

ORDEM DOS ENGENHEIROS JOVEM ENGENHEIRO **REGIÃO SUL**

PRÉMIO INOVAÇÃO 2021

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO **DINÂMICO A LONGO PRAZO DE** SOLUÇÕES INOVADORAS DE VIAS-FÉRREAS

Ana Luísa Gonçalves Ramos

Membro Efetivo nº 71063 (Ordem dos Engenheiros Região Norte)

Trabalho apresentado para a candidatura ao Prémio Inovação Jovem Engenheiro 2021 promovido pela Ordem dos Engenheiros – Região Sul

1 Ramo da Engenharia

O trabalho apresentado neste documento insere-se no ramo da Engenharia Civil, nos domínios da Geotecnia e das Estruturas, visando, sobretudo, aplicações no âmbito da Engenharia Ferroviária.

2 Introdução

2.1 Enquadramento do trabalho e motivação

O crescimento e a necessidade de construir novas linhas ferroviárias são justificadas pelo crescimento mundial da população e a necessidade urgente de reduzir o uso intensivo de veículos que conduz, como é do conhecimento geral, ao aumento do congestionamento do tráfego e problemas ambientais diretamente relacionados com as alterações climáticas. A União Europeia sofre, atualmente, com estes problemas e pediu ao sector ferroviário para assumir uma importância maior e mais urgente nas próximas décadas. Na verdade, a necessidade de oferecer uma rede ferroviária mais inclusiva, abrangente e eficiente é justificada pelo facto de, em 2025, ser esperado existir mais de 40000 km de linhas de alta velocidade a nível mundial (Figura 2.1), sendo esta tendência crescente liderada pela China. Nesta medida, a Europa deve manter e estar alinhada com este crescimento exponencial.



Figura 2.1 - Previsão da evolução temporal de construção de linhas de alta velocidade a nível internacional (UIC, 2015)

Considerando estes factos, a Comissão Europeia, aliada às posições e ações políticas da União Europeia, a partir do projeto *SHIFT2RAIL*, pretende criar aquilo que é designado de *SERA* (*Single European Railway Area*), de forma que todas as principais cidades europeias estejam conectadas e se tornem cada vez mais "próximas". Nesta medida, é imperativo que, nas próximas décadas, ocorra uma mudança radical do transporte rodoviário para o transporte ferroviário (passageiros e mercadorias) de forma a aumentar e sustentar a competitividade e o crescimento económico da União Europeia. Esta mudança é também suportada pelas importantes características sustentáveis inerentes ao sistema ferroviário.

O projeto *SHIFT2RAIL* pretende contribuir e introduzir inovação no sistema ferroviário e conduzir a indústria ferroviária europeia a líder global deste mercado. Sumariamente, este projeto europeu propõe uma redução dos custos do ciclo de vida das estruturas ferroviárias (que inclui construção, exploração, e, principalmente, manutenção e renovação) até 50%. Contudo, é importante compreender que os principais custos das redes ferroviárias estão relacionados com as infraestruturas (um terço) e, sobretudo, com a manutenção, sendo importante, por isso, definir estratégias e metodologias para reduzir estes valores/importâncias.

O trabalho desenvolvido e apresentado neste documento está incluído nos projetos *IN2TRACK* e *IN2TRACK2* e alinhado com os objetivos do projeto *SHIFT2RAIL*, relativo à avaliação e melhoramento do desempenho da via balastrada e, sobretudo, da via em laje em linhas de alta velocidade, de forma a definir estratégias e metodologias para aumentar o ciclo de vida das estruturas e reduzir os custos associados às ações de manutenção e reparação. O projeto *IN2TRACK* pretende melhorar e otimizar o sistema ferroviário e procurar formas de estender o ciclo de vida das pontes e túneis, a partir de uma abordagem holística. O projeto *IN2TRACK2* pretende explorar novas construções ferroviárias a partir de processos de otimização e melhorar o seu desempenho. Resumidamente, os dois os projetos pretendem reduzir custos, melhorar a qualidade e alargar/estender o ciclo de vida das estruturas.

Assim, são percetíveis o interesse e a importância dos principais tópicos apresentados neste trabalho, que pretende, sobretudo, compreender melhor os mecanismos de degradação da estrutura (comportamento a longo prazo), sobretudo da infraestrutura, que tem uma influência direta no comportamento global do sistema. Nesta medida, este trabalho dedica-se, principalmente, à avaliação do desempenho da via em laje (tendo em consideração os paralelismos com a via balastrada, pois existe maior conhecimento deste sistema devido à elevada quantidade de estudos realizados sobre esta estrutura nos últimos anos), especialmente nas zonas de transição, que são áreas onde existe uma degradação da via acelerada. Esta opção deve-se ao crescimento de popularidade da via em laje (principalmente em linhas de alta velocidade), aliados aos baixos custos de manutenção quando comparados com os custos na via balastrada. Este crescimento tem sido observado na Ásia (Japão, China e Coreia do Sul) e em toda a Europa (Alemanha, França e Espanha são alguns exemplos). Contudo, é importante mencionar que estudos acerca do comportamento dinâmico de via em laje em zonas de transição é muito escasso, senão mesmo inexistente.

2.2 Expetativa de contribuição para o ramo da Engenharia

O trabalho desenvolvido inclui duas importantes áreas de conhecimento da ferrovia: estruturas e geotecnia. Estas áreas de estudo complementam-se, nomeadamente, no âmbito do estudo do comportamento a longo prazo, onde o comportamento geotécnico dos geomateriais, quando induzidos por cargas cíclicas (como a passagem de comboios), assume um papel preponderante no comportamento global da estrutura. Depreende-se, por isso, que a compreensão do comportamento de uma estrutura ferroviária, exige o uso e domínio de técnicas de modelação avançadas, como as utilizadas e descritas neste documento.

Sumariamente, é possível assumir que o principal objetivo desta investigação é contribuir para um conhecimento mais profundo acerca do comportamento a curto, mas, sobretudo, a longo prazo das vias-férreas, com especial destaque para as zonas de transição (definidas como mudanças abruptas nas condições de suporte da via) pois são áreas da rede ferroviárias onde se verifica frequentemente uma maior velocidade de degradação da via. Este estudo é suportado pela introdução de novos conceitos e metodologias como a incorporação da deformação permanente em modelos completos da via. Além disso, este trabalho propõe também uma ferramenta de calibração numérica a aplicar na via em laje e via balastrada e compreensão multidimensional acerca do comportamento a curto e longo-prazo das zonas de transição, usando técnicas de modelação avançada suportadas em modelos numéricos dinâmicos calibrados.

Este trabalho pode ser usado como uma ferramenta que permite melhorar o dimensionamento das infraestruturas e contribuir para uma gestão eficiente dos ativos ferroviários, tópico importante no paradigma da redução dos custos de ciclo de vida das estruturas.

2.3 Objetivos

A partir das expetativas de contribuição supracitadas, este trabalho propõe compreender o sistema global das vias-férreas, sobretudo em zonas de transição, e compreender o seu comportamento a curto e longo prazo. De facto, as metodologias desenvolvidas apresentadas neste trabalho podem ser aplicadas considerando condições diferentes das adotadas durante o seu desenvolvimento e também em processos de otimização, que podem conduzir a soluções inovadores com impacto no sistema, reduzindo as operações de manutenção e respetivo custo do ciclo de vida. Esta abordagem, traduzida no trabalho desenvolvido, pode aumentar a competitividade do setor ferroviário e preconiza a visão da Europa no que diz respeito ao sector dos transportes em termos de estratégia e crescimento sustentável.

Este trabalho apresenta, primeiramente, um estudo intensivo do fenómeno da deformação permanente (comportamento a longo-prazo) induzido nos geomateriais e identificação das principais variáveis e fatores que podem influenciar este comportamento. Desta forma, é apresentado um estudo paramétrico acerca dos modelos empíricos (cujos resultados têm a sua génese em ensaios laboratoriais) relativos à deformação permanente e também ao módulo resiliente e que permite comparar modelos e materiais testados, definir um ranking dos materiais e, posteriormente, selecionar o modelo que melhor se adequa aos objetivos propostos. Este ranking e respetivos resultados obtidos são posteriormente utilizados para definir uma nova classificação geomecânica dos geomateriais que pode ser útil na fase de dimensionamento e conceção de vias-férreas e pavimentos. Seguidamente, a partir do ranking dos materiais e seleção do modelo empírico de deformação permanente (que é utilizado ao longo do trabalho exposto), é apresentado um exercício de modelação numérica, comparando o comportamento a longo prazo da via balastrada e da via em laje, considerando os mecanismos quási-estático e dinâmico (a partir da geração de um perfil de irregularidades), utilizando a abordagem 2.5D FEM-PML. A influência do mecanismo dinâmico é avaliada a partir da introdução do conceito de fator de amplificação dinâmico da tensão e deformação permanente (SAF e PDAF, respetivamente). Esta análise é complementada com um estudo paramétrico que inclui a avaliação da influência de diversos fatores como a gama de comprimentos de onda do perfil de irregularidades, velocidade do comboio (inclui a influência da velocidade crítica), características geomecânicas da fundação e variação espacial do perfil de irregularidades. A partir da compreensão do comportamento da via em laje e da via balastrada (e respetiva comparação), foi avaliado o desempenho a longo prazo destas vias a partir de resultados experimentais obtidos num modelo físico à escala real. Os resultados experimentais permitiram desenvolver uma nova metodologia a partir de modelação numérica avançada (modelo 3D) e de um duplo processo de calibração que inclui o ajuste das propriedades dos materiais e dos parâmetros/constantes do modelo empírico de deformação permanente (comportamento a longo prazo). Com base no processo de calibração, é avaliado o comportamento a longo prazo de uma zona de transição considerando o sistema de via em laje. O estudo inclui a avaliação dos deslocamentos, acelerações e tensões em diversos elementos da via e avaliação do impacto do processo de degradação da mesma utilizando um método híbrido entre o software comercial ANSYS e o MATLAB.

Com base nos objetivos apresentados, é possível concluir que os mesmos estão alinhados com os objetivos gerais do projeto *SHIFT2RAIL* pois pretende-se, a partir da análise detalhada do comportamento da infraestrutura, prever a degradação da via, definir estratégias e reduzir os custos de ciclo de vida das estruturas ferroviárias no âmbito, sobretudo, das ações de manutenção e reparação.

