

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO A CURTO E LONGO PRAZO DE UMA ZONA DE TRANSIÇÃO

Cristina Alves Ribeiro^{1*}, Rui Calçada² and Raimundo Delgado³

1: Construct, University of Porto – Faculty of Engineering
R. Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
ana.ribeiro@fe.up.pt

2: Construct, University of Porto – Faculty of Engineering
R. Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
ruiabc@fe.up.pt

3: Construct, University of Porto – Faculty of Engineering
R. Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
rdelgado@fe.up.pt

Palavras-chave: Modelação numérica; zona de transição; interação roda-carril; interação travessa-balastro; previsão do comportamento a longo prazo

Resumo. *Apresenta-se neste artigo a análise a curto e longo prazo do comportamento dinâmico de uma zona de transição. A zona de transição considerada neste estudo consiste numa variação de rigidez vertical da via motivada pela alteração brusca das características da fundação. Os estudos foram realizados para a passagem do comboio Eurostar a 350 km/h tendo-se considerado elementos de contacto nas interfaces roda-carril e nas interfaces base da travessa-topo da camada de balastro. A análise do comportamento a longo prazo da zona de transição foi realizada com base numa metodologia desenvolvida para simular numericamente a evolução do perfil deformado da via resultante da passagem do tráfego ferroviário. Com base num processo iterativo, que articula os programas ANSYS e MATLAB, a metodologia proposta permite considerar a deformação permanente dos materiais que constituem a via tendo por base leis de degradação que dependem do número de ciclos de carga e da tensão de desvio a que os materiais são sujeitos. Os resultados obtidos permitiram verificar que os efeitos dinâmicos de curto prazo, proporcionados apenas pela variação de rigidez vertical da via, são consideravelmente inferiores aos efeitos dinâmicos de longo prazo.*

1. INTRODUÇÃO

Vários estudos numéricos têm sido desenvolvidos com o intuito de avaliar os efeitos da variação de rigidez vertical da via, característica das zonas de transição, no comportamento dinâmico do sistema veículo-via.

No âmbito do projeto Europeu SUPERTRACK [1] foi analisada numericamente a variação

das forças de interação roda-carril quando o veículo experimenta uma transição brusca de rigidez global da via de 45 kN/mm para 90 kN/mm. Na passagem da zona rígida para a zona mais flexível da transição a força de interação roda-carril sofre um aumento que é seguido por uma redução brusca [2].

Varandas et al. [3] estudaram o comportamento dinâmico de uma zona de transição tendo por base um modelo unidimensional em que o carril apoia discretamente nas travessas, que por sua vez apoiam em conjuntos de molas e amortecedores com comportamento não-linear que simulam a camada de balastro, aterro e solo de fundação. Este modelo numérico permite a consideração do contacto roda-carril e avaliar eventuais perdas de contacto entre a base da travessa e o topo da camada de balastro. Tendo por base este modelo os autores procuraram reproduzir o comportamento de uma zona de transição de uma passagem inferior perto de Gouda, na Holanda, que apresentava problemas graves de assentamentos diferenciais junto à zona de transição.

Apesar dos efeitos dinâmicos induzidos pelas variações de rigidez, a degradação da geometria da via, com o aparecimento de assentamentos diferenciais, tem sido identificada como o principal problema das zonas de transição, conforme refere o relatório do ERRI [4], elaborado na sequência de questionários efetuados a várias entidades gestoras das infraestruturas ferroviárias europeias.

Desde a década de 80 do século XX diversos estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de avaliar, ainda que qualitativamente, a influência da variação da rigidez da via no desenvolvimento de assentamentos diferenciais e o efeito na evolução da degradação da via.

A passagem continuada de tráfego ferroviário em zonas onde ocorrem importantes variações de rigidez da via contribui para o aparecimento de assentamentos: o incremento das forças dinâmicas de interação roda-carril que ocorre nas zonas de transição, devido às variações de rigidez, traduz-se numa sobrecarga localizada da via. O carregamento não uniforme promove o aparecimento de assentamentos diferenciais que implicam a alteração da geometria da via. Surgem assim irregularidades que induzem excitação do veículo e consequente variação da carga dinâmica que, podendo ser ainda maior do que a induzida pela variação de rigidez [5], provoca o agravamento dos assentamentos.

A previsão da evolução do assentamento da via compreende por um lado o conhecimento do comportamento a longo prazo dos materiais que a constituem e por outro lado a consideração de modelos que traduzam de forma adequada o comportamento dinâmico da via.

O comportamento a longo prazo dos materiais que constituem a via é normalmente efetuado com base em leis de degradação, estabelecidas a partir de ensaios laboratoriais ou de campo [6,7], que visam descrever a resposta dos materiais quando submetidos a repetidos ciclos de tensão.

O estudo do comportamento a longo prazo de diferentes materiais quando submetidos a carregamento cíclico (principalmente em termos de resposta axial) é uma área bastante explorada. No entanto, a incorporação destes resultados em modelos completos da via é ainda um campo pouco estudado.

Bruni et al. [8] estudaram a evolução do assentamento permanente da via numa zona de transição recorrendo a um procedimento numérico que permite simular a evolução do assentamento da via devido à deformação permanente da camada de balastro. Tendo por base

uma lei de assentamento permanente da camada de balastro, que é função das forças nas travessas, estimaram o assentamento de cada travessa ao fim de determinado número de ciclos de carga que foi aplicado no modelo através de um cálculo estático. Obtiveram assim um novo perfil da via que serve de base à realização de nova análise dinâmica. Este procedimento é repetido consoante os ciclos de carga que se pretenda simular.

Os autores concluíram que o assentamento evolui com o número de ciclos de carga, verificando-se na zona de transição um incremento mais significativo do assentamento.

Procedimento semelhante de simulação do assentamento permanente foi também adotado por outros autores como Abdelkrim et al. [9], Fröhling [10], Hunt [11] e Ferreira [12].

A simulação da evolução do assentamento permanente da via com base neste procedimento é extremamente versátil podendo ser adotada independentemente do tipo de modelo e leis de assentamento consideradas. No entanto, a formulação das leis de assentamento deve estar de acordo com o tipo de modelo de via adotado.

A par com o aparecimento de assentamentos diferenciais na via identifica-se o aparecimento de travessas flutuantes, designação dada às travessas cujo contacto com a camada de balastro é reduzido ou inexistente em virtude do aparecimento de vazios entre a base da travessa e o topo da camada de balastro. Como as travessas se encontram ligadas ao carril, cuja resistência à flexão é muito elevada, a travessa recupera a sua posição após carregamento, não acompanhando a deformação da camada de apoio.

A presença destas travessas provoca amplificação importante das forças de interação dinâmicas veículo-via, conforme é comprovado no estudo de simulação numérica apresentado por Lundqvist e Dahlberg [13].

Tendo por base o caso de uma transição brusca de rigidez da via, motivada pela variação das características da fundação, pretende-se neste artigo compreender os efeitos dinâmicos induzidos pelo tráfego ferroviário numa zona de transição tendo em consideração o comportamento a curto e longo prazo.

