



METODOLOGIA ITERATIVA PARA A AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DE ENCURVADURA EM CARRIS SOLDADOS DE VIAS FERROVIÁRIAS

Joana Delgado

CONSTRUCT LESE, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

Joel Carvalho

joelvdc@gmail.com

CONSTRUCT LESE, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

Rui Calçada

ruiabc@fe.up.pt

CONSTRUCT LESE, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

Raimundo Delgado

rdelgado@gcloud.fe.up.pt

CONSTRUCT LESE, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

Sumário. Na construção de infraestruturas ferroviárias, nomeadamente em vias de alta velocidade, o uso de carris soldados contínuos (continuous welded rails - CWR) é muito frequente. Como os deslocamentos longitudinais são restringidos neste tipo de carris, um aumento da temperatura origina que os esforços de compressão aumentem e que os carris possam encurvar. Se os carris se encontram numa via balastrada, e dado que o balastro tem um comportamento não-linear, um problema de “snap-through” ocorre, não sendo trivial a obtenção da resposta completa da estrutura da via.

O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia iterativa que permite avaliar a temperatura de encurvadura de carris soldados contínuos (CWR) utilizando programas de análise estrutural comuns.

Aplicações a um caso real, analisado com um modelo de barra tridimensional em ANSYS, serão apresentadas a fim de demonstrar a capacidade do procedimento proposto. Apresentam-se análises de segurança à encurvadura para diferentes níveis do estado de conservação da via e para cenários extremos de carregamento resultantes da ação da temperatura e da ação longitudinal do tráfego, incluindo os defeitos de alinhamento da via, identificam-se estados de manutenção e imperfeição da via que podem comprometer a sua estabilidade sob a ação de tráfego ferroviário.

Palavras chave: *Interação via-ponte; Temperatura de encurvadura; Dinâmica da ferrovia*

1 INTRODUÇÃO

A interação da via com a estrutura em pontes provoca variações das tensões e deformações na via, que deverão ser controladas de forma a assegurar que não ocorrerá rotura ou encurvadura do carril nem degradação da via. Estas exigências condicionam fortemente as soluções estruturais a adotar para as pontes e a instalação de aparelhos de dilatação de via.

Neste sentido foi desenvolvido uma metodologia capaz de simular o comportamento da interface via-estrutura que é traduzido por uma lei bilinear, do tipo elasto-plástica, cuja resistência limite depende da via se encontrar carregada ou descarregada. O modelo desenvolvido recorre a metodologias iterativas que permitem avaliar a temperatura de encurvadura de carris soldados contínuos utilizando programas de análise estrutural não vocacionados para a análise deste tipo de fenómenos.

O modelo desenvolvido foi aplicado ao estudo do viaduto poente de acesso à ponte das pirâmides cuja obra e modelo são brevemente apresentados. O modelo numérico foi calibrado por intermédio de campanhas experimentais. Foi realizado um ensaio de vibração ambiental que permitiu a identificação dos parâmetros modais do viaduto servindo de base ao ajuste dos parâmetros relativos à interação solo-estacas. O modelo numérico foi ainda validado com os resultados da monitorização da variação das tensões nos carris e dos deslocamentos do tabuleiro e da via para a variação da temperatura.

Para o modelo devidamente calibrado foi identificada a temperatura mínima e a temperatura de encurvadura. Com base na análise da evolução da tensão instalada nos carris, em modelos onde se fez variar a configuração dos viadutos; as ações ferroviárias não só ao nível da posição do comboio mas também pela possibilidade de frenagem; as características do alinhamento da via; o estado de compacidade do balastro; e posicionamento dos AD's identificaram-se os parâmetros que mais contribuem para a instabilidade da via. Desta forma foi possível avançar para uma análise de segurança à encurvadura da via no viaduto poente onde foram identificados cenários de risco.

