

MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIAS FÉRREAS

NUMERICAL MODELLING OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF RAILWAY TRACK

Fortunato, Eduardo, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal,*
efortunato@lnec.pt

Resende, Ricardo, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal,*
rresende@lnec.pt

Pinelo, António, *Estradas de Portugal, Almada, Portugal, apinelo@estradasdeportugal.pt*

RESUMO

As intervenções de modernização das linhas de caminho de ferro antigas, com vista a permitir maiores velocidades de circulação e o transporte de cargas mais elevadas, exigem a verificação da adequação das características da plataforma às novas solicitações e, eventualmente, a sua renovação. Neste âmbito, as soluções estruturais a adoptar, nomeadamente no que se refere às espessuras e às características dos materiais das camadas de apoio que integram a subestrutura, podem ser avaliadas com recurso à modelação numérica da via férrea, em particular utilizando modelos de equilíbrio tridimensional. Neste trabalho analisam-se alguns casos relativos a soluções estruturais utilizadas na renovação de uma plataforma ferroviária, com base nos resultados da caracterização mecânica, laboratorial e “in situ” da subestrutura existente e dos materiais utilizados na construção das camadas de reforço da plataforma e de sub-balastro.

ABSTRACT

Modernization of old railway track permitting the increase of circulation speed and of maximum load per axis, demands the verification of the platform characteristics and eventually its renewal, in order to fulfil the new requirements. In this aspect, the structural solution to adopt, namely the thickness of the reinforcement layers and the characteristics of the materials that compose the substructure, can be evaluated through numerical modelling of the railway track with three-dimensional equilibrium models. This paper presents some studies referring to the analysis of the different railway track substructures based in laboratorial and “in situ” mechanical characterisation of the old substructure and of the materials used in the reinforcement layers of the platform and sub-ballast.

1. INTRODUÇÃO

Actualmente assiste-se, nomeadamente na Europa, a um novo impulso no desenvolvimento do transporte ferroviário. Em particular, a necessidade de aproveitar linhas férreas construídas e de otimizar os recursos disponíveis tem levado à modernização de linhas antigas, de forma a permitir a sua utilização por comboios de passageiros circulando a alta velocidade e por comboios de mercadorias para transporte de cargas elevadas. Neste âmbito, as soluções estruturais a adoptar na renovação da via, nomeadamente no que se refere às espessuras e às características dos materiais das camadas de apoio que integram a subestrutura, dependem de um conjunto de factores específicos.

A Ficha UIC 719R [1] apresenta uma proposta para o dimensionamento de plataformas ferroviárias que é baseada num conjunto de estudos realizados “in situ”, em trechos piloto, em ensaios laboratoriais e na modelação numérica da via e da sua fundação. Tais estudos tiveram um enquadramento próprio, em particular no que se refere aos materiais utilizados, às solicitações e à geometria dos diversos elementos da via considerados. No que se refere aos materiais das camadas de apoio que integram a subestrutura, os estudos realizados posteriormente permitiram obter um melhor conhecimento do seu comportamento e, conseqüentemente, a adopção no dimensionamento das camadas de leis de tensão-deformação dos materiais mais adequadas do que as então utilizadas.

As intervenções de modernização das linhas de caminho de ferro existentes em Portugal, com vista a permitir maiores velocidades de circulação e o transporte de cargas mais elevadas, exigem a verificação da adequação das características da plataforma e, eventualmente, a sua renovação. Neste caso, a aplicação dos procedimentos descritos naquele documento pode não ser automática, devido a um conjunto de factores específicos, nomeadamente: i) a bitola da via portuguesa ser superior à europeia, o que implica que a distribuição de tensões debaixo da travessa seja diferente; ii) a classificação de plataformas contida na Ficha UIC 719R, obtida a partir de valores do módulo de deformabilidade equivalente de 15, 25 e 80 MPa, para plataformas do tipo P1, P2 e P3, respectivamente, ser excessivamente simplificada para se adaptar às características reais das plataformas existentes; iii) a realização das obras nas vias existentes estar condicionada pela necessidade de conciliar os trabalhos com a exploração do serviço ferroviário, o que pode tornar conveniente a minimização, na medida do possível, das alterações a introduzir no traçado e na rasante da via existente. Assim, é de toda a conveniência fazer uso de modelos de cálculo que permitam a representação do comportamento estrutural da via férrea e da sua fundação, simulando o comportamento conjunto dos seus diversos elementos, com distintas características físico-mecânicas, quando sujeitos a solicitações, nomeadamente das cargas produzidas pela circulação dos comboios, em diversas condições climáticas.

