

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO A LONGO PRAZO DE SOLUÇÕES FERROVIÁRIAS INOVADORAS

Assessment of the long-term dynamic behaviour of innovative railway track solutions

Ana Ramos^{a,c}, António Gomes Correia^b, Rui Calçada^a

^a CONSTRUCT, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

^b Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal.

^c GEG – Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Porto, Portugal.

RESUMO – Este trabalho contribui para a compreensão do comportamento dinâmico a curto e a longo prazo das vias-férreas, em geral, e das zonas de transição em particular, recorrendo a uma abordagem inovadora e integrada. Numa primeira fase, é apresentada uma comparação entre o desempenho a curto e a longo prazo da via balastrada e via em laje. As tensões no solo de fundação e a respetiva deformação permanente são comparadas e avaliadas através dos índices *SAF* e *PDAF*, respetivamente. Posteriormente, os deslocamentos das vias em laje e com balastro foram medidos experimentalmente em ambiente laboratorial ao longo de mais de três milhões de ciclos, resultantes da simulação da passagem de comboios. Foram calibrados dois modelos tridimensionais e um modelo de deformação permanente, de modo a reproduzir numericamente os ensaios laboratoriais. Com base nessa calibração, é apresentada a análise do desempenho da via a curto e a longo prazo de uma zona de transição entre um aterro e um túnel, considerando a via em laje como sistema de via.

ABSTRACT – This work provides insight into the understanding of the short and long term dynamic behaviour of the railway tracks and the transition zones using an innovator and integrated approach. Firstly, a comparison between the short and long-term performance of the ballasted and ballastless tracks is presented. The subgrade stresses and permanent deformation are compared and evaluated through the *SAF* and *PDAF*, respectively. Posteriorly, the slab and ballasted tracks' displacements were measured experimentally in the laboratory over more than three million cycles from the simulation of the train passage. Two 3D models and the permanent deformation model were calibrated to reproduce numerically the laboratory tests. From the calibration, the analysis of the short and long term performance of a transition zone between an embankment and a tunnel is presented, considering the ballastless track as the track system.

Palavras Chave – vias-férreas, zonas de transição, modelo numérico.

Keywords – railway tracks, transition zones, numerical models.

E-mails: aramos@fe.up.pt/aramos@geg-engineering.com (A. Ramos), agc@civil.uminho.pt (A. Gomes Correia), ruiabc@fe.up.pt (R. Calçada)

ORCID: orcid.org/0000-0002-8381-0126 (A. Ramos), orcid.org/0000-0002-0103-2579 (A. Gomes Correia), orcid.org/0000-0002-2375-7685 (R. Calçada)

1 – INTRODUÇÃO

Quer no dimensionamento de vias ferroviárias com balastro quer de vias sem balastro, o desempenho a curto e a longo prazo deve ser considerado (Indraratna et al., 2010; Kim and Sung, 2019; Sainz-Aja et al., 2020). Com efeito, uma estimativa rigorosa da magnitude dos assentamentos acumulados permite evitar um desempenho medíocre das estruturas ferroviárias (Puppala et al., 1999). Assim, apesar dos diversos estudos sobre a caracterização do solo de fundação quando sujeito a cargas cíclicas (Puppala et al., 2009; Salour and Erlingsson, 2015; Rahman and Gassman, 2019), é fundamental compreender plenamente o comportamento desta camada, mas integrado num modelo completo de via quando submetido à passagem de comboios. Com o objetivo de suportar estes estudos e respetivas conclusões, é proposta uma nova classificação geomecânica. Esta classificação integra informação relativa à classificação do solo de fundação (UIC e ASTM), ao módulo resiliente e à deformação permanente (Ramos et al., 2020b). Com base nestes pressupostos, é comparado o desempenho de uma via com balastro, de uma via em laje (sistema Rheda) e de uma via sem balastro constituída apenas pela laje de betão (não sendo considerada a camada de suporte, designada pelo sistema Rheda de HBL – *hydraulically bonded layer*). Esta comparação considera ainda os mecanismos quase-estáticos e dinâmicos e avalia os fatores de amplificação de tensões e de deformação permanente, tendo em conta diversas variáveis que podem influenciar o desempenho das estruturas ferroviárias ao nível da fundação (Ramos et al., 2021a). A partir deste estudo, o desempenho das vias com e sem balastro é avaliado com base em ensaios laboratoriais realizados à escala real, uma abordagem amplamente utilizada em trabalhos desenvolvidos por Bian et al. (2016), Čebašek et al. (2018) e Sainz-Aja et al. (2020). Os resultados experimentais são utilizados para a calibração dos modelos através de um processo inovador (Ramos et al., 2021b), o que só é possível devido à geração de uma quantidade significativa de dados, resultante da atuação de três milhões de ciclos de carregamento sobre a estrutura. Com base nas propriedades calibradas, a mesma via sem balastro foi analisada no contexto das zonas de transição. O seu desempenho foi estudado detalhadamente através da análise de deslocamentos, acelerações e tensões. É proposta uma nova metodologia híbrida para a avaliação do desempenho a longo prazo da via e para a previsão da sua degradação. O principal objetivo desta investigação é contribuir para um conhecimento mais aprofundado do comportamento a longo prazo das vias ferroviárias, em particular nas zonas de transição, melhorando o dimensionamento das infraestruturas e contribuindo para uma gestão mais eficiente dos ativos ferroviários.

2 – MODELOS MECANÍSTICO-EMPÍRICOS DE MÓDULO RESILIENTE E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DA CAMADA DE FUNDAÇÃO: ENSAIOS LABORATORIAIS, MODELAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Tipicamente, a fundação de uma via ferroviária é constituída por geomateriais e apresenta dois tipos de deformação quando submetida a cargas cíclicas: deformações recuperáveis (ou reversíveis) e deformações permanentes (ou plásticas), as quais assumem particular relevância no desempenho a longo prazo da subestrutura (todos os elementos da via-férrea que se encontram geometricamente abaixo do balastro).

Estas deformações podem ser caracterizadas através de modelos elastoplásticos, da teoria do *shakedown* e/ou de modelos mecanístico-empíricos (Ramos et al., 2020b). Na presente análise, é dada maior ênfase a estes últimos. Com o objetivo de compreender de que forma os modelos utilizados para caracterizar o módulo resiliente (M_r) e a deformação permanente (ε_p) diferem entre si, quer em termos de formulação, quer quanto à relevância de determinadas variáveis incluídas no modelo matemático, foi realizado um estudo paramétrico. Este estudo inclui comparações entre alguns modelos selecionados, baseados em diferentes materiais com distintas classificações (UIC e ASTM), propriedades, granulometria e estados físicos. Esta comparação permite estimar M_r e a deformação permanente, bem como classificar os materiais de acordo com o módulo previsto, os

