicos (chapins) entre os carris e as travessas, apoios esses que asseguram tensões admissíveis e protegem a madeira contra o desgaste mecânico. De referir ainda que as fixações são elementos importantes no isolamento elétrico dos carris.

A camada de balastro recebe os elevados esforços transmitidos pelas travessas e tem como principal função a sua atenuação e distribuição, reduzindo assim as tensões transmitidas às camadas inferiores. A camada de balastro é constituída por partículas de rocha, com granulometria uniforme, e usualmente apresenta 20 cm a 40 cm de espessura. A interação entre as partículas confere à camada uma elevada resistência à compressão, essencialmente na direção vertical. As forças horizontais que atuam sobre a via (transversais e longitudinais) são equilibradas pelo imbricamento das partículas de balastro e pelo atrito que se gera entre estas e as travessas. De certo modo, o balastro permite o encastramento parcial das travessas, fornecendo estabilidade à superestrutura da via-férrea. Nestas circunstâncias, a camada de balastro está sujeita a importantes solicitações, o que permite sugerir que esta é uma das aplicações mais exigentes a que os agregados estão sujeitos, no âmbito da sua aplicação em obras de engenharia civil. A camada de balastro contribui para a drenagem da via, uma vez que permite a percolação da água entre as partículas. Pelo facto de ser constituída por material resiliente, fornece à via capacidade de dissipar energia e atenuar vibrações que resultam da passagem de veículos. De referir ainda outras funções secundárias do balastro, que se traduzem pela inibição do crescimento de vegetação e isolamento elétrico entre os carris. Sendo o balastro constituído por partículas grosseiras de dimensões semelhantes, é possível efetuar o rearranjo da estrutura da camada, o que facilita as tarefas de manutenção e a reposição da qualidade geométrica da via. Esta faculdade facilita também as operações de colocação e remoção do balastro e dos outros elementos constituintes da via.

O sub-balastro é um elemento constituído por uma ou várias camadas de materiais distintos, e que separa o balastro da fundação. Usualmente, esta camada tem sido construída com agregado britado de granulometria extensa. À semelhança do balastro, a camada de sub-balastro tem como função degradar as cargas resultantes da circulação de veículos e transmitir-las, a níveis aceitáveis, para as camadas inferiores. Apesar de estes dois elementos partilharem esta mesma função, o sub-balastro deve permitir uma atenuação das tensões de forma mais adequada do que a resultante do aumento da espessura da camada de balastro; de facto, esse aumento, para além de ser economicamente pouco eficiente, pode conduzir a um mau comportamento da camada de balastro. O sub-balastro funciona como barreira para evitar o desgaste da plataforma devido às ações mecânicas do balastro, impede que este penetre nos solos e evita a ascensão de partículas finas provenientes da fundação, que podem contaminar o balastro. O sub-balastro permite ainda drenar as águas que caem na via, encaminhando-as para a drenagem lateral, e evita a subida das águas a partir da fundação. Para além disso, protege também a fundação contra as ações do gelo.

Considera-se como sendo a fundação da via-férrea o conjunto das camadas localizadas abaixo da camada de sub-balastro, que constituem o terreno natural ou foram construídas para o efeito, e até à profundidade onde se fazem sentir as ações produzidas pelo tráfego ferroviário. É normal haver uma preocupação especial com as características dos terrenos até profundidades de, pelo menos, 1 m a 2 m abaixo da base da travessa, na ausência de solos moles (Kaynia et al., 2000). Na parte mais superficial da fundação encontra-se a camada de leito da via (ou coroamento), sobrejacente à parte superior das terraplenagens. Nas linhas modernas e naquelas que têm sido reabilitadas, estas camadas superiores são constituídas por materiais de boa qualidade, cumprindo

exigências, ao nível da compactação e da deformabilidade, superiores às que são exigidas às camadas subjacentes. Em particular, nas situações em que os terrenos de fundação exibem deficientes propriedades geotécnicas, há que garantir uma espessura adequada das camadas superiores, de forma a evitar que a via exiba fenómenos de ressonância, resultantes da circulação de veículos a velocidades próximas da que habitualmente se designa por “velocidade crítica” (Krylov et al., 2000).

Do exposto, é evidente a importância da geotecnia no desempenho nas estruturas de pavimento e de via-férrea. Essa importância deve refletir-se, não só no investimento nos estudos geotécnicos do terreno de fundação e das camadas estruturais, mas também na implementação de práticas geotécnicas adequadas, relativas quer aos materiais, ao dimensionamento e aos processos construtivos, para além do comportamento a longo prazo avaliado através da análise do ciclo de vida.

### **3 – CARACTERIZAÇÃO DE GEOMATERIAIS E MODELAÇÃO ESTRUTURAL**

#### **3.1 – Enquadramento**

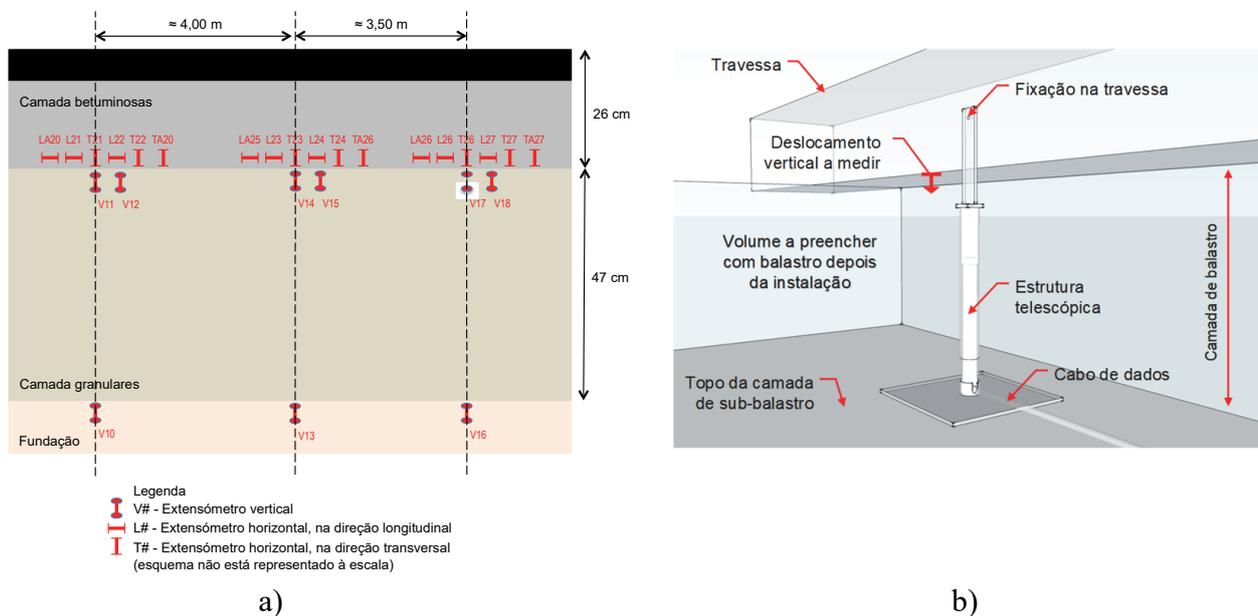
O comportamento das estruturas rodoviárias ou ferroviárias ao longo do seu ciclo de vida depende, entre outros fatores, da qualidade e desempenho dos materiais, não só dos materiais das camadas, mas também dos materiais existentes na fundação. Em muitas dessas estruturas, são as camadas de geomateriais que, em conjunto com a fundação, desempenham o papel mais importante no comportamento estrutural à passagem do tráfego e para as condições ambientais em que se encontram, como por exemplo as condições hídricas. Sobretudo, em redes secundárias de estradas, são as estruturas de pavimento com maior espessura das camadas não ligadas, por oposição à espessura das camadas superiores ligadas (misturas betuminosas ou revestimentos superficiais), que têm a maior representatividade e importância. Nas estradas não revestidas, são as camadas não ligadas que asseguram toda a capacidade de carga. No caso das vias-férreas, o desempenho é fortemente condicionado pelas características dos geomateriais que constituem as camadas de balastro, sub-balastro e fundação da via.

O conhecimento adequado do comportamento de todos os materiais, mas em particular dos geomateriais aplicados na fundação e nas camadas não ligadas, é essencial ao dimensionamento. A natureza e diversidade intrínseca dos geomateriais torna a abordagem à sua caracterização física e mecânica mais complexa, ao contrário de outros materiais fabricados para os quais muitas vezes estão associados sistemas de controlo da sua produção. Com efeito, uma abordagem mais racional ao comportamento dos materiais é mais exigente ao nível dos equipamentos e da amostragem, o que na maioria das vezes é incompatível com o tempo e os custos alocados à atividade de projeto. O comportamento elástico linear tem sido o modelo mais correntemente utilizado no dimensionamento estrutural, pela sua simplicidade de relacionar tensões e deformações. Contudo, a utilização de modelos simplificados pode influenciar significativamente o dimensionamento dos pavimentos e das estruturas de via-férrea, quer em obra nova quer em contexto de reabilitação, com impacto na segurança e na economia (Neves e Gomes Correia, 2002c e 2003, Varandas et al., 2020).

O comportamento dos geomateriais é caracterizado por leis constitutivas – curvas tensão-deformação – que correspondem a relações não lineares, o que leva à definição de parâmetros variáveis para relacionar diferentes valores de tensão com a deformação correspondente (Gomes Correia, 2008). O conhecimento dos modelos mais adaptados ao seu comportamento é fundamental para que, ao serem integrados nos modelos de resposta das estruturas, seja possível o cálculo realista dos estados de tensão e deformação induzidos pelas solicitações do tráfego. Desta forma será possível contribuir para o melhor dimensionamento das estruturas que satisfaça os critérios aplicáveis, não só técnicos, mas também económicos e ambientais. Esta preocupação assume ainda maior relevância no contexto do modelo de economia circular em que são maiores as

exigências, não só no planeamento das ações de manutenção e reabilitação no âmbito dos sistemas de gestão dos pavimentos, mas também na implementação de práticas construtivas mais sustentáveis ao longo do ciclo de vida das obras (Gomes Correia et al., 2016).

A investigação suportada em experimentação tem desempenhado um papel importante na validação e calibração de modelos mais ajustados ao comportamento dos geomateriais, contribuindo para a sua implementação no dimensionamento estrutural assistido por meios de cálculo automático cada vez mais potentes. É disso exemplo a realização em laboratório de ensaios de cargas cíclicas em provetes de materiais ou em modelos físicos de estruturas de pavimentos e/ou vias-férreas e a instrumentação de trechos experimentais. Com efeito, a instrumentação dessas estruturas e a observação do seu comportamento em ensaios não destrutivos tem sido da maior utilidade à avaliação do comportamento dos geomateriais com vista ao estabelecimento e validação de modelos mais adequados a utilizar no dimensionamento. A Figura 1 mostra exemplos de instrumentação de trechos experimentais rodoviários e ferroviários com diferentes tipos de dispositivos. Para além do conhecimento adequado do comportamento dos geomateriais no contexto do dimensionamento estrutural, é também importante que na fase de construção seja assegurado o controlo de qualidade dos materiais e dos processos construtivos.



**Fig. 1** – Instrumentação de trechos experimentais: a) pavimento rodoviário; b) via-férrea.

Em seguida passa-se em revista alguns dos principais aspetos do comportamento mecânico dos geomateriais – solos e misturas de materiais granulares não ligadas – sob ação de cargas cíclicas, avaliados em laboratório e “in situ”, que devem ser levados em linha de conta no dimensionamento estrutural dos pavimentos e vias-férreas.

### 3.2 – Caracterização laboratorial

O comportamento dos solos da fundação dos pavimentos e das vias-férreas sob ação de cargas cíclicas tende a ser mais complexo e dependente de muitos fatores como, por exemplo, dos estados de tensão e deformação aplicados, da história de tensões, da frequência, amplitude e número de ciclos do carregamento, da compactidade, do teor em água, da sucção, do grau de saturação e da anisotropia (Gomes Correia, 2001 e 2004a).

O ensaio triaxial de precisão de cargas cíclicas tem permitido estudar a deformabilidade dos solos ao nível das deformações quasi-elásticas, reversíveis ou resilientes, bem como ao nível das deformações permanentes ou plásticas que se desenvolvem com a aplicação do número de ciclos

de carregamento. A simulação através destes ensaios dos estados de tensão representativos ao nível da fundação das estruturas dos pavimentos e das vias-férreas tem demonstrado que o comportamento dos solos deve ser analisado no domínio das pequenas deformações (Gomes Correia et al., 2010). Além disso, é neste domínio que o comportamento exibido pelos solos depende do estado de tensão aplicado, ou seja, que o comportamento é não linear. (Gomes Correia e Biarez, 1999) Assim, a utilização de correlações empíricas baseadas em resultados de ensaios, como é o caso do ensaio de determinação do Índice Californiano de Capacidade de Carga CBR (“Californian Bearing Ratio”), apenas deve ser considerada como uma forma de avaliação qualitativa e expedita da deformabilidade do solo (Gomes Correia, 2001).