Neste trabalho apresentam-se alguns resultados obtidos na modelação numérica da via férrea, com recurso a um modelo de equilíbrio tridimensional, no qual se implementaram diversos modelos constitutivos relativos ao comportamento tensão-deformação dos materiais que constituem as camadas de apoio da via férrea. Analisam-se alguns casos relativos a soluções estruturais utilizadas na renovação de uma plataforma ferroviária, com base nos resultados da caracterização mecânica, laboratorial e “in situ”, da subestrutura existente e dos materiais utilizados na construção das novas camadas de reforço da plataforma e de sub-balastro.

2. MÉTODOS NUMÉRICOS NA ANÁLISE ESTRUTURAL DA VIA FÉRREA

2.1 Breve referência a alguns modelos apresentados na bibliografia

A via férrea balastrada é uma estrutura relativamente complexa, com comportamento não linear. Actualmente, na análise estrutural da via férrea faz-se uso de modelos que exigem o conhecimento das acções, da geometria dos elementos da superestrutura e das camadas subjacentes (Figura 1), das características mecânicas dos materiais (superestrutura, camadas de apoio e fundação), dos mecanismos de interacção entre os diversos elementos e de vários critérios de dimensionamento, de forma a propiciar o estudo do comportamento do conjunto e permitir determinar os efeitos das cargas produzidas pelo tráfego na via, nomeadamente tensões e deformações. Embora a via férrea esteja sujeita a carregamentos tridimensionais, nomeadamente cargas verticais, laterais e longitudinais, e tenham sido desenvolvidos diversos modelos analíticos com o objectivo de representar individualmente cada uma das componentes da resposta associadas às referidas solicitações ou diversas dessas componentes em simultâneo, é a resposta às acções verticais que tem sido objecto de maior atenção.

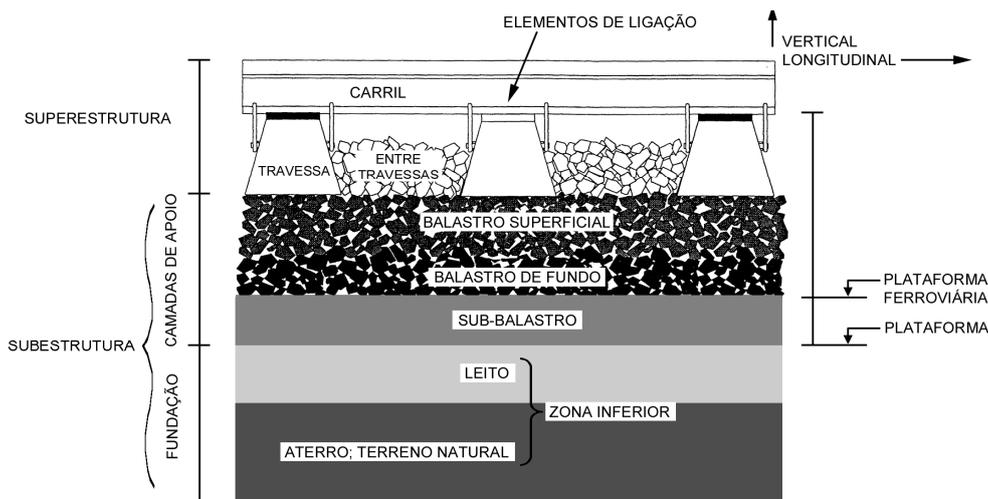


Figura 1 – Esquema estrutural da via férrea balastrada.

Os métodos dos elementos finitos e das diferenças finitas são particularmente adequados à modelação das acções e à utilização de modelos reológicos não lineares com critérios de rotura para os diversos materiais que constituem o sistema, permitindo considerar a variação das características físicas e geométricas no espaço. Apresentam-se em seguida alguns dos modelos que têm sido utilizados por diversos autores em estudos relativos ao comportamento da via.

Um dos primeiros modelos por elementos finitos utilizados na análise da via foi designado por Illitrack [2]. Considerava dois modelos bidimensionais e utilizava os resultados da análise da secção longitudinal em estado plano de deformação como dados para proceder à análise da secção transversal, o que permitia obter um efeito tridimensional com pouco tempo de computação. Na análise longitudinal o modelo considerava a aplicação das cargas verticais correspondentes às rodas actuando apenas num carril, suportado por um sistema constituído por travessas e camadas de apoio. Os carris e as travessas eram representados como vigas e molas de apoio, respectivamente. Era considerado o comportamento não linear dos materiais, cujas características eram determinadas em ensaios laboratoriais do tipo triaxial com cargas repetidas e eram admitidos critérios de rotura para os materiais das camadas de apoio e da fundação.