3 Metodologia

3.1 Introdução

No dimensionamento da via em laje ou da via balastrada, os comportamentos a curto e longo prazo devem ser considerados (Indraratna et al., 2010, Kim and Sung, 2019, Sainz-Aja et al., 2020). De facto, uma estimativa precisa do assentamento acumulado poderá permitir evitar comportamentos medíocres das estruturas ferroviárias (Puppala et al., 1999). Assim, apesar de existirem diversos trabalhos acerca da caracterização do subleito ou da fundação quando submetidos a um carregamento cíclico a partir de ensaios laboratoriais (Puppala et al., 2009, Salour and Erlingsson, 2015, Rahman and Gassman, 2019), é também importante compreender o seu comportamento quando integrados num modelo completo da via e sujeitos à passagem dos comboios.

3.2 Modelos mecanicistas-empíricos relativos às deformações resiliente e permanente da fundação: ensaios experimentais, modelação e ranking

Tipicamente, o subleito e a fundação que constituem a via ferroviária são compostos por geomateriais e apresentam dois tipos de deformações quando sujeitos a carregamentos cíclicos: recuperável e permanente, que tem uma importância vital no comportamento a longo prazo da subestrutura. Estas deformações podem ser caracterizadas a partir de modelos elastoplásticos, aplicando a teoria de *shakedown* ou a partir de modelos mecanicistas empíricos. Neste trabalho, é facultado maior destaque aos modelos mecanicistas-empíricos pois são bastante precisos, eficientes e fáceis de implementar numericamente. De forma a compreender como os modelos empíricos diferem em termos de formulação e a importância de certas variáveis, foi desenvolvido um estudo paramétrico. O estudo contempla a comparação entre diferentes modelos, que são baseados em diferentes materiais com diferentes classificações (UIC e ASTM), propriedades, granulometria e estado físico. Esta comparação permite estimar o módulo resiliente (M_r) , a deformação permanente e estabelecer o ranking dos materiais de acordo com os valores obtidos e respetiva classificação do material (neste caso foi adotada a classificação definida na norma UIC (2008)). Esta ferramenta pode ser bastante útil no dimensionamento das estruturas ferroviárias. Relativamente ao módulo resiliente, foram estudados sete modelos e foram comparados quatro materiais (dois materiais com grãos finos e dois materiais com grãos de maiores dimensões). Relativamente à deformação permanente, foram analisados três modelos e foram comparados seis materiais: areia, silte, areia siltosa (com 42.2% e 27.4% percentagem de finos) e uma areia bem e mal graduadas. Assim, os materiais foram selecionados de forma a obter uma vasta gama de propriedades e classificações. O resultado do ranking está descrito na Figura 3.1 e Figura 3.2, relativo ao módulo resiliente e à deformação permanente, respetivamente.



Figura 3.1 - Ranking dos materiais: módulo resiliente (Gomes Correia and Ramos, 2021)



Figura 3.2 - Ranking dos materiais: deformação permanente (Ramos et al., 2020b)

A partir do estudo paramétrico, foram selecionados dois modelos para caracterizar o módulo resiliente e a deformação permanente, que estão descritos na Tabela 3.1. Analisando a Tabela 3.1 e o modelo relativo ao módulo resiliente, k_1 , k_2 e k_3 correspondem às constantes do modelo, p_0 é tensão de referência (100 kPa), θ corresponde à soma das tensões principais e τ_{oct} é a tensão octaédrica de corte. Em relação ao modelo de deformação permanente, ε_1^{p0} , $\beta \in \alpha$ correspondem às constantes do modelo, p_a é pressão de referência (100 kPa), N é número de ciclos de carga, m e s correspondem, respetivamente, ao declive e à ordenada do critério cedência definido pela expressão $q_f=s+m\cdot p$, p_{am} e q_{am} são as amplitudes da tensão média e de desvio induzidas pela passagem do comboio e p_{ini} e q_{ini} traduzem a tensão média e de desvio inicial. A nova classificação geomecânica proposta está representada na Figura 3.3. Esta classificação relaciona o valor do módulo resiliente (obtido no *ranking* da Figura 3.1), com a deformação permanente (obtido no *ranking* da Figura 3.2) e com a classificação do material (UIC, 2008).

Tabela 3.1 - Modelos empíricos

Autor	Modelo	
Ara and Division (2004)	$M_r = k_1 p_0 \left(\frac{\theta}{p_0}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_0} + 1\right)^{k_3}$	3.1
Chen et al. (2014)	$\varepsilon_{1}^{p}(N) = \varepsilon_{1}^{p0} [1 - e^{-BN}] \left(\frac{\sqrt{p_{am}^{2} + q_{am}^{2}}}{p_{a}} \right)^{a} \cdot \frac{1}{m(1 + p_{ini}) + \frac{s}{2} - (q_{ini} + q_{am})}$	3.2

Analisando a Figura 3.3, é possível observar que uma vasta gama de valores foi obtida para cada classificação. Isto deve-se à natureza mineralógica e às propriedades físicas de cada material. Por exemplo, os materiais classificados como QS1 (de acordo com a classificação UIC (2008)) são dependentes das características de plasticidade e índice de consistência (assim como a percentagem de finos) e estes fatores pode ter um grande impacto no módulo resiliente e na deformação permanente. No caso dos materiais classificados como QS2 e QS3, estes são dependentes do tipo de material (areia ou cascalho) assim como da granulometria (bem ou mal graduados). Ainda, no caso dos materiais bem graduados, a percentagem de finos pode ter influência na resposta do material.



Figura 3.3 - Nova classificação geomecânica com base no módulo resiliente e deformação permanente (Gomes Correia and Ramos, 2021)

3.3 Modelação dos mecanismos quási-estático e dinâmicos da via balastrada e da via em laje

A partir do estudo paramétrico realizado (apresentado na secção anterior), foi selecionado um modelo empírico que, na ótica da autora, melhor caracteriza o desenvolvimento da deformação permanente. Este modelo empírico e a sua integração na modelação numérica das vias-férreas é fundamental para obter o comportamento a longo prazo dos diferentes tipos de via. Este tipo de metodologia é inovador pois permite avaliar o processo de degradação da via, que é fundamental para limitar e prever as ações de manutenção e respetivos custos. Assim, o comportamento a curto prazo foi estimado a partir da determinação das tensões induzidas pela passagem do comboio (com base na formulação numérica 2.5D FEM-PML) e o comportamento a longo-prazo é determinado a partir da implementação do modelo de deformação permanente, que, tal como descrito na Tabela 3.1 (expressão 3.2), é dependente das tensões média e de desvio ($p \in q$, respetivamente).

Assim, o fluxograma adotado para avaliar e comparar o desempenho a curto e longo prazo de uma via em laje, de uma via balastrada e também de uma via em laje "otimizada" está representado na Figura 3.4. Esta via em laje otimizada é apenas constituída pela laje de betão pois as camadas de apoio foram suprimidas. As conclusões obtidas considerando esta otimização podem servir como diretrizes para a realização de possíveis futuras otimizações na estrutura de uma via em laje. Os modelos numéricos são apresentados na Figura 3.5.



Figura 3.4 - Fluxograma acerca da metodologia desenvolvida que inclui a implementação do modelo empírico de deformação permanente



Figura 3.5 - Modelos numéricos: a) via balastrada; b) via em laje (sistema *Rheda*); c) via em laje otimizada (apenas constituída pela laje de betão) (Ramos et al., 2018)

As análises estão focadas na camada de fundação e no elemento 1 (e respetivo alinhamento) representados na Figura 3.5. O elemento 1 foi selecionado devido à sua proximidade com o plano de simetria, o que simplifica a análise e interpretação de resultados em termos de tensões (*Sx, Sy, Sz, Sxy, Sxz, Syz*). Apesar de serem esperados níveis de tensões e deformações permanentes mais elevados no alinhamento debaixo do carril, este trabalho está especialmente focado no desenvolvimento de uma nova metodologia e na comparação de resultados, e não tanto nos seus valores absolutos.

É importante referir que esta camada de fundação, na via balastrada, corresponde à fundação propriamente dita, enquanto na via em laje (sistema *Rheda*) inclui também o FPL (*frost protection layer*) e a fundação (ambos com a mesma rigidez). No caso da via em laje (sistema *Rheda*), assumiu-se que o FPL está totalmente integrado na fundação. Esta simplificação é bastante útil na realização do cálculo numérico relativo à avaliação do desempenho a longo prazo.

Neste estudo, as tensões iniciais foram obtidas considerando o estado de tensão isotrópico (K_0 =1). Acrescenta-se também que a modelação tem em consideração as condições de simetria do problema, de forma a reduzir o tempo de cálculo, tal como evidenciado na Figura 3.5. Os materiais foram modelados no domínio linear elástico (Ramos et al., 2020a) e as suas propriedades estão descritas na Tabela 3.2 e Tabela 3.3.

Elementos	M _r (MPa)	ν	ξ	ho (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
Fundação*	120	0.30	0.030	2040.0

Tabela 3.2 - Características dos materiais: via balastrada

 M_r = Módulo resiliente, ν =coeficiente de *Poisson*, ξ =amortecimento e ρ =densidade

*A fundação é caracterizada por $\phi'=30^{\circ}$ e c'=0 kPa

Elementos	Mr (MPa)	v	ξ	ho (kg/m ³)
Laje de betão	34000	0.20	0.030	2500
HBL	10000	0.20	0.030	2500
FPL*	120	0.20	0.030	2500
Fundação*	120	0.30	0.030	2040.0

Tabela 3.3 - Características dos materiais: via em laje

 M_r = Módulo resiliente, v=coeficiente de *Poisson*, ξ =amortecimento e ρ =densidade

*A fundação e FPL são caracterizados por $\phi'=30^{\circ}$ e c'=0 kPa

Relativamente ao material circulante, o veículo adotado neste estudo corresponde ao comboio português *Alfa Pendular*. Este comboio apresenta um plano de simetria e é composto por 6 carruagens (Figura 3.6). Relativamente ao carregamento, a carga média aplicada é próxima dos 135 kN. No desenvolvimento deste estudo, apenas a massa das rodas foi considerada no modelo. Esta suposição e simplificação está perfeitamente alinhada com estudos realizados anteriormente por Alves Costa et al. (2012a) e Colaço et al. (2016) no âmbito das vibrações.