No estudo do comportamento dinâmico de curto prazo da zona de transição da via discute-se a utilização de um modelo bidimensional em estado plano de tensão, desenvolvido no programa comercial ANSYS. Considera-se interação roda-carril e interação travessa-balastro, o que permitiu ter em consideração nos estudos de simulação, respetivamente, a variação das cargas dinâmicas da via e o aparecimento de vazios sob as travessas.

O estudo do comportamento a longo prazo da via apresentado tem por base uma metodologia numérica desenvolvida pelos autores que permite simular numericamente a evolução do assentamento permanente da via. Com base num processo iterativo, que articula os programas ANSYS e MATLAB, a metodologia proposta permite considerar no modelo numérico a deformação permanente dos materiais que constituem a via tendo por base leis de degradação que dependem do número de ciclos de carga e da tensão de desvio a que os materiais estão sujeitos.

Pretende-se com este trabalho compreender os efeitos de alguns problemas característicos das zonas de transição, como as variações de rigidez vertical e a variação das forças dinâmicas e da aceleração dos eixos do veículo, bem como investigar o comportamento a longo prazo destas zonas através da simulação da evolução da deformação permanente da via numa zona de transição.

2. MODELAÇÃO DO SISTEMA VIA-VEÍCULO

2.1. Descrição geral

A variação de rigidez vertical da via surge normalmente associada a alterações bruscas das características da fundação, como acontece por exemplo em zonas de transição entre via em aterro e via sobre uma estrutura.

Apresenta-se neste estudo uma variação de rigidez vertical da via motivada pela alteração brusca das características da fundação: solo 1 e solo 2.

Na Figura 1 apresenta-se o perfil longitudinal da via na zona de transição e um corte transversal na zona da via fundada em solo 1. A superestrutura da via é constituída por carris, palmilhas e travessas e a infraestrutura constituída por camadas de balastro e sub-balastro e dois solos de fundação que apresentam módulos de deformabilidade distintos. Considerou-se que o firme se encontra a 6,0 m de profundidade.

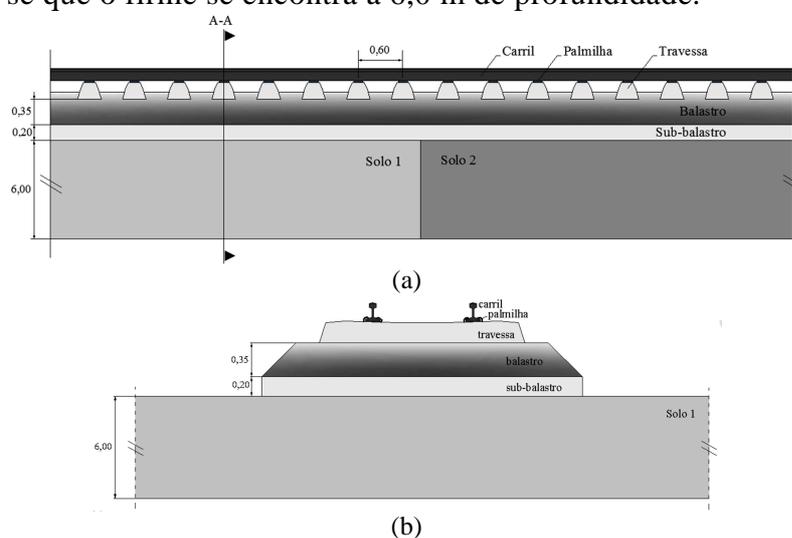


Figura 1 – Representação esquemática da transição: (a) perfil longitudinal da via junto à zona de transição e (b) corte transversal (A-A) na zona da via fundada em solo 1

As características mecânicas dos materiais adotadas encontram-se resumidas na Tabela 1. As características das camadas de balastro e sub-balastro são idênticas às referidas no documento UIC [14]. Consideram-se travessas pré-esforçadas de betão com espaçamento igual a 0,60 m. As palmilhas têm rigidez igual a 200×10^6 N/m e amortecimento 30×10^3 N.s/m.

Camadas da via	E (MPa)	ρ (kg/m ³)	ν (-)
Balastro	130	1530	0,20
Sub-balastro	120	1935	0,30
Solo de fundação 1	80	2040	0,30
Solo de fundação 2	1600	2040	0,30

Tabela 1 – Características adotadas para os constituintes da via

2.2. Modelação da via

Para a simulação do comportamento dinâmico deste caso de estudo desenvolveu-se um modelo bidimensional (2D) de elementos finitos que foi calibrado de formas estática e dinâmica recorrendo a um modelo 3D. No sentido de validar o modelo 2D adotado foi realizada uma comparação exaustiva dos diferentes resultados obtidos nos dois modelos, o qual pode ser consultado com detalhe na tese de Alves Ribeiro [15].

No modelo bidimensional em estado plano de tensão, desenvolvido no programa comercial ANSYS, as travessas e a infraestrutura da via são modeladas com recurso a elementos de 4 nós em estado plano de tensão, sendo as palmilhas e o carril modelados com conjuntos mola-amortecedor e elementos de viga, respetivamente [16].

A secção plana considerada equivale a uma via completa, pelo que os elementos de viga têm as propriedades de dois carris, as travessas massa igual a 315 kg e os conjuntos mola-amortecedor colocados entre o carril e a travessas correspondem a duas palmilhas. De referir ainda que as palmilhas se encontram distribuídas ao longo da largura do topo da travessa. Este modelo apresenta uma extensão total de 72,3 m.

Apresenta-se na Figura 2 um pormenor do modelo de elementos finitos onde é possível visualizar a discretização dos diferentes constituintes da via.

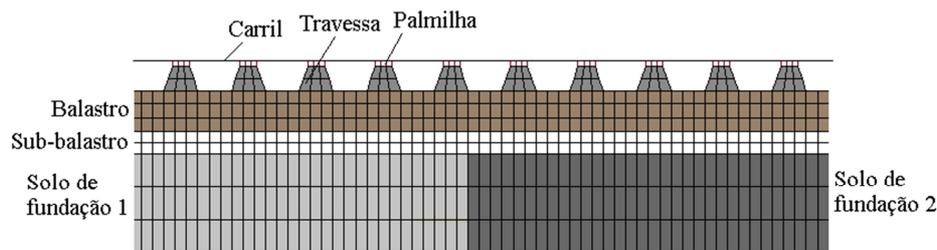


Figura 2 – Modelo de elementos finitos da via junto à zona de transição

Este modelo está também preparado para considerar o contacto entre a base das travessas e o topo da camada de balastro através da colocação de elementos de contacto entre os nós da travessa e a superfície da camada de balastro.

Os elementos em estado plano de tensão adotados para a modelação permitem definir espessura no plano perpendicular ao modelo, que constituiu o parâmetro de calibração e que foi determinado recorrendo ao modelo tridimensional.