O modelo Multilayer Track Analysis - Multa [3] combina o modelo elástico multicamadas de Burmister para a subestrutura com um outro modelo tridimensional, por elementos finitos, para análise da superestrutura. A área carregada das travessas é dividida em segmentos aproximadamente iguais e a área de cada segmento é convertida numa área circular com tensão uniforme. Estas áreas circulares uniformemente carregadas são utilizadas para gerar coeficientes de influência de tensões e de deslocamentos para o modelo linear elástico de multicamadas, o qual permite determinar deslocamentos e tensões nas camadas de apoio. O carril é modelado como uma viga finita suportada por 11 travessas, as quais são também representadas como vigas com um apoio por cada área de contacto travessa-balastro. Este modelo faz uso de uma análise elástica linear, logo não permite considerar o real comportamento tensão-deformação dos materiais da subestrutura; permite o desenvolvimento de tensões irrealistas entre a travessa e o balastro, já que não permite deslocamentos relativos entre estes elementos; as reacções entre o carril e a travessa e entre esta e o balastro mobilizam-se apenas na direcção vertical, não se considerando os esforços de corte. Apesar de apresentar diversas limitações este modelo permitiu aproximar de forma satisfatória o comportamento observado em trechos piloto.

O modelo Prismatic Solid Analysis-PSA [4] é um modelo de elementos finitos tridimensional, que também considera a separação entre a superestrutura e a subestrutura para determinação dos coeficientes de influência de tensão e deslocamento; impõe a compatibilidade de deslocamentos

e tensões entre a parte inferior da travessa e o topo do balastro. A determinação daqueles coeficientes é feita com base na análise de sólidos prismáticos carregados. Os materiais que constituem a subestrutura são considerados elásticos lineares, sendo no entanto possível diferenciar as propriedades dos elementos no plano vertical perpendicular aos carris. A solução tridimensional é aproximada por uma série de Fourier na direcção paralela ao desenvolvimento dos carris. Os coeficientes são obtidos por duas análises bidimensionais por elementos finitos (uma para cada termo da série) que fornecem os coeficientes dos deslocamentos de todos os nós em função das coordenadas dos mesmos. A soma destes termos da série conduz aos deslocamentos totais, a partir dos quais podem ser calculadas as tensões e as deformações. A principal vantagem apontada a este modelo é que permite obter soluções para problemas tridimensionais elásticos com relativo baixo custo computacional, quando comparado com modelos tridimensionais puros (com recurso a “bricks”). Este modelo tem limitações semelhantes ao Multa, tendo como vantagem o facto de possibilitar a variação das características dos materiais ao longo da secção transversal.

O modelo Geotrack [5] foi desenvolvido a partir do modelo Multa com os objectivos: i) de permitir considerar de forma mais adequada o comportamento tensão-deformação dos materiais da subestrutura; ii) de facilitar a aplicação das múltiplas solicitações verticais; iii) de reduzir o tempo de cálculo; iv) de facilitar a análise dos resultados obtidos. É um modelo tridimensional que combina a matriz de rigidez dos elementos da via com a distribuição de tensões de Boussinesq no balastro, no sub-balastro e na fundação. Este modelo incorpora relações tensões-deformações não lineares dos materiais e evita a existência de tensões de tracção nos materiais da subestrutura e entre estes e as travessas. Alguns estudos realizados com este modelo e a comparação dos resultados obtidos com os valores observados “in situ” permitiram concluir que ele contempla os aspectos essenciais da modelação da via e permite determinar a influência das características dos elementos da via no desempenho desta. O desenvolvimento deste modelo deu origem ao modelo Kentrack [6], que apresentou algumas melhorias computacionais e, entre outras facilidades, possibilita a modelação das travessas com elementos finitos.

O modelo Rosalie [7] modela o sistema formado pela via férrea e pela sua fundação com elementos finitos tridimensionais, tendo em conta o comportamento elastoplástico da fundação. Alguns dos estudos desenvolvidos com este modelo permitiram verificar a influência no desempenho do sistema das características físicas e mecânicas dos diversos componentes. Os resultados obtidos, nomeadamente as deflexões do carril e as tensões e as deformações nas camadas da subestrutura, aproximaram satisfatoriamente os valores observados em trechos piloto instrumentados em França, na Áustria e na Inglaterra.

A evolução na modelação numérica tem permitido obter resultados significativamente diferentes e, provavelmente, cada vez mais próximos da realidade. Diversos autores compararam os resultados obtidos com os vários modelos e apontaram as vantagens e desvantagens de uns e de outros. A utilização intensiva destes modelos permitiu realizar estudos paramétricos e elaborar gráficos que traduzem relações entre diversas variáveis utilizadas em alguns métodos de dimensionamento das camadas de apoio [8][9]. Mais recentemente, outros autores têm apresentado modelações da via férrea, com recurso a modelos comerciais mais genéricos [10].