Figura 3.6 - Geometria do comboio Alfa Pendular

Assim, o desempenho da via em laje e da via balastrada foi comparada em termos de tensões e deformações através da introdução do inovador fator de amplificação dinâmico, que é definido pelo rácio entre o mecanismo dinâmico e quási-estático e o mecanismo quási-estático: *SAF* (fator de amplificação das tensões) e o *PDAF* (fator de amplificação das deformações permanentes) (Ramos et al., 2021a).

Nesta medida, foi desenvolvida uma metodologia híbrida que integra a simulação numérica (com base em mais de 60 casos de estudo) usando a abordagem 2.5D FEM-PML (no domínio da frequência), que permite obter de forma expedita o nível das tensões na fundação de cada estrutura ferroviária. Baseado nos resultados das tensões, o desempenho a longo-prazo é analisado a partir da implementação do modelo empírico de deformação permanente (expressão 3.2). Uma vez que o foco do trabalho diz respeito ao comportamento a longo-prazo, os resultados são apresentados em termos de deformações permanentes acumuladas. Os resultados das tensões obtidos no domínio da frequência são posteriormente transformados no domínio do tempo aplicando uma dupla transformada de Fourier.

3.3.1 Modelação da via-férrea: sistema comboio-via-maciço

O conceito dos modelos subestruturados foram utilizados para modelar os sistemas comboio-via e a interação entre ambos. Esta abordagem permite simplificar a modelação já que as duas estruturas são modeladas separadamente mantendo a compatibilidade entre ambas e respeitando as restrições e condições de equilíbrio (Alves Costa et al., 2010).

Neste trabalho, o sistema via-maciço é modelado a partir da abordagem 2.5D FEM-PML. Com esta metodologia é possível reduzir o esforço computacional e considerar a natureza tridimensional do problema (Yang and Hung, 2001, Sheng et al., 2006, Alves Costa et al., 2010).

A metodologia usada neste trabalho é descrita em maior detalhe no trabalho desenvolvido por Alves Costa et al. (2010). Contudo, é importante referir que esta abordagem implica que a resposta da estrutura seja linear e adoção de uma secção transversal invariante.

Devido ao carácter tridimensional e transiente do problema, foram aplicados *Perfectly Matched Layers (PML's)* nas fronteiras. Este tratamento especial permite evitar reflexões espúrias e contaminação de resultados. Esta camada "especial" externa que é adicionada ao domínio do problema absorve a energia das ondas que atingem as fronteiras e evita a sua reflexão. Esta metodologia foi previamente implementada com resultados bastantes satisfatórios no trabalho desenvolvido por Lopes et al. (2014).

Assim, o sistema via-maciço é modelado através da abordagem 2.5D FEM-PML, o comboio é modelado considerando uma formulação multi-corpo e os modelos são acoplados numericamente. O problema da interação implica considerar a compatibilidade de deslocamentos e equilíbrio de cargas nos pontos de contacto entre o veículo e a via. Assim, o contacto roda-carril foi simulado através da aplicação do conceito da rigidez *Hertziana* linearizada. Nesta modelação foram apenas consideradas as "cargas permanentes" transmitidas pelo conjunto das rodas ao carril e apenas foi considerado o movimento vertical do comboio. Mais detalhes sobre esta metodologia e formulação podem ser encontrados no trabalho desenvolvido por Alves Costa et al. (2012b).

Sob a forma de resumo, a metodologia 2.5D FEM-PML permite obter os níveis de tensão induzidos pela passagem do comboio que são, posteriormente, usados como *inputs* para simular o comportamento a longo prazo da fundação das estruturas ferroviárias.

3.3.2 Geração do perfil de irregularidades

Visto que este estudo pretende também avaliar o fator de amplificação dinâmico das tensões e deformações permanentes (*SAF* e *PDAF*, respetivamente), é necessário considerar a influência do mecanismo dinâmico, neste caso, através da inclusão de um perfil de irregularidades gerado artificialmente. O mecanismo dinâmico é induzido pela interação veículo-via que gera acelerações no veículo e, consequentemente, forças de inércia. Este perfil de irregularidades foi definido a partir de uma função sinusoidal descrita por um determinado número de harmónicos. Neste processo, foi utilizada a Função de Densidade Espectral (*PSD – Power Spectral Density*) definida pelo *FRA - Federal Railroad Administration*. Mais detalhes acerca desta metodologia pode ser encontrada na bibliografia no trabalho desenvolvido por Ramos et al. (2021a).

O perfil de irregularidades gerado (apresentado na Figura 3.7) é composto por 120 frequências e foi definido considerando uma progressão geométrica, seguindo as recomendações descritas na norma EN13848-5 (2008). É importante referir que o estudo apresentado é focado no elemento 1 localizado na posição x=0 m do perfil de irregularidades representado na Figura 3.7. Contudo o estudo da influência de outras posições também foi considerado (posições A, B, C e D identificadas na Figura 3.7).



Figura 3.7 - Perfil de irregularidades gerado artificialmente

3.3.3 Estudo paramétrico – avaliação da metodologia implementada

De forma a avaliar a metodologia implementada, foi analisada a influência de diversos fatores no comportamento da fundação e degradação da via tais como as cargas móveis (avaliada através da velocidade do comboio), as propriedades mecânicas da fundação (em termos de rigidez e características mecânicas) e o mecanismo dinâmico causado pela presença de um perfil de irregularidades (avaliado através da gama de comprimentos de onde do perfil e variação espacial). Assim, foram avaliados os seguintes casos de estudo:

- influência da gama dos comprimentos de onda do perfil de irregularidades (três gamas distintas foram avaliadas: 1<λ<3, 3<λ<25, 25<λ<70; cada gama é constituída por 40 frequências e o seu intervalo foi definido com base nas recomendações da norma EN13848-5 (2008));
- influência da velocidade do comboio (foram avaliadas seis velocidades diferentes: 80 km/h, 144 km/h, 200 km/h, 300 km/h, 360 km/h e 500 km/h);
- influência das propriedades geomecânicas da fundação (variação combinada do módulo resiliente e ângulo de atrito; a coesão manteve-se constante e igual a 0):
 - $M_r=90$ MPa, $\phi=28^\circ$;
 - $M_r=120$ MPa, $\phi=30^\circ$;
 - $M_r = 205 \text{ MPa}, \phi = 35^{\circ};$
 - \circ *M_r*=280 MPa; ϕ =40°.
- influência da variabilidade espacial do perfil de irregularidades (foram analisadas 5 posições distintas que correspondem à posição x=0 m e aos pontos assinalados no perfil da Figura 3.7: A, B, C e D).

3.3.4 Comportamentos a curto e longo prazo

A determinação das tensões induzidas pela passagem do comboio corresponde à primeira fase da metodologia implementada. É importante referir que, uma vez que os materiais são caracterizados pelo comportamento elástico linear, a representação do critério de rotura é meramente indicativa nesta fase pois permite apenas perceber a proximidade do digrama de tensões à linha de rotura, que é um fator determinante na determinação das deformações permanentes. Assim, quando os diagramas de tensões estão acima do critério de rotura, este resultado é irrealista pois não tem um significado físico, o que significa que os resultados devem ser analisados cuidadosamente. Neste estudo, foi adotado o critério de cedência de *Mohr-Coulomb*, que é caracterizado pelo ângulo de atrito e coesão, e é também o critério adotado pelo modelo empírico selecionado, ainda que incorporado de forma indireta (inclui a influência dos parâmetros m e s).

Ao longo desta análise, os resultados das tensões são apresentados no espaço p-q. As tensões são analisadas em termos efetivos considerando as tensões iniciais e os incrementos das tensões. Este detalhe é fundamental na determinação das deformações permanentes.

Os resultados relativos às deformações permanentes são apresentados sob a forma de deformações permanentes acumuladas (em mm). A amplitude do diagrama das tensões e os respetivos valores das tensões iniciais, são variáveis importantes usadas no modelo empírico de deformação permanente. Isto significa que, por exemplo, os resultados apresentados considerando um determinado digrama de tensões têm um impacto na deformação permanente acumulada e, consequentemente, na degradação da via-férrea. Nesta simulação, foram adotadas as propriedades dos materiais obtidas no trabalho desenvolvido por Salour and Erlingsson (2015) e que consideram ε_1^{p0} =0.00093, *B*=0.2 and *a*=0.65. Este material é classificado como areia siltosa não plástica de acordo com a classificação unificada de solo.

Visto que se trata de um estudo extenso com mais de 60 casos de estudo, são, por isso, apresentados os resultados e conclusões mais relevantes relativamente à metodologia desenvolvida e que incluem a resposta a curto e longo prazo. Acrescenta-se ainda que são destacados os resultados relativos à possível otimização do sistema de via em laje.

Tendo em conta os fatores analisados, foi possível concluir que a velocidade do comboio é o fator que tem maior influência no desempenho das estruturas ferroviárias pois existe uma maior amplificação dos níveis de tensões, tal como representado na Figura 3.8. Os resultados mostram que, quando a velocidade do comboio é reduzida (entre 80 km/h e 200 km/h), as respostas quásiestáticas e dinâmicas estão praticamente sobrepostas. Contudo, quando a velocidade do comboio aumenta e quase atinge a velocidade crítica da estrutura (entre 360 km/h a 500 km/h), existe um incremento absolutamente significativo do *SAF* e *PDAF*, tal como representado na Figura 3.9.

Em relação ao desempenho da via balastrada e da via em laje (sistema *Rheda*), ao nível da fundação, o seu comportamento é bastante similar em termos de tensões e deformações permanentes (valores próximos considerando os vários fatores analisados). Contudo, por outro lado, a via em laje otimizada pode ser considerada como opção em vez da via em laje *Rheda* convencional pois apresenta um bom desempenho global considerando todos os fatores analisados e elencados previamente. Em termos físicos, isto significa que os valores do *SAF* e *PDAF* são próximos de 1, tal como representado um exemplo na Figura 3.10. A principal desvantagem deste sistema de via otimizado diz respeito aos valores mais elevados da deformação permanente acumulada. Isto deve-se aos baixos valores dos níveis de tensão iniciais, o que significa que as tensões máximas estão mais próximas do critério de cedência, induzindo valores mais elevados de deformação permanente acumulada quando comparados com as restantes estruturas, como mostra a Figura 3.11.

