

ANÁLISE ESTRUTURAL DE VIA-FÉRREA COM RECURSO A UM MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL

André Paixão, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, apaixao@lnec.pt*

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

RESUMO

O actual panorama competitivo de sistemas de transporte e as crescentes exigências impostas à via-férrea, especialmente no que diz respeito a questões de segurança, de qualidade de operação e de aumento da eficiência do transporte ferroviário, têm contribuído inevitavelmente para a optimização dos sistemas que integram a infra-estrutura ferroviária. Desse ponto de vista e tendo em conta o presente paradigma de desenvolvimento sustentável, a optimização da concepção da via-férrea e a redução do custo do seu ciclo de vida apresentam-se como temas de grande relevância.

Nesse âmbito, a utilização de modelos numéricos de equilíbrio tridimensional podem contribuir para uma melhor compreensão do comportamento da via e, conseqüentemente, para a optimização do dimensionamento de soluções estruturais, relativamente às características mecânicas e geométricas a adoptar na subestrutura.

O estudo agora desenvolvido centra-se na modelação numérica tridimensional de diferentes soluções estruturais de via-férrea. Para tal, recorre-se a leis constitutivas lineares e não-lineares para representar o comportamento dos materiais da subestrutura.

Apresentam-se alguns resultados relativos a tensões e deformações nas diversas camadas da subestrutura e discute-se a adequação de distintas soluções estruturais.

1 INTRODUÇÃO

Tendo em conta o actual paradigma de redução dos custos de ciclo de vida das infra-estruturas de transporte, especialmente no que diz respeito ao sector ferroviário, a optimização da concepção da via-férrea apresenta uma relevância acrescida.

Com o objectivo de contribuir para a optimização do dimensionamento de soluções estruturais, relativamente às características mecânicas e geométricas a adoptar na subestrutura, podem ser utilizados modelos numéricos para melhor compreender comportamento da via. Para esse efeito, no presente estudo recorreu-se à modelação numérica de equilíbrio tridimensional para representar o comportamento estrutural da via-férrea e da sua fundação.

Pretende-se, com os modelos apresentados neste estudo, simular o desempenho do conjunto dos vários elementos da via quando submetida a um carregamento semelhante ao produzido pelos comboios.

A via-férrea sobre balastro trata-se de uma estrutura bastante complexa que apresenta normalmente um

comportamento não-linear quando submetida às acções verticais, transversais e longitudinais que ocorrem durante a sua vida útil. No sentido de se tentar representar o comportamento, têm sido desenvolvidos diversos modelos analíticos, quer para representar, individualmente, cada uma das componentes da resposta associada ao carregamento, quer para representar, em simultâneo, as diversas componentes. No entanto, provavelmente devido à sua maior relevância, tem sido dada maior atenção à resposta da via às acções verticais.

Desde há várias décadas que a compreensão do comportamento da via-férrea, quando sujeita a carregamentos verticais, tem sido objecto de estudo por parte de diversos autores. O surgimento de métodos que utilizam intensivamente recursos computacionais, como por exemplo, o método dos elementos finitos ou o das diferenças finitas, permitiu que o estudo do comportamento da via não se baseasse exclusivamente em modelos analíticos ou em trechos experimentais. Os métodos de elementos finitos e das diferenças finitas são particularmente adequados para a modela-

ção das acções e para a utilização de diferentes modelos constitutivos nos diversos materiais que compõem o sistema. Com estes modelos numéricos é possível considerar as variações das características físicas e geométricas. Diversos modelos têm sido utilizados para o estudo do comportamento da via-férrea face às cargas impostas pelos comboios. Esses modelos foram evoluindo de acordo com a capacidade computacional disponível.

O modelo Illitrack (Tarabji e Thompson, 1976) foi um dos primeiros modelos de elementos finitos a ser desenvolvido para o estudo da via-férrea. Apesar de não se tratar de um modelo tridimensional, considerava dois modelos bidimensionais para obter o efeito de uma análise tridimensional. Recorria aos resultados de um modelo bidimensional longitudinal e utilizava-os como dados para efectuar uma análise na direcção transversal. Na análise longitudinal eram consideradas as cargas aplicadas sobre um elemento de viga apoiado em molas, representando os carris e as travessas, respectivamente. Estas eram apoiadas sobre uma malha de elementos finitos que modelava as restantes camadas de apoio. Esta modelação permitia considerar o comportamento não-linear dos materiais.

O modelo Multa (Multilayer Track Analysis), apresentado por Prause e Kennedy (1977) combinava um modelo tridimensional de elementos finitos, representando a superestrutura, com um modelo elástico de multicamadas de Burmister, para a subestrutura. A modelação do carril era aproximada a uma viga finita apoiada sobre 11 travessas, as quais eram também representadas como vigas, apoiadas em áreas de contacto travessa-balastro. A área carregada das travessas era dividida em zonas aproximadamente iguais e a área de cada zona era convertida numa área circular de tensão uniforme. O modelo elástico linear de multicamadas recorria a estas áreas circulares para gerar coeficientes de influência de tensões e de deslocamentos. Este método utilizava uma análise elástica linear, o que não permitia considerar o real comportamento de tensão-deformação dos materiais da subestrutura. Apesar de algumas limitações deste modelo, permitia aproximar, de forma satisfatória, o comportamento observado em trechos experimentais.

O modelo PSA - Prismatic Solid Analysis (Adegoké *et al.*, 1979) tratava-se de um modelo tridimensional, que utilizava o método dos elementos finitos. Este também considerava a separação entre a superestrutura e a subestrutura para a determinação dos coeficientes de influência de tensão e deslocamento, impondo a compatibilidade de deslocamentos e tensões entre a parte inferior da travessa e o balastro. O modelo considerava o comportamento elástico linear para os materiais que constituem a subestrutura. Apresentava limitações semelhantes às do modelo Multa,

tendo como vantagem o facto de possibilitar a variação das características dos materiais ao longo da secção transversal.