A calibração estática é complementada por uma calibração dinâmica que permite encontrar os parâmetros de amortecimento do modelo bidimensional. A determinação destes parâmetros foi efetuada com base na aproximação da curva de receptância do modelo bidimensional à obtida no modelo tridimensional. Após esta calibração é possível obter uma boa concordância na resposta dinâmica conforme evidencia a comparação das curvas de receptância dos dois modelos apresentada na Figura 3.

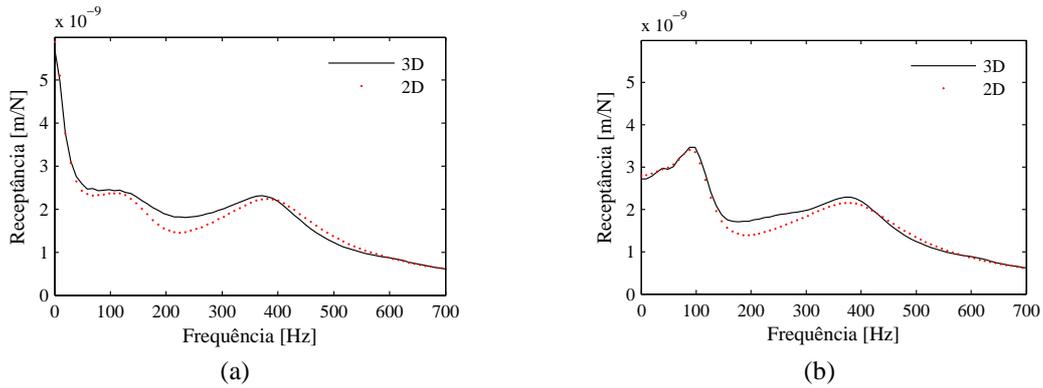


Figura 3 - Comparação das curvas de receptância do carril na via fundada (a) em solo 1 e (b) em solo 2 obtidas nos modelos 3D e 2D após calibração dinâmica

Para evitar reflexões foram consideradas condições de não-reflexão nas fronteiras do modelo estabelecidas de acordo com o preconizado em White et al. [17] para o caso de propagação num domínio isotrópico bidimensional adaptado para o caso de estado plano de tensão. Os valores calculados são atribuídos aos elementos amortecedores colocados nas direções normal e tangencial à fronteira.

2.3. Modelação do veículo e da interação veículo-via

A incorporação da interação roda-carril nas análises dinâmicas implica que, além do modelo de via, se considere também o veículo. Para as simulações dinâmicas efetuadas neste capítulo, adotou-se um bogie do comboio Eurostar.

Relativamente à modelação considera-se que: o bogie é modelado por intermédio de vigas muito rígidas com massa distribuída (M_b), a suspensão primária com recurso a conjuntos mola-amortecedor (K_p, c_p) e a roda como uma massa concentrada (M_e).

Uma vez que o contacto roda-carril é do tipo ponto-linha, foi considerada uma mola entre a massa concentrada e o carril, com rigidez (K_h) determinada de acordo com a teoria de Hertz, que permite ter em consideração a deformabilidade dos dois corpos em contacto.

Apresenta-se na Figura 4 o modelo dinâmico de um bogie do veículo e um pormenor do contacto roda-carril no modelo de elementos finitos.

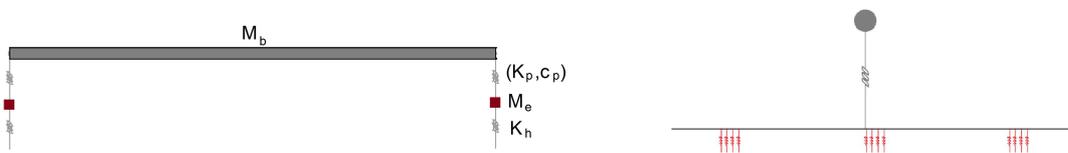


Figura 4 – Modelo dinâmico do veículo e da interação roda-carril

Resumem-se na Tabela 2 os diferentes componentes considerados no modelo do veículo bem como o valor adotado nos estudos de simulação realizados.

Componente	Designação	Valor adotado
Bogies	Mb	2200 kg
Suspensão primária	Kp	$2,60 \times 10^6$ N/m
	cp	$1,20 \times 10^4$ N/m
Rodas/Eixos	Me	1700 kg
Deformabilidade roda-carril	Kh	$1,35 \times 10^9$ N/m

Tabela2 – Componentes e características da locomotiva do comboio Eurostar

Relativamente ao cálculo da interação roda-carril foi considerado um contacto do tipo ponto-linha considerando algoritmos de contacto disponíveis no programa ANSYS e recorrendo ao método da penalidade.

3. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO A CURTO PRAZO

Com o estudo apresentado nesta secção pretende-se, por um lado, compreender o comportamento dinâmico induzido por uma variação de rigidez da via e, por outro lado, comparar os resultados obtidos no modelo 2D com o modelo 3D.

A análise dinâmica foi realizada no programa ANSYS recorrendo a métodos implícitos de integração tendo-se adotado um intervalo de tempo igual a 0,001 s.

3.1. Resultados

Apresentam-se alguns resultados da análise dinâmica admitindo que o veículo se desloca da zona da via fundada no solo mais flexível, o solo 1, para a zona fundada em solo mais rígido, o solo 2, à velocidade de 350 km/h.

O deslocamento dinâmico experimentado pela primeira roda do veículo na passagem pela zona de transição constitui uma medida da variação de rigidez da via. Conforme se pode observar na Figura 5 (a) o deslocamento vertical varia entre 1,0 mm na zona mais flexível e 0,5 mm na zona mais rígida. A linha vertical a traço interrompido representada na figura assinala a transição entre os dois solos de fundação. Apresentam-se os resultados obtidos com o modelo tridimensional (3D) e o modelo bidimensional em estado plano de tensão 2D.

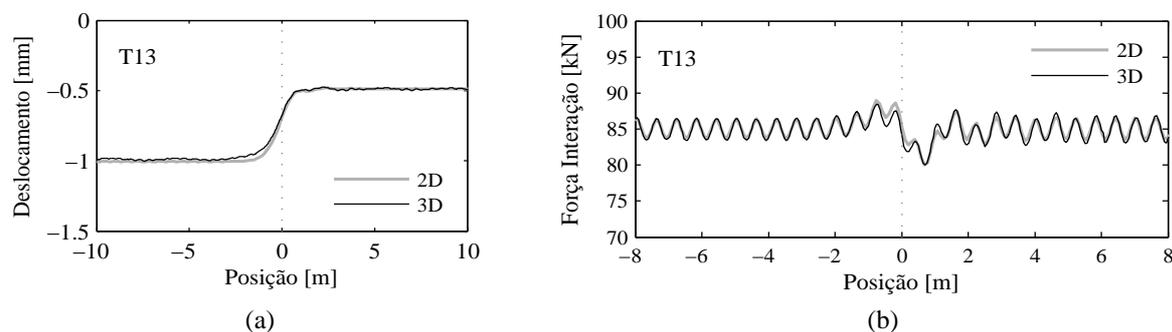


Figura 5 - Comparação entre os resultados obtidos nos modelos 3D e 2D: (a) deslocamento vertical da roda e (b) força de interação roda-carril

Apresenta-se na Figura 5 (b) a variação da força de interação roda-carril. Verifica-se que ocorre um incremento da força imediatamente antes da zona de transição que é seguido de uma redução da força já na zona mais rígida da via.