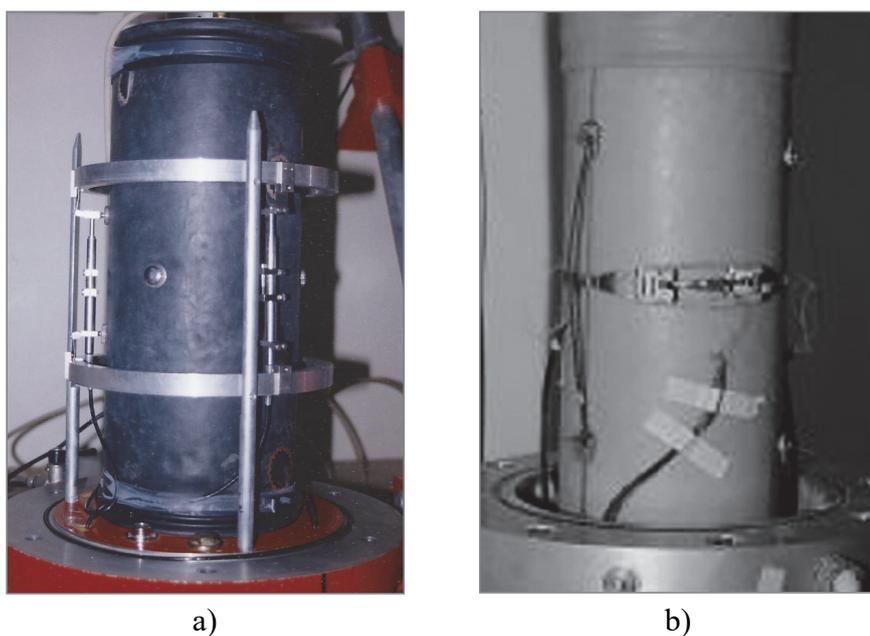
De um modo geral, os modelos de comportamento resiliente dos solos finos estabelecidos em ensaios triaxiais relacionam o módulo quasi-elástico, reversível ou resiliente ( $M_r$ ) com a tensão deviatória cíclica ( $q$ ), ou com as relações  $q/\sigma_3$  ou  $q/p'_0$ , mostrando que o módulo reversível depende da tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) e da tensão normal média efetiva ( $p'_0$ ) (Brown, 1996, Gomes Correia e Dawson, 1996). Estas leis traduzem o comportamento não linear dos solos, nomeadamente dos solos mais finos, quando sujeitos a carregamentos cíclicos. Biarez et al. (1999) generalizaram as leis de comportamento dos solos cobrindo a gama das muito pequenas deformações às grandes deformações.

Quanto aos materiais granulares não ligados das camadas de base e de sub-base de pavimentos rodoviários e as camadas de balastro e de sub-balastro de vias-férreas, estes desempenham um papel fundamental no comportamento estrutural destas estruturas. Para além de agregados naturais, estas camadas também podem ser constituídas por agregados reciclados e artificiais, de diversas proveniências, o que contribui igualmente para a desejável sustentabilidade na construção das infraestruturas de transporte (Delgado et al., 2019, Fortunato et al., 2018, Gomes Correia et al., 2012, Gomes Correia et al., 2016). Quando solicitadas pelo tráfego e à semelhança da fundação, estas camadas exibem igualmente um comportamento mais complexo que interessa conhecer para o dimensionamento mais adequado dos pavimentos.

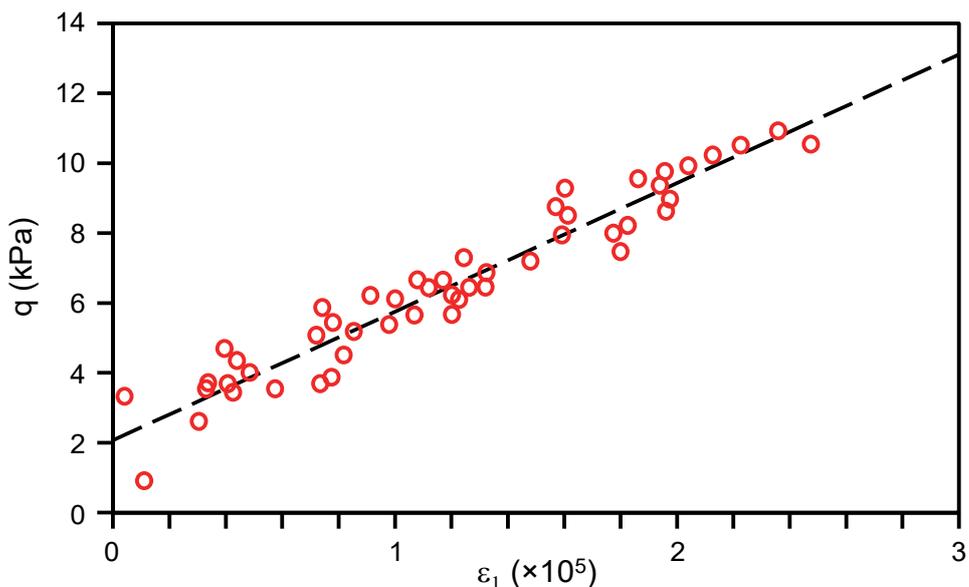
Os primeiros modelos para caracterizar o comportamento dos materiais granulares basearam-se na interpretação de ensaios triaxiais de cargas cíclicas a tensão lateral constante, em que apenas a tensão deviatória era cíclica. Estes ensaios, realizados em câmaras triaxiais de maior dimensão, atendendo à natureza dos materiais, permitiram obter modelos simples do módulo reversível em função do estado de tensão a que o material estava sujeito. As deformações radiais não eram habitualmente medidas nestes ensaios e, portanto, eram arbitrados valores constantes para o coeficiente de Poisson. As limitações destas leis constitutivas fizeram-se sentir, sobretudo, quando se passaram a realizar ensaios mais sofisticados com medição de deformações radiais e com tensão lateral variável. A intensa investigação desenvolvida na Europa desde o final da década de 80 do século XX, onde Portugal participou ativamente (Gomes-Correia e Dawson, 1996), culminou na atual norma EN 13286-7 (2004) relativa ao ensaio triaxial de cargas cíclicas aplicado a misturas granulares não ligadas. Esta norma considera a variação cíclica das tensões deviatória e lateral e contempla diversas trajetórias de tensões, de forma a enquadrar a modelação do comportamento para diversos estados de deformação e condições de estado. Estes ensaios têm permitido estudar, tal como nos solos, a deformabilidade dos materiais granulares ao nível das deformações resilientes e das deformações permanentes. A investigação realizada neste domínio tem mostrado claramente que as misturas de materiais granulares não ligadas evidenciam comportamento reversível não linear, dependendo das condições de estado e até da anisotropia (Gomes Correia, 2000, Gomes Correia, 2004b, Neves e Gomes Correia, 2004).

Tal como nos solos, também nas misturas granulares é muito importante que nos ensaios triaxiais de cargas cíclicas o sistema de medição das deformações seja aplicado diretamente no provete (ensaio triaxial de precisão). Tem havido uma grande evolução nos sistemas de medição da deformação triaxial. Desde os primeiros sistemas de medição constituídos por transdutores de medição de deslocamento linear do tipo LVDT (“Linear Variable Differential Transformer”), como o representado na Figura 2a e instalado no Instituto Superior Técnico, tem-se assistido a uma

evolução conduzindo a sistemas de maior durabilidade e precisão. A Figura 2b mostra a instrumentação de um provete com transdutores do tipo LDT (“Local Differential Transducer”) construídos na Universidade do Minho (Coronado et al., 2011 e 2016). Este tipo de transdutores não só permite o registo de deformações numa gama ainda menor, como também são de fácil construção e aplicação, têm menor custo e apresentam maior durabilidade a longo prazo pela maior resistência à temperatura e humidade. Relativamente à avaliação do estado de tensão do provete, o transdutor de medição da força vertical deve igualmente ser colocado no interior da câmara e no topo do provete, permitindo assim obter uma maior precisão nas leituras pela eliminação da influência do atrito mobilizado na zona do pistão. A Figura 3 evidencia o melhor desempenho que globalmente é conseguido num sistema de medição tensão-extensão triaxial deste tipo no domínio das pequenas deformações ( $0,1 \times 10^{-5} < \varepsilon_1 < 3 \times 10^{-5}$ ).

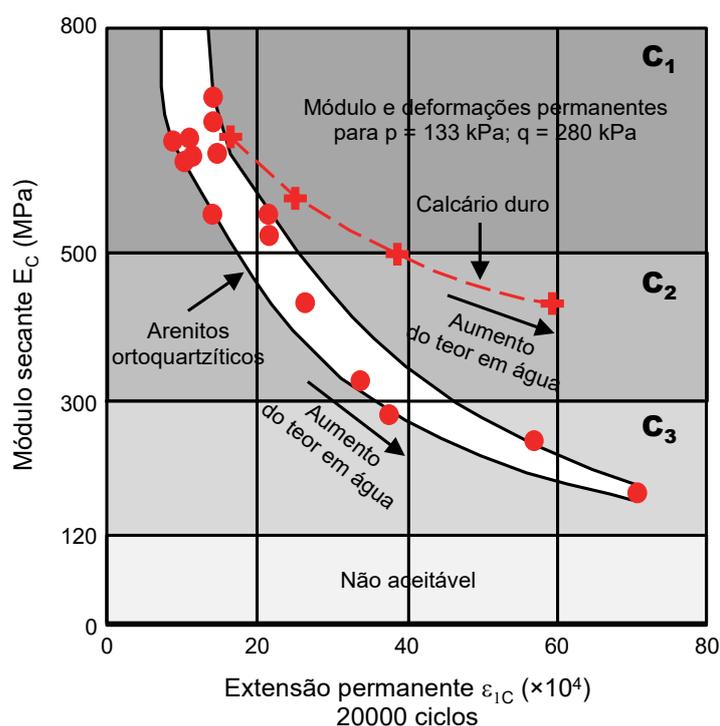


**Fig. 2** – Sistemas de medição da deformação triaxial: a) LVDT; b) LDT.

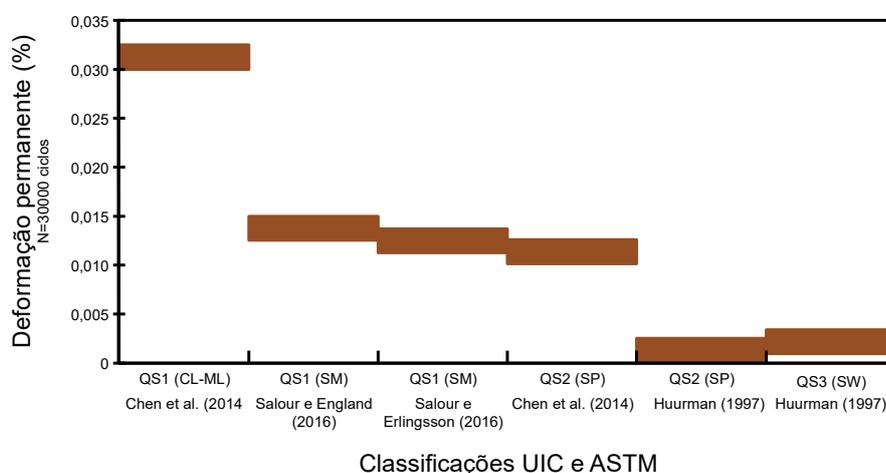


**Fig. 3** – Desempenho do sistema de medição tensão-extensão triaxial no domínio das pequenas deformações (Coronado et al., 2011).

Gomes Correia et al. (1999) apresenta uma revisão dos modelos de comportamento reversível atualizados posteriormente em Gomes Correia (2004b), sendo que modelos de comportamento às deformações permanentes, quer de solos, quer de agregados, podem ser consultados em trabalhos recentes (Ramos et al., 2020, Varandas et al., 2020). Os modelos avançados para as deformações permanentes, para além de serem influenciados pelas condições de estado (Gomes Correia, 2000), devem incluir o estado de tensão inicial, e o posicionamento da tensão aplicada em relação à envolvente de rotura. A consideração do comportamento reversível e às deformações permanentes tem sido utilizado para uma classificação geomecânica dos solos e dos materiais granulares de que é exemplo a Figura 4 em relação ao teor em água (Coronado et al., 2011). Esta mesma abordagem foi recentemente adaptada para a classificação do comportamento às deformações permanentes dos tipos de solos definidos pela “Union Internationale des Chemins de Fer” (UIC) e “American Society for Testing and Materials” (ASTM) como se ilustra na Figura 5 (Ramos et al., 2020).