No sentido de se proceder à implementação de algumas melhorias no modelo Multa, foi desenvolvido o modelo Geotrack (Chang *et al.*, 1980). Os objectivos deste aperfeiçoamento consistiam basicamente em permitir considerar de forma mais adequada o comportamento de tensão-deformação dos materiais da subestrutura, em facilitar a aplicação das múltiplas solicitações verticais, em reduzir o tempo de cálculo e em facilitar a análise dos resultados obtidos. O modelo Geotrack tratava-se de um modelo tridimensional que incorporava relações elásticas não lineares de tensão-deformação para os materiais e evitava 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 contemplava os aspectos essenciais da modelação da via e permitiu determinar a influência das características dos elementos da via no desempenho desta. O desenvolvimento do modelo Geotrack, conduziu ao modelo Kentrack (Huang *et al.*, 1984), sendo implementadas algumas melhorias computacionais e, entre outros aspectos, possibilitando a modelação das travessas com elementos finitos.

O modelo Rosalie (Sauvage e Larible, 1982), enquadrado nos trabalhos da UIC e da SNCF, foi desenvolvido no âmbito de intensos estudos para a modelação numérica da via-férrea (ORE, 1983). Este modelo utilizava elementos finitos tridimensionais para representar o sistema formado pela via-férrea e pela sua fundação, tendo em conta o comportamento elástico-perfeitamente plástico da fundação. Alguns 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 experimentais, instrumentados em França, Áustria e Inglaterra.

A evolução na modelação numérica de problemas deste tipo tem permitido obter resultados significativamente diferentes e, provavelmente, cada vez mais próximos da realidade. Diversos autores compararam os resultados obtidos pelos vários modelos e apontaram as respectivas vantagens e desvantagens. 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 (Li e Selig, 1998; ORE, 1983; Ministerio de Fomento, 1999). Outros autores (Sanguino *et al.*, 1998; Wil-

liams e Pérez, 1998; Aubry *et al.*, 1999) modelaram a via-férrea com recurso a *software* comercial, os quais apresentam distintas potencialidades.

Na sua generalidade, os estudos efectuados consideram um comportamento linear das camadas de suporte da via. Inicialmente esta consideração deveu-se à limitação do poder de cálculo, tanto de *software* como de *hardware* disponível na altura. Actualmente, face aos desenvolvimentos verificados ao nível do poder de cálculo das ferramentas disponíveis, alguns autores sugeriram a utilização de modelos mais complexos de modo a se obter uma melhor aproximação ao comportamento real dos materiais.

Neste contexto, o objectivo deste estudo consiste não só em estudar a influência das características geométricas das camadas de suporte da via, como também em comparar os valores obtidos nas modelações numéricas em que se consideram distintas leis constitutivas para representar o comportamento dos materiais utilizados na via-férrea.

2 MODELAÇÃO DA VIA-FÉRREA

Para o desenvolvimento dos modelos numéricos de equilíbrio tridimensional utilizou-se o programa de cálculo automático FLAC3D (2006), que recorre ao método das diferenças finitas. O cálculo explícito (Lagrangeano) e o método de discretização utilizado neste programa proporcionam uma adequada modelação de sistemas contínuos, permitindo a resolução de problemas de equilíbrio tridimensional com uma elevada complexidade geométrica e física.

Uma das características que conduziu à escolha deste *software* prende-se com a possibilidade de aplicação de modelos constitutivos para os materiais, tanto através do desenvolvimento de rotinas em linguagem C++, assim como através de uma linguagem de programação interna (*FISH*). Considerando o algoritmo de resolução utilizado, a implementação de modelos constitutivos é relativamente simples, quer estes sejam elásticos lineares ou não-lineares, com ou sem critério de rotura.

Como é frequente em aplicações deste género, na construção da malha de elementos tirou-se partido das condições de simetria do problema, sendo possível reduzir o domínio de cálculo para um quarto do total (Figura 1). Definiram-se como planos de simetria (de geometria e de carregamento) o plano vertical longitudinal que contém o eixo da via e o plano transversal vertical, no qual é aplicado o carregamento. Os diversos modelos utilizados apresentam um desenvolvimento aproximado de 2,5 m na direcção paralela aos carris; 3,8 m de largura na direcção transversal da via; profundidade constante de 3,65 m, relativa à face infe-

rior das travessas. Optou-se por manter a distância ao plano de fronteira horizontal inferior constante em todos os modelos, pois constatou-se que é um dos parâmetros que apresenta relativa influência sobre os deslocamentos verticais calculados. Relativamente às condições de fronteira do problema, foram restringidos os deslocamentos horizontais nos planos verticais de fronteira, assim como os deslocamentos verticais no plano horizontal inferior.

Na sua generalidade, foram utilizados modelos com 11 288 elementos hexaédricos e com um número total de nós de 13 195 que representam os seguintes elementos da via: carril, palmilhas, travessas, camada de balastro, camada de sub-balastro, leito de via (ou coroamento), terreno natural (ou fundação) (Figura 1).

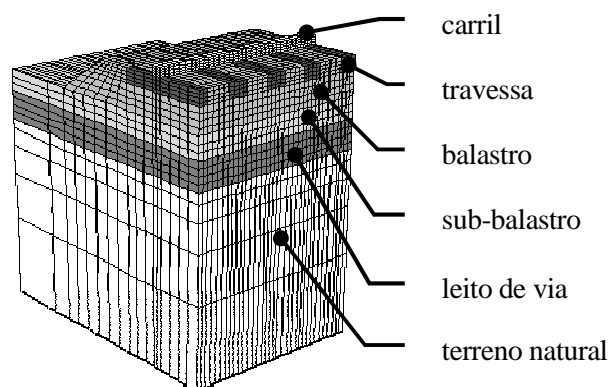


Figura 1. Exemplo de malha de elementos utilizada com o *software* FLAC3D para modelar a via.