A variação dos resultados obtidos com o modelo tridimensional é muito semelhante à obtida com o modelo bidimensional em estado plano de tensão. Com o intuito de confirmar esta proximidade, foram efetuados mais testes e comparação de resultados entre os dois modelos [15]. Na Figura 6 apresentam-se os valores máximos da tensão vertical de compressão obtida nos elementos finitos localizados no topo das camadas de sub-balastro de uma secção do modelo na zona flexível da via ($E=80$ MPa) e uma secção na zona rígida da via ($E=1600$ MPa). No modelo tridimensional a análise é efetuada para 11 elementos finitos da secção transversal do modelo, conforme representado também na figura. Os valores obtidos no elemento finito do topo da camada no modelo bidimensional, localizado na mesma secção de análise, encontram-se representados a traço interrompido.

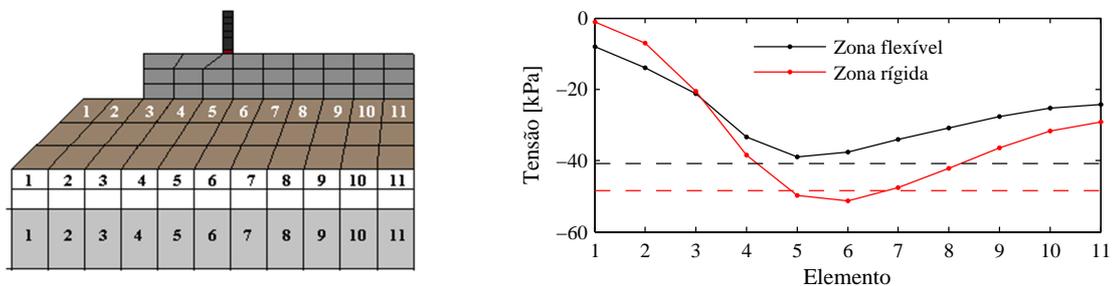


Figura 6 - Tensão vertical máxima de compressão obtida nos modelos 2D e 3D ao longo de uma secção transversal da via na zona rígida e na zona flexível no topo da camada de sub-balastro

Conforme se pode verificar os valores da tensão vertical obtidos no modelo bidimensional aproximam-se dos verificados no modelo tridimensional entre os elementos 5 e 6, alinhados com a base do carril. Verifica-se ainda que as tensões são superiores na zona rígida da via.

4. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO A LONGO PRAZO

Fenómenos de deformação acelerada da via surgem normalmente associados às zonas de transição, onde são frequentemente identificados problemas como o assentamento diferencial da via, aparecimento de travessas flutuantes, travessas partidas e degradação do material da camada de balastro. A variação de rigidez que ocorre nestas zonas da via é identificada como a causa do problema, mas a forma como a deformação evolui e a sua relação com essa variação de rigidez da via é ainda um campo de investigação pouco explorado.

Apresenta-se nesta secção uma metodologia para simular o comportamento a longo prazo da zona de transição brusca de rigidez apresentada anteriormente. Pretende-se com esta metodologia compreender a génese de alguns problemas característicos das zonas de transição, como o aparecimento de assentamentos diferenciais e de travessas flutuantes.

O estudo será feito com recurso ao modelo de elementos finitos bidimensional que, mediante os resultados da análise dinâmica apresentados anteriormente, constitui uma boa alternativa

ao modelo tridimensional. Este modelo permite conhecer com rigor o estado de tensão dos elementos finitos das camadas da via, o que constitui um dos requisitos base da metodologia proposta.

Para esta aplicação efetuaram-se algumas considerações que importa referir:

- i) A via encontra-se em perfeitas condições, não existindo nenhum defeito geométrico;
- ii) Assume-se que os eixos circulam a 350 km/h;
- iii) Considera-se que o veículo se desloca da zona flexível para a zona rígida da via;
- iv) Considera-se apenas a deformação permanente devida ao incremento de tensão provocado pela passagem dos eixos;
- v) As características de amortecimento e de rigidez dos materiais não são atualizadas com a evolução da deformação permanente da via;

4.1. Metodologia

O método de simulação do assentamento permanente da via proposto consiste num processo iterativo implementado que envolve a articulação entre o programa ANSYS e o programa MATLAB, de acordo com o esquema apresentado na Figura 7.

No programa ANSYS é efetuada a modelação numérica do veículo e da via e todo o processo de pré e pós-processamento dos resultados, e no programa MATLAB efetua-se a leitura dos resultados da análise dinâmica e a determinação da deformação permanente com base nas leis de deformação consideradas.

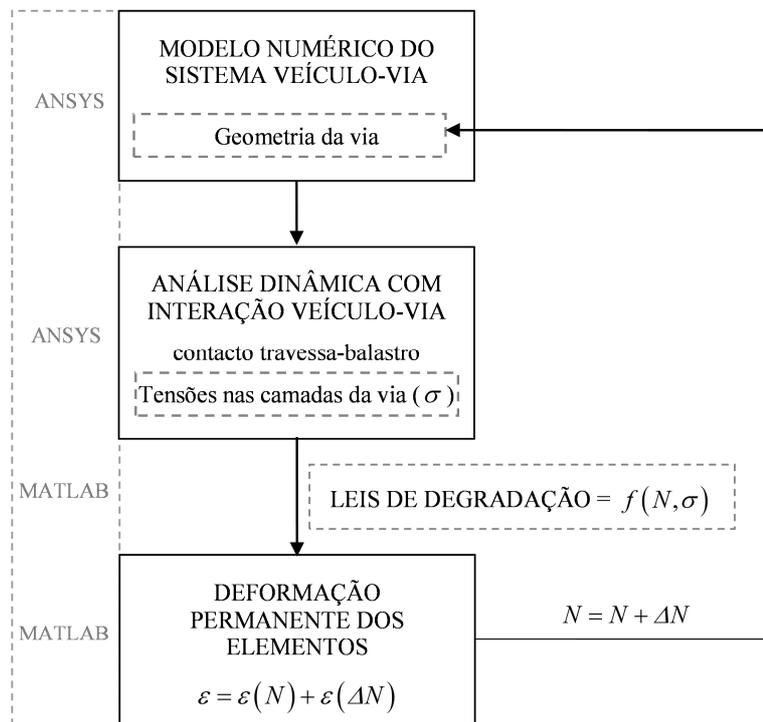


Figura 7 - Representação esquemática do processo de simulação da deformação permanente da via

A passagem do veículo provoca nas camadas da via um campo de tensões multidirecional, que estão na base do cálculo do assentamento permanente neste método.