2.2 Modelo numérico utilizado neste trabalho

Na realização deste trabalho utilizou-se um modelo de equilíbrio tridimensional para representar os elementos que constituem a via e a sua fundação e para simular o comportamento do conjunto quando sujeito às acções. Recorreu-se ao programa de cálculo automático FLAC-3D [11], que faz uso do Método das Diferenças Finitas. O cálculo explícito (Lagrangiano) e a técnica de discretização utilizados neste programa asseguram uma modelação adequada de

sistemas contínuos e permitem resolver problemas de equilíbrio tridimensional com grande complexidade, geométrica e física. Uma característica que motivou a sua escolha é a possibilidade de implementação de modelos constitutivos para os materiais, quer através de desenvolvimento de rotinas em linguagem C++, quer através da linguagem de programação interna (*FISH*). Atendendo ao algoritmo de resolução empregue, a implementação de modelos constitutivos – lineares, não-lineares, com ou sem plasticidade – é relativamente simples.

Considerando alguns resultados obtidos em ensaios de carga triaxial cíclica sobre materiais granulares e a possibilidade de aproximar esses resultados por modelos tensão-deformação normalmente adoptados para esses materiais [12], elaboraram-se rotinas para a implementação desses modelos no programa FLAC-3D. Entre outros, implementaram-se o modelo k - θ , traduzido pela expressão

$$E = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (1)$$

sendo:

θ – soma das tensões principais $(\sigma_1 + 2\sigma_3) = 3p$;

k_1, k_2 – parâmetros característicos do material determinados em ensaio;

e o modelo de Boyce que considera a anisotropia, traduzido por:

$$\varepsilon_v = p_a^{1-n} \cdot p^{*n} \left[\frac{\gamma + 2}{3 \cdot K_a} + \frac{n-1}{18 \cdot G_a} (\gamma + 2) \cdot \left(\frac{q^*}{p^*} \right)^2 + \frac{\gamma - 1}{3 \cdot G_a} \left(\frac{q^*}{p^*} \right) \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon_q = \frac{2}{3} p_a^{1-n} \cdot p^{*n} \left[\frac{\gamma - 1}{3 \cdot K_a} + \frac{n-1}{18 \cdot G_a} (\gamma - 1) \cdot \left(\frac{q^*}{p^*} \right)^2 + \frac{2\gamma + 1}{6 \cdot G_a} \left(\frac{q^*}{p^*} \right) \right] \quad (3)$$

com

$$p^* = \frac{\gamma \cdot \sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad \text{e} \quad q^* = \gamma \cdot \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4)$$

sendo:

$\varepsilon_v, \varepsilon_q$ – extensões volumétrica e distorcional reversíveis, respectivamente;

p_a – tensão de referência, 100 kPa;

σ_1, σ_3 – tensões principais máxima e mínima, respectivamente;

G_a, K_a, n, γ – parâmetros do modelo

3. MODELAÇÃO DA VIA FÉRREA E RESULTADOS OBTIDOS

A malha de elementos utilizada nas simulações (Figura 2) foi estabelecida considerando a simetria da geometria e do carregamento quer na direcção transversal à via, em relação a um eixo vertical situado a meia distância entre os carris, quer na direcção longitudinal, considerando um eixo vertical a meio da travessa solicitada; o desenvolvimento da malha é de 2,5 m na direcção paralela aos carris, de 3,75 m na direcção transversal e de aproximadamente 3,5 m abaixo da cota de implantação das travessas (variando em função das espessuras das camadas colocadas acima da fundação); o número total de elementos paralelepípedicos de 8 nós utilizados na modelação de todos os elementos constitutivos da via e da sua fundação é de 26928 e o número de nós de 30368. Em termos de ligações da malha nas fronteiras, consideraram-se restringidas todas as translações na base do modelo. Nas fronteiras laterais foram restringidas apenas as translações normais aos planos verticais de fronteira, de modo a respeitar as condições do problema.

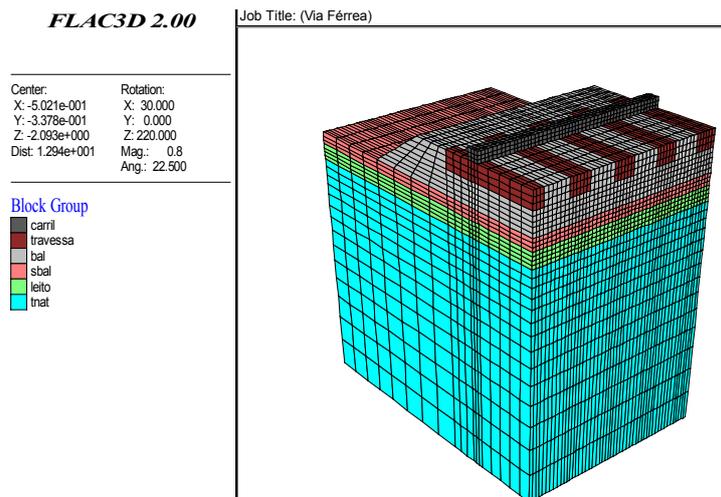


Figura 2 – Malha de elementos utilizada na modelação da via férrea e da sua fundação.