Simplificadamente, modelou-se um carril do tipo UIC60 com uma forma paralelepípedica, utilizando um número suficiente de elementos para reproduzir adequadamente o seu comportamento de flexão. Adoptou-se para a largura do carril o valor de 0,15 m (largura real do patim), sendo determinada uma altura equivalente de modo a que o carril apresentasse um momento de inércia semelhante ao do carril real. Para este elemento considerou-se um comportamento elástico linear, com módulo de Young (E) de 210 GPa e coeficiente de Poisson (ν) de 0,3. Foi determinado um valor de peso volúmico equivalente de modo a que o peso do carril modelado fosse próximo do peso real do carril (60 kg/m).

Relativamente às palmilhas de apoio do carril sobre as travessas, recorreu-se a elementos de interface triangulares sem espessura, disponíveis no *software* FLAC3D, adoptando rigidez normal de 100 kN/mm.

As travessas monobloco foram igualmente modeladas com uma forma paralelepípedica, representando travessas do tipo B70. As suas dimensões foram determinadas tal que, em primeiro lugar, o seu valor de área em planta fosse próximo do valor real e, em

segundo lugar, que o valor da sua altura conduzisse a um momento de inércia semelhante ao valor médio da travessa real. Considerou-se que estes elementos apresentavam um comportamento elástico linear com módulo de Young de 64 GPa e coeficiente de Poisson de 0,25. Adoptou-se também um valor de peso volúmico equivalente tal que o peso da travessa modelada igualasse o seu peso real de 300 kg.

No que se refere à camada de balastro, modelou-se este material sob as travessas e entre estas, bem como no prisma lateral. Nos modelos estudados adoptou-se uma espessura constante de 0,35 m de balastro sob as travessas. Relativamente ao material constituinte desta camada foram consideradas três situações para representar o seu comportamento: 1) comportamento elástico linear (modelos ELi); 2) comportamento elástico linear perfeitamente plástico (modelos EPI); 3) comportamento elástico não-linear perfeitamente plástico (modelos VPI).

No caso dos modelos ELi, o comportamento deste material foi caracterizado por um módulo de deformabilidade de 130 MPa e um coeficiente de Poisson igual a 0,2.

Nas situações em que se considerou a possibilidade de rotura do material de balastro, adoptou-se o critério de Mohr-Coulomb, com coesão nula e $\phi = 45^\circ$.

Tendo em conta alguns resultados obtidos em ensaios de carga cíclica triaxial sobre materiais granulares, bem como a possibilidade de representar esses resultados por modelos de tensão-deformação, que são geralmente adoptadas para os materiais granulares, foram utilizadas algumas rotinas que permitem aplicar esses modelos no programa FLAC3D (Fortunato, 2005). Assim, relativamente às situações em que se considerou que o material do balastro apresentava uma rigidez variável (modelos VPI), recorreu-se ao modelo $k-\theta$ para traduzir a variação do módulo de deformabilidade (E) com a tensão instalada, como representado pela expressão:

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

em que

E - módulo de deformabilidade;

θ - primeiro invariante de tensões, soma das tensões principais: $\theta = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 3p$;

k_1 e k_2 - parâmetros característicos dos materiais, determinados em ensaio: $k_1 = 22682$ e $k_2 = 0,3$ (Fortunato, 2005).

Adoptou-se um peso volúmico de 17,3 kN/m³.

Relativamente à camada de sub-balastro, tomou-se como espessura de referência o valor de 0,30 m.

À semelhança da camada de balastro, foram também consideradas as três situações anteriormente referidas para representar o comportamento deste material.

Quando o material foi considerado elástico linear foram estudados diferentes valores para o módulo de deformabilidade: entre 100 e 500 MPa; mantendo um coeficiente de Poisson constante, igual a 0,3.

Nas situações em que se considerou a possibilidade de rotura deste material, adoptou-se também o critério de Mohr-Coulomb, com coesão nula e $\phi = 55^\circ$.

Nos casos em que se considerou ainda um comportamento de rigidez variável para este material, recorreu-se ao modelo de Boyce com anisotropia, que pode ser representado da seguinte forma:

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

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

com

$$p^* = \frac{\gamma \cdot \sigma_{zz} + \sigma_{yy} + \sigma_{xx}}{3} \quad (4)$$

e com

$$q^* = \sqrt{3 \times \left[\frac{1}{6} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \gamma \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \gamma \sigma_{zz})^2 \right] + \sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2 \right]} \quad (5)$$

em que:

ε_v - extensão volumétrica reversível;

ε_q - extensão distorcional reversível;

p_a - tensão de referência, 100 kPa;

σ_i - componentes do tensor das tensões;

G_a, K_a, n, γ - parâmetros característicos dos materiais, determinados em ensaio (Quadro 1).

Quadro 1: Parâmetros do modelo de Boyce utilizado no material de sub-balastro (Fortunato, 2005)

Parâmetros	Valores
G_a (kPa)	169,4
K_a (kPa)	167,5
n	0,535
γ	0,910

Atribuiu-se ao material do sub-balastro um peso volúmico de 23,0 kN/m³.

Relativamente à camada de leito da via, considerou-se que este consistia numa camada de solo com espessura de referência de 0,40 m. Nos modelos ELi, este material foi representado por um comportamento elástico linear, como valores de módulo de deformabilidade de 40 ou 80 MPa e coeficiente de Poisson de 0,30. Nas situações em que se considerou a possibilidade de rotura (EPi e VPi), adoptou-se o mesmo critério utilizado para o sub-balastro. O valor do peso volúmico deste material foi também idêntico ao do sub-balastro.

Em todas as situações estudadas, sob a camada de leito de via e até uma profundidade de 3,65 m, relativa à face inferior das travessas, considerou-se a existência de terreno natural. Admitiu-se para este material um comportamento elástico linear com coeficiente de Poisson de 0,3 e módulo de deformabilidade de 25 ou 60 MPa, consoante as situações estudadas. O peso volúmico considerado foi de 19,5 kN/m³.