valores de deformação e a classificação do solo, constituindo uma ferramenta útil para o dimensionamento de estruturas ferroviárias. Assim, no estudo do módulo resiliente foram testados sete modelos e quatro materiais (dois solos granulares e dois solos finos). Relativamente à deformação permanente, foram analisados três modelos e seis materiais (areia, silte, areia siltosa — com 42,2% e 27,4% de finos — e areias bem graduadas e mal graduadas). Os materiais foram selecionados de forma a abranger um amplo intervalo de propriedades e classificações. Com base no estudo paramétrico, foi selecionado um modelo para a caracterização do módulo resiliente (equação 1 — modelo MEPDG desenvolvido por Ara e Division (2004), de carácter universal, aplicável a solos finos e granulares) e um modelo para a deformação permanente (equação 2 — modelo desenvolvido por Chen et al. (2014), que considera a influência do estado de tensão, do estado inicial de tensão e do critério de cedência). A partir desta seleção, os materiais foram classificados em termos de M_r e deformação permanente e, com base nessa classificação, foi proposta uma nova classificação geomecânica (Gomes Correia e Ramos, 2021), conforme ilustrado na Figura 1. Este trabalho permite compreender quais são os valores aceitáveis da deformação permanente e do módulo resiliente de acordo com o tipo de material e a sua classificação. Neste caso particular, foi utilizada a classificação da UIC que divide os materiais em QS1, QS2 e QS3 de acordo com a sua granulometria, ensaios de CBR, entre outros ensaios/propriedades. Os materiais classificados como QS0 foram excluídos, uma vez que a sua aplicação na ferrovia só é aceitável considerando tratamentos adicionais com cal ou cimento. A partir desta classificação, foi determinada a deformação permanente e Módulo Resiliente de cada material testado e foram definidos intervalos de forma a perceber os limites de cada classificação/material.

$$M_r = k_1 p_0 \left(\frac{\theta}{p_0} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_0} + 1 \right)^{k_3} \quad (1)$$

$$\varepsilon_1^p(N) = \varepsilon_1^{p0} [1 - e^{-BN}] \left(\frac{\sqrt{p_{am}^2 + q_{am}^2}}{p_a} \right)^\alpha \cdot \frac{1}{m \left(1 + \frac{p_{ini}}{p_{am}} \right) + \frac{s}{p_{am}} - \frac{(q_{ini} + q_{am})}{p_{am}}} \quad (2)$$

onde M_r corresponde ao módulo resiliente, k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros/constantes dependentes do estado do material, τ_{oct} é a tensão de corte octaédrica, θ é a soma das tensões principais e p_0 ou p_a (dependendo do autor) é a pressão atmosférica. Acrescenta-se, ainda que ε_1^p corresponde à deformação permanente, N é número de ciclos de carga, ε_1^{p0} , B e α são parâmetros do modelo, p_{am} e q_{am} são a tensão média e de desvio induzido pela passagem do comboio, p_{ini} e q_{ini} são a tensão média e de desvio iniciais e s e m são os parâmetros usados para definir o critério de rotura $q=s+mp$.

Os resultados apresentados na Figura 1 mostram que foi obtido um intervalo significativo de valores para cada classificação. Tal deve-se à natureza mineralógica e às propriedades físicas de cada material. Os materiais classificados como QS1 dependem das características de plasticidade e do índice de consistência (bem como da percentagem de finos), podendo ter um impacto significativo na ε_p e M_r . Os materiais classificados como QS2 e QS3 dependem do tipo de material (areia ou cascalho), bem como da sua granulometria (bem ou mal graduada). Adicionalmente, a percentagem de finos (nos materiais bem graduados) pode também influenciar a resposta do material.

Neste sentido, a classificação geomecânica proposta permite compreender de forma inequívoca, a partir da caracterização dos materiais (M_r e ε_p) e classificação dos mesmos (Qsi) (associada também à respetiva classificação da plataforma da via), a influência que as deformações elástica e plástica dos geomateriais podem ter no comportamento a curto e longo prazo da via do ponto de vista estrutural e geotécnico. Essa avaliação e impacto das deformações são apresentados ao longo do presente documento.

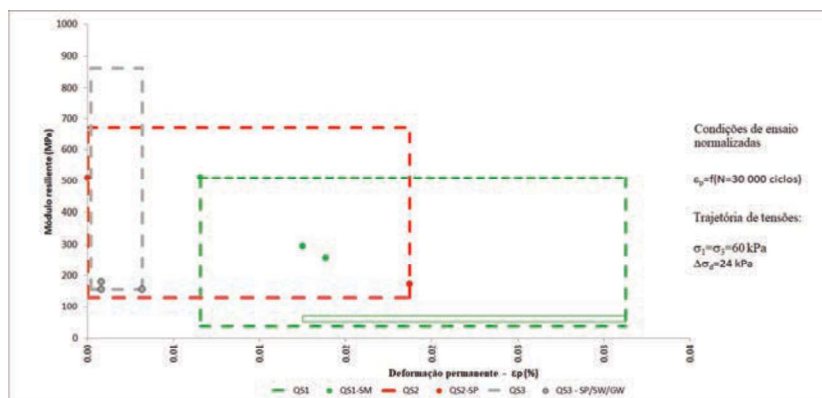


Fig. 1 – Classificação geomecânica com base no módulo resiliente e deformação permanente.

3 – MODELAÇÃO DOS MECANISMOS QUASE-ESTÁTICOS E DINÂMICOS DAS VIAS COM BALASTRO E SEM BALASTRO

As vias ferroviárias com balastro e sem balastro apresentam algumas semelhanças, mas também diferenças importantes em termos de materiais, rigidez, ruído gerado, entre outros aspetos. Este estudo analisa detalhadamente o desempenho da via com balastro, da via sem balastro (sistema *Rheda*) e de uma via sem balastro otimizada, constituída apenas pela laje de betão (sendo omitidas as camadas de suporte designadas de *HBL* no sistema *Rheda*; trata-se de uma sugestão e um estudo preliminar com base em modelação numérica, uma vez que esta poderá ser uma solução mais económica que a original. As conclusões obtidas relativamente à via sem balastro otimizada podem ser utilizadas como orientação para futuras otimizações da estrutura de via sem balastro em determinadas situações. Os modelos numéricos são apresentados na Figura 2.

As análises foram realizadas na camada de fundação e no elemento 1 (e respetivo alinhamento) representado na Figura 2. Em termos de geometria, a travessa da via balastrada apresenta uma espessura de 0,22 m, enquanto as camadas de balastro e de sub-balastro apresentam uma espessura de 0,35 m e 0,55 m, respetivamente. No caso do balastro, a espessura foi medida a partir da base da travessa. No caso das vias sem balastro, a laje de betão, a camada de suporte (*HBL*) e a camada *FPL* (*frost protection layer*) apresentam uma espessura de 0,24 m, 0,30 m e 0,50 m, respetivamente. No caso da via sem balastro (sistema *Rheda*), assume-se que a camada *FPL* está totalmente integrada na fundação e apresenta o mesmo valor de rigidez da fundação. Esta simplificação revelou-se muito útil para a realização dos cálculos, nomeadamente no que respeita ao desempenho a longo prazo. Nesta análise, as tensões iniciais foram obtidas considerando um estado de tensões isotrópico ($K_0 = 1$) e, conforme ilustrado na Figura 2, a modelação considera as condições de simetria do problema. Os materiais foram modelados no domínio elástico linear (Ramos et al., 2020a). Os valores adotados são apresentados no Quadro 1.