2 MODELAÇÃO DA VIA E DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE ENCURVADURA

2.1. Interface via-estrutura

A análise da interação via-estrutura envolve a realização de modelos numéricos que permitam ter em conta a configuração e as propriedades da estrutura e da via. Uma das particularidades deste tipo de modelações prende-se com as características da interface via-estrutura. O comportamento desta interface é geralmente traduzido por uma lei bilinear, do tipo elasto-plástica, cuja resistência limite depende da via se encontrar carregada ou descarregada. De modo a obterem-se os efeitos mais desfavoráveis para a ação do tráfego, é necessário realizar análises para diferentes posições do comboio. Tal obriga a considerar vários modelos, em que as características dos elementos que simulam a interface são ajustadas em função da via se encontrar carregada ou descarregada, tornando assim o processo de análise bastante moroso.

Combinando elementos de interface com resistência correspondente à de uma via descarregada com elementos de atrito com resistência dependente do carregamento normal à superfície de deslizamento, obtém-se um modelo que permite tornar o processo de análise mais eficiente. Desta forma a resistência limite da interface passa a ser função directa da posição e das cargas

do comboio, podendo utilizar-se um único modelo para analisar as diferentes posições do comboio bem como efetuar análises considerando o histórico do carregamento. Esta modelação encontra-se validada em Delgado et. al (2009) e em Delgado (2013a).

O modelo desenvolvido recorre a metodologias iterativa que permitem avaliar a temperatura de encurvadura de carris soldados contínuos utilizando programas de análise estrutural não vocacionados para a análise deste tipo de fenómenos.

2.2. Snap-through

O fenómeno da encurvadura da via é gerado pela interação complexa dos movimentos laterais, longitudinais e de torção. No entanto, as estruturas atuais da via envolvem predominantemente, nas deformadas finais de encurvadura, apenas um dos modos de colapso (vertical ou horizontal).

A resposta típica da estrutura da via pode ser descrita em termos de três valores de temperatura: temperatura neutra (temperatura para a qual a tensão no carril é nula), temperatura máxima de encurvadura (ou temperatura de encurvadura) e temperatura mínima de encurvadura (ou temperatura de segurança). O fenómeno de encurvadura pode ser representado em termos do aumento da temperatura no carril, acima da temperatura de referência, versus o deslocamento lateral da via, como se representa na Figura 1a).

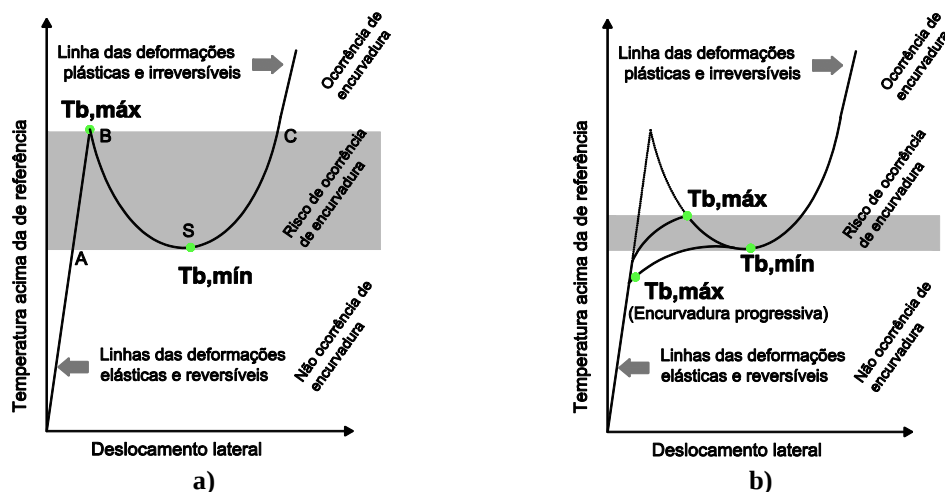


Figura 1. Encurvadura: a) Repentina; b) Progressiva (adaptado de ERRI-D202/RP11, 1999).

Os ensaios experimentais desenvolvidos revelam que um aumento adicional da temperatura no carril origina um aumento gradual da sua deformação. Um aumento para além da temperatura crítica $T_{b,m\acute{a}x}$ (medida relativamente à temperatura neutra do carril) pode originar uma deformação excessiva do carril, fazendo-o saltar de uma posição B para uma nova posição C (Figura 1a)) sendo característica de 90% dos casos registados de ocorrência deste fenómeno. Este caso corresponde a um tipo de encurvadura repentina (snap-through), existindo uma outra forma de encurvadura expressa por uma resposta monótona progressiva (Figura 1b).