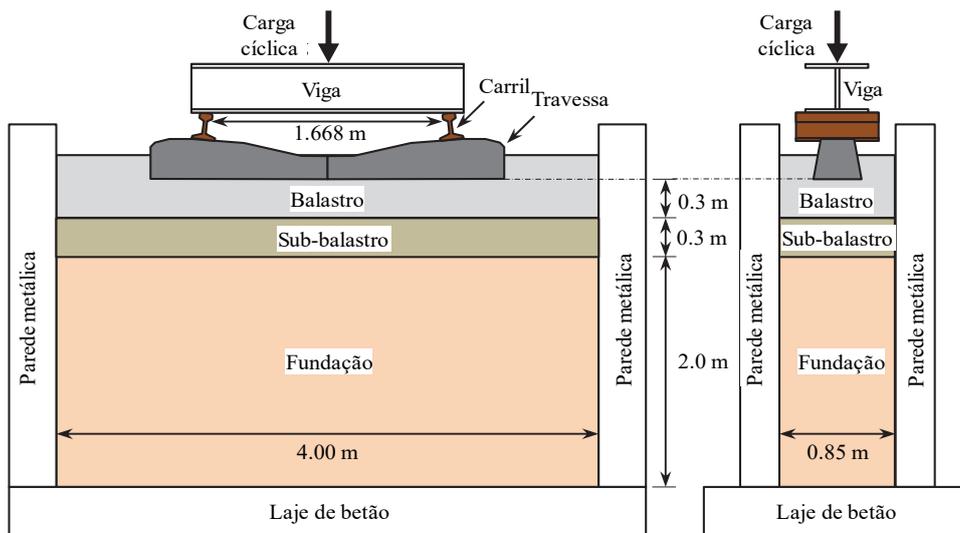


**Fig. 4** – Influência do teor em água na classificação geomecânica (adaptado de Coronado et al., 2011).

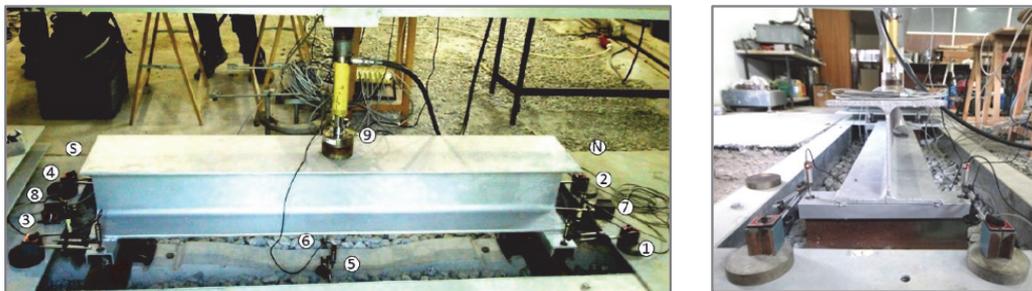


**Fig. 5** – Deformação permanente para diferentes solos (adaptado de Ramos et al., 2020).

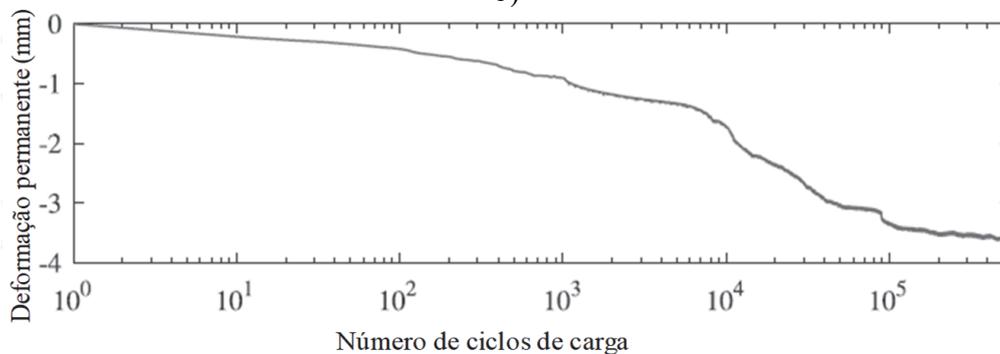
Também os modelos físicos de laboratório (Ramos et al., 2021), bem como os construídos à escala real, têm desempenhado um papel importante quer, por exemplo, na avaliação do comportamento não linear dos agregados que constituem as camadas de apoio da via-férrea (Fortunato, 2005), quer no âmbito do estudo do reforço da fundação de vias-férreas com injeções de ligantes (Fortunato et al., 2019), quer ainda no estudo da deformação permanente dos materiais. Em particular, no que se refere à análise e modelação do comportamento das camadas de balastro e sub-balastro ferroviário, Varandas et al. (2020) utilizaram um modelo físico da via-férrea construído à escala real (Figura 6), para, através de ensaios de carga cíclica, validar a implementação num modelo numérico – dinâmico, tridimensional, por elementos finitos – de análise estrutural da via-férrea, um modelo elástico não linear para estimar a deformação resiliente e um modelo constitutivo de deformação permanente.



a)



b)

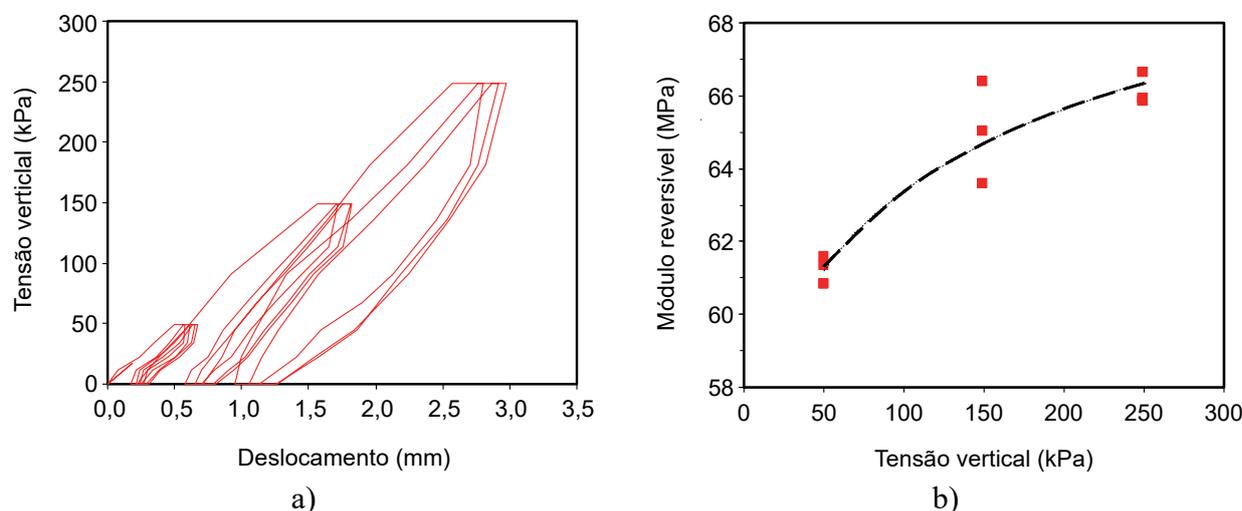


c)

**Fig. 6** – Modelo físico: a) esquema (vistas frontal e lateral); b) ensaio (vistas frontal e lateral); c) resultados experimentais (Varandas et al., 2020).

### 3.3 – Caracterização *in situ*

Em pavimentos rodoviários, a realização de ensaios de carga com placa e aplicação repetida de ciclos de carga e descarga (Figura 7a) mostrou que a fundação exibiu comportamento não linear, evidenciado através da relação direta do módulo reversível com a tensão vertical aplicada na placa de ensaio (Figura 7b) (Neves e Gomes Correia, 2006).

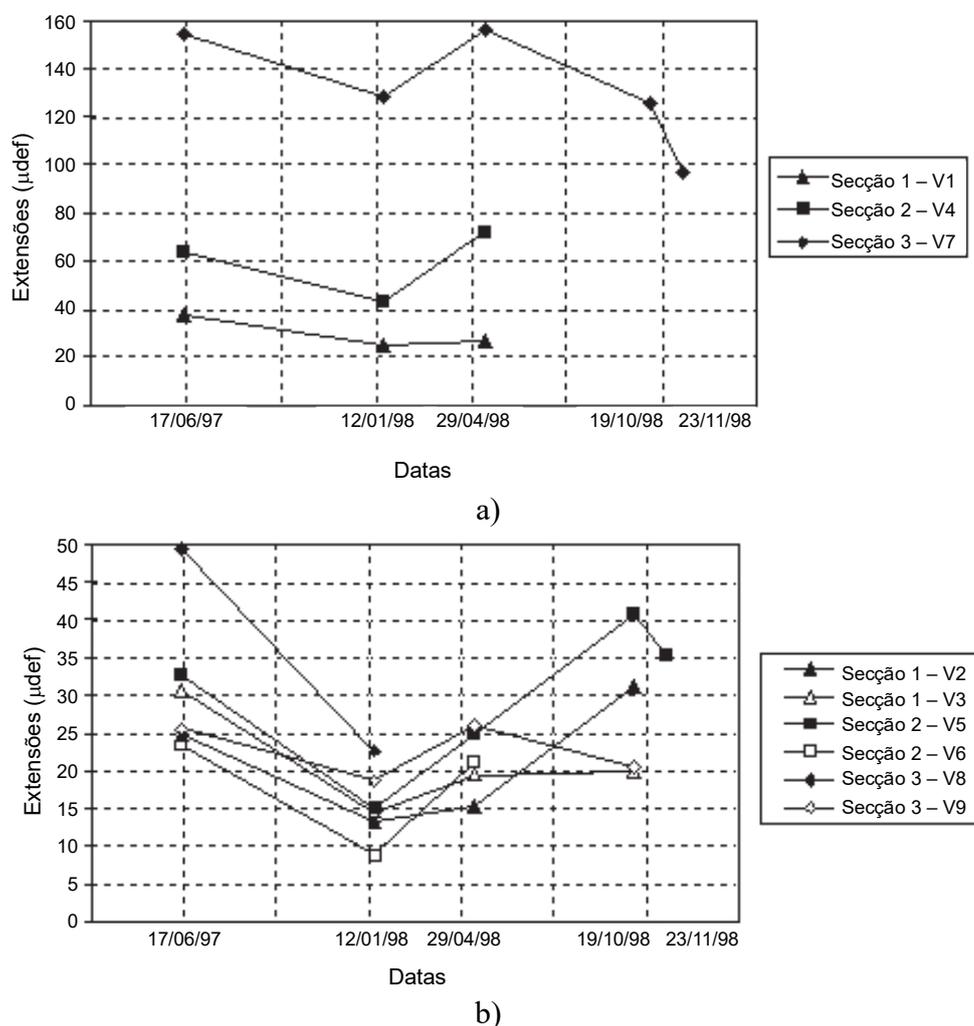


**Fig. 7** – Comportamento de fundação em ensaios de carga com placa: a) ciclos de carga e descarga; b) influência da tensão vertical no módulo reversível (Neves e Gomes Correia, 2006).

Em trechos experimentais foram avaliados os estados de deformação gerados em ensaios de carga para diferentes frequências de passagem do veículo de ensaio: ensaio com defletómetro de impacto (FWD, “Falling Weight Deflectometer”) (simulação de carga dinâmica equivalente à passagem de tráfego à velocidade de 80 km/h); ensaio de carga com passagem de veículo de ensaio à velocidade aproximada de 3 km/h (simulação de carga quase estática) (Neves e Gomes Correia, 2002b, 2002c e 2007). A análise das extensões verticais medidas na fundação (Figura 8a), complementadas também com extensões verticais medidas nas camadas granulares (Figura 8b), permitiu avaliar a influência dos seguintes fatores no comportamento do solo de fundação (consultar a Figura 1a para identificação dos extensómetros):

- Influência das condições hídricas do solo: aos valores mais baixos do teor em água do solo, associados a precipitação reduzida ou nula, corresponderam as menores extensões na fundação.
- Influência da temperatura das camadas betuminosas: a deformabilidade da fundação dependeu da rigidez das camadas betuminosas atendendo à influência da temperatura no seu comportamento viscoelástico. Para um aumento médio da temperatura das camadas betuminosas de 10 °C constatou-se aumento de 33% a 45% nas extensões da fundação.
- Influência do tipo de carregamento: a deformabilidade da fundação foi superior nos ensaios de carga quase estática, comparativamente aos ensaios de carga dinâmicos. Com efeito, foi constatado que o nível de extensões medido na fundação nos ensaios dinâmicos correspondeu de 60% a 70% das extensões medidas nos ensaios quase estáticos. Aliás, foi também observada uma influência idêntica ao nível das camadas betuminosas, embora de forma menos acentuada.
- Influência do nível de extensão: o comportamento da fundação foi linear quando submetida a níveis de carga no domínio das muito pequenas deformações ( $<10^{-5}$ ). Este foi o caso do pavimento constituído por camadas betuminosas de maior rigidez, ou seja, após a fase de construção. Por sua vez, o comportamento da fundação foi não linear antes da

fase de construção do pavimento. Nesta fase, este comportamento foi justificado pelo nível elevado das extensões induzidas no solo pela realização dos ensaios de carga diretamente na fundação. Posteriormente, a construção do pavimento permitiu reduzir as extensões medidas na fundação.