Nestes problemas estáticos admitiu-se o carregamento de um único eixo, pois verificou-se que a influência do carregamento de um segundo eixo, a uma distância de aproximada de 3,0 m, introduzia pequenas variações nos resultados analisados.

Relativamente ao carregamento vertical, simplificadamente, tomou-se o valor de 300 kN/eixo como carregamento de referência. A escolha deste valor foi baseada de forma a englobar, tanto os efeitos do carregamento de um eixo de um veículo de alta velocidade a circular a velocidade elevada (com a respectiva componente dinâmica), como o de um eixo, consideravelmente mais pesado mas a uma velocidade inferior. Dado que se tirou proveito das condições de simetria, o valor aplicado no modelo corresponde a um quarto deste carregamento, ou seja, 75 kN. Esta carga vertical foi aplicada no topo do carril no plano transversal vertical de simetria.

3 ANÁLISE DE RESULTADOS

No sentido de se proceder à avaliação da influência da variação de alguns parâmetros característicos da via-férrea, nomeadamente as espessuras e os módulos de deformabilidade das camadas da subestrutura, foram desenvolvidos diversos modelos numéricos tridimensionais, representando uma variedade de tipologias.

A escolha das leis constitutivas a utilizar para representar o comportamento dos materiais dos elementos constituintes da via é uma decisão fundamental para se poder obter uma aproximação razoável do problema real. Por esse motivo, efectuaram-se altera-

ções relativas às leis constitutivas adoptadas para os materiais de balastro, sub-balastro e leito.

Foram registadas e comparadas as variações de tensão e deformação observadas na via, quando submetida a um carregamento vertical.

No Quadro 2 apresenta-se o resumo de algumas das características mecânicas e geométricas relativas às diferentes camadas de apoio da via utilizadas neste estudo, nas circunstâncias em que o comportamento foi considerado elástico linear e naquelas em que foi considerado elástico linear perfeitamente plástico.

Quadro 2: Valores utilizados para os parâmetros das camadas de suporte da via.

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores utilizados</i>
Balastro	
<i>E</i> (MPa)	130
<i>ν</i>	0,20
Peso volúmico (kN/m ³)	17,3
Espessura (m)	0,35
Sub-balastro	
<i>E</i> (MPa)	100; 200; 500
<i>ν</i>	0,30
Peso volúmico (kN/m ³)	23,0
Espessura (m)	0,10 a 0,60
Leito de via	
<i>E</i> (MPa)	40; 80
<i>ν</i>	0,30
Peso volúmico (kN/m ³)	23,0
Espessura (m)	0,10 a 0,60
Terreno natural	
<i>E</i> (MPa)	25; 60
<i>ν</i>	0,30
Peso volúmico (kN/m ³)	19,5

3.1 Modelos ELi: Comportamento elástico linear dos materiais constituintes da via

Numa primeira abordagem, desenvolveram-se alguns modelos de via-férrea onde se considerou que todos os materiais apresentavam um comportamento elástico linear. Tomando as características gerais dos modelos descritas anteriormente e mantendo as espessuras das camadas de suporte constantes, efectuaram-se variações dos módulos de deformabilidade, apenas ao nível do sub-balastro, do leito de via e do terreno natural, como indicado no Quadro 3.

Quadro 3: Variação dos módulos de deformabilidade introduzida nos modelos com comportamento elástico linear.

	Sub-balastro (MPa)	Leito de via (MPa)	Terreno natural (MPa)
EL1	100	40	25
EL2	200	40	25
EL3	200	80	25
EL4	200	80	60
EL5	500	40	25

A análise dos resultados obtidos com estes modelos realça a influência que o incremento do módulo de deformabilidade do terreno natural apresenta para o aumento da tensão vertical registada em todas as camadas de apoio, como evidenciado, na Figura 2, pela comparação dos resultados do modelo EL4 com os resultados dos restantes.

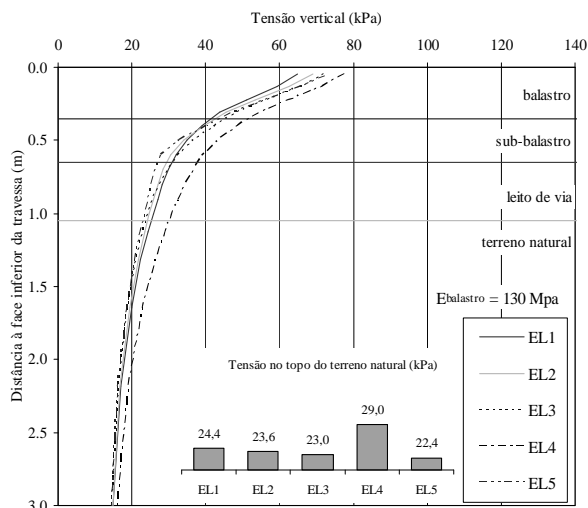


Figura 2. Tensão vertical em profundidade devido ao carregamento obtida nos modelos ELi.

Verifica-se ainda que o incremento do módulo de deformabilidade das camadas intermédias se traduz num ligeiro aumento da tensão nas camadas que as sobrepõem. Embora de um modo menos evidente, esta variação de rigidez reduz também as tensões nas camadas subjacentes.

3.2 Modelos EPi: Comportamento elástico linear perfeitamente plástico nos materiais de balastro, sub-balastro e leito de via

Posteriormente, a partir dos modelos apresentados no Quadro 3, construíram-se os modelos EP1 a EP4, com as mesmas características dos anteriores, mas conside-

rando agora, para os materiais constituintes das camadas de balastro, de sub-balastro e de leito, um comportamento elástico linear perfeitamente plástico, com a introdução do critério de rotura de Mohr-Coulomb.