Para aumentos de temperatura abaixo da do ponto A a via é estável e se for sujeita a ações laterais esta volta à sua configuração inicial, quando a ação perturbadora é removida. Em qualquer ponto, entre A e B, a via pode encurvar requerendo este caso menos energia do que a do aumento de temperatura de A para B. A partir do ponto B a via encurva sem necessitar de energia externa.

Todas as configurações de estados de equilíbrio correspondentes a pontos ao longo do ramo BS podem ser considerados como instáveis, enquanto que ao longo do ramo SC são estáveis. O ramo BC mostra a possibilidade de existir uma passagem brusca de um estado de pré-encurvadura para uma posição final de pós-encurvadura.

A temperatura associada ao ponto mínimo S corresponde à temperatura a partir da qual um aumento da temperatura pode gerar instabilidade, designando-se este ponto como temperatura mínima de encurvadura $T_{b,min}$. Por outro lado a temperatura máxima, ponto B, é designada por temperatura máxima de encurvadura $T_{b,max}$. A temperatura $T_{b,min}$ pode ser entendida como a mínima temperatura para a qual a via pode encurvar, passando da configuração associada ao ponto A para a do ponto S, caso seja fornecida energia externa suficiente ou existirem perturbações ao nível da via para a temperatura associada ao ponto A. O ponto B representa o aumento da temperatura, acima da temperatura neutra, para o qual a estrutura da via deixa de ser estável, verificando-se um súbito aumento dos deslocamentos laterais da via até esta atingir uma nova configuração estável, ocorrendo um fenómeno de snap-through, em que para uma diminuição da força instalada as deformações continuam a crescer. Esta resposta da via em função do aumento da sua temperatura foi demonstrada de forma teórica e comprovada através de estudos experimentais.

Uma característica importante da encurvadura súbita e repentina é que a força no carril diminui na zona da encurvadura, quando comparada com o seu valor na pré-encurvadura. Isto acontece porque o deslocamento lateral contribui para a libertação de alguma dessa força (Esveld, 2001). A distribuição da força de compressão instalada no carril encontra-se representada na

Figura 2, quando a imperfeição lateral é pequena, a força instalada no carril é constante ao longo do seu desenvolvimento. Após a ocorrência da encurvadura a força instalada no carril diminui na zona onde se verificam grandes deslocamentos devidos a este fenómeno e de forma menos pronunciada numa extensão contígua à zona de encurvadura.

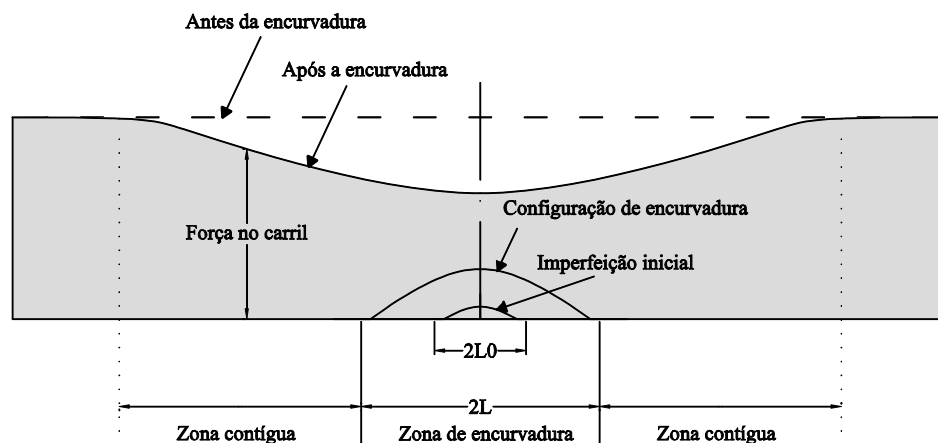


Figura 2. Distribuição da força no carril antes e após a encurvadura (adaptado de Kish e Samavedam, 2013).