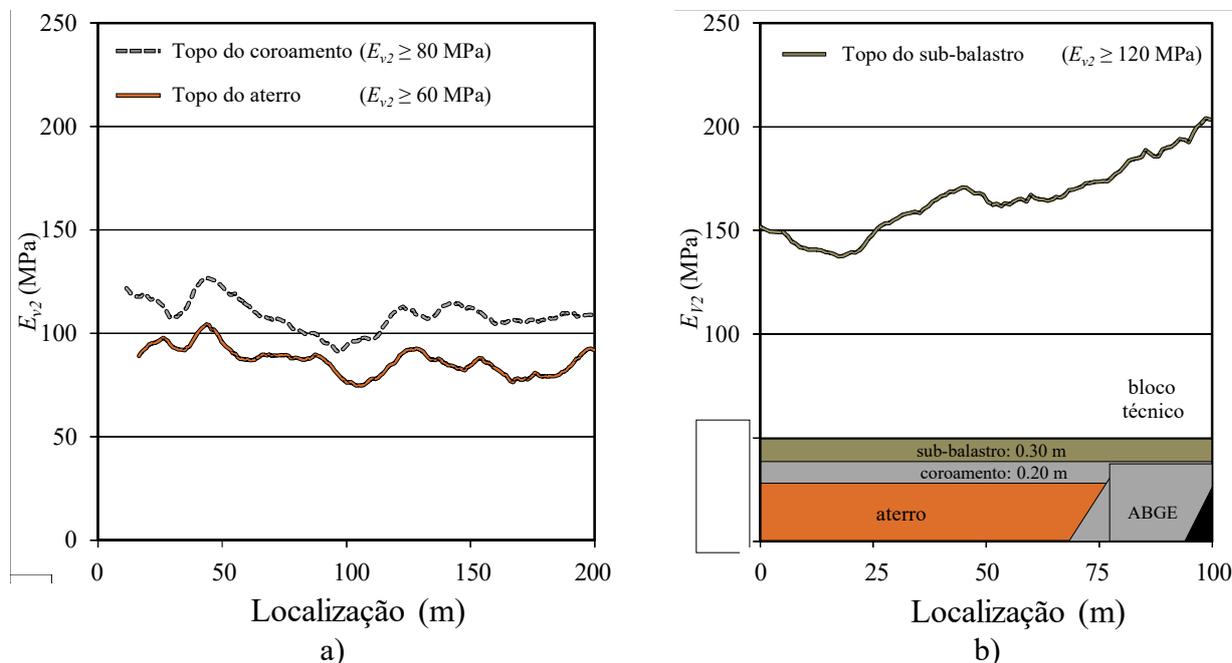


**Fig. 8** – Medição de extensões verticais em trechos experimentais durante ensaios de carga: a) topo da fundação; b) topo das camadas granulares.

No âmbito ainda da caracterização “in situ”, Nazarian e Desai (1993) propôs um método de ensaio sísmico “in situ” não destrutivo – análise espectral de ondas de superfície (SASW, “spectral analysis of surface waves”) – que, com base na medição direta de perfis de velocidade de onda de corte dos materiais, permite obter perfis de rigidez das camadas com potencial interesse para o dimensionamento dos pavimentos.

A caracterização “in situ” da subestrutura da via-férrea, com recurso a distintos métodos, tem permitido não só avaliar a qualidade das infraestruturas construídas como também contribuir para melhorar a conceção e os processos construtivos dessas estruturas (Fortunato, 2016). A título de exemplo, no âmbito da construção de uma via-férrea em Portugal foi possível, para além de proceder à caracterização de alguns dos geomateriais em laboratório – nomeadamente do comportamento resiliente e da deformação permanente sob carga triaxial cíclica –, proceder também à instrumentação e ensaio de camadas construídas. A medição em contínuo da rigidez no topo dessas camadas, com recurso ao equipamento “Portancemètre”, permitiu avaliar o benefício, em termos de aumento do módulo de deformabilidade equivalente ( $E_{V2}$ ), de colocar no topo do

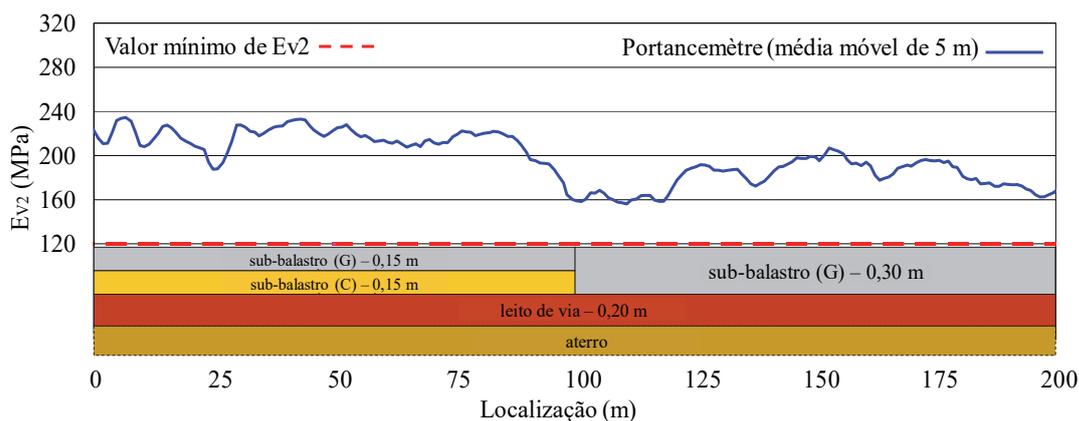
aterro uma camada de coroamento (leito da via) e sobre esta uma camada de sub-balastro (Figura 9a); para além disso, permitiu avaliar o progressivo aumento de rigidez da subestrutura da via nas zonas de aproximação das obras de arte (Figura 9b), onde se construíram blocos técnicos de transição das terraplenagens para essas estruturas, de acordo com os requisitos atualmente estabelecidos para vias-férreas novas de elevado desempenho (Fortunato et al., 2013).



**Fig. 9** – Resultados da medição de rigidez em contínuo com o “Portancemètre”: a) nos topos do aterro e do coroamento; b) no topo do sub-balastro em zona de transição (Paixão et al., 2015).

Subsequentemente, em fase de operação, a infraestrutura foi monitorizada e observou-se o seu comportamento durante a passagem de comboios. Em particular, as deflexões verticais máximas do carril medidos à passagem de vários eixos permitiram observar que a rigidez da via aumenta com a aproximação à obra de arte. Na sequência destes estudos, calibrou-se um modelo numérico, nomeadamente considerando os resultados da caracterização “in situ” e da monitorização da via em operação. A utilização desse modelo contribuiu para aumentar o conhecimento sobre o comportamento dinâmico da infraestrutura, em particular em zonas de transição, e validar as hipóteses de projeto, relativamente à seleção de materiais e definição da geometria dos blocos técnicos (Paixão et al., 2014).

Numa outra zona da mesma via-férrea desenvolveram-se estudos com o objetivo de avaliar a possibilidade de alterar as disposições de projeto, nomeadamente substituir a camada de sub-balastro de 0,30 m de espessura de agregado granítico (G) de granulometria extensa por uma camada de 0,15 m de agregado calcário (C) (com granulometria semelhante, mas com menor resistência à fragmentação que o granito), sobre a qual se construiu uma camada de 0,15 m do mesmo agregado granítico. Atendendo à maior disponibilidade e ao custo inferior do agregado calcário, esta alteração traduziu-se por uma redução no prazo de execução e no custo da obra. Os estudos laboratoriais e os resultados da caracterização “in situ”, quer relativos à análise das alterações das características físicas dos materiais durante a construção quer do módulo de deformabilidade medido pelo “Portancemètre”, permitiram concluir que era possível proceder a essa alteração, sem qualquer prejuízo do desempenho da estrutura, obtendo mesmo valores superiores de  $E_{v2}$  (Figura 10).



**Fig. 10** – Valores de  $E_{v2}$  medidos em contínuo com o “Portancemètre” em zonas adjacentes com distintas configurações da camada de sub-balastro (Fortunato et al., 2012).

### 3.4 – Modelação estrutural de pavimentos

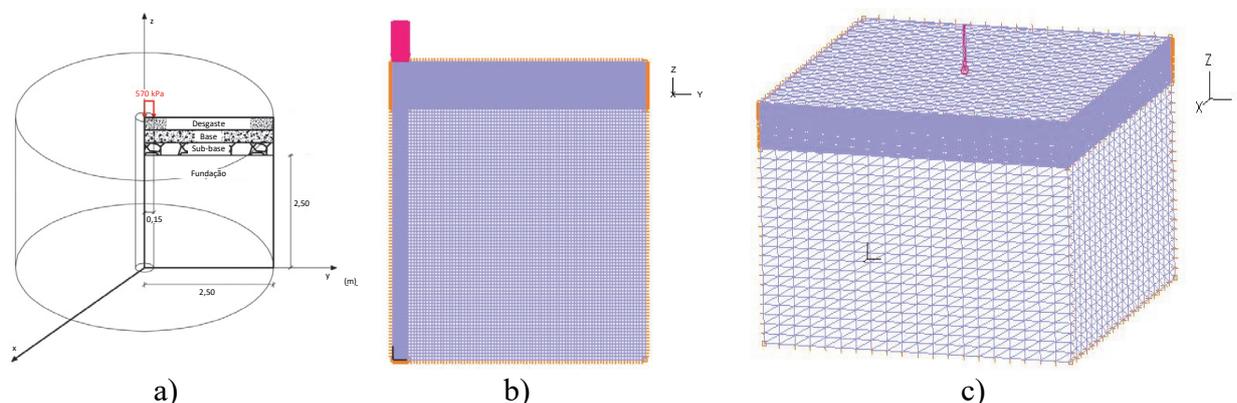
O comportamento não linear dos solos e dos materiais granulares sob ação de cargas cíclicas, conforme foi amplamente confirmado pelos estudos de laboratório e de observação de trechos experimentais descritos anteriormente, terá naturalmente impacto quando considerado no dimensionamento das estruturas de pavimento. Esta influência pode traduzir-se consequentemente na economia do dimensionamento, quer de pavimentos novos quer no âmbito do reforço de pavimentos existentes (Neves, 2001).

Na análise do comportamento da fundação de trechos experimentais de pavimentos rodoviários durante ensaios de carga com pneu, realizados em condições quase estáticas (baixa velocidade de passagem do veículo de ensaio) e com medição das deflexões à superfície com viga Benkelman, Neves e Gomes Correia (2006) utilizaram o modelo elástico não linear, através do método dos elementos finitos, e o modelo elástico linear, utilizando o método de múltiplas camadas elásticas lineares, em tudo semelhante ao trabalho original em Balay et al., (1998). A análise dos resultados permitiu confirmar que a utilização do modelo não linear foi a metodologia mais adequada à modelação do comportamento da fundação. Por sua vez, a utilização do modelo linear, admitindo meio homogéneo e semi-infinito em toda a fundação, que corresponde à prática mais habitual no projeto, foi a metodologia que mais se desajustou dos resultados experimentais, tendendo a subestimar a rigidez dos solos. Na consideração de comportamento linear e numa abordagem expedita, foi a divisão da fundação em subcamadas que permitiu a melhor aproximação aos resultados experimentais, confirmando indiretamente a hipótese de comportamento não-linear dos solos (Neves e Gomes Correia, 2006, Gaspar, 2010). Atendendo a que a avaliação das extensões verticais na fundação é fundamental à análise do critério das deformações permanentes estabelecido para o dimensionamento de pavimentos do tipo flexível (com camadas superiores de misturas betuminosas), é muito importante ter o melhor conhecimento possível relativo à deformabilidade da fundação em correspondência com o comportamento estrutural do pavimento na sua globalidade (Neves e Gomes Correia, 2014).

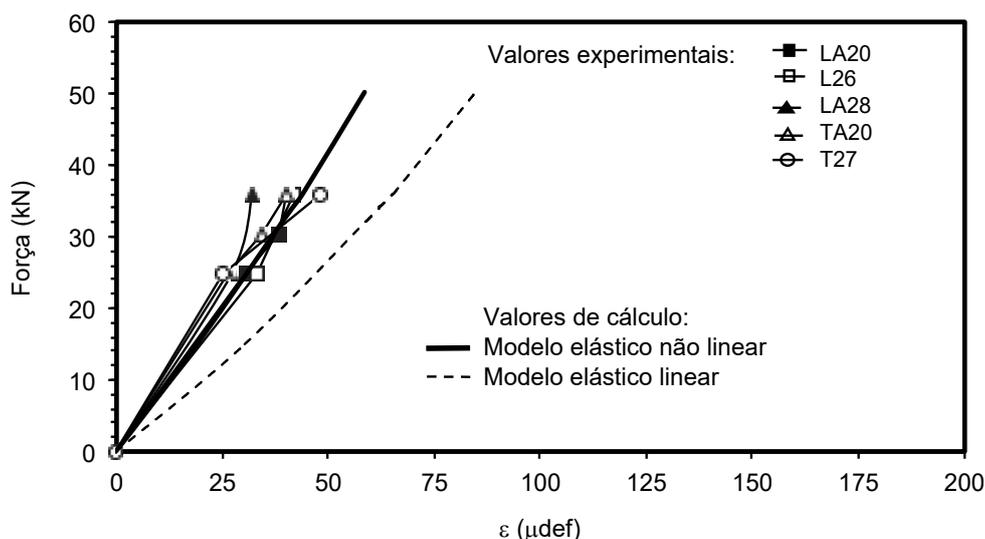
Com efeito, a modelação numérica recorrendo a ferramentas mais complexas, como por exemplo o método de elementos finitos, permite a análise de estruturas de pavimentos considerando modelos de comportamento mais adequados ao comportamento dos materiais, como é o caso da não linearidade para os materiais granulares e da viscoelasticidade para os materiais betuminosos (Balay et al., 1998, Monteiro, 2019, Neves e Gonçalves, 2018). A Figura 11 mostra a modelação por elementos finitos de um pavimento flexível (camada de desgaste em misturas betuminosas e camadas de base e sub-base de materiais granulares) com a utilização do programa ADINA em análises bidimensional (2D) e tridimensional (3D). As condições de simetria axial, que é possível estabelecer para a geometria circular de carregamento equivalente ao efeito do eixo-

padrão (Figura 11a), permitem que a análise 2D possa ser utilizada frequentemente com vantagens associadas à maior simplicidade e rapidez de análise. A modelação numérica pode ainda permitir a consideração na estrutura do pavimento quer de descontinuidades, como é o caso da instalação de geogrelhas (Neves e Gonçalves, 2018), quer da ação dinâmica dos veículos (Monteiro, 2019).