Considerando os resultados expostos anteriormente, é possível afirmar que a metodologia implementada para estudar o comportamento a curto e longo prazo apresenta resultados satisfatórios, o que significa que é possível simular a degradação da via de forma eficaz e eficiente já que o esforço computacional não é significativo. Mais ainda, os resultados mostram quais os fatores que devem ser analisados cuidadosamente no dimensionamento de uma estrutura ferroviária e quais os comportamentos e consequências que podem ser antecipadas de forma a reduzir as operações de manutenção e respetivos custos.



Figura 3.8 - Incremento dos efeitos dinâmicos considerando a variação da velocidade do comboio (via em laje – sistema *Rheda*)



Figura 3.9 - Via em laje (sistema Rheda): a) SAF (tensão média); b) PDAF



Figura 3.10 - Relação entre a variação do SAF relativo à tensão de desvio (q) e a velocidade do comboio (até 360 km/h)



Figura 3.11 - Deformação permanente acumulada (v=200 km/h)

4 Desenvolvimento: validação numérica e experimental da metodologia

Com base na metodologia híbrida desenvolvida e no exercício paramétrico numérico apresentados anteriormente, foi investigado o comportamento a curto e longo prazo da via em laje e da via balastrada quando submetidas a cargas cíclicas com base em resultados experimentais. Estes resultados são fundamentais para desenvolver modelos numéricos calibrados, que podem ser posteriormente utilizados no estudo do comportamento de uma zona de transição, onde a velocidade de degradação da via é significativa e, por isso, conduz a constrangimentos relevantes aos Gestores das Infraestruturas Ferroviárias.

4.1 Desempenho a longo prazo da via balastrada e da via em laje submetidas a carregamento cíclico: modelo físico e calibração do modelo numérico

De forma a compreender e também explorar o comportamento dinâmico das vias-férreas (curto e longo prazo), duas secções à escala real (modelo físico) correspondentes à via balastrada e via em

laje com 2.2 m de comprimento, foram submetidas, em ambiente controlado, a um carregamento cíclico a partir do uso do equipamento GRAFT-2. O principal objetivo deste tipo de ensaio laboratorial consiste na avaliação e caracterização do comportamento a curto e longo-prazo das vias-férreas. Este teste simula a passagem de vários comboios (anos de passagens) em apenas alguns dias. O equipamento (representado na Figura 4.1) usa 6 atuadores hidráulicos independentes para carregar 3 travessas à escala real (Figura 4.2) na via balastrada e na via em laje a partir da simulação do movimento do comboio (usado um carregamento faseado). As estruturas foram submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos. No caso dos ensaios dinâmicos, foram adotadas duas frequências distintas, também associadas a níveis de carregamento diferentes: 5.6 Hz e 2.5 Hz. A frequência de 5.6 Hz corresponde a uma velocidade do comboio de 360 km/h. Durante os testes dinâmicos, as subestruturas mantiveram-se inalteradas, o que inclui a fase/momento de mudança da frequência de 5.6 Hz para 2.5 Hz. Os assentamentos da via foram controlados usando diversos dispositivos incluindo LVDTs (também designados de deslocamentos CH, na nomenclatura original do teste ou R-LVDTs). Acrescentase também que foram instalados quatro LVDTs de 12mm de alta precisão na laje de betão (no caso da via em laje) e nas travessas (no caso da via balastrada). As dimensões do modelo físico da via em laje e da via balastrada estão representadas na Figura 4.3 e Figura 4.4.



Figura 4.1 - Configuração experimental: a) vista frontal; b) dimensões do equipamento GRAFT-2 (Čebašek et al., 2018)



Figura 4.2 - Vias férreas testadas com 2.2 m de comprimento: a) via balastrada; b) via em laje



Figura 4.3 - Dimensões do modelo físico da via em laje: a) via completa; b) parte da superestrutura



Figura 4.4 - Dimensões do modelo físico da via balastrada

Tal como representado na Figura 4.3, a via em laje é constituída pela laje de betão, uma fina camada de argamassa, uma camada de betão pobre designada de HBL (*hydraulically bonded layer*), FPL (*frost protection layer*) e fundação. A via balastrada (Figura 4.4) é constituída pelo balastro, FPL, fundação e uma geogrelha colocada entre o balastro e o FPL. A subestrutura é comum às duas estruturas e é composta pelo FPL (0.4 m de espessura) e pela fundação (0.8 m de espessura), com uma espessura total de 1.2 m. Tal como referido anteriormente, ambas as estruturas são submetidas a cargas cíclicas ao longo de 3.4 milhões de ciclos de carga. Na verdade, este valor corresponde a, aproximadamente, 5.3 anos de utilização da linha *West Coast Main Line* (Kennedy et al., 2013) no Reino Unido.

A grande quantidade de dados gerada em termos de deslocamentos obtidos ao longo da aplicação dos ciclos de carga permitiu estudar o comportamento a longo-prazo e simular o processo de degradação da via balastrada e da via em laje. Na verdade, este tipo de dados é muito raro e de difícil obtenção pois existem muito poucos dispositivos de manutenção instalados a longo-prazo que permitem monitorizar os assentamentos permanentes. É importante mencionar que os ensaios da via balastrada foram realizados depois dos ensaios da via em laje. Assim, durantes os ensaios da via balastrada, a maior parte da subestrutura permaneceu inalterada, enquanto a superestrutura foi totalmente substituída, com exceção das palmilhas (as mesmas palmilhas foram utilizadas para as vias em laje e balastrada). Este facto é importante pois pode influenciar os resultados, uma vez que o solo pode já ter sofrido *shakedown* durante os ensaios anteriores da via em laje.

De forma a reproduzir numericamente, exatamente, os resultados experimentais, foi adotado um processo de calibração que foi dividido em duas fases distintas: calibração a curto-prazo e calibração a longo-prazo (Ramos et al., 2021b). Na calibração a curto-prazo, foram desenvolvidos dois modelos numéricos 3D usando elementos sólidos com oito nós (Figura 4.5). Nesta fase da calibração, foram adotados modelos 3D em detrimento dos modelos 2.5D. Esta opção é justificada pelo facto de estes modelos 3D calibrados serem utilizados, posteriormente, no estudo de uma zona de transição. Assim, apesar da significativa eficiência computacional dos modelos 2.5D e

Avaliação do comportamento dinâmico a longo prazo de soluções inovadoras de vias-férreas

elevada precisão de resultados, eles não podem ser utilizados na modelação de uma zona de transição onde se assume uma secção variante ao longo do desenvolvimento da via. Além desse facto, os modelos 3D são também mais flexíveis do ponto de vista de modelação numérica pois não apresentam restrições relativamente à geometria da via e adoção de modelos e análises não lineares.

Na primeira fase relativa à calibração a curto-prazo, as propriedades dos materiais foram aferidas através da comparação dos deslocamentos medidos em laboratório e obtidos numericamente. Tal como representado na Figura 4.6, os resultados obtidos mostram uma boa concordância entre os resultados numéricos (curvas coloridas associadas à posição geométrica de cada LVDT) e experimentais (sombreado cinzento; existe uma variabilidade significativa associada aos resultados experimentais). Nesta calibração, os valores do coeficiente *Poisson* e módulo de *Young* de alguns materiais foram ajustados: palmilhas, balastro, FPL e fundação. As propriedades dos materiais calibradas e adotadas estão descritas na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 (via em laje e via balastrada, respetivamente).



b) Figura 4.5 - Modelos 3D: via em laje; b) via balastrada



Figura 4.6 - Comparação dos deslocamentos numéricos e experimentais (R-LVDTs; frequência de 2.5Hz): a) via em laje; b) via balastrada

Material	Propriedades	Referências	
	E=200×10 ⁹ Pa		
Carril (BS113A)	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$	UIC 60	
	v=0.30		
	k=1800×10 ⁶ N/m		
D-1:11	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$	\dot{C}_{1}	
Paimina	v=0.30	Cebasek et al. (2018)	
	E=k×thickness/area		
	E=210×10 ⁹ Pa		
Chapa de aço	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$	Características da chapa de aço - valores	
x y	v=0.30	assumidos	
	k=40×10 ⁶ N/m		
	$\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$	č 1 × 1 + 1 (2010)	
EPDM	v=0.00	Cebasek et al. (2018)	
	E=k×thickness/area		
	E=25×10 ⁹ Pa		
Argamassa	$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$	-	
	v=0.25		
	E=40×10 ⁹ Pa		
Laje de betão	$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$	-	
	v=0.25		
	E=15×10 ⁹ Pa		
HBL	$\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$	Informação fornecida pela Max-Bőgl	
	v=0.25		
FPL	E=3.3×EV2=3.3×135×10 ⁶ Pa		
	$\rho = 2141 \text{ kg/m}^3$	E é baseado no valor de Ev ₂ (Cebašek et	
	v=0.35	al., 2018)	
	E=3.3×EV ₂ =3.3×65×10 ⁶ Pa		
Fundação	$\rho = 2091 \text{ kg/m}^3$	<i>E</i> é baseado no valor de Ev_2 (Cebašek et	
3	v=0.35	al., 2018)	

Tabela 4.1 - Propriedades adotadas dos materiais da via em laje

Material	Propriedades	Referências	
	E=200×10 ⁹ Pa		
Carril (BS113A)	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$	BS113A (56E1)	
	v=0.30		
	k=40×10 ⁶ N/m		
	$\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$	Čebašek et al. (2018)	
EPDM	v=0.00		
	E=k×thickness/area		
T. (C44 (50)	E=38×10 ⁹ Pa		
Iravessas (G44 - 650mm de	$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$	Travessa G44	
espaçamento)	v=0.15		
	E=110×10 ⁶ Pa		
Balastro	$\rho = 1530 \text{ kg/m}^3$	UIC719Rb (2008)	
	v=0.30		
	E=3.3×EV ₂ =3.3×135×10 ⁶ Pa	E é baseado no valor de Ev ₂ (Čebašek	
FPL	$\rho = 2141 \text{ kg/m}^3$		
	v=0.35	al., 2018)	
	E=3.3×EV2=3.3×65×10 ⁶ Pa		
Fundação	$\rho = 2091 \text{ kg/m}^3$	<i>E</i> e baseado no valor de Ev_2 (Cebašek et al. 2018)	
	v=0.35	al., 2018)	

Tabela 4.2 - Propriedades adotadas dos materiais da via balastrada

Após a calibração a curto-prazo, foi desenvolvida a calibração a longo prazo. Neste caso, as curvas experimental e numérica relativas à deformação permanente são comparadas e a curva numérica é calibrada a partir do ajustamento dos parâmetros/constantes do modelo, com base no método dos mínimos quadrados. Visto que a deformação permanente é dependente do critério de cedência *Mohr-Coulomb*, que depende dos parâmetros M (ou m) e q_0 (ou s), que são baseados no valor da coesão (c') e do ângulo de atrito (ϕ ') de cada material, foram adotadas as seguintes propriedades para cada material:

- Balastro: c'=0 kPa e $\phi'=50^{\circ}$;
- FPL: c'=0 kPa e $\phi'=48^{\circ}$;
- Fundação: c'=5 kPa e $\phi'=35^{\circ}$.