Após a análise dinâmica retiram-se as tensões (verticais, horizontais e de corte) de todos os elementos finitos das diferentes camadas da via que se consideram contribuir para a deformação permanente. O registo temporal das tensões em cada camada da via (camada horizontal de elementos finitos) é armazenado numa matriz cuja dimensão depende do intervalo de tempo da análise e do número de elementos finitos da camada (são formadas tantas matrizes quantas as camadas de elementos finitos consideradas). Com as tensões retiradas determina-se a evolução das tensões principais ao longo do tempo para cada elemento finito, sendo os valores máximos das tensões principais armazenados sob a forma de vetores que servem de base para o cálculo das deformações permanentes através de leis de deformação dos materiais.

A deformação permanente da via induzida pela passagem de apenas um eixo provoca uma deformação muito pequena pelo que este processo não é efetuado ciclo a ciclo mas em incrementos correspondentes a um conjunto de ciclos (ΔN), assumindo-se que nesse conjunto de ciclos o estado de tensão a que os materiais estão sujeitos se mantém constante.

A determinação da deformação permanente a aplicar aos elementos finitos é efetuada em MATLAB, com base nas leis de deformação adotadas. Ainda neste programa são escritos os ficheiros que servirão para, no programa ANSYS, aplicar as deformações permanentes a cada elemento finito, promovendo a atualização da geometria da via.

Depois de cada análise dinâmica avaliam-se os efeitos da nova geometria da via no comportamento dinâmico da zona de transição, analisando-se assim o efeito conjunto da variação de rigidez e do assentamento provocado pela passagem de tráfego ferroviário após a passagem de determinado número de eixos.

Resumem-se agora algumas considerações e simplificações relativamente ao método proposto para a simulação do assentamento permanente da via:

- i) Considera-se em todas as análises dinâmicas a interação veículo-via;
- ii) Assume-se que para cada conjunto de ciclos estipulados como incrementos do processo iterativo, as tensões nos elementos finitos se mantêm constantes;
- iii) A determinação da deformação permanente efetua-se elemento a elemento;
- iv) Apenas se considera deformação permanente segundo a direção vertical;

4.2. Leis de deformação dos materiais

Para o método de simulação implementado selecionaram-se as leis de deformação dos materiais que permitem considerar simultaneamente as duas componentes essenciais do processo de deformação permanente: o estado de tensão experimentado pelos materiais e o número de ciclos de carga a que estão sujeitos. Assim de entre as leis analisadas considerou-se para os materiais de balastro a lei de deformação apresentada pela ORE [6] que é dada por:

$$\varepsilon_N = \varepsilon_1(1 + C \log(N)) \quad (1)$$

onde ε_N corresponde à deformação permanente do balastro após N ciclos de carga, C é uma constante tomado igual a 0,20 e ε_1 a deformação permanente experimentada no primeiro ciclo

de carga e é dada por:

$$\varepsilon_1 = 0.082(100n_p - 38.2)(\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad (2)$$

onde $(\sigma_1 - \sigma_3)$ é a tensão de desvio a que o material está sujeito e n_p a porosidade da camada de balastro que é função do grau de compactação inicial e do tipo de balastro. Admitindo que a camada de balastro se encontra bem compactada considerou-se a porosidade igual a 0,40, que é o valor mínimo do intervalo de variação proposto para este parâmetro [6,7].

A deformação permanente da camada de balastro pode ser dividida em duas fases, sendo a primeira fase caracterizada por um grande incremento de deformação permanente que é normalmente associada à estabilização inicial da camada de balastro e a segunda fase característica da evolução da deformação permanente da via com a passagem do tráfego ferroviário. Estudos efetuados por Ionescu [18] indicam que o período inicial de estabilização de carregamento corresponde a cerca de 1×10^5 ciclos de carga que foi o valor considerado para a primeira fase deste estudo (N_i). Assim, a lei que traduz a evolução da deformação da camada de balastro passa a ser dada por:

$$\varepsilon_N = \varepsilon_1 \left(C \log \left(\frac{N + N_i}{N_i} \right) \right) \quad (3)$$

Relativamente à evolução da deformação nas restantes camadas da via é adotada a lei de deformação de materiais granulares apresentada nos trabalhos de Gidel et al. [19]:

$$\varepsilon_N = f(N) \cdot g(p_{\max}, q_{\max}) \quad (4)$$

A função f depende do número de ciclos de carga, N (em que $N > 100$) e a função g depende das tensões máximas experimentadas pelo material. Esta lei foi implementada de forma a possibilitar a consideração de quatro tipos de materiais diferentes: material granular Soreze, material granular Poulmarch, agregado granítico ou agregado calcário.

De entre as opções disponíveis selecionou-se para a camada de sub-balastro um agregado calcário idêntico ao ensaiado por Fortunato [20] e para o solo de fundação 1 o material com características idênticas ao material granular ensaiado por Gidel et al. [19] e designado por Poulmarch. Os parâmetros a considerar para as leis de deformação destas camadas encontram-se resumidos na Tabela 3.

Camada da via		Solo de fundação 1	Sub-balastro
Material		Poulmarch UGM	Agregado Calcário
Parâmetros	s (kPa)	42,8	20,981
	m	3,8	3,324
	n	0,588	0,496
	B	0,03	0,17
	$\varepsilon_1 (\times 10^{-4})$	195,2	14,119

Tabela 3 - Parâmetros da lei de deformação para os materiais das camadas de sub-balastro e fundação da via

Conforme referido anteriormente, admite-se que durante determinado número de ciclos (ΔN)

o estado de tensão nos elementos se mantém constante. No entanto, e uma vez que este varia, ao fim de cada conjunto de ΔN ciclos faz-se a avaliação do estado de tensão dos elementos. Com este procedimento, obtém-se para um mesmo momento valores de deformação permanente diferentes que correspondem a estados de tensão diferentes, sendo portanto necessário efetuar a transição entre os estados de tensão. Na metodologia aqui proposta a transição entre estados de tensão decorre de acordo com o preconizado nos trabalhos de Ford [21].

4.3. Resultados

A avaliação do nível de tensão nos elementos finitos para a passagem dos eixos constitui a base do método de evolução da deformação permanente que agora se aplica. Na Figura 8 apresenta-se a primeira avaliação da evolução da tensão de desvio do processo de deformação da via, determinada com base nas tensões principais, no topo das camadas de balastro, sub-balastro e solo de fundação 1. A posição 0 m corresponde à zona de transição entre os dois solos de fundação e cada ponto do registo ao valor obtido num elemento finito localizado no alinhamento vertical de uma travessa.