Relativamente ao comportamento dos materiais granulares das camadas de base e de sub-base, a comparação de resultados de ensaios de carga realizados em trechos experimentais com os obtidos da análise numérica pelo método dos elementos finitos, para as mesmas condições de realização dos ensaios, permitiu concluir que o modelo utilizado para descrever o comportamento dos materiais granulares teve influência significativa nas extensões de cálculo na fundação e no pavimento (Neves e Gomes Correia, 2002b, 2002c e 2004). A Figura 12 mostra a comparação das extensões horizontais na base da camada betuminosa resultantes de simulações numéricas e de medições em extensómetros durante ensaios experimentais (ver a Figura 1a). A figura mostra que as extensões máximas medidas em ensaios de carga realizados para diferentes carregamentos do eixo (força) estiveram mais próximas dos resultados da modelação considerando um modelo elástico não linear para as camadas granulares. Ao invés, o modelo linear conduziu às maiores extensões de cálculo, sempre superiores às observadas. Para o carregamento máximo (36 kN), foi possível constatar que a consideração de comportamento linear sobrestimou a extensão horizontal em aproximadamente 45%.



**Fig. 11** – Modelação de pavimento flexível: a) geometria axial do pavimento e do carregamento; b) modelação 2D (Neves e Gonçalves, 2018); c) modelação 3D (Monteiro, 2019).



**Fig. 12** – Comparação de extensões experimentais e de cálculo em função do modelo de comportamento das camadas de misturas granulares não ligadas (Neves e Gomes Correia, 2004).

Atendendo a que as extensões na base das camadas betuminosas estão associadas ao dimensionamento de pavimentos segundo o critério de fadiga, a utilização do modelo elástico linear, ao sobrestimar as extensões, pode resultar no sobredimensionamento da estrutura do pavimento. A consideração da não linearidade do comportamento pode ser ainda mais importante em pavimentos onde as camadas de materiais granulares desempenham a função estrutural principal, como é o caso dos pavimentos com camadas de misturas betuminosas de reduzida espessura. Neves e Gomes-Correia (2002a) mostraram que há redução significativa das extensões quando se utiliza o modelo não linear, tanto mais expressiva quanto mais espessa for a camada de material granular em relação às camadas de materiais betuminosos. Estes autores concluíram que essa redução pode atingir cerca de 60% no caso das extensões da fundação e 70% nas extensões das camadas betuminosas, dependendo do tipo de estrutura de pavimento. Este facto pode traduzir-se na menor espessura das camadas betuminosas necessária à satisfação dos critérios de dimensionamento, com impacto económico de grande significado. Idêntica importância da utilização do modelo não linear foi demonstrada para o caso do reforço de pavimentos existentes (Neves e Gomes-Correia, 2003).

### 3.5 – Modelação estrutural da via-férrea

Relativamente à estrutura da via-férrea, é também importante a consideração do comportamento não linear dos solos de fundação (Gomes Correia e Cunha, 2014), incluindo também o seu comportamento a longo prazo, dependente do número de ciclos associados ao carregamento e da variabilidade do nível de tensões (Ramos et al., 2020, Varandas et al., 2020). Igualmente, e como foi referido anteriormente, a camada de balastro assume particular importância no desempenho da infraestrutura. Esta camada está sujeita a importantes variações do estado de tensão devido aos ciclos de carga associados à passagem dos comboios. Atendendo a que a rigidez do material de granulometria uniforme que usualmente constitui a camada de balastro é influenciada pelo estado de tensão a que está sujeito, pode ser importante considerar a resposta resiliente não linear na análise estrutural. Ainda que para valores usuais de carga por eixo a deflexão vertical ao nível do carril e a aceleração das travessas possam não ser significativamente influenciadas pelo facto de simplificar-se o módulo de deformabilidade independente do estado de tensão, tem-se demonstrado que a assunção do comportamento elástico linear falha na estimativa das tensões no interior da camada de balastro.

Utilizando um modelo numérico 3D por elementos finitos (Figura 13a), calibrado experimentalmente, que contempla o comportamento dinâmico e a interação veículo-via, Paixão et al. (2016) evidenciaram a importância de considerar o comportamento elástico não linear do material da camada de balastro – recorrendo ao modelo K- $\theta$  – na avaliação das tensões nesta camada. Os valores de pico das tensões média ( $p$ ) e deviatórica ( $q$ ), calculadas em diversos pontos de uma secção transversal do centro do modelo (Figura 13b), à passagem dos comboios de passageiros Alfa Pendular (AP) e Intercidades (IC), são apresentados na Figura 13c (modelos linear e não linear). Esses valores são obtidos, respetivamente, através das equações:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (1)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2)$$

Pode concluir-se que a consideração do comportamento elástico linear ( $E = 130$  MPa) falha quer na estimativa das tensões de pico nas várias posições, quer na estimativa da variação da tensão, em particular antes e após os eixos atravessarem a secção em análise (mais pronunciado em termos de

q nas posições A, B e C da Figura 13b. Este comportamento decorre do facto de a transferência de carga entre a base das travessas e a camada de balastro se realizar de forma distinta no caso do comportamento não linear, pois concentram-se tensões mais elevadas nos elementos finitos que sofrem maiores variações de módulo, resultantes das condições de carga mais gravosa a que estão sujeitos. Este aspeto é mais evidente nos elementos sob as travessas, como se constata da análise da Figura 14, onde se apresenta mapas de cores da tensão vertical de pico,  $\sigma_z$ , obtida nas situações de comportamento linear e não linear, à passagem dos veículos na secção alinhada com a travessa central do modelo ( $x = 0,0$  m), nos planos  $z = 0,0$  m (base da camada de balastro) e  $z = 0,3$  m (base da travessa). Estes resultados mostram que a consideração do comportamento elástico linear parece subestimar os níveis de tensão na camada de balastro, o que pode afetar negativamente os estudos de modelação que dependam da avaliação rigorosa das tensões ou deformações dos geomateriais. Por exemplo, o modelo elástico linear deve ser utilizado com precaução no estudo do comportamento de longo prazo das vias que envolva formulações empíricas simples que relacionam deformações plásticas com tensões ou deformações elásticas, e não leis constitutivas que permitem avaliar deformações permanentes da camada de balastro (Varandas et al., 2020).

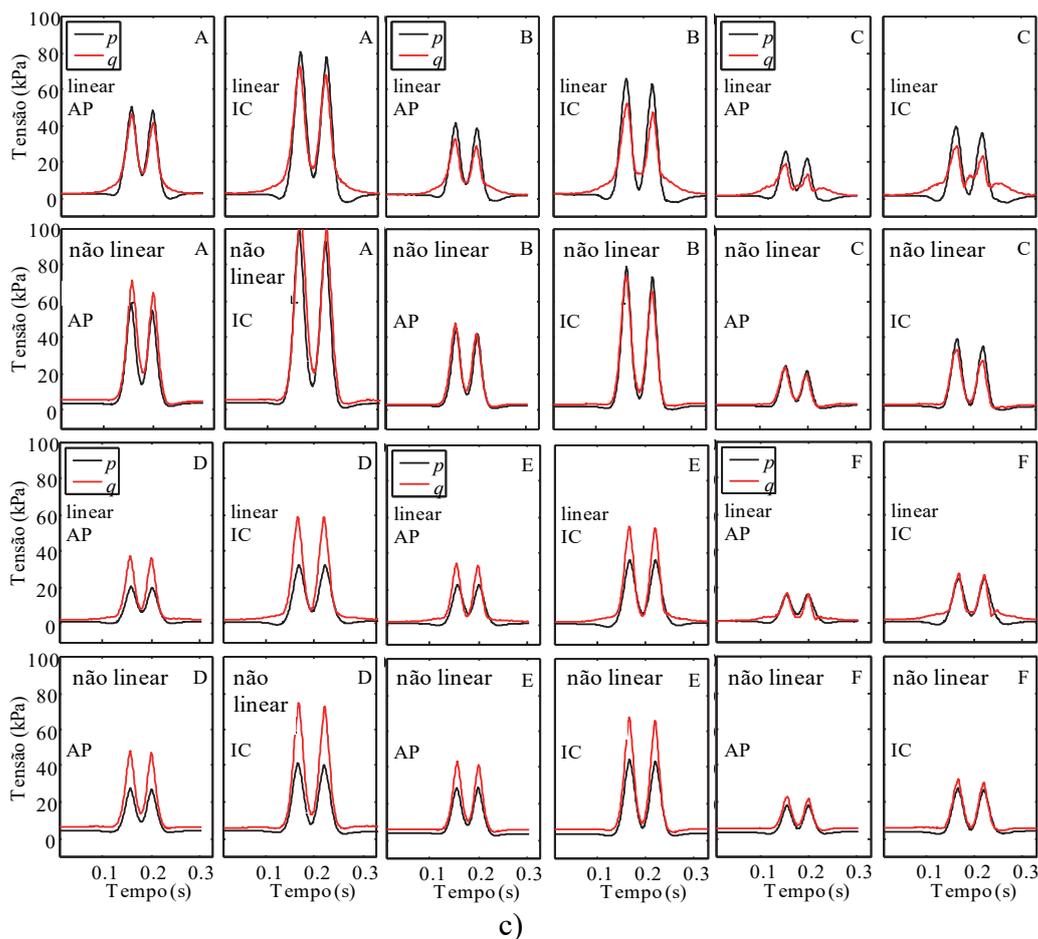
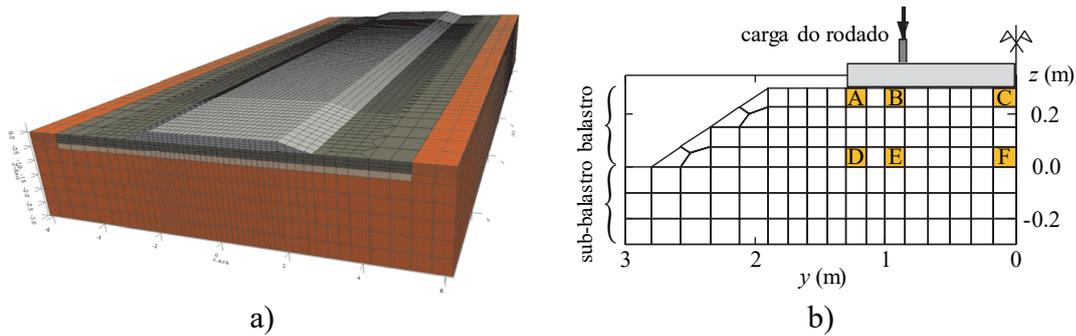
## 4 – DIGITALIZAÇÃO

### 4.1 – Aplicação às terraplenagens

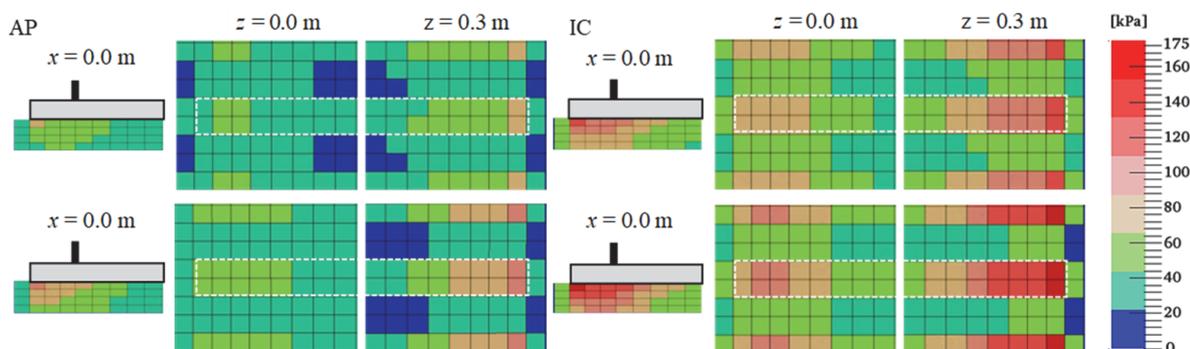
A gestão e alocação de recursos em ambientes dinâmicos, como se verifica em obras de terraplenagens ou operações mineiras, é tradicionalmente baseada em grande parte na experiência da equipa de projeto. Porém, as metodologias utilizadas não se traduzem, na maioria dos casos, na utilização ótima dos recursos disponíveis (por exemplo equipamento mecânico), o que tem um impacto negativo em fatores tais como custos, durações e emissões de carbono durante a execução deste tipo de tarefas. Neste sentido, estudos recentes permitiram verificar a viabilidade de várias técnicas de modelação avançada e otimização moderna que, por sua vez, permitem realizar o escalonamento de processos e a alocação de recursos de um modo automático e garantindo a utilização ótima dos vários recursos disponíveis em fase de projeto (Gomes Correia e Magnan, 2012, Parente et al., 2015a e 2015b).