Estes valores foram obtidos a partir de ensaios laboratoriais e com base na granulometria do material.

Assim, a partir dos modelos 3D calibrados previamente em função dos deslocamentos, foram obtidas as tensões submetidas no balastro (no caso da via balastrada), no FPL e fundação, que serviram de *input* para o modelo empírico. Alguns resultados das tensões média e de desvio estão representadas na Figura 4.7.

Com base na calibração a curto-prazo, o modelo empírico de deformação permanente selecionado anteriormente (expressão 3.2) foi calibrado a partir das constantes do modelo: ε_{p0} , $\alpha \in B$. Assim, foi adotada uma nova abordagem que permite a simulação do comportamento a longo prazo das vias balastrada e em laje através da calibração do modelo empírico de deformação permanente.

No processo de calibração, o conceito de endurecimento (*time-hardening approach*) foi aplicado. Nesta medida, visto que a subestrutura se manteve inalterada de um teste dinâmico (com frequência de 5.6 Hz) para o seguinte (com frequência de 2.5 Hz), a deformação permanente acumulada associada aos níveis de tensão do primeiro teste, é utilizada para calcular o número de ciclos de carga necessários para atingir essa mesma quantidade de deformação permanente acumulada considerando o estado e níveis de tensões atuais. Este conceito permite incluir a influência do histórico das tensões no desenvolvimento das deformações permanentes.



Figura 4.7 - a) identificação dos elementos da via em laje; b) identificação dos elementos da via balastrada; c) tensões obtidas no FPL da via em laje (frequência igual a 2.5 Hz); d) tensões obtidas na fundação da via em laje (frequência igual a 2.5 Hz); e) tensões obtidas no FPL da via balastrada (frequência igual a 2.5 Hz); f) tensões obtidas na fundação da via balastrada (frequência igual a 2.5 Hz);

O processo de calibração da via em laje implica a determinação de seis parâmetros desconhecidos (três associados a cada material: FPL e fundação), enquanto o processo da via balastrada implica a determinação de nove parâmetros. Os valores iniciais associados aos parâmetros foram arbitrariamente escolhidos. A Tabela 4.3 mostra os resultados finais da calibração de cada parâmetro e de cada material.

O resultado final da calibração da deformação permanente acumulada com o número de ciclos é apresentado na Figura 4.8. Os resultados mostram uma excelente concordância entre os resultados experimentais e numéricos (as curvas estão perfeitamente sobrepostas). Mais ainda, os resultados experimentais confirmam que a via balastrada apresenta valores mais elevados de deformação permanente (e deformação permanente acumulada) em comparação com a via em laje devido à presença da camada do balastro (cerca de 15-20 vezes). Este resultado confirma, assim, a significativa influência da camada de balastro no desenvolvimento dos assentamentos da via.

Tipo de via	Parâmetro	f=5.6 Hz	f=2.5 Hz	
		FPL		
	\mathcal{E}_{p0}	-4.100e-05	0.0155	
je	В	-0.354	0.0139	
n la	α	0.859	1.15	
a en		Fundação		
Vi	\mathcal{E}_{p0}	-4.100e-05	0.055	
	В	-0.354	0.25	
	α	0.648	2.720	
		Balastro		
	\mathcal{E}_{p0}	0.014	0.008	
	В	1.512	0.105	
	α	0.995	1.620	
ada	FPL			
istr	Ep0	0.182	0.007	
bal£	В	0.005	0.010	
'ia l	α	0.969	0.986	
\mathbf{r}				
	\mathcal{E}_{p0}	0.119	0.006	
	B	0.004	0.010	
	α	0.943	0.954	

Tabela 4.3 - Calibração dos parâmetros dos materiais da via em laje e da via balastrada



Figura 4.8 - Calibração do modelo de deformação permanente: a) via em laje; b) via balastrada

4.2 Análise de uma zona de transição num sistema de via em laje: aterro para túnel

A partir do processo de calibração apresentado anteriormente, as propriedades calibradas foram aplicadas a uma via em laje numa zona de transição. Neste caso de estudo, a geometria da via em

laje representada na Figura 4.5 a) foi estendida, tal como está representado na Figura 4.9 (nesta modelação o carril é contínuo). Assim, é possível compreender a importância do modelo 3D utilizado no processo de calibração anterior (em detrimento da utilização da modelação 2.5D). O modelo 3D calibrado e estendido geometricamente permite analisar em detalhe o desempenho da via em laje numa zona de transição sem qualquer constrangimento relativamente à geometria e ao tipo de análise implementada (não linear associado ao problema de contacto roda-carril, em vez de linear). Desta forma, o aterro e o túnel apresentam 31.65 m e 21.45 m de comprimento, respetivamente. Relativamente à secção transversal, a fundação apresenta uma espessura de 10.4 m e a distância entre o centro do modelo e fronteira vertical (definida pelo plano yx) é de 6 m. Visto tratar-se de uma análise dinâmica e transiente, a formulação de *Lysmer* foi adotada para atenuar e absorver a energia das ondas que atingem as fronteiras, o que permite evitar a contaminação dos resultados.

De forma a simular o processo de degradação da via nesta zona de transição, foram analisados, em detalhe, os efeitos da passagem dos primeiros quatro bogies do comboio *Alfa Pendular* a 220 km/h. Detalhes relativos à modelação do veículo e respetivas propriedades do mesmo são apresentados na Figura 4.10 e Tabela 4.4. É importante referir que, neste processo, a interação entre o veículo e a via foi modelada através da inclusão de elementos de contacto, o que implica uma análise não linear. Acrescenta-se, também, que foram adicionados elementos de contacto entre o HBL e FPL para simular a "separação" entre a superestrutura e subestrutura (simulação do efeito semelhante às travessas flutuantes que pode ocorrer na via balastrada). De modo a simplificar, o veículo foi apenas modelado com a inclusão dos bogies, suspensão primária, massa da roda e carga por eixo e ainda a rigidez *Hertziana*. Uma carga de 67.5 kN foi adotada para simular a carga da roda (carga do eixo/2, visto que o modelo tem em conta as condições de simetria).



Figura 4.9 - Zona de transição considerando um sistema de via em laje: aterro para túnel: a) modelo completo; b) detalhe do modelo e da transição; c) dimensão longitudinal do modelo; d) dimensão vertical do modelo



Figura 4.10 - Modelo do carril e do comboio

Componente Bogie: <i>M</i> _b /2		Valores	
		4932/(2*2.7) [kg]	
Suspensão	$K_p/2$	3420×10 ³ (/2) [N/m]	
primária:	$c_{p}/2$	36×10 ³ (/2) [N.s/m]	
Massa da roda:	$M_{e}/2$	1800 (/2) [kg]	
Kh		2.4×10 ⁹ (/2) [N/m]	

Assim, a partir da modelação tridimensional, foram analisadas as tensões, acelerações e os deslocamentos nos principais elementos da via como o carril, laje de betão, HBL, FPL e fundação. Contudo, foi dado maior destaque aos resultados das tensões. A Figura 4.11 a), apresenta as tensões longitudinais (sob o alinhamento do carregamento) no topo e base dos nós do HBL ao longo da zona de transição (localizada na posição x=0 m). Estes resultados são essenciais pois são os elementos da laje de betão e o HBL que asseguram a continuidade da via ao longo da transição e, por isso, estão submetidas a um complexo campo de tensões, que é agravado devido à variação da rigidez da via na direção longitudinal. Assim, analisando a Figura 4.11 a), é possível identificar uma tensão máxima (pico de tensão) na transição, que corresponde à posição x=0 m. Tendo em consideração a modelação tridimensional, foram também analisadas as tensões no elemento HBL ao longo da secção transversal. Os resultados representados na Figura 4.11 b), apresentam os valores máximos das tensões verticais do HBL considerando duas secções localizadas em zonas distintas: zona flexível (que corresponde ao aterro) e zona rígida (que corresponde ao túnel). Os resultados expõem as variações das tensões na direção transversal da via: as tensões são máximas sob o carril e tendem a diminuir nas extremidades da secção. Mais ainda, os resultados mostram também que as tensões são superiores na secção localizada na zona rígida. Este tipo de análise traduz a importância da modelação tridimensional neste tipo de problema em análise.

De forma a incluir a influência da deformação permanente no desempenho da via e prever a degradação da mesma, foram obtidos os valores das tensões em todos os nós da subestrutura (FPL e fundação) no modelo tridimensional. Estes resultados foram importados do software ANSYS para o software MATLAB de forma a determinar a deformação permanente. De facto, a incorporação da deformação permanente induzida em modelos completos da via é ainda um assunto/campo muito pouco explorado. Portanto, foi desenvolvida uma metodologia para simular numericamente a evolução da deformação permanente da via: a deformação permanente é obtida aplicando o modelo empírico apresentado na expressão 3.2, utilizado nas secções anteriores, e

com os parâmetros já calibrados obtidos na secção 4.1. Esta metodologia é baseada no número de ciclos de carga e nos níveis da tensão induzidos pela passagem do comboio nos geomateriais. Tal como representado na Figura 4.12, a deformação permanente máxima acumulada na subestrutura, no alinhamento sob o carregamento, é de 0.52 mm e ocorre na posição x=-7.25 m na direção longitudinal. Os resultados mostram também que as camadas que mais contribuem para a deformação permanente (e respetiva deformação permanente acumulada) estão localizadas entre o topo do FPL e y=-4.138 m (acima de metade da espessura da fundação). De facto, todos as camadas do FPL estão a contribuir para o desenvolvimento da deformação permanente, assim como cerca de 30% da fundação. A partir da profundidade y=-4.138 m, a deformação permanente acumulada estabiliza, o que significa que cerca de 70% da fundação não está a contribuir para o seu desenvolvimento. Esta informação é crucial e bastante útil pois significa que não há necessidade de obter as tensões em todos os elementos da fundação, o que permite reduzir de forma significativa o tempo de cálculo e análise de resultados.