3 METODOLOGIAS PARA A ABORDAGEM DE PROBLEMAS DE PÓS-ENCURVADURA

Com o objetivo de determinar numericamente as curvas temperaturas-deslocamento associadas ao fenómeno da encurvadura, estudaram-se os métodos numéricos que permitem realizar análises de snap-through para estruturas sujeitas à ação da variação da temperatura. Com base neste estudo, desenvolveu-se uma metodologia que permite determinar as temperaturas de encurvadura ($T_{b,max}$) e de segurança ($T_{b,min}$).

Para validar a metodologia proposta, efectuada em Carvalho et al. (2013), foram construídos modelos assumindo as características da via apresentadas na publicação ERRI-D202/RP11 (1999). Os resultados do modelo e da publicação foram comparados entre si tal como com os resultados obtidos por aplicação das expressões analíticas, propostas por diversos autores. Para validar a aplicação da metodologia numérica a modelos tridimensionais da via, foram efetuados três modelos de via (Carvalho et al. (2013)), para os quais se calcularam as curvas de snap-through e se compararam com os resultados obtidos por Lim et al. (2003).

Sendo esperada a existência de snap-through na curva carga-deslocamento, a resposta em pós-encurvadura e a temperatura de segurança só são possíveis de obter numericamente recorrendo a métodos incrementais/iterativos que utilizem técnicas como a do método do arco ou a de controlo dos deslocamentos. O método de Newton-Raphson convencional, também conhecido como método de controlo da carga, o mais correntemente utilizado em análises não-lineares (Crisfield, 1991), não permite incrementos de carga negativos, o que impossibilita a determinação da temperatura de segurança efetuando uma só análise.

Para análises de pós-encurvadura, o ANSYS tem implementado o método de Newton-Raphson conjugado com dois métodos, o do arco (arc-length) e o de controlo de carga com estabilizador, designado por nonlinear stabilization. Este último não permite incrementos de carga negativos, mas impede que uma análise termine quando é atingida a carga crítica, passando diretamente do ponto B para o ponto D da Figura 3, onde está exemplificada a diferença entre os dois métodos para um problema de snap-through. Tal é obtido introduzindo um fator de dissipação de energia (casos de encurvadura local ou global) ou um fator de amortecimento (casos de encurvadura global). A estabilização dos nós é conseguida através de uma rigidez adicional, incorporada em cada nó do modelo, que pode ser calibrada. Desta forma, quando é atingida a carga crítica, a análise prossegue com rigidez adicional fornecida aos nós instáveis, sendo possível obter deformadas num estado pós-encurvadura.

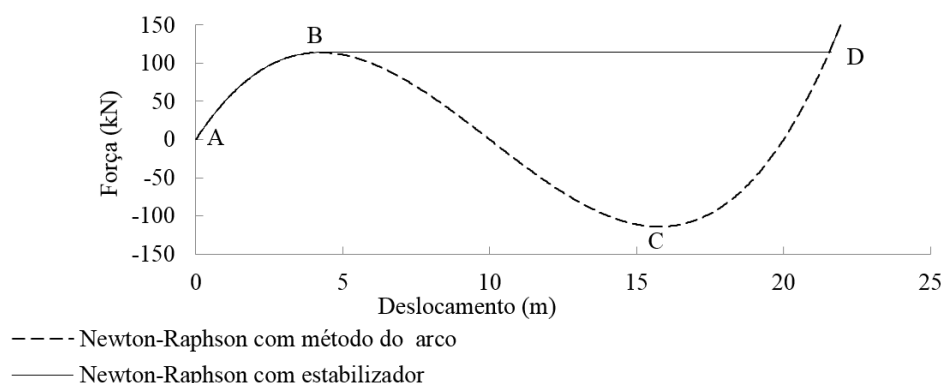


Figura 3. Método de Newton-Raphson com o método do arco e Newton-Raphson com estabilizador.