Assim, o desempenho das vias com e sem balastro, em termos de tensões e deformações permanentes, é comparado e quantificado através de um fator de amplificação inovador, definido pela relação entre os mecanismos dinâmicos e quase-estáticos: *SAF* (*stress amplification factor – fator de amplificação da tensão*) e *PDAF* (*permanent deformation amplification factor – fator de amplificação da deformação permanente*). Este estudo foi desenvolvido através de uma metodologia híbrida que integra a simulação numérica e a análise de mais de 60 casos de estudo, utilizando a abordagem FEM-PML 2.5D (Ramos et al., 2021a) (no domínio da frequência), a qual permite obter de forma expedita os níveis de tensão na fundação de cada estrutura ferroviária. A abordagem 2.5D é uma solução tridimensional obtida através da discretização numérica em FEM da secção transversal invariante combinada com a transforação de *Fourier* do domínio do longo da direção

longitudinal. PML ou *Perfectly Matched Layers* (camadas de correspondência perfeita) correspondem às fronteiras artificiais que permitem absorver as ondas que nela incidem e garantem que não há reflexão das mesmas quando estas atingem as fronteiras. É importante referir que, pelo facto de considerar uma secção invariante, esta abordagem numérica não permite modelar zonas de transição. A partir dos resultados das tensões, o desempenho a longo prazo foi analisado através da implementação do modelo empírico de deformação permanente descrito na Equação 2. Os resultados ao nível do comportamento a longo prazo são apresentados em termos de deformações permanentes acumuladas.

Quadro 1 – Características dos materiais.

Elementos	M_r (MPa)	ν	ξ	ρ (kg/m ³)
Travessas (via balastrada)	30000	0,20	0,010	1833,3
Balastro	97	0,12	0,061	1591,0
Sub-balastro	212	0,30	0,054	1913,0
Laje de betão	34000	0,30	0,030	2040,0
HBL	10000	0,20	0,030	2500,0
FPL*	120	0,20	0,030	2500,0
Fundação*	120	0,30	0,030	2040,0

M_r = Módulo Resiliente; ν =coeficiente de Poisson, ξ = amortecimento e ρ =densidade

* A camada FPL e fundação são caracterizadas por um ângulo de atrito de 30° e uma coesão efetiva igual a zero

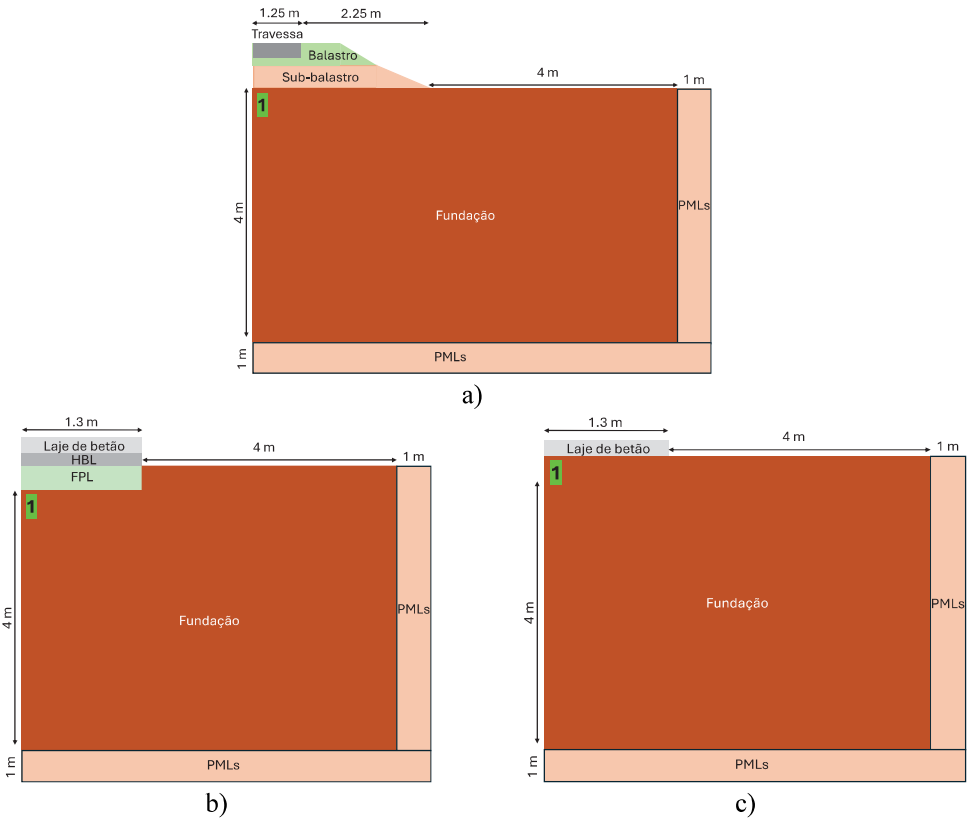


Fig. 2 – Geometria dos modelos numéricos: a) via com balastro; b) via sem balastro (sistema Rheda); c) via sem balastro constituída apenas por laje de betão (adaptado de Ramos et al., 2018).

A determinação destes fatores de amplificação permitiu avaliar o impacto de diferentes variáveis consideradas importantes e/ou com influência na degradação das vias ferroviárias, tais como as cargas móveis (avaliadas através da velocidade do comboio), as propriedades mecânicas da camada de fundação (rigidez e resistência) e o mecanismo dinâmico causado pelo perfil de irregularidades (definido em termos de comprimento de onda (λ) e variabilidade espacial). Os resultados mostram que a velocidade do comboio é o fator com maior influência no desempenho das estruturas ferroviárias, uma vez que provoca uma amplificação significativa dos níveis de tensão. Quando a velocidade do comboio é reduzida (entre 80 km/h e 200 km/h), as respostas quase-estática e dinâmica são praticamente coincidentes (Figura 3). No entanto, quando a velocidade aumenta e se aproxima da velocidade crítica (entre 360 km/h e 500 km/h), verifica-se um aumento significativo dos fatores *SAF* e *PDAF*, conforme ilustrado na Figura 4.

Relativamente ao desempenho da via com balastro e da via sem balastro (sistema *Rheda*), ao nível da fundação, este é muito semelhante em termos de tensões e deformação permanente. Por outro lado, a via sem balastro “otimizada” pode constituir uma alternativa ao sistema *Rheda*, uma vez que apresenta um bom desempenho global considerando todos os fatores analisados. Isto significa que os valores de *SAF* e *PDAF* são próximos de 1, conforme apresentado na Figura 5a. O principal problema está relacionado com os valores significativos da deformação permanente acumulada. Tal deve-se aos baixos valores da tensão média inicial, o que faz com que o pico de tensão esteja mais próximo do critério de cedência, induzindo maiores deformações permanentes cumulativas quando comparadas com as restantes estruturas, conforme ilustrado na Figura 5b.