Relativamente aos resultados destes casos, comparando com os modelos ELi, parece ser evidente em todos os modelos estudados um incremento significativo da tensão máxima vertical sob a zona carregada, especialmente nas camadas superiores, como se pode verificar pela Figura 3. Por exemplo, em algumas situações verificou-se um incremento de quase 70%. Esta diferença deve-se principalmente ao facto de existir uma maior distribuição de tensões nos modelos elásticos lineares, pelo motivo de estes permitirem o comportamento de tracção dos materiais.

Tal como nos modelos ELi anteriores, a existência de uma maior rigidez no terreno natural conduz a um incremento da tensão vertical em todas as camadas, como se pode verificar pelos resultados do modelo EP4 apresentados na Figura 3, quando comparados com os restantes modelos EPi.

Também é interessante observar as variações provocadas na distribuição de tensões resultantes da alteração da rigidez, quer do material do sub-balastro, quer do material do leito de via. Por exemplo, verifica-se para o modelo EP3 uma redução importante da tensão ao nível do leito de via, resultante do aumento do módulo do leito para 80 MPa. Um efeito semelhante verifica-se no modelo EP5, ao nível do sub-balastro, mediante o incremento do módulo dessa camada para 500 MPa.

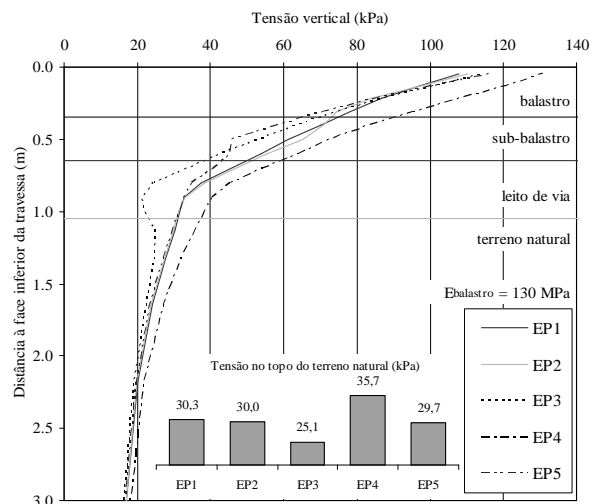


Figura 3. Tensão vertical em profundidade devido ao carregamento obtida nos modelos EPi.

Outra observação a salientar diz respeito à redução em cerca de 15% da tensão sobre o terreno natural resultante da introdução de um leito com módulo de 80 MPa no modelo EP4, quando comparado com o

modelo EP2. Contrariamente, o aumento de 200 MPa para 500 MPa do módulo do sub-balastro, no modelo EP2 para o EP5, não trouxe benefícios significativos ao nível da tensão calculada no topo do terreno natural.

3.3 Modelos VPi: Comportamento elástico não-linear perfeitamente plástico nos materiais de balastro e sub-balastro

Tomando como referência os modelos EPi do ponto anterior, desenvolveram-se os modelos VP1, VP3 e VP4, com as mesmas características daqueles, mas considerando, agora, para os materiais constituintes das camadas de balastro e sub-balastro, um comportamento elástico não-linear perfeitamente plástico, com a introdução dos modelos $k-\theta$ e Boyce.

Tanto os resultados dos modelos EL1 e EP1 como os dos modelos EL2, EL5, EP2 e EP5 podem ser comparados com os resultados do modelo VP1, dado que neste último o módulo de deformabilidade do material de sub-balastro é determinado em função do estado de tensão instalado em cada zona, de acordo com as leis constitutivas já apresentadas. Desse modo, não foi necessário desenvolver os modelos VP2 e VP5.

Da análise dos resultados dos modelos VPi é novamente evidente a influência da variação do módulo de deformabilidade do terreno natural na variação da tensão registada nas diversas camadas da via (Figura 4).

De modo semelhante ao verificado nos modelos EPi, com a alteração do módulo do leito de 40 para 80 MPa, registou-se uma redução da tensão vertical no topo do terreno natural, neste caso, cerca de 10%.

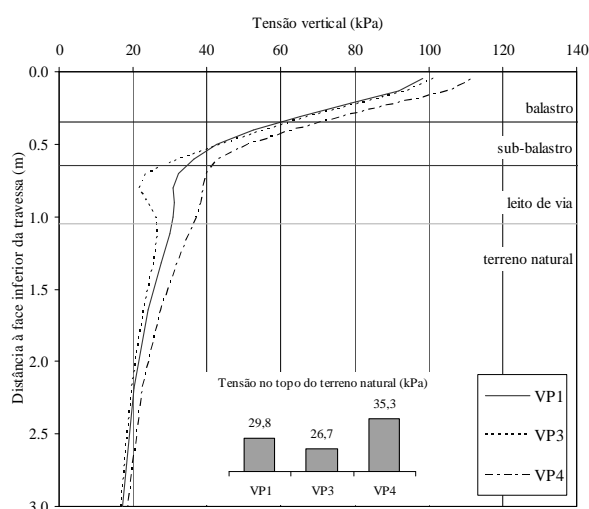


Figura 4. Tensão vertical em profundidade devido ao carregamento obtida nos modelos VPi.

3.4 Comparação das diferentes leis constitutivas utilizadas

Pela análise dos resultados anteriores, afigura-se que a consideração do comportamento elástico linear para algumas camadas de apoio se apresenta pouco adequada no âmbito da análise do comportamento da via.

A não consideração do critério de rotura na simulação do comportamento dos materiais das camadas superiores não é a abordagem mais adequada, uma vez que conduz a tensões horizontais de tracção que na realidade não são comportáveis por estes materiais. Esta capacidade dos modelos elásticos lineares reflecte-se numa maior capacidade de distribuição de tensões, que resulta em menores níveis de tensão e deslocamento vertical, assim como num aspecto mais suavizado da distribuição destas grandezas.