Modelou-se o carril, o elemento de apoio do carril na travessa, cinco travessas (incluindo a solicitada), as camadas de balastro, de sub-balastro, de leito da via e (ou) de balastro contaminado (balastro misturado com solos, ver [12]) e a fundação (terreno natural ou aterro). O carril, do tipo UIC 60, foi modelado como um paralelepípedo regular, com um número de elementos suficiente para reproduzir de forma adequada a rigidez de flexão; a dimensão horizontal do carril, na direcção transversal à via, foi considerada igual à da sua base; a sua altura foi estabelecida de forma a que a secção transversal do conjunto de elementos que o modelam tenha o mesmo momento de inércia que a secção verdadeira. Estes elementos foram considerados como tendo comportamento elástico linear; os valores do módulo de Young e do coeficiente de Poisson considerados foram 210 GPa e 0,3, respectivamente, e o peso volúmico foi de 79,5 kN/m³. Os elementos de apoio dos carris sobre as travessas foram modelados com elementos de junta triangulares sem espessura, com rigidez normal de 244 kN/mm e sem resistência à abertura. As travessas, de betão armado do tipo monobloco, foram modeladas como paralelepípedos de momento de inércia e superfície de apoio equivalentes às reais. Tal como nos carris, considerou-se um comportamento elástico linear para o material das travessas. Os valores de módulo de Young e do coeficiente de Poisson foram 50 GPa e 0,25, respectivamente, e o peso volúmico de 25,5 kN/m³. Modelou-se o balastro localizado sob as travessas, o que se encontra entre as travessas e o que constitui o prisma lateral. Sob as travessas a camada de balastro tem uma espessura de 30 cm. O modelo de comportamento adoptado para o balastro traduz uma variação do módulo de deformabilidade com a tensão, dada pela lei K- θ , com coeficientes $k = 22682$ e $n = 0,30$. Para este material considerou-se o critério de rotura de Mohr-Coulomb, com coesão nula, ângulo de atrito de 45° e um peso volúmico de 17,3 kN/m³.

Consideraram-se vários modelos de subestrutura, nos quais se mantiveram as características da camada de balastro e se variaram as características das camadas de sub-balastro, do leito da via e da fundação subjacente, de acordo com algumas das soluções estruturais adoptadas no projecto de renovação de uma plataforma ferroviária em Portugal (geometrias G1S, G2S e G3S). Modelaram-se também duas situações que pretendem representar subestruturas subdimensionadas, uma das quais sem sub-balastro (G4) e outra com uma camada de sub-balastro de 0,15 m de espessura e com uma plataforma com módulo de deformabilidade equivalente de 40 MPa (G5S).

No Quadro 1 apresentam-se, de forma resumida, as características das camadas consideradas nos diversos modelos analisados. No Quadro 2 apresentam-se os valores dos parâmetros do modelo de Boyce com anisotropia considerados nos cálculos, relativos aos agregados calcários e graníticos de granulometria extensa (0/37,5 mm) e ao balastro contaminado, determinados a

partir dos ensaios realizados em laboratório [12]. Nos materiais em que se consideraram modelos de elasticidade variável admitiu-se um valor mínimo do módulo de deformabilidade de 50 MPa. O peso volúmico considerado foi 21 kN/m³ no caso do balastro contaminado e de 23 kN/m³ no caso dos agregados de granulometria extensa. O valor de K_0 foi tomado igual a 1.

Quadro 1 – Características das camadas dos modelos analisados.

Cálculo	Sub-balastro	Leito da via	Fundação sob o leito
G1S	0,15 m de agregado granítico	0,20 m de agregado calcário	F1
G2S	0,15 m de agregado granítico	0,35 m de agregado calcário	F2
G3S	0,15 m de agregado calcário	0,20 m de balastro contaminado de granulometria média	F1
G4	--	--	F2
G5S	0,15 m de agregado granítico	--	F2

F1, F2 – comportamento elástico, com módulo de deformabilidade de 60 e 40 MPa, respectivamente.

Quadro 2 – Parâmetros do modelo de Boyce com anisotropia.

Designação do material	K_a (MPa)	G_a (MPa)	n	γ
agregado granítico	169,4	167,5	0,535	0,910
agregado calcário	286,6	244,0	0,570	0,894
balastro contaminado de granulometria média	224,5	230,6	0,536	0,924

Considerou-se o critério de rotura de Mohr-Coulomb, com coesão nula e ângulo de atrito de 55°, para os agregados de granulometria extensa e para o balastro contaminado. A camada que representa a fundação subjacente ao leito da via foi modelada com cerca de 3 m de espessura. O comportamento do solo foi admitido elástico linear, com módulo de deformabilidade de 60 e 40 MPa, conforme o modelo considerado, sendo o coeficiente de Poisson de 0,4. O peso volúmico considerado foi de 19,5 kN/m³. A carga dinâmica de 170 kN por roda, obtida tendo em atenção as especificações de projecto [12], foi aplicada sobre a travessa central e foi distribuída pelos nós do carril, que se situam no plano transversal à via que passa no eixo de simetria. Na aplicação desta carga consideraram-se as condições de simetria da malha.