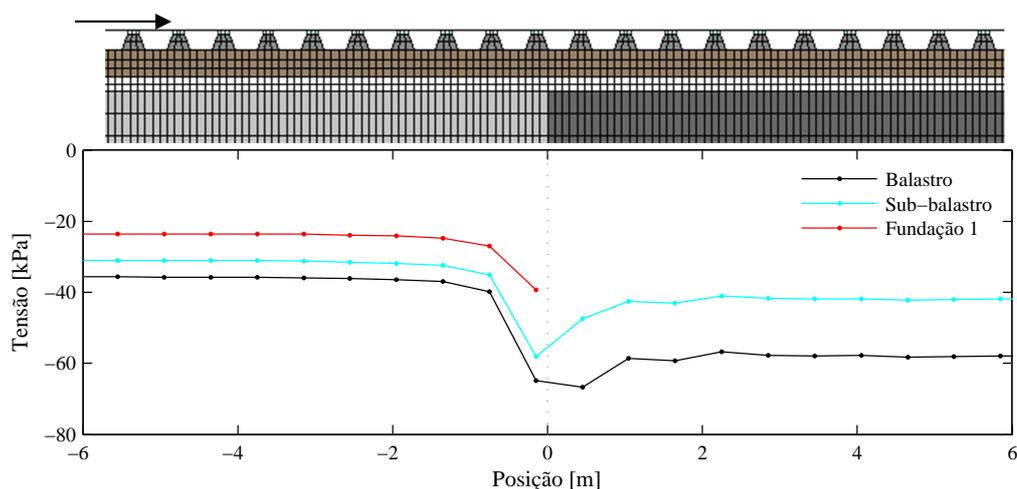


Figura 8 - Evolução da tensão de desvio no topo das camadas de balastro, sub-balastro e fundação da via ao longo da zona de transição

A tensão é mais elevada na camada de balastro, reduzindo-se em profundidade. Verifica-se que na passagem pela zona de transição ocorre um aumento da tensão de desvio (em módulo) em todas as camadas, que se deve por um lado ao aumento da tensão principal máxima e por outro lado à redução da tensão principal mínima.

Considerou-se neste estudo apenas deformação da fundação da via até 3 m de profundidade, uma vez que a este nível a tensão de desvio é já muito baixa.

A deformação permanente das camadas da via ao fim de determinado número de ciclos é função do nível de tensão verificado e das leis de deformação adotadas. Assim, a deformação evolui de forma diferente nas diferentes camadas da via, variando também ao longo da zona

de transição.

Representa-se na Figura 9 a deformação permanente ao fim de 100000 ciclos de carga nos elementos do topo das camadas de balastro, sub-balastro e fundação da via ao longo da zona de transição. De referir que cada ponto do registo corresponde ao valor obtido no topo das camadas no alinhamento vertical de uma travessa.

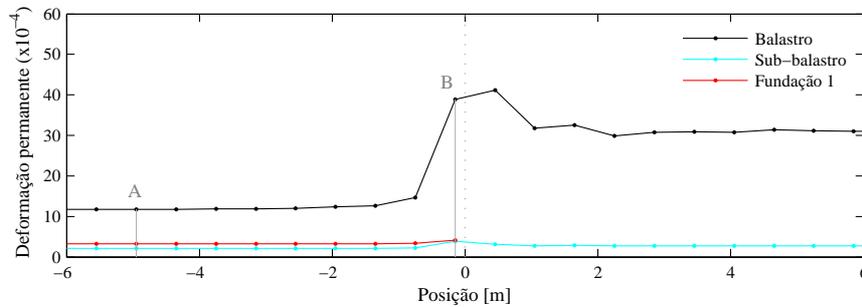


Figura 9 - Deformação permanente ao fim de 100000 ciclos de carga no topo das camadas de balastro, sub-balastro e fundação da via ao longo da zona de transição

Esta deformação permanente corresponde a 100000 ciclos de carregamento, ao fim dos quais se efetua nova análise dinâmica e reavaliação do estado de tensão dos elementos finitos.

Considerando sempre um incremento do número de ciclos constante e igual a 100000 efetuou-se a simulação do comportamento a longo prazo da via até serem atingidos os valores limites da aceleração vertical do eixo do veículo referidos na bibliografia.

Apresenta-se na Figura 10, a título de exemplo, a evolução da deformação permanente num elemento da camada de balastro junto à zona de transição (assinalado a vermelho na malha apresentada na figura) que foi avaliada a cada 100000 ciclos de carga de acordo com a metodologia de transição entre níveis de tensão implementada. Verifica-se que apesar da deformação não crescer da mesma forma ao longo dos ciclos de carga, a tendência global é semelhante, verificando-se ainda que o incremento de deformação decresce com o aumento do número de ciclos de carregamento.

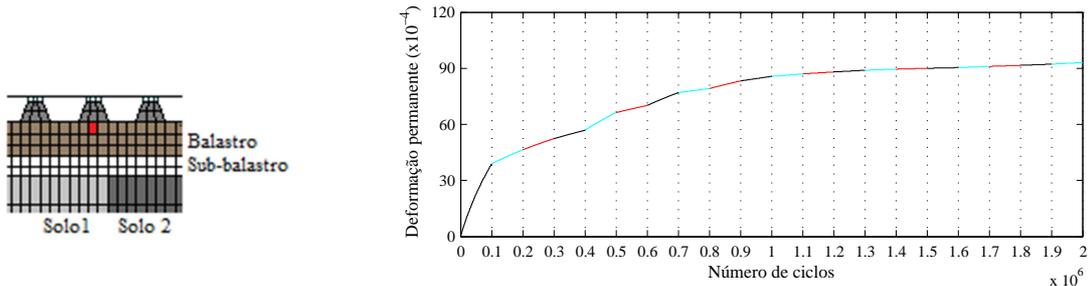


Figura 10 - Evolução da deformação permanente com o número de ciclos de carga num elemento finito do topo da camada de balastro junto à transição (assinalado na malha)

Ao fim de cada incremento de ciclos efetua-se uma análise dinâmica que permite, por um

lado, avaliar o nível de tensão que servirá de base à determinação da deformação permanente a aplicar ao modelo na próxima iteração e, por outro lado, analisar a evolução de algumas grandezas como a deformação máxima da via, a aceleração do eixo do veículo e as forças dinâmicas de interação roda-carril.

Analizam-se agora os resultados relativos às análises dinâmicas efetuadas ao longo do processo de simulação do comportamento a longo prazo da via.

A acumulação de deformação permanente com o número de ciclos de carga provoca alteração progressiva no perfil longitudinal da via. Para ilustrar este efeito apresenta-se na Figura 11 a evolução do assentamento do topo da camada de balastro e da base da travessa ao longo da zona de transição com o aumento do número de ciclos de carga, quando a via se encontra descarregada. Cada ponto do registo corresponde à média dos valores do assentamento obtidos nos nós situados no alinhamento de uma travessa (4 nós neste caso).