Comparando os resultados dos modelos EPi com os dos VPi, verifica-se uma redução dos valores máximos de tensão registados ao nível do balastro e sub-balastro. Contudo, constata-se que os valores de tensão registados em profundidade, por ambos os grupos de modelos, se aproximam razoavelmente. Esta observação é mais evidente na Figura 5, onde são apresentados os valores de tensão vertical no alinhamento do carril, obtidos nos modelos EL4, EP4 e VP4, ao nível do: a) balastro sob as travessas; b) topo do sub-balastro; c) topo do terreno natural.

Observa-se que a distribuição longitudinal de tensões verticais obtida sob as travessas apresenta algumas irregularidades que se devem à existência de uma transição brusca de rigidez entre o balastro e as travessas, concentrando tensões nos vértices destas.

Quanto às tensões calculadas no topo do sub-balastro, verifica-se que os modelos EPi apresentam uma distribuição algo irregular, provavelmente devidas às concentrações de tensões ao nível da camada de balastro.

De um modo geral, obteve-se, para as três situações de comportamento de materiais consideradas, uma repartição semelhante de cargas entre as travessas: aproximadamente 33% na travessa carregada; cerca de 22% nas segundas; 9% nas terceiras; menos de 2% nas seguintes.

Relativamente ao estudo dos deslocamentos destes modelos, verifica-se que são também condicionados pela rigidez vertical do terreno natural. Por exemplo, nos casos analisados em que se introduziu um aumento de rigidez do terreno natural de 25 MPa para 60 MPa, resultou num acréscimo de assentamento, ao nível da base das travessas, de mais de 60%, independentemente da variação introduzida nos módulos de deformabilidade das camadas superiores.

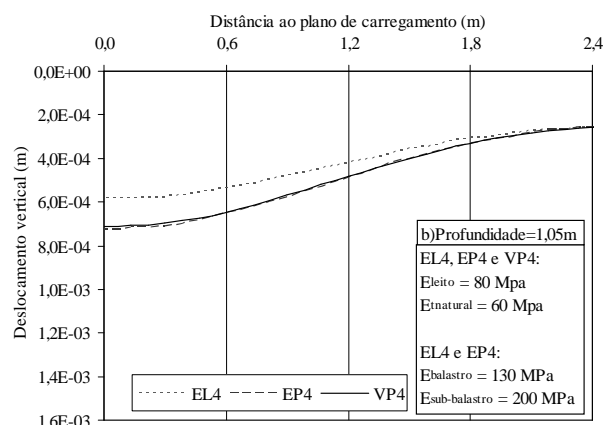
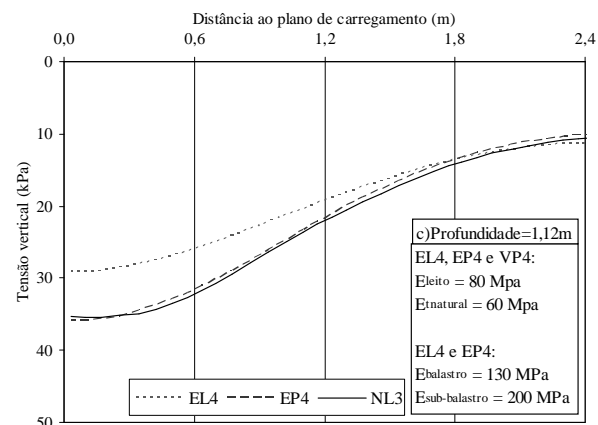
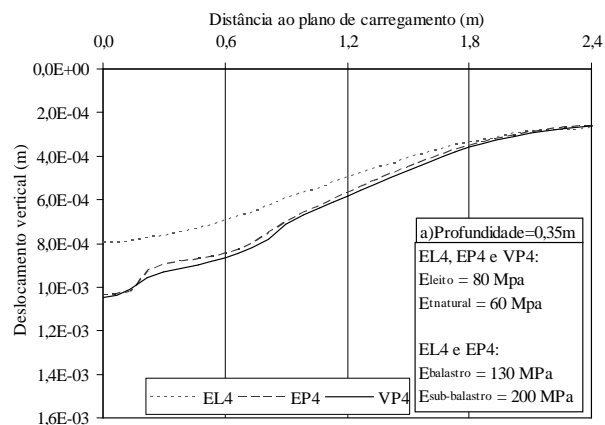
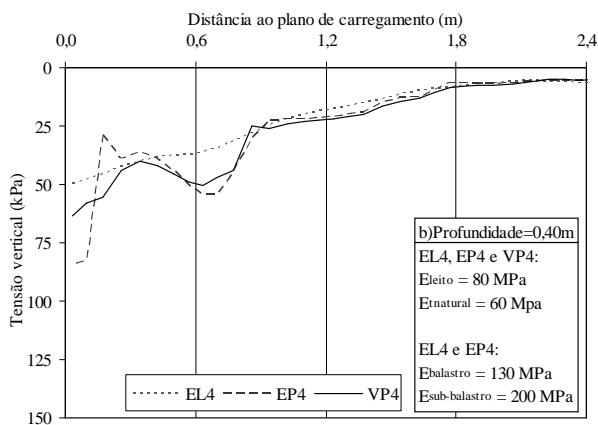
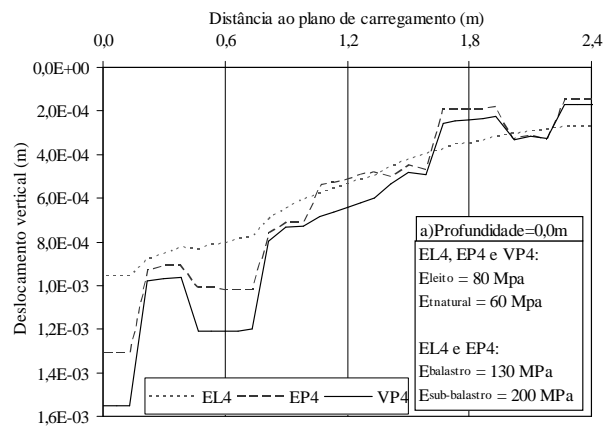
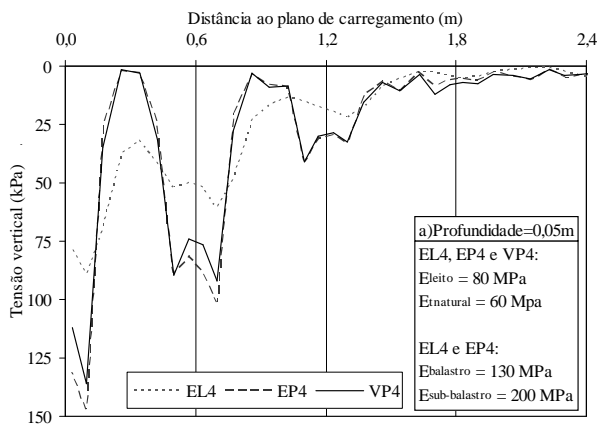