Figura 4.11 - a) tensões longitudinais no topo e base dos nós do HBL ao longo da transição; b) tensões máximas verticais ao longo da secção transversal na zona mais rígida (túnel) e na zona mais flexível (aterro) nos nós de topo do HBL



Figura 4.12 - Deformação permanente acumulada na subestrutura (FPL+ fundação) em mm: a) ao longo da via (considerando todos os alinhamentos verticais); b) deformação permanente máxima acumulada ao longo da via (sob o alinhamento do carril)

Após a determinação da deformação permanente, a deformada (após 1 milhão de ciclos) foi novamente imputada no modelo 3D em cada nó do FPL e da fundação (o que traduz a importância da colocação dos elementos de contacto entre o HBL e FPL). Na Figura 4.13, são comparadas as tensões longitudinais associadas à geometria inicial e à geometria deformada da via. Assim, é possível concluir que esta transição com o sistema de via em laje apresenta um desempenho bastante satisfatório, pois as curvas associadas às duas geometrias estão praticamente sobrepostas. Os resultados mostram que a rigidez da estrutura associada à laje de betão é significativa quando comparada, por exemplo, com a rigidez do balastro no caso da via balastrada, onde é esperado um comportamento inferior de acordo com vários resultados descritos na bibliografia.

Contudo, devido à concentração de tensões na laje de betão e HBL na zona de transição (demonstrada na Figura 4.11 a)), foi incluída uma manta resiliente no túnel e no aterro (primeiro

metro imediatamente antes da transição) de forma a tentar mitigar este fenómeno, otimizar a via em laje e suavizar a transição. Na verdade, esta manta é importante para conceder flexibilidade debaixo da laje de betão e para balancear a rigidez entre o aterro e o túnel. Acrescenta-se ainda que este pode ser um passo importante na otimização deste sistema em zonas de transição. Assim, é imperativo avaliar as tensões, cujos resultados estão representados na Figura 4.14. Relativamente à laje de betão, os resultados apresentam uma redução das tensões máximas longitudinais na posição x=0 m. Esta atenuação das tensões é também visível no HBL em termos de tensões longitudinais mínimas.



Figura 4.13 - Variação das tensões (obtidas nos nós de topo do HBL) ao longo da zona de transição com o número de ciclos de carga (sob o alinhamento do carregamento): a) tensões verticais; b) tensões longitudinais



Figura 4.14 - Comparação das tensões (ao longo da via) com e sem manta resiliente: a) tensões longitudinais nos nós de topo da laje de betão; b) tensões longitudinais nos nós da base do HBL

5 Conclusões

Este trabalho visa obter uma compreensão mais abrangente acerca do comportamento estrutural das estruturas ferroviárias, sobretudo em zonas de transição. É possível afirmar que é inovador pois compreende uma metodologia inclusiva que contempla tanto o comportamento a curto prazo como a longo prazo, fundamental para definir ações preditivas e antecipar e reduzir as ações de manutenção.

Primeiramente, a partir de um estudo paramétrico, foi selecionado um modelo empírico de deformação permanente para estudar o comportamento a longo prazo e que é a base desta investigação pois a sua implementação e aplicação é transversal ao longo deste trabalho. Com

base nos estudos paramétricos e *ranking* 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 uma ampla gama de resultados/deformações. Na verdade, esta gama abrangente é um reflexo da variação das propriedades dos materiais (mesmo com a mesma classificação UIC), que influencia os dois tipos de deformação.

A partir da seleção do modelo empírico, foi definida uma abordagem para compreender a evolução da deformação permanente induzida pela passagem do comboio, a partir de modelo completo da via-férrea. Assim, foi selecionada uma metodologia eficaz e eficiente do ponto de vista computacional. A abordagem 2.5D FEM-PML foi selecionada e articulada com implementação de um modelo empírico de deformação permanente. A partir deste exercício numérico, foi comparado o desempenho da via balastrada e via em laje. Os resultados mostram que o desempenho da fundação dos dois tipos de via não difere muito de acordo com os fatores analisados: velocidade do comboio, propriedades mecânicas da fundação, comprimento de onda do perfil de irregularidades e sua variabilidade espacial. Os resultados obtidos mostram também que velocidade do comboio (e sua aproximação à velocidade crítica da estrutura) apresenta uma influência significativa no processo de degradação da via. A sua avaliação foi realizada através do conceito inovador SAF e PDAF. Além disso, em relação à via em laje, foram modeladas duas estruturas com o objetivo de avaliar o efeito das camadas de suporte na resposta da fundação. Os resultados mostram que a via em laje "otimizada" pode ser uma opção quando comparada com sistema Rheda, pois apresenta um bom desempenho global considerando todos os fatores analisados (tendo em consideração a avaliação do SAF e do PDAF). A única desvantagem desta estrutura está relacionada com os valores absolutos superiores da deformação permanente.

A partir da metodologia híbrida apresentada, foi analisado o desempenho a curto e longo prazo da via em laje e da via balastrada quando submetidas a cargas cíclicas em ambiente laboratorial e à escala real, o que permitiu validar a sua implementação. Assim, o equipamento GRAFT-2 foi utilizado para avaliar, em condições controladas, os comportamentos a curto e longo prazo das vias balastrada e em laje com 2.2 m. Os resultados experimentais mostram que os deslocamentos da via em laje são significativamente inferiores quando comparados com a via balastrada, o que confirma a importante influência da camada de balastro no desenvolvimento da deformação permanente da via. Adicionalmente, foram calibrados dois modelos numéricos 3D, a partir dos deslocamentos medidos experimentalmente, com resultados bastante satisfatórios. Após a calibração a curto prazo, foi simulado, com sucesso, o comportamento a longo prazo de ambas as estruturas a partir da calibração de um modelo empírico de deformação permanente. Esta abordagem/metodologia pode ser interpretada como uma ferramenta valiosa na futura modelação a longo prazo de estruturas ferroviárias em zonas de transição e pode ser usada para desenvolver estratégias de previsão e manutenção, reduzindo os custos do ciclo de vida das mesmas.

Os resultados anteriores são, assim, fundamentais para desenvolver modelos numéricos calibrados que são utilizados no estudo de uma zona de transição, onde é usual verificar-se uma acelerada degradação da via, o que pode causar constrangimentos consideráveis aos Gestores das Infraestruturas Ferroviárias. Nesta medida, a partir das propriedades calibradas e estendendo a geometria da via em laje, foi analisado seu desempenho em maior detalhe numa zona de transição. Os resultados obtidos mostram que as tensões no elemento HBL são menores no aterro quando comparadas com as tensões na zona do túnel (mais rígida). Acrescenta-se também, que as tensões apresentam alguma variação ao longo da direção transversal. A subestrutura apresenta uma deformação permanente acumulada máxima (sob o alinhamento do carregamento) de 0.52 mm, o que não é significativo. Os resultados da deformação permanente também mostram que as camadas que mais contribuem para a deformação permanente são o FPL e 30% da camada da fundação. Além disso, a via em laje apresenta um bom desempenho a longo prazo, uma vez que não foram observadas diferenças significativas nos resultados de tensões quando as condições

iniciais (via não deformada) são comparadas com a via deformada. Adicionalmente, foi proposta uma otimização do sistema com a inclusão de uma manta resiliente de forma a reduzir a concentração das tensões na transição. Os resultados mostram uma redução nos níveis de tensões no HBL e na laje de betão. Estes resultados permitem também validar a metodologia proposta.

6 Aplicabilidade prática e perspetivas de futuro

6.1 Considerações gerais

As metodologias e ferramentas numéricas implementadas e anteriormente apresentadas apresentam um nível de aplicabilidade prático bastante significativo e o produto final é um reflexo do processo de pensar e fazer "Engenharia" onde, a partir do conhecimento científico e prático, há a intenção de melhorar estruturas, sistemas e processos. Confirmação disso mesmo são os diversos projetos internacionais concluídos e em desenvolvimento que a autora participou e está a participar e onde foi possível desenvolver e aplicar as ferramentas apresentadas neste documento no âmbito da análise dinâmica e geotécnica de sistemas ferroviários.

6.2 Exemplos de estudo em projetos internacionais

A presente secção apresenta a descrição geral de um conjunto de estudos e aplicação da metodologia desenvolvida em projetos internacionais (alguns concluídos e outros ainda em desenvolvimento) e nos quais a autora esteve diretamente envolvida nas tarefas atribuídas à Universidade do Porto e à Universidade do Minho. As ferramentas numéricas apresentadas foram diretamente aplicadas e, em muitos casos, o desenvolvimento desses estudos foi condicionado pela existência dessas mesmas ferramentas.

6.2.1 *IN2TRACK* (concluído)

O trabalho desenvolvido foi realizado no âmbito de um acordo entre a Fundação de Cooperação Científica *Railenium* e a Universidade do Minho (ISISE) e Universidade do Porto (*CONSTRUCT*) com o objetivo de contribuir para o projeto *IN2TRACK* (*SHIFT2RAIL*). Assim, o principal objetivo deste projeto consiste em estabelecer os conceitos e ações base que possam contribuir para uma rede ferroviária europeia resiliente, consistente, económica e de alta capacidade. Os objetivos específicos do *IN2TRACK* podem ser divididos em três partes:

- 1. Melhorar e otimizar os *switch & crossings* e sistemas de via, de forma a garantir o uso e capacidade ótima da rede ferroviária;
- 2. Investigar novas formas de estender a vida útil de pontes e túneis através de diferentes abordagens para manter, reparar e melhorar essas estruturas;
- 3. Desenvolvimento e adoção de uma abordagem holística de todo o sistema.