Quando a ação é uma variação de temperatura, as técnicas de controlo dos deslocamentos e do método do arco convencionais (desenvolvidas para cargas mecânicas) apresentam problemas de convergência. Tal acontece no ANSYS onde não se obteve convergência para nenhum caso com carregamento térmico, por mais simples que fosse a estrutura. O método do arco implementado no ANSYS não se encontra adaptado a problemas locais de encurvadura. Por outro lado, o método de Newton-Raphson convencional não requer qualquer alteração para a análise de problemas com cargas térmicas (Parente et al., 2006), sendo possível obter convergência em pós-encurvadura utilizando o nonlinear stabilization do ANSYS. No entanto, com este método e efetuando apenas uma análise, só é possível determinar a temperatura de encurvadura (ponto B na Figura 3), uma vez que para a determinação da temperatura de segurança (ponto C na Figura 3), seria necessário que o programa permitisse incrementos de carga negativos. Em vez disso, a curva fica aproximadamente horizontal, até voltar a intersectar um ramo estável (ponto D na Figura 3). De forma a contornar esta grande desvantagem, na secção seguinte é proposta uma metodologia original para estimar a temperatura de segurança, utilizando o método de Newton-Raphson convencional, sem recorrer a técnicas complexas como a do método do arco e a de controlo dos deslocamentos.

3.1. Método indireto: Nova abordagem

O método de cálculo desenvolvido para encontrar o valor da $T_{b,min}$ designou-se por método indireto, e teve por base a observação da relação entre a $T_{b,max}$ e a $T_{b,min}$. Normalmente, $T_{b,max}$ é maior que $T_{b,min}$, mas em algumas situações de resistência lateral insuficiente, isso pode não acontecer (ERRI-D202/RP11, 1999). De acordo com o exposto na secção 2.1. se $T_{b,max}$ for inferior a $T_{b,min}$, está-se perante um caso denominado por encurvadura progressiva, deixando de existir um pico associado ao valor da temperatura de encurvadura (Figura 1 b)).

Como já foi referido, a estabilidade lateral da via é controlada, sobretudo, pela resistência lateral do balastro, que resulta das forças de interação desenvolvidas entre as travessas e o balastro. Na modelação da via é comum considerar que a curva força-deslocamento referente ao balastro na direção lateral tem um comportamento bilinear (ver Figura 4), onde F_p representa a força de pico e W_p o deslocamento para a força de pico (ou deslocamento limite elástico). Segundo os estudos de Van (1997), tanto o F_p como o W_p influenciam fortemente a $T_{b,max}$; no entanto, a influência do W_p sobre a $T_{b,min}$ é praticamente nula. Os resultados obtidos por Van (1997) para vários valores de W_p estão representados na Figura 5, onde $T_{b,max}$ corresponde à temperatura de encurvadura e $T_{b,min}$ à temperatura de segurança.

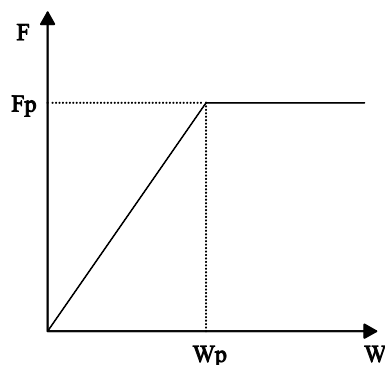


Figura 4. Modelo para a resistência lateral do balastro.

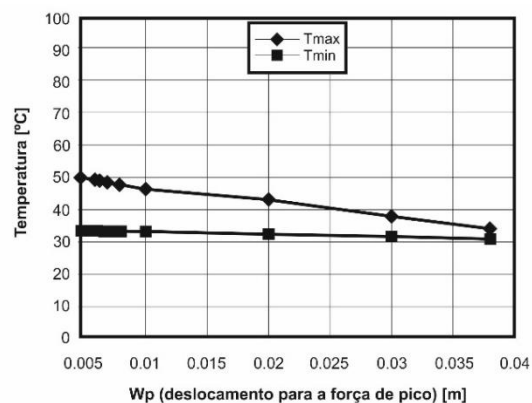


Figura 5. Temperatura de encurvadura e de segurança em função de W_p (adaptado de Van, 1997).

De acordo com as considerações anteriores, um aumento progressivo do W_p origina uma diminuição gradual da $T_{b,max}$, no entanto, não influencia ou influencia pouco a $T_{b,min}$. Dado que $T_{b,min}$ não se altera, é expectável que a resposta plástica da estrutura correspondente ao braço CD da Figura 3 não sofra alterações e que, por isso, todas as curvas de temperatura-deslocamentos resultantes deste processo se cruzem no ponto, ou perto do ponto, referente à $T_{b,min}$.