Figura 5. Tensão vertical obtida no alinhamento do carril com diferentes modelos de comportamento dos materiais: a) ao nível do balastro, sob as travessas; b) no topo do sub-balastro; c) no topo do terreno natural.

É de notar que os deslocamentos verticais obtidos neste tipo de análises são muito influenciados pela profundidade do domínio considerado no modelo. Por esse motivo, há que abordar com algum cuidado a comparação de diferentes modelos, no que se trata ao estudo dos deslocamentos verticais. Como foi referido inicialmente, para minimizar esse efeito adoptou-se uma profundidade constante para todos os modelos estudados.

Figura 6. Deslocamento vertical obtido no alinhamento do carril com diferentes modelos de comportamento dos materiais: a) ao nível do balastro, sob as travessas; b) no topo do sub-balastro; c) no topo do terreno natural.

Na Figura 6 observa-se que a consideração do comportamento elástico linear em todos os elementos da via conduz quase que a uma evolução linear do assentamento em função da distância ao plano do carregamento. Nos restantes modelos, verifica-se que existem deslocamentos relativos importantes entre as travessas e o material de balastro, como evidenciado na Figura 6(a). Apesar de os resultados dos modelos EPi se aproximarem dos modelos VPi, verifica-se, por

exemplo, em relação ao campo de deslocamentos, que podem surgir diferenças relativamente importantes: tome-se o deslocamento máximo obtido no balastro do modelo VP4, sob a face inferior da travessa. Este é cerca de 18% superior ao obtido no modelo EP4, enquanto ao nível do terreno natural a diferença registada entre os modelos é apenas cerca de 1%.

Relativamente aos modelos EPi, há que referir que, como se pôde constatar pelos resultados apresentados, constituem uma aproximação bastante satisfatória aos modelos mais complexos. Alguns estudos (Ministerio de Fomento, 1999) consideram aceitável, ao nível de projecto, a utilização deste tipo de comportamento para modelar alguns materiais.

No âmbito deste estudo foi proposta a utilização de modelos mais complexos no sentido de efectuar uma abordagem mais próxima do comportamento real dos materiais. Assim, apesar de os modelos EPi se apresentarem como boas aproximações, verificou-se, em algumas situações, que estes apresentavam valores sensivelmente distintos dos obtidos pelos modelos VPi. Como já foi referido, a consideração da rigidez variável dos materiais, em função do estado de tensão instalado, reproduz de um modo mais correcto a propagação tridimensional do carregamento em profundidade. Nesses modelos, a concentração de tensões numa determinada área conduz a um aumento de rigidez nessa mesma zona, o que, por sua vez, induz recursivamente um incremento da concentração de tensões. Em algumas situações, este comportamento pode resultar num encaminhamento de cargas distinto.

Assim, no âmbito do desenvolvimento dos estudos inicialmente propostos, reconheceu-se que seria mais adequada a consideração de um comportamento de rigidez variável para representar os materiais das camadas do balastro e do sub-balastro. Relativamente aos materiais do leito de via e do terreno natural considerou-se um comportamento idêntico ao utilizado nos modelos EPi.

3.3 Influência da espessura das camadas de sub-balastro e de leito de via

É fundamental assegurar que a fundação desempenhe um comportamento adequado durante a vida útil da infra-estrutura o que, em parte, pode ser acautelado pela limitação dos níveis de tensão transmitidos à sua superfície. Nos resultados anteriores, verificou-se que o comportamento da via é menos sensível à variação das características das camadas superiores, pois este é fortemente orientado pelas propriedades de deformabilidade do terreno natural. Para além dos parâmetros de rigidez das camadas superiores, existe um interesse acrescido na determinação das características geomé-

tricas mais adequadas a adoptar para essas camadas, no sentido de reduzir e distribuir as tensões transmitidas ao terreno natural. Para esse objectivo, tomou-se como referência o modelo VP4 apresentado anteriormente e desenvolveram-se novos modelos a fim de aferir qual a influência da variação da espessura das camadas de sub-balastro e de leito de via.

De modo a que fosse possível uma comparação directa de tensões e de deslocamentos entre os modelos, manteve-se constante e igual a 0,70 m a soma das espessuras das camadas de sub-balastro e de leito de via. Estudaram-se seis modelos com características muito semelhantes às do modelo VP4, que agora toma a designação VP4_S30L40, em que “S30” designa a espessura de 0,30 m do sub-balastro e “L40” a espessura de 0,40 m do leito de via. Este princípio de notação foi utilizado para identificar os restantes modelos.

Consideraram-se espessuras de 0,10 a 0,60 m para a camada de sub-balastro e, complementarmente, espessuras de 0,60 a 0,10 m para o leito de via. É de notar que as situações limite de espessura não tentam representar qualquer tipologia de via-férrea aplicável. Apenas foram consideradas para tornar mais evidente a influência da variação da grandeza em estudo.