No entanto, as soluções que advêm da aplicação das técnicas acima referidas resultam de uma abordagem totalmente preditiva o que, dada a elevada incerteza associada às fases de construção (por exemplo decorrente de avarias do equipamento, condições atmosféricas imprevisíveis, variações na produtividade estimada do equipamento, entre outros fatores), não devem ser vistas como uma regra inflexível, mas sim como parte de uma abordagem adaptável e ágil. De facto, a variabilidade das condições de trabalho em fases de execução ou de obra exige um constante ajuste das soluções de alocação de recursos e do fluxo de trabalho no estaleiro, de modo a que seja possível garantir o desempenho ótimo da frota de equipamentos.

Neste contexto, com o desenvolvimento inerente às áreas de Investigação Operacional e das tecnologias de informação e comunicação, surgem novos conceitos e ferramentas com o potencial para enfrentar este problema. Iniciativas como a Indústria 4.0 (I4.0), com origem nas indústrias de produção e que se apoia em conceitos tais como sistemas ciber-físicos e sistemas de otimização ágeis e flexíveis (em detrimento de abordagens preditivas rígidas), aliados à monitorização das operações em tempo real, podem servir de base para o desenvolvimento da indústria da construção e mineira nestas direções. Embora a origem do conceito I4.0 possa ser atribuída às indústrias de produção e manufatura, já foi estabelecido que estas apresentam uma estrutura semelhante a vários processos na área de Engenharia Civil, o que implica que ambos seguem as mesmas tendências de desenvolvimento. De facto, e do ponto de vista da Engenharia, processos como terraplenagens em obras de infraestruturas de transporte podem ser considerados linhas de produção dinâmicas em ambientes caracterizados por elevada complexidade e incerteza (Parente et al., 2015a).

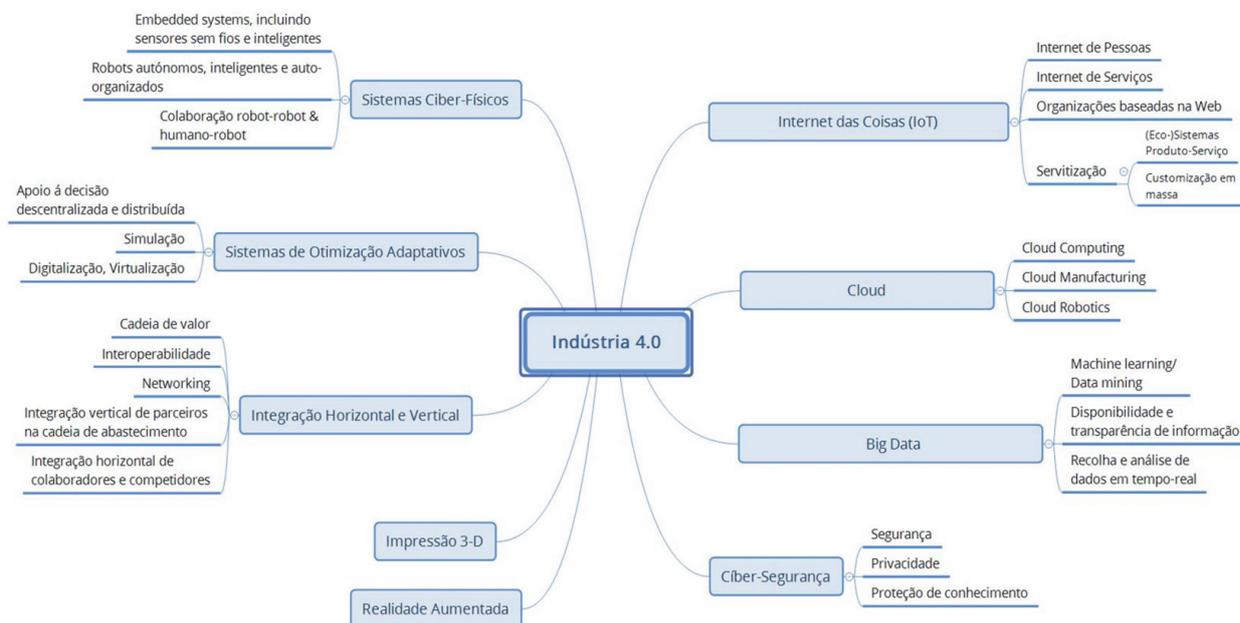


**Fig. 13** – Tensões em secção transversal de via-férrea: a) aspeto do modelo 3D; b) identificação dos pontos em análise do centro do modelo; b) tensões p e q (Paixão et al., 2016).



**Fig. 14** – Tensão vertical de pico obtida na camada de balastro (adaptado de Paixão et al., 2016).

Tais processos de Engenharia Civil podem ser melhorados pela aplicação de conceitos relacionados com automação e autonomia, flexibilidade e adaptação, monitorização em tempo real e interconectividade em Cloud/Internet das Coisas, e auto-configuração/auto-otimização, que essencialmente constituem pilares da I4.0 (Rüßmann et al., 2015). A Figura 15 mostra os pilares da Indústria 4.0 com maior relevância na indústria da construção.



**Fig. 15** – Pilares da Indústria 4.0 com relevância na indústria da construção.

Ainda que já existam vários estudos que demonstram a viabilidade e o ganho associados à utilização de conceitos e tecnologias tais como a Impressão 3D ou a Realidade Aumentada na construção, a presente análise da Figura 15 será limitada ao âmbito deste trabalho. Assim, verifica-se que, no contexto da aplicação às terraplenagens, os pilares da I4.0 com um impacto mais significativo resumem-se a:

- **Sistemas ciber-físicos:** têm como objetivo criar uma ligação entre os recursos disponíveis no mundo físico/real e os elementos correspondentes num mundo/modelo virtual. Geralmente, no âmbito da construção, isto é conseguido por meio da utilização de equipamentos de monitorização e instrumentação ligados a um sistema informático, que representa os recursos monitorizados num espaço virtual, tornando-se possível a análise de cenários de um modo rápido e sem custos quando integrado com sistemas de otimização adaptativos.
- **Sistemas de otimização adaptativos:** potenciam a manipulação dos recursos no mundo virtual (cuja identidade é ligada ao recurso correspondente no mundo físico por meio dos sistemas ciber-físicos) no contexto da simulação de cenários e otimização de processos. Os resultados podem ser transmitidos de volta ao mundo físico por meio da ligação estabelecida pelos sistemas ciber-físicos.
- **“Big Data”:** os métodos de “machine learning” e “data mining” permitem a utilização de bases de dados de construções passadas como base para estimativa de variáveis em construções futuras (por exemplo a estimativa de produtividade de equipas/equipamentos dependendo das condições de trabalho a que estão sujeitas). Podem ser utilizados em conjunto com sistemas de otimização adaptativos e sistemas ciber-físicos, apoiando-os na estimativa de parâmetros de otimização desconhecidos ou com grande variabilidade/incerteza.

- Internet das coisas: compreende ligação de máquinas, pessoas, recursos, fabricantes e clientes entre si por meio da internet. Isto potencia e suporta conceitos tais como “Building Information Modelling” (BIM) e construção sustentável (por exemplo otimizando a manufatura de elementos construtivos, assim como a utilização energética das construções e dos fabricantes), assim como manutenção preditiva (como por exemplo apoiando-se no aumento da informação disponibilizada pela instrumentação presente nos equipamentos, como resultado da implementação dos sistemas ciber-físicos), entre outros.

Ao mesmo tempo, verifica-se que as novas ferramentas associadas aos sistemas de informação e comunicação já fornecem os meios necessários à implementação destes conceitos nos próprios estaleiros, uma vez que incluem diferentes tipos de instrumentação capaz de monitorizar o equipamento ativo autonomamente e em tempo real. O Quadro 1 resume os vários tipos de instrumentação de monitorização em função do tipo de equipamento e da sua atividade. Aqui, verifica-se que vários destes equipamentos já podem ser monitorizados no que diz respeito à sua posição ao longo do tempo por meio de sistemas de informação geográfica e sistemas de posicionamento global (GPS), o que é especialmente importante na avaliação do rendimento dos equipamentos de transporte (i.e. camiões basculantes, “dumpers”) (Caterpillar Inc., 2012, Montaser e Moselhi, 2014). Para além disso, estes desenvolvimentos incluem instrumentação acrescida para outros tipos de equipamento, tais como sensores capazes de medir o volume de material transportado em cada ciclo de carga de escavadoras em tempo real (LC Products, 2018, Shearon, 2015), a monitorização e ajuste automático da inclinação e elevação das lâminas do equipamento de espalhamento (Caterpillar Inc., 2006), ou o controlo e ajuste dos parâmetros de compactação adotados por um compactador equipado com a tecnologias de controlo contínuo da compactação (Gomes Correia e Quibel, 2000, Petersen, 2005, Thurner e Sandström, 2000) e/ou compactação inteligente (Camargo et al., 2006, Gomes Correia e Parente, 2014, Thurner e Sandström, 1980). Mesmo que várias destas tecnologias tenham como propósito apenas o melhoramento dos processos em si, verifica-se que, através da sua implementação, é possível obter facilmente dados relativos à produtividade dos equipamentos dependendo das condições de trabalho a que estão sujeitos em tempo real.

**Quadro 1** – Instrumentação existente para equipamentos mecânicos e fatores monitorizados.

<b>Equipamento</b>	<b>Tipo de instrumentação</b>	<b>Fatores monitorizados</b>
Escavação	GPS e/ou sensores de volume de material transportado por ciclo	Quantidade de material transportado por ciclo e número de ciclos (produtividade); material carregado em cada camião ou “dumper”; tempo de inatividade
Transporte	GPS ou sinal de rádio	Número de viagens por intervalo temporal (produtividade); velocidade (instantânea e média); tempo de inatividade
Espalhamento	GPS, sensores laser na lâmina	Ângulo e inclinação da lâmina de espalhamento; velocidade do equipamento; tempo de inatividade
Compactação	GPS, sensores no tambor (controlo contínuo da compactação), e/ou no controlo dos parâmetros de compactação do equipamento (compactação inteligente)	Número de passagens por intervalo temporal; velocidade do equipamento; medição contínua da rigidez do material e geração de mapa de compactação (controlo contínuo da compactação); ajuste automático dos parâmetros de compactação (compactação inteligente)

Assim, durante as fases de execução torna-se possível recorrer às capacidades destas tecnologias de campo para monitorizar e avaliar constantemente a produtividade do equipamento ativo, permitindo que os sistemas de otimização reajustem as soluções de alocação de recursos previamente adotadas na fase de projeto, de modo a assegurar a continuação dos trabalhos em condições ótimas. Uma possível arquitetura de um sistema de otimização reativo deste tipo pode ser descrita através dos seguintes passos:

1. Recolha periódica ou em tempo real dos dados gerados pela instrumentação de monitorização instalada nos equipamentos.
2. Compilação e análise dos dados recebidos pelo sistema em função do formato de origem e do tipo de equipamento associado, traduzindo os dados em produtividade real dos equipamentos (por exemplo produtividade média num determinado espaço de tempo).
3. A informação decorrente do passo anterior é utilizada pelo sistema de otimização, ao qual pode ser solicitado (manual ou automaticamente em função de uma série de indicadores predefinidos, por exemplo quando se verifica que a produtividade de algum equipamento está abaixo do que tinha sido originalmente estimado nas fases de projeto) um novo ciclo de otimização dos recursos ativos e disponíveis. Este novo ciclo de otimização (denominado re-otimização) compreende a reorganização/relocação dos recursos mecânicos ao longo do estaleiro de modo garantir a minimização de vários objetivos, que podem incluir combinações de custos de execução, duração de execução, ou emissões de carbono, por exemplo. Os custos e atrasos associados à implementação das novas soluções (por exemplo o tempo necessário para deslocar o equipamento ativo de uma frente de trabalho para outra) devem fazer parte das soluções sugeridas pelo sistema, uma vez que uma alteração constante da solução de alocação de equipamentos no estaleiro pode não trazer vantagens para a finalização das tarefas dentro dos prazos e custos que foram estimados.
4. Comunicação dos resultados da otimização ao utilizador do sistema sob a forma de várias soluções de alocação dos recursos, no contexto de apoio à decisão. Tal como verificado em estudos anteriores (Marques et al., 2009; Parente et al., 2015a; Parente et al., 2016), a utilização de vários objetivos de otimização resulta numa série de “trade-offs” entre os mesmos, o que aumenta a flexibilidade do processo de decisão.

Como pode facilmente inferir-se, este tipo de sistema compreende uma implementação direta dos conceitos de sistemas ciber-físicos e sistemas de otimização adaptativa mencionados anteriormente. Como tal, representa um passo importante na direção do conceito de construção inteligente (à semelhança do conceito conhecido como “smart manufacturing” nas indústrias de produção e manufatura), baseado em robots autónomos, autossuficientes e interligados, que constituem a base do paradigma trazido pela I4.0.