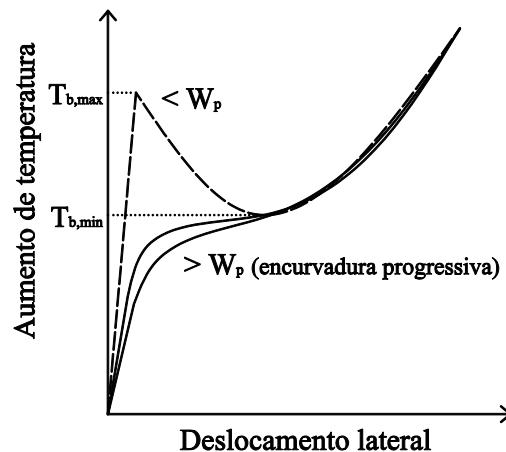


Figura 6. Procedimento para estimar $T_{b,min}$ causando encurvadura progressiva.

Na Figura 6 está representado o procedimento, de forma esquemática, para estimar o valor da temperatura de segurança, provocando a encurvadura progressiva da estrutura por via da alteração do valor de W_p . Como nos casos de encurvadura progressiva não existe nenhuma inclinação negativa da curva carga-deslocamento, é perfeitamente possível traçar a resposta da estrutura utilizando o método comum de Newton-Raphson, com a inclusão do estabilizador do ANSYS. Visto que é necessário efetuar mais do que uma análise da estrutura da via, para diferentes valores de W_p , esta metodologia pode ser encarada como um método indireto para estimar a temperatura de segurança (Carvalho et al., 2013).

4 OBRA, MODELO E SUA VALIDAÇÃO

4.1. Descrição geral da obra

O novo ramal de ligação ferroviária ao porto de Aveiro, que estabelece a ligação entre a plataforma multimodal de Cacia, da linha do norte, e o porto de Aveiro, tem uma extensão de aproximadamente nove quilómetros em via única não eletrificada e destina-se à circulação de comboios de mercadorias. O ramal ferroviário contempla duas pontes, uma sobre o canal das Pirâmides e outra sobre o rio Bouco, dois viadutos de acesso à ponte das Pirâmides, dos lados nascente e poente e um viaduto de acesso à ponte da Gafanha.

Escolheu-se para alvo de estudo seis troços de tabuleiro (troço 4 ao troço 9, Figura 10). Cada tramo do viaduto apresenta 100 m de desenvolvimento. Os aparelhos de dilatação da via (AD's) estão situados sobre o tramo 4 e no encontro. O encontro pode ser considerado fixo e assim servir de ponto de referência para o cálculo dos deslocamentos do tabuleiro. A tipologia corrente do viaduto é a que se encontra representada na Figura 7.

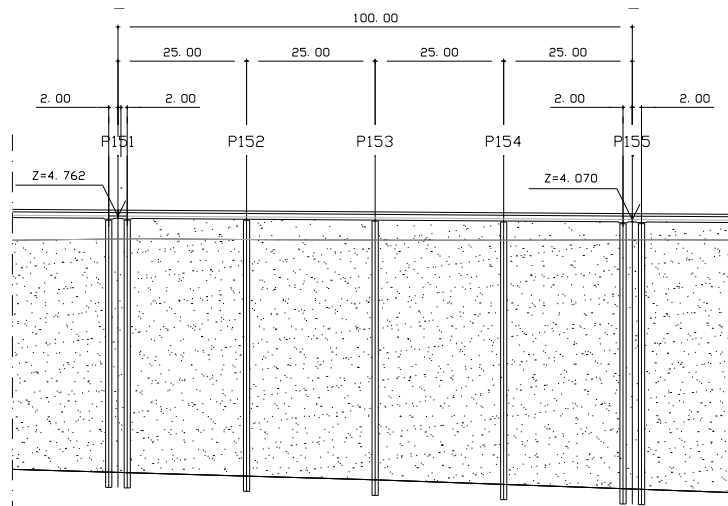


Figura 7. Corte longitudinal de um troço com 100 m do viaduto poente (adaptado de REFER, 2005a).

O tabuleiro em betão armado pré-esforçado apresenta secção transversal em forma de “U” (Figura 8), com uma laje inferior com 0,45 m de espessura, sobre a qual está disposta a via. O tabuleiro encontra-se apoiado em pares de pilares-estaca cilíndricos com 1,1 m de diâmetro, dispostos sob as longarinas (Figura 9).