A análise das tensões registadas nestes modelos permitiu observar a reduzida influência da variação das espessuras destas camadas, no que diz respeito às tensões obtidas na camada de balastro. Registo idêntico se obteve relativamente aos níveis de tensão verificados em profundidade, no terreno natural. Na Figura 7 apresenta-se, em maior pormenor, a variação da tensão registada em profundidade nas camadas de sub-balastro e de leito de via. Como nos diversos modelos o interface entre estas duas camadas se encontra a cotas distintas, na Figura 7 são identificados os pontos onde se efectua esta transição estrutural.

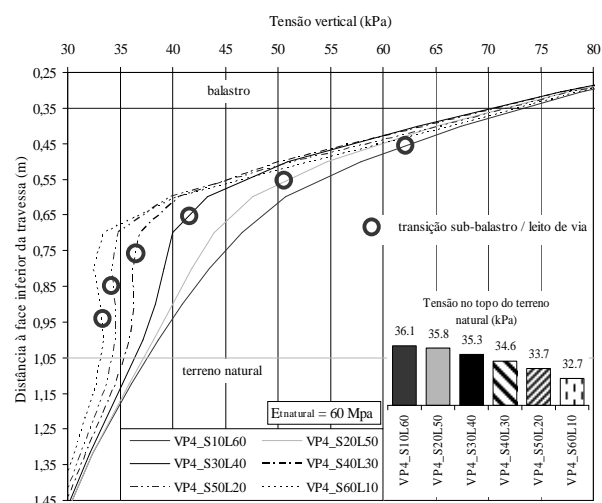


Figura 7. Tensão vertical obtida em profundidade devida ao carregamento.

Verifica-se que o incremento da espessura do sub-balastro, em detrimento da espessura do leito, conduz a uma redução das tensões no topo do terreno natural. Observa-se também pela Figura 7 que nos casos em que se utilizou uma espessura inferior de sub-balastro, a variação em alguns centímetros da sua espessura não resulta numa variação significativa das tensões no topo do terreno natural.

Relativamente aos deslocamentos, verificou-se que os 6 modelos usados apresentavam um comportamento semelhante, registando-se variações de deslocamentos verticais inferiores a 1%. Esta situação aponta mais uma vez para a forte influência que a deformabilidade da fundação tem no comportamento da via.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 para o estudo de diversas soluções estruturais. Estes modelos, alguns com leis de comportamento não-linear para os materiais granulares, permitiram conhecer melhor o comportamento estrutural da via e da sua fundação.

Atendendo aos resultados apresentados, pode concluir-se que a utilização de modelos elásticos lineares para representar o comportamento dos materiais das camadas superiores de apoio da via não é a mais adequada. A utilização de modelos de comportamento elástico linear perfeitamente plástico conduzem a resultados razoáveis. Contudo para se obter uma melhor aproximação da distribuição de tensões tridimensional apresenta-se mais adequada a implementação de modelos de comportamento de rigidez variável para os materiais das camadas superiores.

Os resultados obtidos permitiram verificar que a rigidez do terreno natural apresenta grande influência no que se refere às tensões verticais obtidas nas diversas camadas. A variação de espessura das camadas de sub-balastro e leito de via apresenta uma moderada influência naquelas tensões. Como seria de esperar, a substituição de um material por outro de maior rigidez, por exemplo, leito de via por sub-balastro, apresenta alguns benefícios ao nível da redução da tensão transmitida ao terreno natural.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do projecto I&D "PTDC/ECM/70571/2006 - Optimização de vias ferroviárias de alta velocidade mediante o uso de sub-balastro betuminoso" financiado pela FCT, do Minis-

tério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior Português.

REFERÊNCIAS

- Adegoke, C.; Chang, C.; Selig, E. (1979). *Study of analytical models for track support systems*. TRR 733;
- Aubry, D.; Baroni, A.; Clouteau, A.; Fodil, A.; Modarelli, A. (1999). *Modélisation du comportement du ballast en voie*. Proc. of XII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam. Balkema, pp. 1733-1736;
- Chang, C.; Adegoke, C.; Selig, E. (1980). *Geotrack model for railroad track performance*. Journal of the Geotechnical Eng., ASCE, Vol. 106, N. GT11;
- FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (2006). Itasca Consulting Group;
- Fortunato, E. (2005). *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Tese de Doutoramento. Universidade do Porto;
- Huang, Y.; Lin, C.; Deng, X.; Rose, J. (1984). *Ken-track: a computer program for hot-mix asphalt and conventional ballast railway trackbeds*. RR-84-1. Asphalt Institute, USA;
- Li, D.; Selig, E. T. (1998). *Method for railroad track foundation design. I: Development*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 4;
- Ministerio de Fomento (1999). *Recomendaciones para el proyecto de plataformas ferroviarias*. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes. Madrid;
- Office de Recherches et d'Essais de l'Union Internationale des Chemins de Fer (ORE). (1983). *Question D117. Rapport No. 27*;
- Prause, R.; Kennedy, J. (1977). *Parametric study of track response*. FRA-OR & D-77/75. U.S. Department of Transportation;
- Sanguino, M.; Requejo, P.; Urroz, E. (1998). *Cálculo de plataformas ferroviarias mediante el empleo de modelos matemáticos avanzados*. Congreso Nacional de Ing. Ferroviaria. Coruña, pp. 161-171;
- Sauvage, R.; Larible, G. (1982). *La modélisation par "éléments finis" des couches d'assise de la voie ferrée*. Revue Générale des Chemins de Fer, Sep.;
- Tarabji, S.; Thompson, M. (1976). *Finite Element Analysis of a Railway Track Support System, User's Manual*. Report No. FRA-OR & D-76-257, U.S. Department of Transportation.
- Williams, P.; Pérez, M. (1998) *Cálculo de plataformas ferroviarias mediante elementos finitos*. Congreso Nacional de Ing. Ferroviaria. Coruña.