## **4.2 – Aplicação aos pavimentos**

A fim de ter infraestruturas de transporte resilientes e sustentáveis que protejam o ambiente, permitam às pessoas prosperar e criem valor económico, os gestores têm vindo a mudar a forma como trabalham. O BIM, grande volume de dados, computação em nuvem e análises estão a mudar a forma como a infraestrutura é planeada, concebida, construída e gerida. Um exemplo é a moderna gestão de infraestruturas que faz uso de sistemas para avaliação do estado, previsão do desempenho e apoio à decisão. Estas tarefas recorrem a grandes volumes de dados e ao respetivo tratamento, em particular para produzir informação que possibilite interpretar o comportamento das estruturas, como um todo e dos elementos que as constituem, e alimentar modelos de análise. Exemplo disso são os Sistemas de Gestão de Pavimentos (SGP), que a partir da década de 60 do século XX, têm vindo a desenvolver-se por todo o mundo. Neste domínio, as técnicas de “machine learning” podem ser utilizadas na avaliação do estado do pavimento, na previsão do desempenho do pavimento e no apoio à decisão. Nestes sistemas, os modelos de previsão do

desempenho (mecanicistas, empíricos ou empírico-mecanicistas), quer determinísticos quer probabilísticos, assumem particular relevo, pelo que o recurso a estas técnicas pode ser vantajoso, nomeadamente nas diversas etapas e sucessivas iterações dos modelos (recolha de dados; pré-processamento de dados; modelação; avaliação e estabelecimento do modelo final). De facto, não é fácil estabelecer os modelos de previsão, que normalmente se baseiam em indicadores ou combinações de indicadores de desempenho, devido ao número de variáveis envolvidas – relacionadas com tráfego, ambiente, estrutura do pavimento, construção e manutenção – e à forma como se relacionam entre si (Marcelino et al., 2018). As técnicas de “machine learning” que têm vindo a ser utilizadas no âmbito dos SGP, são, por exemplo, algoritmos genéticos, “support vector machines”, “random forests”, “naïve bayes” e, em particular e há mais tempo, as redes neuronais (Marcelino et al., 2021).

A principal limitação na utilização dos modelos baseados em técnicas de “machine learning” reside no facto de requererem uma quantidade significativa de dados e de nem todos os tipos de infraestruturas possuírem o volume de dados históricos necessários para aplicá-los, o que torna essencial a pesquisa de técnicas ou tecnologias que possam contribuir para aumentar o volume de dados disponíveis. Nestes processos de desenvolvimento de modelos de previsão é fundamental dispor de bases de dados de qualidade. No entanto, existem diversas razões que contribuem para a existência de bases de dados incompletas e de difícil utilização, condicionando a sua fiabilidade e a aplicabilidade prática, nomeadamente: distintas dimensões das séries temporais; distintas frequências de recolha de dados; inconsistências de dados; dados em falta; valores fora da gama expectável; problemas com o nível de integração dos dados, relacionados com alterações, ao longo do tempo, da forma como são recolhidos (métodos, tipos de equipamentos e formatos diferentes).

Sendo a falta de dados em determinadas observações um problema recorrente, conduzindo à redução do tamanho do conjunto de dados, pode ser necessário recorrer a métodos adequados que permitam completar esse conjunto. Em geral, ao constatar a existência de dados em falta, é essencial identificar o tipo, a extensão e a aleatoriedade dos dados em falta, para definir qual método de tratamento a ser utilizado. Marcelino et al. (2019a) apresentaram um estudo comparativo no qual aplicaram na imputação de dados em falta em sistemas de gestão de pavimentos, para além de valores médios, três técnicas de “machine learning”. Estas técnicas foram: “multivariate imputation with chained equations (MICE)”, “k-nearest neighbors (KNN)” e “MissForest”. Nesse estudo concluíram que a técnica que conduziu a melhores resultados foi a “MissForest”, apresentando o menor valor de erro (definido pela diferença entre os valores imputados e reais). Em particular, em relação à imputação da média o erro foi inferior em 46%.

No sentido de estudar formas de enriquecer as bases de dados, no trabalho apresentado em Marcelino et al. (2019b) testou-se a aplicação de “transfer learning” no desenvolvimento de modelos de previsão. O processo de “transfer learning” pretende transferir a aprendizagem obtida em tarefas anteriores para novas tarefas. Nesse estudo, o objetivo foi utilizar dados de pavimentos de uma base de dados semelhante à que se pretendia utilizar, mas mais completa do que esta, para treinar os modelos de forma a que pudessem ser transferidos e aplicados à base de dados de trabalho. Concluiu-se que devido ao enriquecimento da base de dados, foi possível obter uma redução do erro dos modelos na ordem de 20%.

### **4.3 – Aplicação à via-férrea**

A digitalização ferroviária oferece uma vasta gama de serviços e aplicações potenciais a curto e médio prazo. Destacam-se os serviços de informação de passageiros e carga, vigilância por vídeo, vigilância inteligente, infraestruturas inteligentes, monitorização de bens, sistemas de sinalização e sistemas automatizados de controlo de comboios, todos eles com o objetivo comum de melhorar a eficiência das operações e de servir o utilizador mais eficazmente. O programa Shift2Rail, iniciado em 2014 (Shift2Rail@, 2021), como uma plataforma de coordenação e desenvolvimento de atividades de investigação e inovação visa promover a competitividade

ferroviária e perseguir benefícios específicos, tais como a redução do custo do ciclo de vida dos caminhos-de-ferro em 50%, duplicando a sua capacidade e aumentando a sua pontualidade em 50%. Nestes objetivos o papel da digitalização é muito importante, com especial destaque para as infraestruturas inteligentes (Rana et al., 2016). Neste contexto, Abedi et al. (2020) desenvolveram um compósito auto-sensorial cimentício com elevado desempenho mecânico, microestrutural e de elevada durabilidade recorrendo à combinação híbrida de nanotubos de carbono (CNTs) e nanoplaquetas de grafeno (GNPs). Esta prova de conceito está a ser adaptada para um solo-cimento com previsão de ser utilizado num demonstrador na via-férrea nacional numa zona de transição. Tratar-se-á de um material inovador com capacidade de monitorização contínua da deformação e de localização de dano, para além de poder emitir um sinal de alerta para estados de degradação não conformes às condições de serviço. Nesta mesma linha de materiais inovadores e auto-sensoriais foi também desenvolvido um protótipo de uma geogrelha cuja informação está publicada em Rana et al. (2014). Estes desenvolvimentos estão alinhados com o apoio à manutenção preditiva e à supervisão em tempo real.

A digitalização a nível de projeto é também já uma realidade, embora ainda pouco aplicada ao nível da infraestrutura ferroviária. Uma das ferramentas é o BIM, que é o processo de geração, construção e gestão de dados ao longo da vida do projeto, utilizando tecnologias baseadas em modelos ligados a uma base de dados de informação do projeto. BIM incorpora dados físicos, ambientais e comerciais sobre cada elemento. Esta ferramenta tem sido aplicada com sucesso em muitas áreas da arquitetura, engenharia e construção (AEC). Contudo, essa não é a realidade em todos os setores, como é o caso das obras de geotecnia e infraestruturas de transporte, onde a sua aplicação é ainda limitada. Neves et al. (2019) estudaram a viabilidade de implementação da metodologia BIM no âmbito da obra de renovação integral duma via-férrea em Portugal, com aplicação de geotêxtil e geogrelha na base da camada de balastro. Nesse estudo foi realizada a modelação geométrica espacial – modelo 3D – de um trecho da obra e foi avaliada a possibilidade de extração de informação do modelo criado relativamente aos principais parâmetros geométricos da via-férrea e com vista à sua futura inspeção. A implementação da metodologia BIM apresentou ainda limitações, nomeadamente ao nível da interoperabilidade entre sistemas para definição de modelos mais avançados, como foi o caso do modelo 4D associado ao planeamento no tempo do processo construtivo. Idêntica problemática se coloca em relação aos pavimentos rodoviários.

## **5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Há hoje e continuará no futuro a verificar-se a utilização de abordagens mecanicistas, quer a nível da interpretação dos resultados dos ensaios, quer a nível de dimensionamento, bem como de retroanálise da observação de estruturas rodoviárias e ferroviárias em detrimento de abordagens de base puramente empírica. Esta orientação privilegia a valorização de materiais, muitas vezes rejeitados no passado, contribuindo para a economia circular e visando soluções mais sustentáveis e resilientes. Cada vez mais se poderá recorrer ao dimensionamento por programas de cálculo automático simulando cada vez mais as condições reais. Estas simulações numéricas integradas com os dados da monitorização (reais ou sintéticos) resultantes de múltiplas fontes permitirão representar a sua contraparte física (“digital twin”). Além disso, a abordagem probabilística será cada vez mais incorporada no projeto geotécnico e no projeto de pavimentos e vias-férreas de modo a contabilizar a incerteza e a variabilidade da natureza dos geomateriais “in situ” e das ações quer mecânicas quer ambientais. As abordagens de dimensionamento serão cada vez mais orientadas para as condições de funcionalidade e segurança, incorporando análises de custo de ciclo de vida.

No rescaldo do impacto significativo que a crise económica europeia teve no setor da construção na década passada, a recuperação desta indústria passará indubitavelmente pela incorporação das novas tecnologias, ferramentas e metodologias correspondentes à digitalização que se verifica atualmente na indústria, garantindo assim a competitividade europeia neste setor no

panorama global. Isto compreende a evolução dos processos de dimensionamento e construção na direção da construção inteligente, caracterizada pela autonomia e interconectividade da Indústria 4.0, não só potenciando a flexibilidade e adaptabilidade em obra para lidar com a incerteza inerente à mesma, mas também integrando equipamentos, pessoas, processos e dimensionamento num contexto de apoio à decisão em tempo real. Um dos principais desafios do futuro é saber lidar e utilizar os dados eletrónicos recolhidos no local, usando materiais inteligentes, instrumentos de última geração e sistemas informatizados comerciais. A tendência é mesmo a geração em tempo real de informação de apoio à geração de relatórios digitais, e de suporte à tomada de decisões nos aspetos da gestão e do controlo de qualidade. Na prática, isto terá um impacto marcante em termos económicos (por exemplo minimização de custos, tempos), ambientais (por exemplo minimização de emissões de carbono e otimização de recursos) e sociais (por exemplo melhoramento da qualidade das estruturas e serviços, aumentando o ciclo de vida útil e a segurança dos utilizadores), que correspondem aos principais aspetos da sustentabilidade na construção.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abedi, M.; Fangueiro, R.; Gomes Correia, A. (2020). *Ultra-sensitive affordable cementitious composite with high mechanical and microstructural performances by hybrid CNT/GNP*. Materials, Vol. 13, nº 16, art. n.º 3484.
- Balay, J.; Gomes Correia, A.; Jouve, P.; Horny, P.; Paute, J. L. (1998). *Étude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des graves non traitées et des sols supports de chaussées*. Dernières avancées. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 216, pp. 3-17.
- Biarez J.; Bougriou Z.; Fayad T.; Hammoud I.; Liu W.; Gomes Correia A. (1999). *Les modules de 10-5 à 10-1 pour les sols remaniés et non remaniés, pour les fondations des voies ferrées et les routes*. Proceedings of the 10<sup>th</sup> ECSMGE, Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure, AA Balkema. The Netherlands, vol. 3, pp. 1737-1742.
- Brown, S. F. (1996). *36<sup>th</sup> Rankine Lecture: Soil Mechanics in Pavement Engineering*. Géotechnique, Vol. 46, nº 3, pp. 383-426.
- Camargo, F.; Larsen, B.; Chabourn, B.; Roberson, R.; Siekmeier, J. (2006). *Intelligent compaction: A Minnesota case history*. Proceedings of the 54<sup>th</sup> Annual University of Minnesota Geotechnical Conference. Minneapolis, USA.
- Caterpillar Inc. (2006). *System for Track-Type Tractors AccuGrade: Grade Control System for Track-Type Tractors*. [http://www.cat.com/en\\_US/support/operations/technology/earth-moving-solutions/accugrade-grade-control-system.html](http://www.cat.com/en_US/support/operations/technology/earth-moving-solutions/accugrade-grade-control-system.html). Acedido em abril de 2018.
- Caterpillar Inc. (2012). *Cat Minestar System – Robison Mine case study*. [http://www.cat.com/en\\_US/articles/customer-stories/mining/case-studies/robinson-mine.html](http://www.cat.com/en_US/articles/customer-stories/mining/case-studies/robinson-mine.html). Acedido em abril de 2018.
- Coronado, O.; Caicedo, B.; Taibi, S.; Gomes Correia, A.; Fleureau, J.-M. (2011). *A macro geomechanical approach to rank non-standard unbound granular materials for pavements*. Engineering Geology, vol. 119, pp. 64-73.
- Coronado, O.; Caicedo, B.; Taibi, S.; Gomes Correia, A.; Souli, H.; Fleureau, J.-M. (2016). *Effect of water content on the resilient behavior of non standard unbound granular materials*. Transportation Geotechnics, vol. 7, pp. 29-39.