Assim, os trabalhos desenvolvidos ao abrigo do acordo entre a *Railenium*, a Universidade do Minho e a Universidade do Porto contribuíram, principalmente, para a previsão da degradação subjacente à fundação da via. O trabalho desenvolvido pela autora foi dividido em duas partes:

- 1. Estado de arte e guia sobre a modelação do comportamento de geomateriais sob cargas cíclicas de longo prazo e ações dinâmicas;
- 2. Desenvolvimento de um catálogo de propriedades e modelos de solo e subleito/fundação para simulação numérica para prever e classificar a degradação da via.

Assim, o primeiro relatório elaborado pela autora incluiu um estado de arte sobre a deformação permanente dos solos. De forma a complementar o trabalho, o segundo relatório debruçou-se sobre o estado de arte do comportamento resiliente dos materiais. Os dois primeiros relatórios serviram de suporte para o desenvolvimento do relatório final que contempla um catálogo

completo de propriedades e modelos dos geomateriais para modelação numérica relativa ao desempenho da via. No final, é apresentada uma nova classificação geomecânica dos solos (apresentada na secção 3.2).

Com base nos relatórios supracitados, a autora também participou no desenvolvimento da aplicação prática dos conceitos anteriormente mencionados (deformação permanente e módulo resiliente) através da modelação numérica usando a abordagem 2.5D, que é uma ferramenta útil para obter os níveis de tensão e simular a degradação do solo através da articulação com a implementação de modelos empíricos que descrevem a deformação permanente dos geomateriais. A metodologia desenvolvida permitiu compreender o desempenho a longo prazo de diferentes sistemas da via-férrea, tal como mostra a Figura 6.1.



Figura 6.1 - Resultados relativos à deformação permanente da fundação apresentados no âmbito do projeto IN2TRACK: a) via balastrada; b) via em laje; c) via em laje otimizada

Assim, é possível compreender que os resultados preliminares apresentados no âmbito do projeto *IN2TRACK* permitiram o desenvolvimento de uma metodologia robusta apresentada ao longo deste documento, que foi posteriormente validada pelos pares e restantes parceiros participantes no projeto.

6.2.2 IN2TRACK2 (concluído)

O projeto *IN2TRACK2* é o primeiro grande projeto do *SHIFT2RAIL* TD3.4 "Next Generation Track System" e que, portanto, utilizou o conhecimento existente de projetos relevantes de R&D. O TD3.4 pretendeu melhorar substancialmente o sistema de via, o que implicou mudanças

relevantes no desempenho do sistema, que foram altamente priorizadas. O processo do Demonstrador Técnico (TD) seguiu uma cadeia fortemente integrada, partindo da identificação inicial das necessidades de longo prazo da ferrovia e potenciais soluções para atendê-las. Assim, o projeto *IN2TRACK2* e o *Work Package 4* (*WP4*) em particular (designado de "Next Generation Track") tem como principal objetivo o dimensionamento, instalação, manutenção e monitorização da próxima geração de soluções de vias-férreas. O principal objetivo do *WP4* é melhorar substancialmente o sistema ferroviário, tendo em consideração o horizonte de cerca de 40 anos, além do estado de arte atual, de forma a providenciar uma mudança radical no desempenho.

Neste projeto a autora foi responsável por duas sub-tarefas:

• sub-tarefa 4.1.2 do TRL4: Modelação numérica de um demonstrador à escala real

A via em laje e a via balastrada foram testadas em laboratório, à escala real, e o seu desempenho foi avaliado a partir de sistemas de monitorização instalados (tais como os LVDTs). Este estudo permitiu avaliar o comportamento a curto e longo prazo das vias-férreas e está diretamente relacionado com o trabalho apresentado no Capítulo 4.1. Este estudo foi avaliado em detalhe e validado pelos pares, parceiros e *team leaders* do projeto e os resultados foram apresentados sob a forma de relatório (já submetido). Neste relatório foi também apresentada uma análise de sensibilidade relativa aos valores da coesão da fundação, de forma a entender qual a sua influência na deformação permanente acumulada. Assim, após o processo de calibração, o valor da coesão foi alterado (de 5kPa para 0 kPa e 10 kPa) e os seus efeitos foram avaliados a partir da curva de deformação permanente acumulada. Este estudo é justificado pelo facto de ter sido adotado um valor para a coesão com base na curva granulométrica do material, que apresentava uma percentagem significativa de finos. Os resultados obtidos nesta análise de sensibilidade são apresentados na Figura 6.2 e dizem respeito ao desempenho da via em laje.

Analisando a Figura 6.2, é possível verificar que a coesão tem uma influência significativa na deformação permanente. Isto significa que os materiais da fundação devem ser caracterizados de forma cuidadosa. Estes resultados foram obtidos com base na metodologia adotada que integra e articula o modelo completo da via com a implementação do modelo empírico de deformação permanente, que permite simular a degradação da via.



Figura 6.2 - Análise de sensibilidade do modelo de deformação permanente à coesão: a) coesão=0 kPa; b) coesão= 10 kPa

• sub-tarefa 4.3.4: Modelação numérica da próxima geração de sistemas de via

Esta tarefa está focada no desenvolvimento de modelação numérica avançada do sistema veículovia-maciço, em conjunto com o desenvolvimento do TD da sub-tarefa 4.1.3 do projeto. A utilização deste tipo de abordagem permite suportar o desenvolvimento da engenharia relativamente à próxima geração de sistemas de vias.

Este trabalho focou-se, sobretudo, no desempenho das zonas de transição e, por isso, está diretamente relacionado com o Capítulo 4.2 apresentado neste documento. As conclusões

apresentadas no relatório final do projeto são baseadas nos resultados numéricos obtidos num modelo tridimensional. Assim, são avaliados os efeitos dinâmicos gerados pela passagem do comboio num sistema de via em laje considerando que existe uma diferença de rigidez de suporte entre duas estruturas (aterro e túnel). Este tipo de transição e o sistema adotado é ainda muito pouco explorado pois a maioria dos trabalhos desenvolvidos são baseados em zonas de transição entre a via balastrada e a via em laje ou até mesmo entre a via balastrada e outra estrutura mais rígida como uma ponte ou túnel.

Neste trabalho foram avaliados, por exemplo, os deslocamentos do carril e da fundação em várias posições relativas à direção longitudinal da via. Alguns resultados são apresentados na Figura 6.3. Acrescenta-se, também, que foram avaliados os deslocamentos dos eixos do comboio, que são dependentes das forças de interação veículo-via. Os resultados associados aos deslocamentos do carril mostram valores entre 1mm e 1.5 mm, onde é possível identificar os vários eixos do comboio. Por outro lado, nos deslocamentos relativos à fundação, é possível identificar apenas os bogies. Os resultados evidenciam uma diminuição da magnitude dos deslocamentos, que variam ao longo da direção longitudinal do aterro para o túnel, devido a transição e ao suporte rígido na zona do túnel. O deslocamento máximo da fundação é próximo de 0.5 mm. Em relação aos deslocamentos dos eixos do comboio, é possível também identificar uma diminuição da sua magnitude no sentido aterro-túnel. Os deslocamentos variam entre 1.4 mm e 0.8 mm.



Figura 6.3 - Resultados dinâmicos: a) deslocamentos no carril; b) deslocamentos na fundação; c) deslocamentos dos eixos do comboio

Os trabalhos desenvolvidos neste projeto mostram a atualidade do tema e a necessidade de explorar este assunto com maior detalhe de forma a incrementar o conhecimento técnico. A metodologia desenvolvida (com base na avaliação do comportamento a longo prazo de uma estrutura ferroviária) e a sua aplicação permite fornecer informações importantes aos Gestores das Infraestruturas Ferroviárias e podem ter influência nas tomadas de decisão.

6.2.3 *IN2TRACK3* (em desenvolvimento)

O projeto *IN2TRACK3* corresponde à aplicação das metodologias desenvolvidas (e apresentadas anteriormente) a partir da instalação de demonstradores. Assim, este projeto encontra-se em desenvolvimento e a autora está em envolvida em duas tarefas:

• Sub-tarefa 3.1.1 – Desenvolvimento de sistemas de via (*WP3 – Work Package* 3)

Relativamente à sub-tarefa 3.1.1, pretende-se que a autora (e a Universidade do Porto) proceda à validação e aperfeiçoamento da simulação do modelo de via em laje 3MB em zonas de transição através de dados obtidos em campo (nos demonstradores). Pretende-se, também, o desenvolvimento de uma abordagem numérica capaz de prever os assentamentos da via em laje. A abordagem numérica será usada, primeiramente, para o estudo das zonas de transição, nomeadamente em termos de assentamentos a longo prazo e posteriormente para o estudo de soluções alternativas para a fundação da via em laje. Assim, compreende-se que a metodologia desenvolvida, validada e apresentada no Capítulo 4, seja aplicada neste projeto. De forma a contextualizar melhor o problema, está representado na Figura 6.4 o modelo numérico já desenvolvido que pretende replicar o comportamento do sistema de via em laje 3MB. Este sistema é constituído por uma laje de betão e quatro blocos de betão de cada lado que permitem ajustar o nivelamento. Na interface entre laje e os blocos, existe uma camada elastomérica que atenua as vibrações transmitidas à laje de betão. Este sistema modular permite corrigir facilmente a geometria da via, bem como reparações e renovações eficientes. A análise apresentada neste documento pretende avaliar o comportamento a curto e longo-prazo deste novo sistema modelar em plena via, aplicando a metodologia já apresentada. As dimensões do modelo estão representadas na Figura 6.4. O modelo tem em consideração as condições de simetria. As propriedades da superestrutura podem ser encontradas no trabalho desenvolvido por Matias (2021) e as propriedades da fundação e das respetivas constantes calibradas do modelo empírico (para simular o comportamento a longo prazo) podem ser encontradas no trabalho de Ramos et al. (2021b) e também na Tabela 4.3 deste documento. Esta modelação preliminar (considerando a passagem do comboio Alfa Pendular) permitiu obter resultados a curto-prazo relacionados, por exemplo, com os deslocamentos na laje e tensões verticais na fundação, tal como representado na Figura 6.5. Os resultados mostram um bom comportamento do sistema 3MB com valores bastante aceitáveis ao nível dos deslocamentos na laje e tensões na fundação.