Na Figura 3a apresenta-se, para os diversos modelos, a tensão vertical no alinhamento do carril, ao nível da base das travessas, devida à carga aplicada pelo comboio. Embora, em geral, os valores obtidos nos diversos cálculos sejam da mesma ordem de grandeza, a diferença entre o valor máximo obtido no cálculo G1S (130 kPa) e o valor máximo obtido no cálculo G4 (118 kPa) é de cerca de 10%. A distribuição da tensão vertical obtida sob as travessas é algo irregular e está relacionada com a geometria e com a elevada rigidez destas, relativamente ao balastro subjacente. Considerando a distribuição longitudinal da tensão vertical, a repartição da carga pelas travessas é tal que a mais solicitada transmite cerca de 25% da carga para o balastro e as sucessivamente mais afastadas cerca de 20%, 11%, 5% e 2%, respectivamente.

Na Figura 3b apresenta-se a tensão vertical, no alinhamento do carril, no topo da fundação. A distribuição da tensão vertical e os valores máximos observados variam de forma importante conforme o modelo analisado. No cálculo G4, devido à ausência da camada de sub-balastro, a tensão vertical na plataforma varia de forma importante na direcção longitudinal, em função do posicionamento das travessas. O valor mais baixo da tensão vertical máxima foi obtido no cálculo G2S (cerca de 30 kPa); nos cálculos G1S e G3S a tensão vertical máxima foi de cerca de 35 kPa; nos cálculos G4 e G5S essa tensão foi de 56 e 42 kPa, respectivamente, o que representa aumentos de cerca de 87% e 40%, em relação ao valor obtido em G2S.

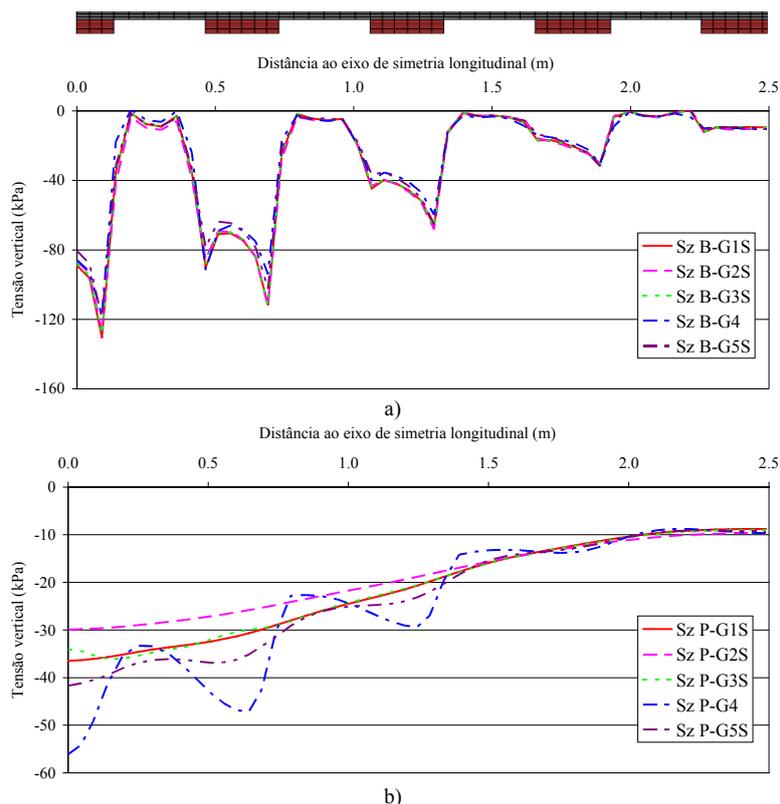


Figura 3 – Tensão vertical no alinhamento do carril: a) base das travessas; b) topo da fundação.

Na Figura 4 apresenta-se a distribuição da tensão vertical, devida à carga aplicada pelo comboio, no alinhamento da travessa solicitada. Ao nível da base das travessas observa-se que os valores mais elevados da tensão vertical ocorrem junto à extremidade da travessa; o valor mais elevado foi obtido no cálculo G4 (183 kPa), sendo cerca de 20% superior ao valor máximo obtido no cálculo G1S. Assim, conclui-se que as subestruturas subdimensionadas conduzem a valores mais elevados da tensão vertical, não só na fundação, mas também na camada de balastro. Ao nível do topo da fundação, observa-se a tendência para uma maior variação da tensão sob a zona solicitada (ao longo do desenvolvimento da travessa), com o aumento do valor absoluto; além disso, verifica-se também que o ponto onde ocorre o maior valor da tensão vertical tende a ficar mais próximo da extremidade da travessa, com o aumento do valor absoluto. Os valores máximos da tensão vertical obtidos nos cálculos G4 e G5S são 128% e 53% superiores aos obtidos no cálculo G2S, respectivamente.