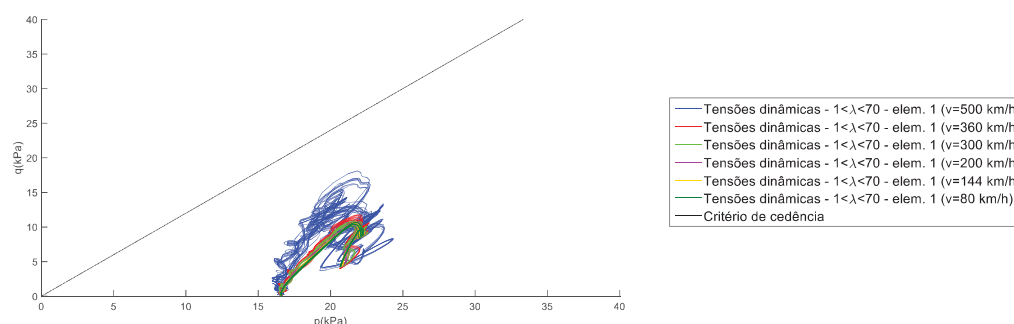


Fig. 3 – Incremento dos efeitos dinâmicos com o aumento da velocidade do comboio (sistema *Rheda*).

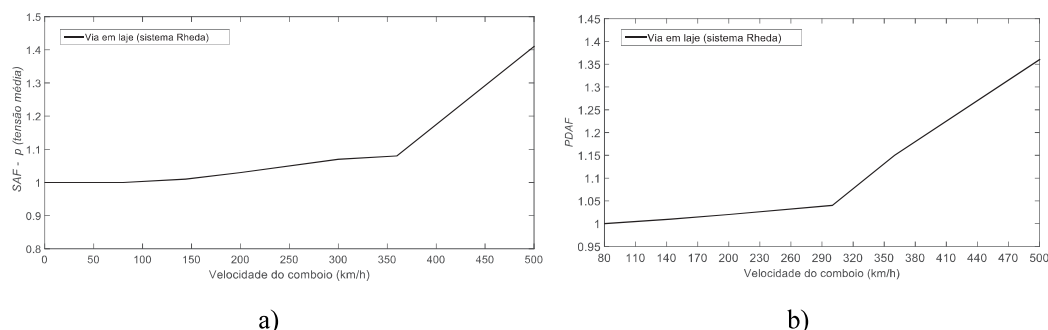


Fig. 4 – Via em laje (sistema *Rheda*): a) *SAF*- tensão média; b) *PDAF*.

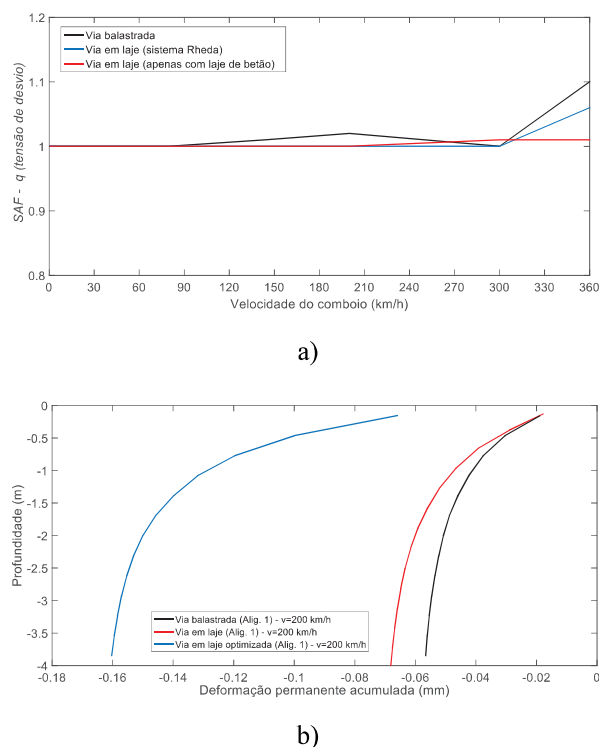


Fig. 5 – a) Relação entre o fator *SAF* (tensão de desvio - *q*) e velocidade do comboio até 360 km/h; b) deformação permanente acumulada (*v*=200 km/h).

4 – DESEMPENHO A LONGO PRAZO DAS VIAS COM E SEM BALASTRO SOB CARREGAMENTO CÍCLICO: MODELAÇÃO FÍSICA E CALIBRAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS

Com o objetivo de compreender e explorar o desempenho dinâmico das vias ferroviárias (a curto e a longo prazo), foram realizados ensaios laboratoriais à escala real considerando as vias com e sem balastro, utilizando o equipamento GRAFT-2 (Ramos et al., 2021b), que é apresentado na Figura 6. No caso da via em laje, o sistema de via ensaiado experimentalmente apresenta uma laje de betão com 0,2m de espessura, uma camada de HBL com 0,3m de espessura, uma camada de FPL com 0,4m de espessura e a camada de fundação apresenta 0,8m de espessura. No caso da via balastrada, o balastro apresenta uma espessura máxima de 0,7m, enquanto as espessuras do FPL e da fundação são iguais ao da via em laje.

O principal objetivo deste equipamento é avaliar e caracterizar não só o desempenho a curto prazo, mas também a longo prazo, simulando a passagem de comboios (anos de exploração) em apenas alguns dias de ensaio. O equipamento utiliza seis atuadores hidráulicos independentes que carregam três travessas de dimensão real nas vias com balastro e em laje, considerando a simulação de um comboio em movimento (carregamento faseado). As estruturas ferroviárias foram submetidas a ensaios estáticos e cíclicos/dinâmicos (considerando duas frequências distintas: 5,6 Hz e 2,5 Hz; a subestrutura manteve-se inalterada em ambas as frequências). A frequência de 5,6 Hz foi determinada com base numa velocidade de 300 km/h e uma distância standard entre bogies. De forma a considerar cargas por eixo superiores, foi necessário, devido à limitação do equipamento, adotar uma frequência reduzida de 2,5 Hz.



Fig. 6 – Equipamento GRAFT-2 (a ensaiar uma via balastrada).

Os assentamentos medidos foram controlados através de vários dispositivos, incluindo LVDTs, também designados por deslocamentos CH. Adicionalmente, foram instalados quatro LVDTs de alta precisão (12 mm) na laje de betão da via sem balastro e nas travessas da via com balastro.