- Delgado, B.; Viana da Fonseca, A.; Fortunato, E., Maia, P. (2019). *Mechanical behavior of inert steel slag ballast for heavy haul rail track: laboratory evaluation*. Transportation Geotechnics, vol. 20, pp. 2214-3912.
- EN 13286-7 (2004). *Unbound and hydraulically bound mixtures; Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures*. European Committee for Standardization, Brussels.
- Fortunato, E., (2005). *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos relativos à capacidade de carga*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fortunato, E. (2016). *Comportamento estrutural de vias-férreas balastradas. Contributos para melhorar a eficiência e a qualidade da operação*. Lisboa: LNEC. ISBN 978-972-49-2280-5.
- Fortunato, E.; Paixão, A.; Fontul, S. (2012). *Improving the use of unbound granular materials in railway sub-ballast layer*. Hokkaido University, Japan: Taylor & Francis Group.
- Fortunato, E.; Paixão, A.; Calçada, R., (2013). *Railway track transition zones: design, construction, monitoring and numerical modelling*. International Journal of Railway Technology. Saxe-Coburg Publications, vol. 2, n.º 4, pp. 33-58.
- Fortunato, E.; Roque, A. J.; Gomes Correia, A. (2018). *Comportamento estrutural de um trecho rodoviário construído com agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC)*. 16º Congresso Nacional de Geotecnia, Ponta Delgada, Sociedade de Portuguesa de Geotecnia.
- Fortunato, E.; Paixão, A.; Morais, P.; Santos, C.; Francisco, A.; Asseiceiro, F.; Cruz, J.; Cruz, N. (2019). *Soil-binder columns for the rehabilitation of railway track platforms*. Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Iceland.
- Gaspar, A. P. T. (2010). *Performance evaluation and numerical modeling of an ISAC embankment and its comparison with a traditional soil embankment*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Gomes Correia, A. (2000). *Influence of compaction conditions on the resilient and permanent deformations of aggregate mixtures of granite*. Compaction of soils and granular materials (eds. A. Gomes Correia & A. Quibel). Presse Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 27-39.
- Gomes Correia, A. (2001). *Soil Mechanics in routine and advanced pavement and rail track rational design*. Geotechnics for Roads, Rail tracks and Earth Structures (Gomes Correia and Brandl, eds.). Balkema, pp. 165-187.
- Gomes Correia, A. (2004a). *Características de deformabilidade dos solos que interessam à funcionalidade das estruturas*. Geotecnia, n.º 100, pp. 103-122, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, Portugal.
- Gomes Correia, A. (2004b). *Evaluation of mechanical properties of unbound granular materials for pavements and rail tracks*. Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction (eds. A. Gomes Correia and A. Loizos). Milpress, Rotterdam, Netherlands, pp. 35-60.
- Gomes Correia, A. (2008). *Innovations in design and construction of granular pavements and railways*. Advances in Transportation Geotechnics (Ellis, Yu, McDowell, Dawson & Thom, Eds.). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47590-7, pp. 3-13.
- Gomes Correia, A.; Biarez, J. (1999). *Stiffness properties of materials to use in pavement and rail track Design*. Proceedings of the 12<sup>th</sup> ECSMGE, Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure (Barends et al., eds.), Balkema, Rotterdam, vol. 2, pp. 1245-1250.

- Gomes Correia, A.; Cunha, J. (2014). *Analysis of nonlinear soil modelling in the subgrade and rail track responses under HST*. Transportation Geotechnics, vol. 1, pp. 147-156.
- Gomes-Correia, A.; Dawson, A. (1996). *The effects of sugrade clay condition on the structural behaviour of road pavements*. Flexible Pavements (A. Gomes Correia, Ed.). Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 523 2, pp. 113-119.
- Gomes Correia, A.; Magnan, J. P. (2012). *Trends and challenges in earthworks for transportation infrastructures*. Advances in Transportation Geotechnics II, Taylor & Francis Group, pp. 1–12.
- Gomes Correia, A.; Parente, M. (2014). *Intelligent compaction technology for geomaterials. A demonstration project*. TRA2014 Transport Research Arena, pp. 1–10.
- Gomes Correia, A.; Quibel, A. (2000). *Compaction of soils and granular materials* (A. Gomes Correia & A. Quibel, Eds.). Presse Nationale des Ponts et Chaussées.
- Gomes Correia, A.; Araújo, N.; Reis Ferreira, S. (2010). *A large precision triaxial apparatus for study geomaterials under cyclic loading*. 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, pp. 1125-1130.
- Gomes Correia, A.; Hornych, P.; Akou, Y. (1999). *Review of models and modelling of unbound granular materials*. Unbound Granular Materials. Laboratory testing, In-situ Testing and Modelling (A. Gomes Correia, Ed.). A.A. Balkema, pp. 3-15.
- Gomes Correia, A.; Winter, M. G.; Puppala, A. J. (2016). *A review of sustainable approaches in transport infrastructure geotechnics*. Transportation Geotechnics, vol. 7, pp. 21-28.
- Gomes Correia, A.; Roque, A. J.; Reis Ferreira, S. M.; Fortunato, E. (2012). *Case study to promote the use of industrial byproducts: The relevance of performance tests*. Journal of ASTM International, vol. 9, n.º 2, pp. 1-18.
- Kaynia, A. M.; Madshus, C.; Zackrisson, P. (2000). *Ground vibration from high-speed trains: Prediction and countermeasure*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 126, n.º 6, pp. 531-537.
- Krylov, V. V.; Dawson, A. R.; Heelis, M. E.; Collop, A. C. (2000). *Rail movement and ground waves caused by high-speed trains approaching track-soil critical velocities*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 214, n.º 2, pp. 107-116.
- LC Products. (2018). *Titan 3330 Production Monitor Brochure*. [https://lc.com.au/products\\_excavator\\_production\\_monitor.aspx](https://lc.com.au/products_excavator_production_monitor.aspx). Acedido em abril de 2018.
- Marcelino, P.; Lurdes Antunes, M.; Fortunato, E. (2018). *Comprehensive performance indicators for road pavement condition assessment*. Structure and Infrastructure Engineering, vol. 14, n.º 11, pp. 1433-1445.
- Marcelino, P.; Lurdes Antunes, M.; Fortunato, E.; Gomes, M. C. (2019a). *Improved Methods for the Imputation of Missing Data in Pavement Management Systems*. 18th Annual International Conference on Pavement Engineering, Asphalt Technology and Infrastructure, Liverpool, UK.
- Marcelino, P.; Lurdes Antunes, M.; Fortunato, E.; Gomes, M. C. (2019b). *Transfer learning for pavement performance prediction*. International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 13, pp. 154–167.

- Marcelino, P.; Lurdes Antunes, M.; Fortunato, E.; Gomes, M. C. (2021). *Machine learning approach for pavement performance prediction*. International Journal of Pavement Engineering, vol. 22, n.º 3, pp. 341-354.
- Marques, R.; Gomes Correia, A.; Cortez, P. (2009). *Data mining applied to compaction of geomaterials*. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Champaign, Illinois, USA, Taylor & Francis, vol. 2, pp 597-605.
- Montaser, A.; Moselhi, O. (2014). *Truck + for earthmoving operations*. Journal of Information Technology in Construction, vol. 19, pp. 412–433.
- Monteiro, A. (2019). *Modelação numérica do comportamento de camadas de pavimentos rodoviários constituídas por solos tratados com cimento*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Nazarian, S; Desai, M. R. (1993). *Automated surface wave method: Field testing*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 119, n.º 7.
- Neves, J. (2001). *Contribuição para a modelação do comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis*. Tese de Doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa.
- Neves, J.; Gonçalves, M. (2018). *Finite element modelling of reinforced road pavements with geogrids*. Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX – Cardoso et al. (Eds), Taylors & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-33203-4, vol. 2, pp. 1371-1376.
- Neves, J.; Gomes Correia, A. (2002a). *Importância do comportamento dos materiais granulares no dimensionamento e na economia de construção de pavimentos flexíveis*. 2º Congresso Rodoviário Português, Lisboa. Centro Rodoviário Português, vol. II, pp. 233- 244.
- Neves, J.; Gomes Correia, A. (2002b). *Bearing capacity of a flexible pavement during the construction phase*. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, BCRA02, Lisboa. A.A. Balkema, Rotterdam, vol. 1, ISBN 90 5809 396 4, pp. 677-684.
- Neves, J.; Gomes Correia, A. (2002c). *O contributo da observação de trechos experimentais na modelação do comportamento estrutural e pavimentos flexíveis*. 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, vol. 3, pp. 1421-1431.
- Neves, J.; Gomes Correia, A. (2003). *Influence of non-linear elastic behaviour of unbound granular materials on pavement reinforcement design*. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Conference, MAIREPAV03, Guimarães. A.A. Balkema, Rotterdam, ISBN 972-8692-03-X, pp. 251-260.
- Neves, J.; Gomes Correia, A. (2004). *Behaviour of granular materials: field results versus numerical simulations*. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Unbound Aggregates in Roads, UNBAR6, Nottingham, United-Kingdom. A.A. Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 699 8, pp. 97-106.
- Neves, J.; Gomes Correia, A. (2006). *Consideração da não-linearidade do comportamento dos solos na modelação numérica de pavimentos rodoviários*. 10º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, pp.1-10.
- Neves, J.; Gomes Correia, A. (2006). *A experiência portuguesa na modelação do comportamento estrutural dos solos de fundação dos pavimentos rodoviários*. III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Geotecnia de Infraestrutura de Transportes, Brasil. ABMS/SPG, pp. 77-82.

- Neves, J.; Gomes Correia, A. (2007). *Evaluation and modelling of subgrade stiffness during the construction phase of asphalt pavements*. Proceedings of the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials. Grécia, vol. 1, pp. 503-511.
- Neves, J.; Gomes Correia, A. (2014). *Portuguese experience on asphalt pavements design supported by in situ performance evaluations*. Design, Analysis, and Asphalt Material Characterization for Road and Airfield Pavements. GSP 246, ASCE, pp. 75-82.
- Neves, J.; Sampaio, Z.; Vilela, M. (2019). *A case study of BIM implementation in rail track rehabilitation*. Infrastructures, vol. 4, n° 8.
- Paixão, A.; Fortunato, E.; Calçada, R. (2014). *Transition zones to railway bridges: track measurements and numerical modelling*. Engineering Structures, vol. 80, pp. 435-443.
- Paixão, A.; Fortunato, E.; Calçada, R. (2015). *Design and construction of backfills for railway track transition zones*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 229, n° 1, pp. 58-70.
- Paixão, A.; Varandas, J. N.; Fortunato, E.; Calçada, R. (2016). *Non-linear behaviour of geomaterials in railway Tracks under different loading conditions*. Procedia Engineering, vol. 143, pp. 1128-1135.
- Parente, M.; Cortez, P.; Gomes Correia, A. (2015a). *An evolutionary multi-objective optimization system for earthworks*. Expert Systems with Applications, vol. 42, n° 11, pp. 6674–6685.
- Parente, M.; Gomes Correia, A.; Cortez, P. (2015b). *Modern optimization in earthwork construction*. Proceedings of the XVI ECSMGE, ICE Publishing, pp. 343–348.
- Parente, M.; Gomes Correia, A.; Cortez, P. (2016). *Metaheuristics, data mining and geographic information systems for earthworks equipment allocation*. Advances in Transportation Geotechnics III, vol. 143, pp. 506-513.
- Petersen, L. (2005). *Continuous compaction control MnROAD demonstration*. Technical report for the Minnesota Department of Transportation (Mn/DOT). Minneapolis, USA.
- Profillidis, V. A. (2006) *Railway management and engineering*. 3ª Edição. Ashgate, Aldershot, UK, ISBN 978-1-4094-6463-1.
- Ramos, A.; Gomes Correia, A.; Indraratna, B.; Ngo, T.; Calçada, R.; Costa, P. A. (2020). *Mechanistic-empirical permanent deformation models: Laboratory testing, modelling and ranking*. Transportation Geotechnics, vol. 23, 100326.
- Ramos, A.; Gomes Correia, A.; Calçada, R.; Alves Costa, P.; Esen, A.; Woodward, P. K.; Connolly, D. P.; Laghrouche, O. (2021). *Influence of track foundation on the performance of ballast and concrete slab tracks under cyclic loading: Physical modelling and numerical model calibration*. Construction and Building Materials, vol. 277.
- Rana, S.; Subramani, P.; Figueiro, R.; Gomes Correia, A. (2016). *A review on smart self-sensing composite materials for civil engineering applications*. AIMS Materials Science, vol. 3, n° 2, pp. 357-379.
- Rana, S.; Zdraveva, E.; Pereira, C.; Figueiro, R.; Gomes Correia, A. (2014). *Development of hybrid braided composite rods for reinforcement and health monitoring of structures*. The Scientific World Journal, n.º 170187.
- Rüßmann, M.; Lorenz, M.; Gerbert, P.; Waldner, M.; Justus, J.; Engel, P.; Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*.

[https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_40\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries/#chapter1](https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries/#chapter1). Acedido em abril de 2017.

Shearon, L. (2015). *Manage what you measure*. Australia's Mining Monthly Magazine, 57. [https://lc.com.au/pdfs/amm\\_titan\\_article.pdf](https://lc.com.au/pdfs/amm_titan_article.pdf). Acedido em abril de 2018.

Shift2Rail Homepage (2021). <https://shift2rail.org>. Acedido em abril de 2021.

Thurner, H.; Sandström, A. (1980). *A new device for instant compaction control*. Proceedings of International Conference on Compaction, Paris, France, pp. 611–614.

Thurner, H.; Sandström, A. (2000). *Continuous Compaction Control, CCC*. In A. Gomes Correia & A. Quibel (Eds.), *Compaction of soils and granular materials*. Paris, France: Presse Nationale des Ponts et Chaussées.

Varandas, J. N.; Paixão, A.; Fortunato, E.; Zuada Coelho, B.; Hölscher, P. (2020). *Long-term deformation of railway tracks considering train-track interaction and non-linear resilient behaviour of aggregates – A 3D FEM implementation*. Computers and Geotechnics, vol. 126, 103712.