A deflexão no alinhamento do carril devida à carga do comboio, ao nível da base das travessas e no topo da fundação, é apresentada na Figura 5. O perfil das deflexões obtidas ao nível da base das travessas reflecte, de forma evidente, o posicionamento destas. No que se refere às deflexões obtidas no topo da fundação, a variação longitudinal é relativamente suave. Na zona do modelo mais afastada da travessa solicitada (2,5 m de distância da zona de aplicação da carga), a deflexão é cerca de 30% da deflexão máxima, no que se refere aos valores obtidos ao nível da base das travessas e 36% quando se analisam os valores obtidos no topo da fundação.

Na Figura 6 apresenta-se a deflexão no alinhamento da travessa solicitada, ao nível da base e no topo da fundação. Embora a deflexão ao nível da base das travessas, ao longo do seu desenvolvimento longitudinal, seja semelhante em todos os pontos, a deflexão máxima ocorre sob o carril. No topo da fundação, em particular nos cálculos G1S, G2S e G3S, a deflexão máxima ocorre sob a zona central da travessa. Os modelos G1S e G3S apresentam valores de deflexão semelhantes, quer ao nível da base das travessas, quer ao nível do topo da fundação,

sendo os valores máximos 1,05 e 0,78 mm, respectivamente; o modelo G2S apresenta, ao nível da base das travessas e ao nível do topo da fundação, valores máximos superiores em 20% e 30% relativamente aos anteriormente referidos, respectivamente; no modelo G5S, aqueles valores são superiores em 43% e 59% e no modelo G4 em 57% e 74%, respectivamente.

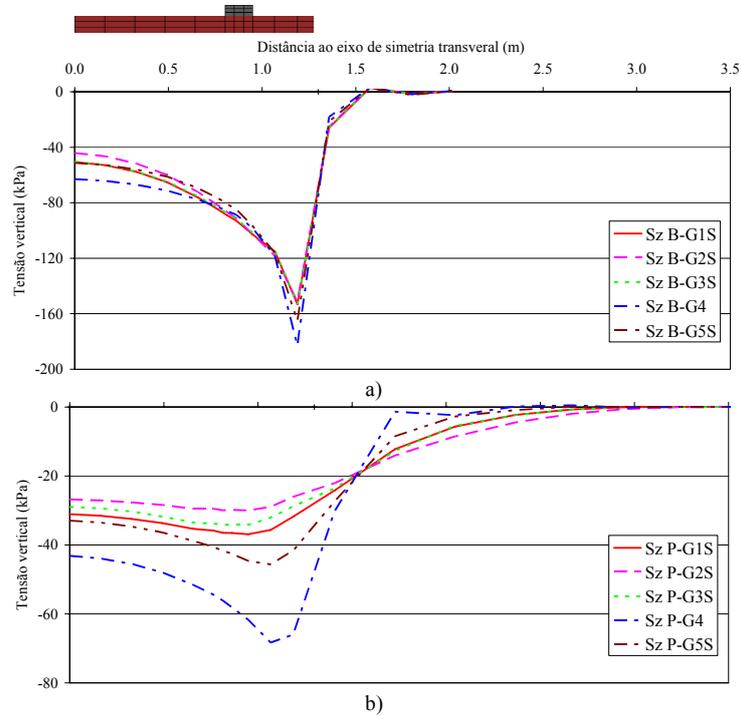


Figura 4 – Tensão vertical no alinhamento da travessa solicitada: a) base; b) topo da fundação.