A via com balastro é constituída pela camada de balastro, a camada *FPL*, fundação e uma geogrelha colocada entre o balastro e a camada *FPL*. A via sem balastro é composta por uma laje de betão, uma camada fina de calda de cimento, uma camada de suporte designada por *HBL* (*hydraulically bonded layer*), sendo a subestrutura constituída pela camada *FPL* e fundação, com uma espessura total de 1,2 m. As duas estruturas foram submetidas a ensaios cíclicos através da aplicação de 3,4 milhões de ciclos de carga, o que corresponde a cerca de 5,2 anos de exploração da *West Coast Main Line* no Reino Unido (Kennedy et al., 2013). A quantidade de dados gerados em termos de deslocamentos/assentamentos ao longo dos ensaios cíclicos permitiu estudar o comportamento a longo prazo das estruturas e simular o processo de degradação das vias com e sem balastro. Importa referir que os ensaios da via com balastro foram realizados após os ensaios da via sem balastro. No caso da via com balastro, a maior parte da subestrutura permaneceu inalterada, sendo a superestrutura totalmente substituída, com exceção das palmilhas (as mesmas palmilhas foram utilizadas em ambas as vias). Este facto pode influenciar os resultados, uma vez que o solo pode já ter sofrido um aumento de rigidez e durante os ensaios anteriores na via sem balastro durante a aplicação dos ciclos de carga. Nesta medida, este aumento de rigidez pode traduzir-se numa menor propensão para o desenvolvimento da deformação permanente.

Para reproduzir numericamente, de forma rigorosa, os resultados experimentais, o processo de calibração foi dividido em duas fases: calibração a curto prazo e calibração a longo prazo. Na calibração a curto prazo Figura 7a, foram desenvolvidos dois modelos numéricos 3D utilizando elementos sólidos de oito nós. Nesta fase, as propriedades dos materiais foram calibradas através da comparação entre os deslocamentos medidos e os obtidos numericamente. Os resultados obtidos mostraram uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Nesta calibração, foram ajustados o coeficiente de Poisson e o módulo de *Young* de alguns materiais: palmilhas, balastro, camada *FPL* e fundação.

A partir da calibração a curto prazo, foi calibrado um modelo empírico de deformação permanente (descrito na equação 2) com base nas propriedades dos materiais. Os resultados mostram que as constantes do modelo empírico foram calibradas com sucesso (Figuras 7b e c). Esta calibração foi realizada utilizando o método dos mínimos quadrados e aplicando o conceito de *time hardening* (Salour and Erlingsson, 2015), de forma a ter em conta o historial de tensões a que os materiais estiveram sujeitos (principalmente no caso da camada *FPL* e da fundação). Os resultados mostram uma excelente concordância entre os resultados experimentais (deformação medida nas estruturas ferroviárias ensaiadas ao longo de mais de 3 milhões de ciclos de carga – curvas a vermelho e azul, 5,6 Hz e 2,5 Hz, respetivamente) e numéricos, com curvas praticamente sobrepostas. As curvas numéricas correspondem ao modelo empírico apresentado na Equação 2 após calibração das constantes ε^{p0} , B e α . (curvas a preto e verde, 5,6 Hz e 2,5 Hz, respetivamente). Adicionalmente, os resultados experimentais confirmaram que a via com balastro apresenta deformações permanentes (e deslocamentos permanentes acumulados) significativamente superiores às da via sem balastro, devido à presença da camada de balastro (cerca de 15 a 20 vezes superiores). Este resultado confirma, assim, a influência significativa da camada de balastro na deformação permanente.

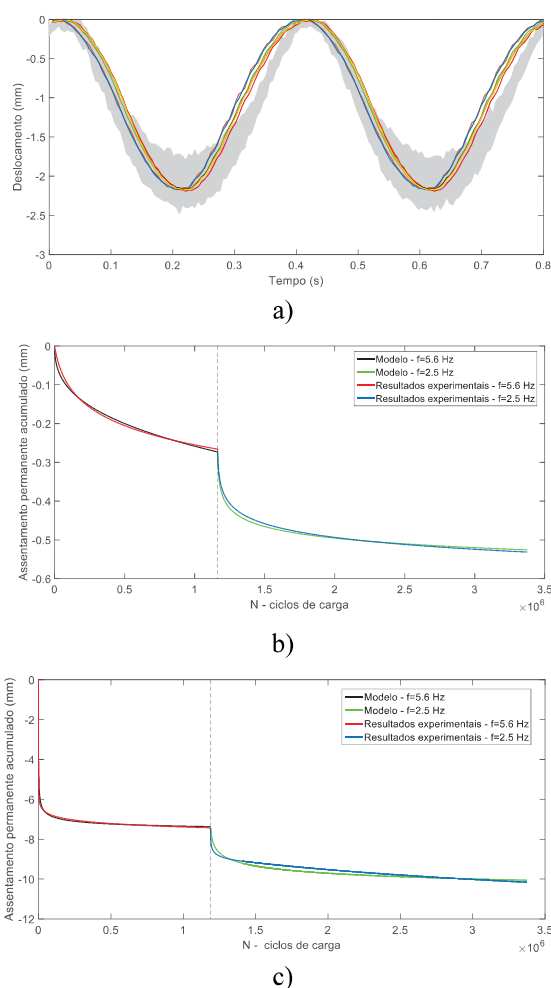


Fig. 7 – a) Calibração do modelo a curto prazo; b) Calibração do modelo de deformação permanente: via em laje; c) calibração do modelo de deformação permanente da via balastrada.

5 – ANÁLISE DE UMA ZONA DE TRANSIÇÃO ATERRO-TÚNEL CONSIDERANDO UM SISTEMA DE VIA EM LAJE

A partir do processo de calibração anterior, as propriedades calibradas foram aplicadas a uma via em laje numa zona de transição. Neste caso, a geometria da via em laje foi estendida, conforme ilustrado na Figura 8. Relativamente à secção transversal, a fundação tem uma espessura de 10,4 m e a distância entre o centro do modelo e o limite vertical (plano yx) é de 6 m. A formulação de *Lysmer* (Lysmer and Kuhlemeyer, 1969) foi adotada para atenuar as ondas que incidem nas fronteiras do modelo. Para simular o processo de degradação da zona de transição, foram analisados os efeitos da passagem dos primeiros quatro bogies do Alfa Pendular a 220 km/h. A interação veículo-via foi considerada através da inclusão de elementos de contacto. Foram também incluídos elementos de contacto entre as camadas *HBL* e *FPL*, de modo a simular o “descolamento” da subestrutura em relação à superestrutura. Para simplificar a modelação, o veículo foi representado apenas pelos *bogies*, suspensão primária, massa e eixo do comboio, bem como pela rigidez hertziana. Foi utilizada uma carga de 67,5 kN para simular a carga por eixo (carga por eixo/2).

A partir da modelação, foram analisadas as tensões, acelerações e deslocamentos no carril, laje de betão, camada *HBL*, camada *FPL* e solo de fundação, sendo dada maior ênfase à variação das tensões. A Figura 9a apresenta as tensões longitudinais (direção x da Figura 7, sob o alinhamento de carregamento) nos nós superior e inferior da camada de *HBL* ao longo da zona de transição (localizada em $x = 0$ m). Estes resultados são particularmente relevantes, uma vez que a camada *HBL* e a laje de betão são os elementos que asseguram a continuidade da via ao longo da transição e, por esse motivo, estão sujeitos a um campo de tensões complexo, agravado pela variação de rigidez da via. Assim, é possível identificar um pico de tensão na zona de transição ($x = 0$ m).