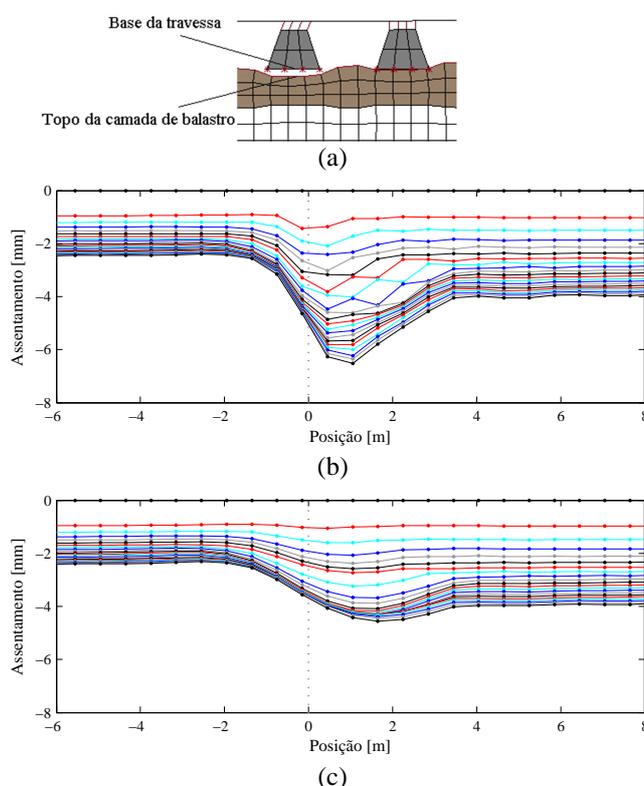


Figura 11 –(a) Pormenor da malha deformada junto à zona de transição e evolução do assentamento em função do número de ciclos de carga ao longo da zona de transição: (b) no topo da camada de balastro e (c) na base das travessas

A análise dos resultados apresentados permite retirar algumas conclusões importantes sobre a evolução da deformação permanente da via:

- i) Ocorre um aumento mais acentuado da deformação permanente na zona de transição;
- ii) O defeito gerado na transição tende a aumentar afetando cada vez mais travessas em torno desta zona, alastrando principalmente para a zona mais rígida da via;

- iii) Na plena via (via flexível e via rígida) a taxa de evolução da deformação permanente reduz-se com o aumento do número dos ciclos de carga, tendência que se verifica na zona de transição apenas para os últimos ciclos de carregamento efetuados;
- iv) A deformação permanente é mais elevada na zona rígida do que na zona flexível da via;

A deformação máxima da via ocorre na transição e é igual a 6,5 mm, sendo a deformação máxima relativa verificada sensivelmente igual a 4 mm.

Da análise destes resultados verifica-se que na zona de transição, a partir de certo momento, o assentamento do topo da camada de balastro é maior do que o verificado na base das travessas, o que se traduz na formação de vazios sob as travessas. De referir que apenas se consegue analisar este fenómeno porque se considerou no modelo o contacto entre a base da travessa e o topo da camada de balastro.

Na Figura 12 ilustra-se a situação inicial em que as travessas assentam perfeitamente sobre a camada de balastro e o perfil deformado após 500000 ciclos de carga quando se verifica a formação de vazios em três travessas da zona de transição.

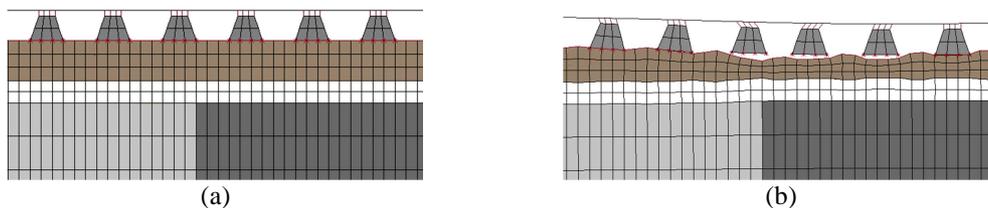


Figura 12 - Representação esquemática da posição relativa da base da travessa e do topo da camada de balastro (a) na situação inicial e (b) na via deformada ao fim de 500000 ciclos de carga

No gráfico da Figura 13 apresenta-se a distribuição dos vazios ao longo da zona de transição em função do número de ciclos de carga considerados, representando-se também a situação inicial, quando ainda não ocorreu nenhuma deformação da via.

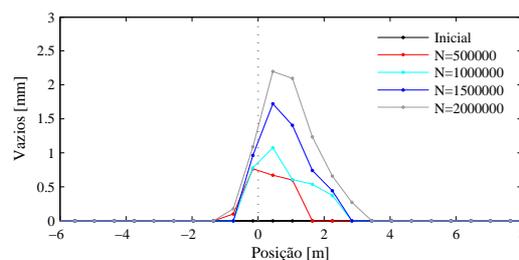


Figura 13 - Evolução dos vazios ao longo da zona de transição em função do número de ciclos de carga

Verifica-se que ao fim de 500000 ciclos de carga ocorre um vazio de 0,77 mm sob a travessa localizada imediatamente antes da zona de transição. Ao fim de 2 milhões de ciclos verifica-se um vazio máximo de 2,2 mm que ocorre agora na travessa imediatamente depois da zona de transição. Verifica-se que, estando inicialmente concentrados nas travessas da transição, os vazios tendem a propagar para as travessas vizinhas à medida que o número de ciclos de carga

aumenta. Esta tendência está de acordo com a evolução do assentamento do topo da camada de balastro e da base da travessa analisados anteriormente.

Verifica-se ainda que, com o aumento do número de ciclos de carga a aceleração vertical máxima das travessas aumenta consideravelmente nas travessas localizadas na zona de transição. Comparando estes resultados com a evolução de vazios na via é possível verificar que o maior aumento da aceleração vertical ocorre nas travessas que se encontram flutuantes. Apresenta-se na Figura 14 (a) a variação do deslocamento vertical da roda ao longo da zona de transição e em função do número de ciclos de carga e na Figura 14 (b) apresenta-se a variação da força de interação roda-carril em função do número de ciclos de carga.

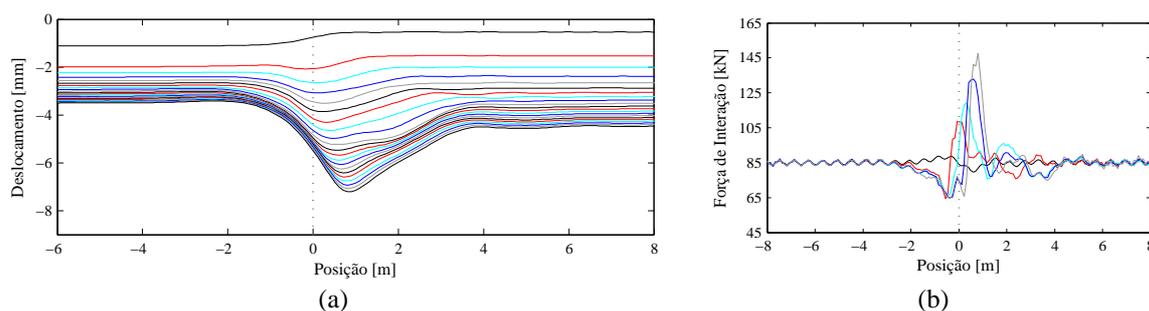


Figura 14 – (a) Deslocamento vertical dinâmico da roda ao longo da zona de transição e (b) força de interação roda-carril em função do número de ciclos de carga (até 2 milhões de ciclos)

O deslocamento vertical da roda sobre a via deformada conjuga a curva inicial de deslocamento não deformada com o perfil de assentamento da camada de balastro, uma vez que à passagem da roda os vazios existentes sob as travessas fecham e o veículo experimenta a deformação total da via. Verifica-se que ao fim de 2 milhões a componente dinâmica da força de interação é cerca de 16 vezes superior ao valor verificado inicialmente o que corresponde a uma amplificação de 73,6% face ao valor da componente estática da carga.