Figura 6.4 - a) Modelo numérico do sistema 3MB: a) modelo completo; b) detalhe do modelo



Figura 6.5 - a) Deslocamentos da laje na secção x=13.15 m nos nós de topo; b) Tensões verticais na secção x=13.15m nos nós de topo

Com base nos níveis de tensão obtidos em todos os elementos da fundação do modelo 3D, foram determinadas as deformações e respetivos assentamentos permanentes acumulados, tal como apresentado na Figura 6.6. Os resultados mostram que o assentamento permanente é máximo no alinhamento sob o limite da laje e corresponde a um valor próximo de 1 mm, que é bastante aceitável. Os resultados mostram também que os assentamentos permanentes estabilizam a uma profundidade próxima dos 3 m, o que significa que os elementos localizados abaixo desta profundidade não estão a contribuir para o desenvolvimento da deformação permanente.



Figura 6.6 - a) Assentamentos permanentes em alinhamentos selecionados; b) assentamentos permanentes acumulados ao longo da secção transversal (em x=13.15 m)

Assim, estes resultados preliminares mostram que o sistema apresenta um comportamento a curto e longo prazo bastante satisfatório com um deslocamento permanente máximo próximo de 1 mm. A partir deste estudo será avaliado o desempenho do sistema de via 3MB em zonas de transição, aplicando a metodologia desenvolvida.

• Sub-tarefa 4.2.5 – Demonstrador de sistema integrado inteligente para zonas de transição (*WP4 – Work Package* 4)

Este trabalho inclui o desenvolvimento, calibração e validação de dois modelos numéricos diferentes (associados a dois demonstradores instalados em duas zonas de transição distintas) usando dados de monitorização (curto e longo prazo) gerados com base em equipamentos instalados e que estão identificados no plano de monitorização definido pela autora. Os resultados e conclusões podem ser uma ferramenta útil nos processos de tomada de decisão de gestão de ativos relacionados com a segurança operacional e planeamento da manutenção das linhas da rede ferroviária. A Universidade do Porto e a autora em particular serão, assim, responsáveis pela definição do plano de monitorização e apoio na instalação dos equipamentos. Desta forma, foram selecionados dois demonstradores que estão associados a duas tipologias diferentes de zonas de transição: passagem hidráulica e transição entre um aterro e um viaduto. Estes demonstradores serão instalados no final de 2022/início de 2023 na linha da Beira Alta no corredor TEN - *Trans-European Transport Network*.

O plano de monitorização para obter o comportamento a curto prazo e longo prazo é apresentado na Figura 6.7 e Figura 6.8, respetivamente. Estes resultados, aliados também a uma extensa campanha de caracterização laboratorial e *in situ* serão essenciais para calibrar e validar os modelos. Acrescenta-se ainda que serão realizados ensaios adicionais como os ensaios de receptância que irão permitir calibrar as propriedades dinâmicas dos modelos numéricos. A metodologia implementada para realizar esta tarefa está descrita na Figura 6.9. Esta metodologia articula o plano de monitorização com a campanha experimental de caracterização geotécnica.

Avaliação do comportamento dinâmico a longo prazo de soluções inovadoras de vias-férreas



b)

Figura 6.7 - Monitorização a curto-prazo a implementar nos demonstradores instalados na linha da Beira Alta: a) transição numa passagem hidráulica; b) transição entre um aterro e um viaduto



Figura 6.8 - Monitorização a longo-prazo a implementar nos demonstradores instalados na linha da Beira Alta: a) transição numa passagem hidráulica; b) transição entre um aterro e um viaduto

O resultado final deste trabalho (concluído em 2023) será o produto da aplicação da metodologia desenvolvida que permitirá avaliar o desempenho a curto e longo prazo, das zonas de transição associadas aos demonstradores selecionados. Este trabalho resulta da utilização de técnicas de modelação complexas associadas a um extenso trabalho de monitorização e análise de dados.



Figura 6.9 - Fluxograma com a articulação de diversas informações provenientes dos ensaios e monitorização instalada

6.3 Perspetivas de futuro

Tal como apresentado ao longo deste documento, a metodologia concebida, desenvolvida e implementada apresenta um carácter prático num assunto pertinente e tão importante na engenharia ferroviária em particular e na engenharia em geral. O comportamento a curto e longo prazo das estruturas e a relação com seu ciclo de vida são conceitos fundamentais e totalmente desassociáveis de temas tão pertinentes na sociedade atual como a economia circular e sustentabilidade. É possível, assim, afirmar que este trabalho apresenta um abrangente campo de aplicação prático pois são imperativos o estudo e a previsão do comportamento das estruturas ao longo do tempo, reduzindo as operações e custos de manutenção e aumentando a competitividade, neste caso, do setor ferroviário. Assim, a metodologia apresentada permite a análise geotécnica e dinâmica dos sistemas ferroviários (a curto e longo prazo), elevando a Engenharia nacional, neste domínio, ao nível das melhores e mais eficientes práticas mundiais. A participação em projetos internacionais concluídos e em desenvolvimento indicam a necessidade de um estudo extenso sobre o comportamento das zonas de transição e uma contínua aplicação da metodologia desenvolvida. De uma forma mais específica, a nível nacional, é esperado o aumento de novas linhas ferroviárias e reabilitação/renovação das linhas existentes de acordo com os objetivos do programa Ferrovia 2020 (como mostra o exemplo da renovação da linha da Beira Alta). Assim, é urgente o desenvolvimento de competências nesta área e contínua aplicação da metodologia desenvolvida, sobretudo nas zonas de transição onde se verifica uma rápida degradação da via. Só assim, com metodologias capazes de identificar e prever os comportamentos a curto e longoprazo das estruturas ferroviárias ao longo do seu ciclo de vida, é que é possível tornar o sistema ferroviário eficiente e atrativo. Esta é, na verdade uma tendência internacional tal como mostra a parceria entre FEUP e a empresa ACCIONA (no âmbito do projeto IN2TRACK3) no desenvolvimento e previsão do comportamento a longo prazo do "novo" sistema de via em laje 3MB em zonas de transição. Este projeto mostra a relevância e atualidade do tema a nível internacional, sobretudo em linhas de alta velocidade, permitindo haver perspetivas de colaborações futuras com outros parceiros e empresas. Esta tendência de crescimento da rede ferroviária está refletida no projeto futuro do sistema ferroviário europeu (concretizado até 2040), tal como apresentado pelo EU Transport em dezembro de 2021 (Figura 6.10).

Em relação à evolução da própria ferramenta, no âmbito do projeto europeu *IN2TRACK3*, estão a ser despendidas energias no melhoramento contínuo da metodologia e a sua eficiência, mas, também, na sua articulação com métodos de previsão mais sofisticados e expeditos computacionalmente como os algoritmos relacionados com a extração e conhecimento de dados, comummente designados de algoritmos de inteligência artificial (como por exemplo as redes neuronais ou máquinas de vetores de suporte). Com acesso a uma grande quantidade de dados fornecidos pela monitorização, será possível construir uma base de dados robusta e, assim, obter

quase instantaneamente alguns resultados ao nível das tensões e deformações instaladas nos elementos da via, que poderão ser usados num primeiro nível de análise. Nesta medida, será possível tirar partido de resultados e ferramentas numéricas já validadas e calibradas com base em casos práticos reais e extrapolar esses mesmos resultados com base em modelos completos e complexos.



Figura 6.10 - Rede ferroviária da europa expectável em 2040 (Eu_Transport, 2021)

7 Referências bibliográficas

- Alves Costa, P., Calçada, R. & Silva Cardoso, A. 2012a. Influence of train dynamic modelling strategy on the prediction of track-ground vibrations induced by railway traffic. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 226, 434-450.
- Alves Costa, P., Calçada, R. & Silva Cardoso, A. 2012b. Track–ground vibrations induced by railway traffic: In-situ measurements and validation of a 2.5D FEM-BEM model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 32, 111-128.
- Alves Costa, P., Calçada, R., Silva Cardoso, A. & Bodare, A. 2010. Influence of soil non-linearity on the dynamic response of high-speed railway tracks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 221-235.
- 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.
- Čebašek, T. M., A.F. Esen, Woodward, P. K., Laghrouche, O. & Connolly, D. P. 2018. Full scale laboratory testing of ballast and concrete slab tracks under phased cyclic loading. *Transportation Geotechnics*, 17, 33-40.
- Chen, R., Chen, J., Zhao, 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, 205–220.
- Colaço, A., Costa, P. A. & Connolly, D. P. 2016. The influence of train properties on railway ground vibrations. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12, 517-534.
- En13848-5 2008. Railway Applications Track Track geometry quality Part 5: Geometric quality levels. *EN13848*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- Eu_Transport 2021. TEN-T: Explanatory factsheets per country. European Commission: European Commission.
- Gomes Correia, A. & Ramos, A. 2021. A geomechanics classification for the rating of railroad subgrade performance. *Railway Engineering Science*.
- 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, 907-917.

- 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, 615-625.
- Kim, M. & Sung, D. 2019. Experimental investigation on effects of track configurations on longterm behavior of ballasted track. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 4, 76-85.
- Lopes, P., Alves Costa, P., Ferraz, M., Calçada, R. & Silva Cardoso, A. 2014. Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: From the source to the nearby buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volumes 61–62, 269– 285.
- Matias, S. 2021. *Modelling railway slab track towards enhanced dynamic performance and reduced track deterioration*. PhD Thesis, Universidade de Lisboa.
- 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, 274-282.
- 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, 1379–1389.
- 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, A. G., Costa, P. A. & Calçada, R. 2020a. Influence of Track Irregularities in the Stress Levels of the Ballasted and Ballastless Tracks. *Lecture Notes in Civil Engineering*.
- 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*, 1-33.
- 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.
- Ramos, A., Gomes 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.
- Ramos, A. L., Correia, A. G., 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.
- Salour, F. & Erlingsson, S. 2015. Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering*, 18, 236-246.
- Sheng, X., Jones, C. J. C. & Thompson, D. J. 2006. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods. *Journal of Sound and Vibration*, 293, 575-586.
- Uic 2008. UIC Code 719 R. Earthworks and Track Bed for Railway Lines. International Union of Railways.
- Uic. 2015. *High Speed Rail Brochure 2015* [Online]. http://www.uic.org/IMG/pdf/high_speed_brochure.pdf. [Accessed 2017].
- Yang, Y. & Hung, H. 2001. A 2.5D finite/infinite element approach for modelling visco-elastic body subjected to moving loads *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 51, 1317-1336.