Sendo este um modelo 3D, as tensões na camada *HBL* foram também analisadas ao longo da secção transversal do modelo (Figura 9b). Os valores máximos das tensões verticais na camada *HBL* são apresentados para duas secções localizadas na zona do aterro (mais flexível) e na zona do túnel (mais rígida). Os resultados mostram variações na direção transversal da via: as tensões são máximas sob o carril e tendem a diminuir nas extremidades. Adicionalmente, os resultados indicam que as tensões são mais elevadas na secção localizada na zona do túnel (mais rígida). Este tipo de análise evidencia a importância da modelação tridimensional.

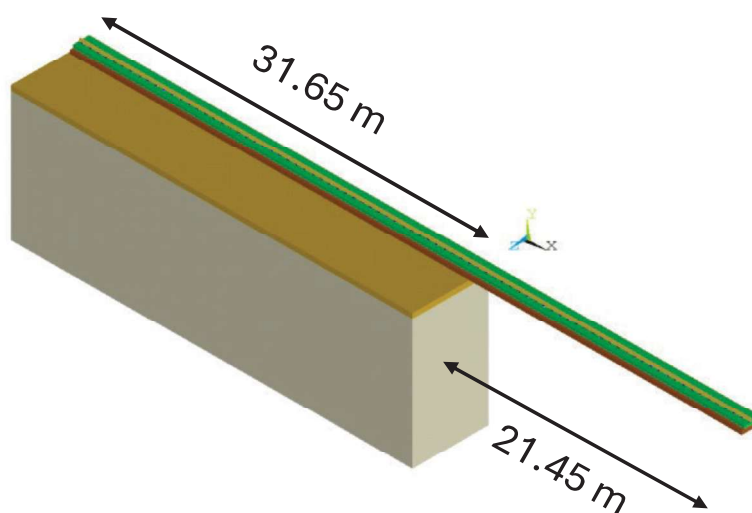


Fig. 8 – Transição aterro para túnel num sistema de via em laje.

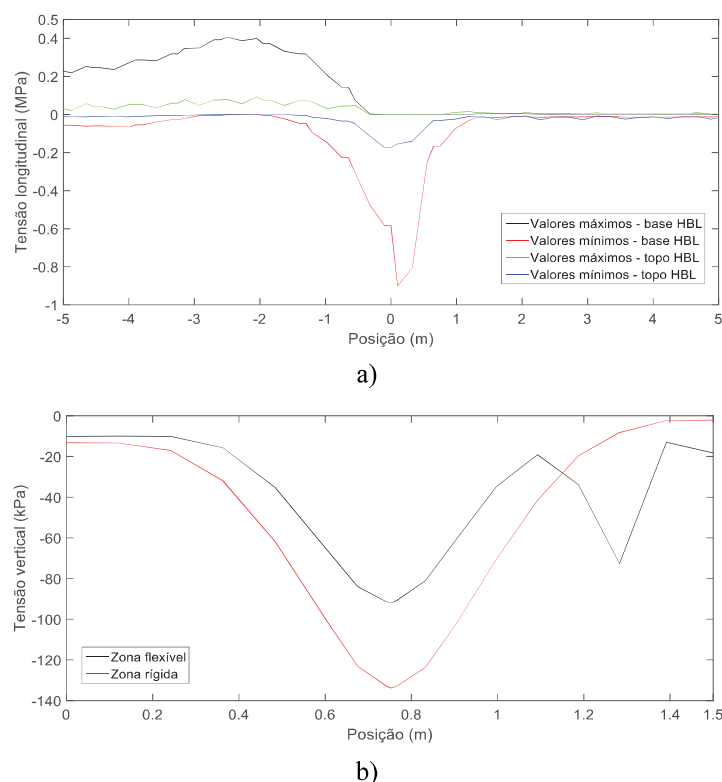


Fig. 9 – a) Tensão longitudinal nos nós superiores e inferiores da camada HBL ao longo da zona de transição; b) tensão vertical máxima ao longo da secção transversal de uma zona rígida e de uma zona flexível (nós superiores) na camada de HBL.

Para modelar a deformação permanente e prever a degradação da via, foram obtidas, na modelação 3D, as tensões em todos os nós da subestrutura (camada *FPL* e fundação) que foram, posteriormente, importadas para o cálculo da deformação permanente. A incorporação da deformação permanente em modelos completos de via constitui ainda um campo pouco explorado. Assim, foi desenvolvida uma metodologia para simular numericamente a evolução da deformação permanente da via: a deformação permanente é obtida aplicando o modelo desenvolvido por Chen et al. (2014) utilizado nas secções anteriores, e os parâmetros já calibrados na Secção 4. Esta metodologia baseia-se no número de ciclos de carga e nos níveis de tensão induzidos pela passagem do comboio nos geomateriais. Conforme ilustrado na Figura 10, o deslocamento permanente acumulado máximo na subestrutura, sob o alinhamento do carregamento (posição do carril), é de 0,52 mm e ocorre na posição $x = -7,25$ m. Os resultados mostram ainda que as camadas que mais contribuem para a deformação permanente e para o respetivo deslocamento permanente acumulado localizam-se entre o topo da camada *FPL* e $y = -4,138$ m (acima de metade da espessura do solo de fundação). De facto, a camada *FPL* contribui para o desenvolvimento da deformação permanente, bem como cerca de 30% da fundação. A partir da profundidade $y = -4,138$ m, o deslocamento permanente acumulado estabiliza, o que significa que cerca de 70% da camada de fundação não contribui para o desenvolvimento da deformação permanente. Esta informação é relevante, pois indica que não é necessário obter as tensões em todos os elementos da fundação, reduzindo o tempo de cálculo. Mais ainda, indica até que profundidade pode ser necessário reforçar, por exemplo, um aterro ferroviário.

Após a determinação do deslocamento permanente, a geometria deformada (após 1 milhão de ciclos de carga) foi introduzida no modelo 3D em cada nó da camada *FPL* e do solo de fundação. Os valores das tensões longitudinais foram comparados considerando o cenário inicial (geometria indeformável) e o novo cenário com a geometria deformada. Os resultados são apresentados na Figura 11. Assim, é possível concluir que esta zona de transição específica, com um sistema de via em laje, apresenta um desempenho satisfatório. Os resultados mostram que a rigidez da estrutura conferida pela laje de betão é significativa quando comparada com a do balastro utilizado na via balastrada, uma vez que é conhecido seu comportamento quando submetido a milhões de ciclos de carga (deformações permanentes significativas).

Devido à concentração de tensões na laje de betão e na camada *HBL* na zona de transição, foi incluída uma manta resiliente sob a laje de betão no túnel e no aterro (1 m imediatamente antes da transição), com o objetivo de mitigar este fenómeno, otimizar a via em laje e suavizar a transição. Esta manta é importante para conferir maior flexibilidade sob a laje de betão e equilibrar a rigidez entre o aterro e o túnel, constituindo um passo relevante na otimização deste sistema em zonas de transição. Assim, torna-se imperativo avaliar as tensões. Os resultados apresentados na Figura 12 mostram uma redução dos valores das tensões longitudinais ao longo da via. Relativamente à laje de betão, é possível identificar uma redução do valor máximo da tensão longitudinal em $x = 0$ m. Esta atenuação dos valores da tensão é também visível na camada *HBL*, nas tensões longitudinais mínimas.