A variação da força dinâmica de interação acompanha a variação da aceleração vertical do eixo do veículo, apresentada na Figura 15, que constitui um indicador normalmente adotado para avaliar o desempenho da via.

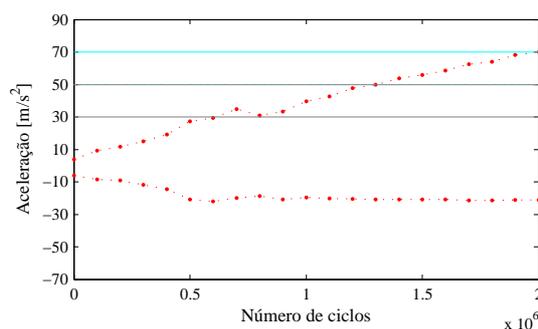


Figura 15 - Valores máximos e mínimos da aceleração do eixo em função do número de ciclos de carga

As linhas horizontais também representadas correspondem aos limites adotados na linha

Madrid-Sevilha, estabelecidos com base na experiência da SNCF.

Conforme se pode observar a partir de 600000 ciclos de carga são excedidos os 30 m/s² de aceleração vertical do eixo do veículo, sendo que ao fim de 2 milhões de ciclos se atinge o nível máximo que impõe correção imediata da via.

5. CONCLUSÕES

Tendo por base o estudo de uma transição brusca de rigidez da fundação da via apresentaram-se diferentes aspetos relativos à simulação do comportamento dinâmico a curto e longo prazo. Com base nos resultados da análise dinâmica com interação veículo-via foi possível concluir que ocorrem na zona da transição alguns efeitos importantes como a variação da força de interação roda-carril e do deslocamento vertical da roda.

No entanto, os efeitos dinâmicos obtidos numa zona de transição brusca de rigidez considerando a deformação permanente da via são consideravelmente superiores aos obtidos quando apenas se considera a variação de rigidez. Por exemplo, verificou-se neste caso de estudo que ao fim de 2 milhões de ciclos de carga a componente dinâmica da força de interação é cerca de 16 vezes superior ao valor verificado inicialmente, quando apenas se considera a variação de rigidez, o que corresponde a uma amplificação de 73,6% relativamente ao valor da componente estática da carga.

A metodologia desenvolvida para a simulação da evolução da deformação permanente da via permite ter em conta as diferentes características dos vários materiais que constituem a via, podendo ser facilmente aplicada a outros estudos de zonas de transição ou mesmo de plena via. As leis de evolução da deformação permanente dos materiais deverão ser função do número de ciclos de carga aplicados e do estado de tensão.

Face às conclusões retiradas sobre a evolução da deformação permanente é possível concluir que as soluções de mitigação a aplicar nas zonas de transição com vista a melhorar o seu desempenho a longo prazo devem essencialmente propiciar uma melhor distribuição das tensões pelas diferentes travessas. Assim, por exemplo, a colocação de palmilhas flexíveis sob os carris, de palmilhas sob as travessas ou de mantas sob a camada de balastro, poderão ser soluções interessantes a explorar.

REFERÊNCIAS

- [1] SUPERTRACK - Numerical simulation of train-track dynamics, 2005. Linköping University. Linköping, Sweden.
- [2] Lundqvist, A.; Larsson, R. and Dahlberg, R. - Influence of railway track stiffness variations on wheel/rail contact force. In: Workshop Track for high speed railways, 2006: Porto, Portugal.
- [3] Varandas, J. N.; Hölscher, P. and Silva, M. A. G. - Dynamic behaviour of railway tracks on transitions zones. *Computers & Structures*, 2011. 89:13-14, p. 1468-1479.
- [4] ERRI - D 230.1 / RP3 - State of the art report. Embankment structure transition, Bridge ends, 1999. European Rail Research Institute. Utrecht, Netherlands.
- [5] Esveld, C. - *Modern Railway Track*. Second Edition, 2001. Delft University of Technology.

- [6] ORE - Deformation properties of ballast. Laboratory and track tests (Text and appendices), 1970. Office of Research and Experiments of the International Union of Railway. Utrecht.
- [7] Selig, E. T. and Waters, J. M. - Track geotechnology and substructure management. 1994. Thomas Telford.
- [8] Bruni, S.; Colina, A. and Corradi, R. - Numerical modeling of railway runnability and ballast settlement in railroad bridges. In: Eurodyn 2002, Swets & Zeitlinger. 2002: Lisse.
- [9] Abdelkrim, M.; Bonnet, G. and de Buhan, P. - A computational procedure for predicting the long term residual settlement of a platform induced by repeated traffic loading. *Computers and Geotechnics*, 2003. 30:6, p. 463-476.
- [10] Fröhling, R. D. - Deterioration of railway track due to dynamic vehicle loading and spatially varying track stiffness. PhD thesis. 1997, University of Pretoria. Pretoria.
- [11] Hunt, H. E. M. - Settlement of railway track near bridge abutments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport*, 1997. 123:1, p. 68-73.
- [12] Ferreira, P. - Modelling and prediction of the dynamic behaviour of railway infrastructures at very high speeds. PhD Thesis. 2010, Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.
- [13] Lundqvist, A. and Dahlberg, T. - Load impact on railway track due to unsupported sleepers. *Proc. IMechE*, 2005. 219 Part F: J. Rail and Rapid Transit, p. 67-77.
- [14] UIC - Earthworks and track bed for railway lines. 2008.
- [15] Alves Ribeiro, C., *Transições aterro-estrutura em linhas ferroviárias de alta velocidade: análise experimental e numérica*, 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
- [16] Alves Ribeiro, C.; Calçada, R. and Delgado, R. - Dynamic effects in transition zones of high speed railway lines. In: 15th Nordic Railway Seminar 2008: Hooks Herrgards, Sweden.
- [17] White, W., I.K. Lee, and S. Valliappan, Unified Boundary for Finite Dynamic Models. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1977. 103(5): p. 949-964.
- [18] Ionescu, D. - Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast. PhD thesis. 2004, University of Wollongong.
- [19] Gidel, G.; Hornych, P.; Chauvin, J.-J.; Breyse, D. and Denis, A. - A new approach for investigation the permanent deformation behaviour of unbound granular material using the repeated load triaxial apparatus, 2001. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*. Paris, France.
- [20] Fortunato, E. - *Renovação de plataformas ferroviárias. Estudos relativos à capacidade de carga*. Tese de Doutoramento. 2005, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- [21] Ford, R., Differential ballast settlement, and consequent undulations in track, caused by vehicle - track interaction. *Vehicle System Dynamics Supplement 24*, 1995: p. 222-233.