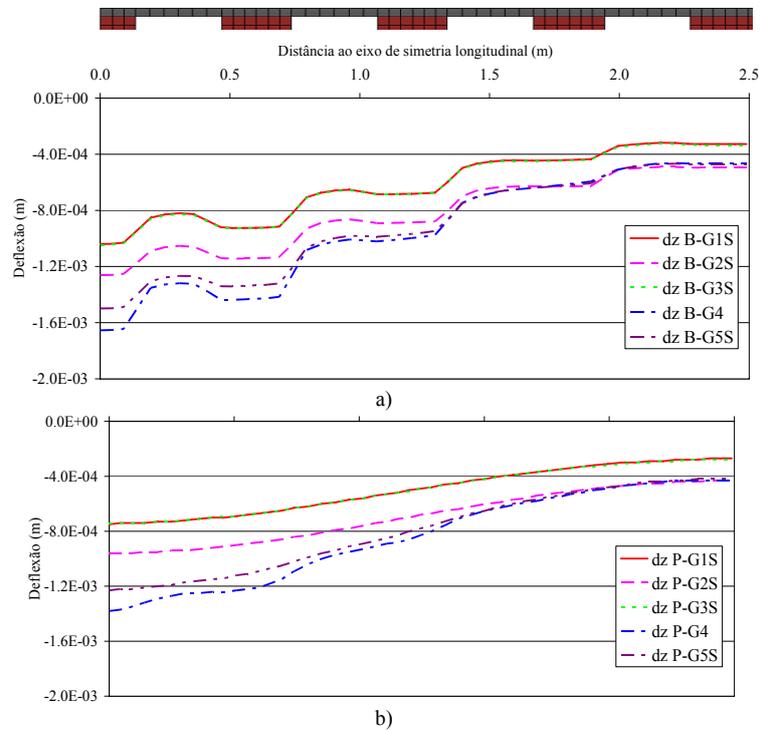


Figura 5 – Deflexão no alinhamento do carril: a) base das travessas; b) topo da fundação.

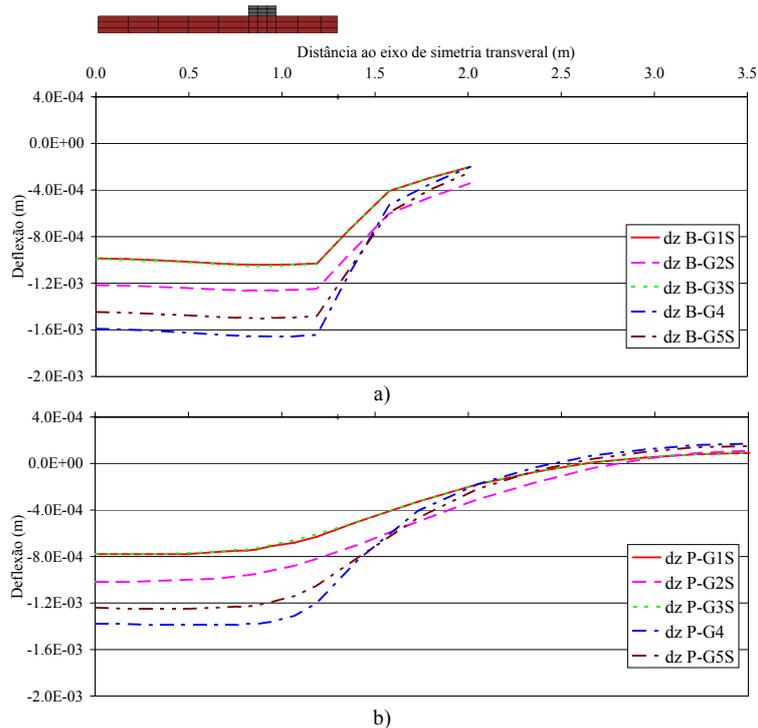


Figura 6 – Deflexão no alinhamento da travessa solicitada: a) base; b) topo da fundação.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentaram-se alguns aspectos da modelação numérica do comportamento estrutural da via férrea e um conjunto de resultados obtidos com um modelo tridimensional utilizado no estudo de diversas soluções estruturais, no âmbito da renovação de uma plataforma ferroviária. Este modelo, com leis de comportamento não lineares para os materiais granulares, permitiu conhecer o comportamento estrutural da via e da sua fundação. As diferenças entre os valores das tensões e das deformações obtidos numa subestrutura dimensionada adequadamente e os obtidos numa subdimensionada, permitiram evidenciar a importância da caracterização da plataforma existente e do adequado dimensionamento das camadas de reforço e de sub-balastro.

5. REFERÊNCIAS

- [1] UIC. Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaires. Code UIC 719R(1994).
- [2] Tarabji, S. Finite element analysis of a railway track support system. FRAORD76257(1976).
- [3] Prause, R.; Kennedy, J. Parametric study of track response. FRA/ORD-77/75(1977). USDT.
- [4] Adegoke, C. Study of analytical models for track support systems. TRR733(1979), pp.12-19.
- [5] Chang, C; Adegoke, C.; Selig, E. Geotrack model for railroad track performance. Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 106, No. GT11 (1980), pp.1201-1218.
- [6] Huang, Y.; Lin, C.; Deng, X.; Rose, J. Kentrack. RR-84-1 (1984). Asphalt Institute, USA.
- [7] Sauvage, R.; Larible, G. La modélisation par "éléments finis" des couches d'assise de la voie ferrée. Revue Générale des Chemins de Fer, Septembre (1982), pp. 475-483.
- [8] Li, D.; Selig, E. T. Method for railroad track foundation design. I: Development. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 4 (1998), pp. 316-322.
- [9] ORE. Question D117. Rapport No. 27 (1983).
- [10] Williams, P.; Pérez, M. Cálculo de plataformas ferroviárias mediante elementos finitos. CNIF. Coruña (1998), pp. 149-160.
- [11] FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua 3D (1997). Itasca Consulting Group.
- [12] Fortunato, E. Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga. Tese de Doutoramento (2005). Universidade do Porto.