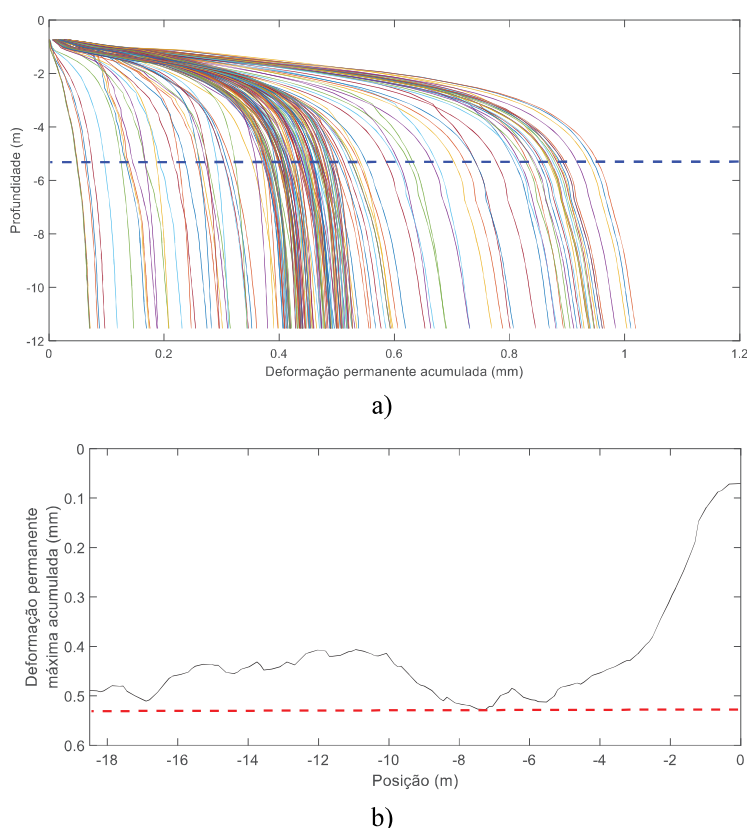


Fig. 10 – Deformação/assentamento permanente acumulado na subestrutura (*FPL*+fundação) em mm: a) ao longo da via, considerando todos os alinhamentos; b) Deformação permanente acumulada máxima ao longo da via.

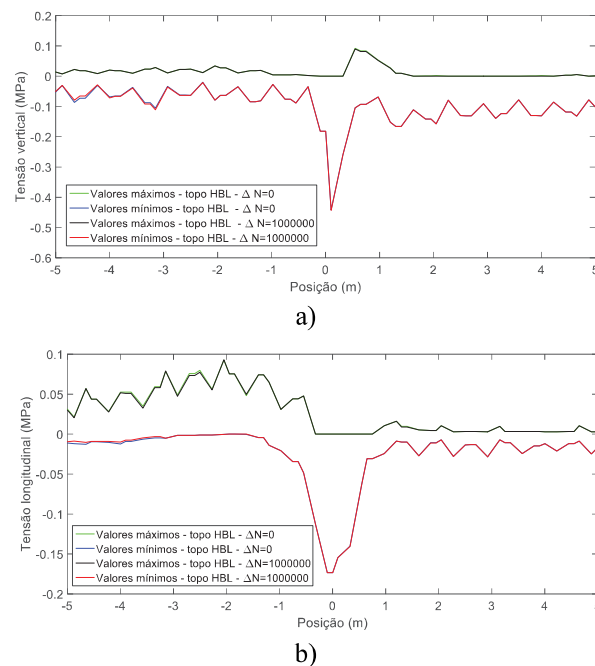


Fig. 11 – Variação das tensões nos nós superiores da camada *HBL* ao longo da zona de transição com o número de ciclos de carga (sob o alinhamento de carregamento): a) tensão vertical; b) tensão longitudinal.

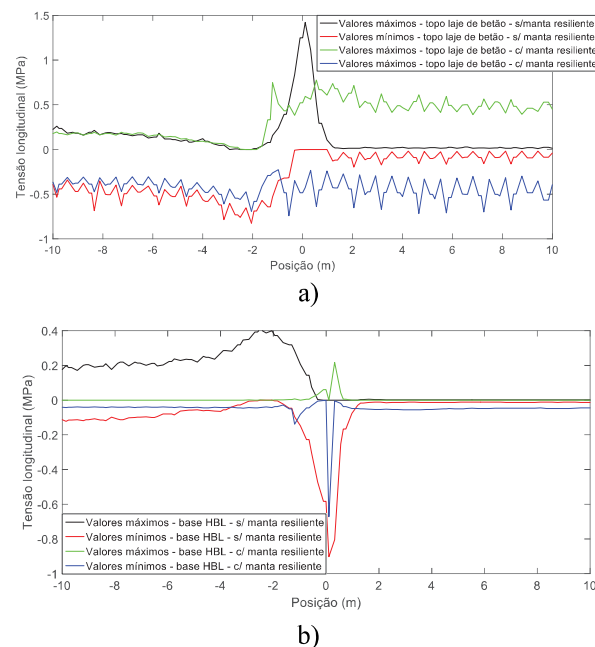


Fig. 12 – Comparação das tensões (ao longo da via) com e sem manta resiliente: a) tensões longitudinais nos nós superiores da laje de betão; b) tensões longitudinais nos nós inferiores da camada *HBL*.

6 – CONCLUSÕES

Este trabalho tem como objetivo obter um entendimento mais abrangente do comportamento estrutural das infraestruturas ferroviárias, com especial enfoque nas zonas de transição. Numa primeira fase, com base num estudo paramétrico, foi selecionado um modelo empírico de deformação permanente para o estudo do comportamento a longo prazo. A partir dos estudos paramétricos e da classificação dos materiais, foi proposta uma nova classificação geomecânica. Esta ferramenta estabelece uma relação entre a classificação *UIC* e as deformações resilientes e permanentes. O produto final apresenta um amplo intervalo de resultados/deformações, refletindo a variação das propriedades dos materiais, mesmo dentro da mesma classificação *UIC*, que influencia ambos os tipos de deformação (reversível e irreversível).

Na comparação entre as vias com e sem balastro, os resultados mostraram que o desempenho da fundação não é significativamente diferente para os fatores analisados (velocidade do comboio, propriedades mecânicas da fundação, comprimento de onda do perfil de irregularidades e variabilidade espacial). Adicionalmente, a velocidade do comboio (e a sua aproximação à velocidade crítica) apresenta uma influência significativa no processo de degradação das estruturas ferroviárias. A avaliação desta influência foi realizada através dos fatores *SAF* e *PDAF*. No que respeita à via sem balastro, foram modeladas duas estruturas para avaliar a influência das camadas de suporte na resposta da fundação. Os resultados mostraram que a via sem balastro “otimizada” pode constituir uma alternativa ao sistema *Rheda* “convencional”, uma vez que apresenta um bom desempenho global considerando todos os fatores analisados (tendo em conta a avaliação do *SAF* e do *PDAF*). A única desvantagem está relacionada com os valores absolutos mais elevados de deformação permanente (em comparação com a via em laje tradicional e a via balastrada).

Posteriormente, o equipamento *GRAFT-2* foi utilizado para avaliar, em condições controladas, o desempenho a curto e a longo prazo das vias com e sem balastro. Os resultados experimentais mostraram que os deslocamentos da via sem balastro são significativamente inferiores aos da via com balastro, confirmando a influência relevante da camada de balastro na deformação permanente. Adicionalmente, dois modelos numéricos 3D foram calibrados com sucesso a partir de resultados experimentais. Após a calibração a curto prazo, foi introduzida uma abordagem inovadora para simular o comportamento a longo prazo de ambas as estruturas, através da calibração de um modelo empírico de deformação permanente, com resultados muito satisfatórios. Esta abordagem constitui uma ferramenta valiosa para futuras modelações da degradação a longo prazo de estruturas ferroviárias em zonas de transição, podendo ser utilizada no desenvolvimento de estratégias preditivas e de manutenção, com redução dos custos ao longo da vida útil das mesmas.

Com base nas propriedades calibradas e a partir da extensão da geometria da via em laje, o seu desempenho foi analisado detalhadamente numa zona de transição. Os resultados obtidos mostram que as tensões na camada *HBL* são inferiores na zona do aterro quando comparadas com as tensões desta mesma camada na zona do túnel. Acrescenta-se ainda que as tensões apresentam variações ao longo da direção transversal. A subestrutura apresenta uma deformação permanente acumulada máxima (sob o alinhamento de carregamento) de 0,52 mm. Os resultados da deformação permanente indicam ainda que as camadas que mais contribuem para a deformação permanente são a camada *FPL* e cerca de 30% da fundação. Adicionalmente, a via em laje apresenta um bom desempenho a longo prazo, uma vez que não se observaram diferenças significativas nos resultados das tensões ao comparar as condições iniciais com as condições com a via deformada. Por fim, foi proposta uma otimização do sistema através da inclusão de uma manta resiliente, com o objetivo de reduzir a concentração de tensões na zona de transição. Os resultados demonstram uma redução dos níveis de tensão na camada *HBL* e na laje de betão.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ara, I.; Division, E. C. (2004). *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures* (Final report, NCHRP project 1-37A). Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies.
- Bian, X.; Jiang, H.; Chen, Y.; Jiang, J.; Han, J. (2016). *A full-scale physical model test apparatus for investigating the dynamic performance of the slab track system of a high-speed railway*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 230, pp. 554-571. <https://doi.org/10.1177/095440971455>
- Čebašek, T. M.; Esen, A. F.; Woodward, P. K.; Laghrouche, O.; Connolly, D. P. (2018). *Experimental investigation of ballasted and slab track systems for high-speed railway*. Fourth International Conference on Railway Technology: Railways 2018. Sitges, Barcelona.
- Chen, R.; Chena, J.; Zhaob, X.; Bian, X.; Chen, Y. (2014). *Cumulative settlement of track subgrade in high-speed railway under varying water levels*. International Journal of Rail Transportation, 2, pp. 205–220. <https://doi.org/10.1080/23248378.2014.959083>
- Gomes Correia, A.; Ramos, A. (2022). *A geomechanics classification for the rating of railroad subgrade performance*. Railway Engineering Science, 30, pp. 323–359. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00260-z>
- Indraratna, B.; Nimbalkar, S.; Christie, D.; Rujikiatkamjorn, C.; Vinod, J. (2010). *Field assessment of the performance of a ballasted rail track with and without geosynthetics*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136, pp. 907-917. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000312](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000312)
- Kennedy, J.; Woodward, P. K.; Medero, G.; Banimahd, M. (2013). *Reducing railway track settlement using three-dimensional polyurethane polymer reinforcement of the ballast*. Construction and Building Materials, 44, pp. 615-625. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.002>
- Kim, M.; Sung, D. (2019). *Experimental investigation on effects of track configurations on long-term behavior of ballasted track*. Journal of Structural Integrity and Maintenance, 4, pp. 76-85. <https://doi.org/10.1080/24705314.2019.1603191>
- Puppala, A. J.; Mohammad, L. N.; Allen, A. (1999). *Permanent deformation characterization of subgrade soils from RLT test*. Journal of Materials in Civil Engineering, 11, pp. 274-282. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:4\(274\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:4(274))
- Puppala, A. J.; Saride, S.; Chomtid, S. (2009). *Experimental and modeling studies of permanent strains of subgrade soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135, pp. 1379–1389. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000163](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000163)

- Rahman, M. M.; Gassman, S. L. (2019). *Permanent deformation characteristics of coarse grained subgrade soils using repeated load triaxial tests*. In: MEEHAN, C. L., KUMAR, S., PANDO, M. A. & COE, J. T. (eds.) *Geo-Congress 2019*. Philadelphia, Pennsylvania.
- Ramos, A.; Correia Gomes, A.; Costa, P. A.; Calçada, R. (2020a). *Influence of track irregularities in the stress levels of the ballasted and ballastless tracks*. Influence of Track Irregularities in the Stress Levels of the Ballasted and Ballastless Tracks. In: Tutumluer, E., Chen, X., Xiao, Y. (eds) *Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics*. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 66. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2349-6_37
- Ramos, A.; Correia Correia, A.; Indraratna, B.; Ngo, T.; Calçada, R.; Costa, P. A. (2020b). *Mechanistic-empirical permanent deformation models: laboratory testing, modelling and ranking*. *Transportation Geotechnics*, 23, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100326>
- Ramos, A., Gomes Correia, A.; Calçada, R.; Alves Costa, P. (2021a). *Stress and permanent deformation amplification factors in subgrade induced by dynamic mechanisms in track structures*. *International Journal of Rail Transportation*, 10 (3), pp. 1-33. <https://doi.org/10.1080/23248378.2021.1922317>
- Ramos, A.; Gomes Correia, A.; Calçada, R.; Alves Costa, P.; Esen, A.; Woodward, P. K.; Connolly, D. P.; Laghrouche, O. (2021b). *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*, 277, 122245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122245>
- Ramos, A. L.; Gomes Correia, A.; Calçada, R.; Costa, P. A. (2018). *Influence of permanent deformations of substructure on ballasted and ballastless tracks performance*. Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, 2018 Vienna, Austria. Zenodo.
- Sainz-Aja, J.; Pombo, J.; Tholken, D.; Carrascal, I.; Polanco, J.; Ferreño, D.; Casado, J.; Diego, S.; Perez, A.; Filho, J. E. A.; Esen, A.; Cebasek, T. M.; Laghrouche, O.; Woodward, P. (2020). *Dynamic calibration of slab track models for railway applications using full-scale testing*. *Computers and Structures*, 228, 106180. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106180>
- Salour, F.; Erlingsson, S. (2015). *Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests*. *International Journal of Pavement Engineering*, 18 (3), pp. 236-246. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1065991>