Nas juntas entre troços de tabuleiro estão dispostos ligadores hidráulicos (Figura 9 e Figura 10) que permitem movimentos para ações lentas (variações de temperatura), mas bloqueiam para as ações rápidas, como é o caso da frenagem ou sismo.

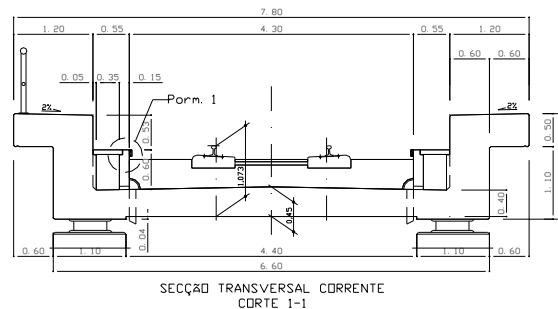


Figura 8. Secção transversal corrente (REFER, 2005a).

A ligação do tabuleiro aos pilares é realizada por aparelhos de apoio do tipo “pot” fixos e ao encontro por aparelhos do tipo “pot” móveis. O encontro é do tipo perdido, fundado indiretamente em seis estacas com diâmetro de 1,0 m e com profundidades variáveis entre os 40 e os 50 m.



Figura 9. Pilares/estaca e ligador hidráulico.

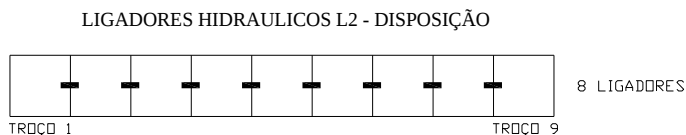


Figura 10. Disposição dos ligadores hidráulicos (REFER, 2005a).

4.2. Modelação

As análises numéricas do viaduto poente foram realizadas com base num modelo tridimensional de elementos de viga desenvolvido no programa ANSYS (2007). As cotas às quais se introduziram os elementos no modelo numérico estão indicadas na Figura 11, tendo-se designado o centro de gravidade: do tabuleiro por (C.G.T.), do carril UIC54 por (C.G.c.), da travessa por (C.G.t.) e dos aparelhos de apoio por (C.G.A.).

Modelaram-se os dois carris através de elementos de viga, afastados de 1,738 m, com uma discretização longitudinal de 0,6 m, para garantir um espaçamento igual ao das travessas. A ligação entre o carril e as travessas é realizada através de elementos de rigidez elevada. As travessas foram modeladas igualmente por elementos de viga, com o seu comprimento e afastamento reais, 2,60 m e 0,6 m, respetivamente. Imediatamente abaixo das travessas foram introduzidas elementos que simulam o comportamento do balastro (Delgado et al. ,2009). A partir destes pontos, dispuseram-se elementos de rigidez elevada, em forma de U, até ao ponto do centro de gravidade do tabuleiro. Neste ponto, dispôs-se uma viga longitudinal que simula o tabuleiro à qual se ligam elementos rígidos até aos dois pontos que correspondem aos centros de gravidade/rotação dos aparelhos de apoio, e que estão afastados 5,5 m entre si. Abaixo destes pontos, e com o mesmo afastamento, dispuseram-se elementos tipo viga, na direção vertical, para simular os pilares/estaca. Para a simulação da interação solo-fundação, utilizaram-se elementos de mola, espaçados de 0,5 m, ligados à estaca, numa das extremidades e fixos na outra. Com base nas características do solo, avaliadas através de sondagens, ensaios SPT e ensaio SCPTU, calcularam-se os parâmetros geotécnicos que permitiram definir as constantes das molas, através da expressão de Vesic (Santos, 2008). As características geométricas e mecânicas dos diferentes elementos que simulam a via e o viaduto foram introduzidas de acordo com os dados disponíveis no projeto de estrutura (REFER, 2005b, a).

Neste modelo a interface via-tabuleiro foi simulada nas direções vertical, transversal e longitudinal. Para a modelação do balastro nas direções vertical e transversal da via, utilizaram-se molas do tipo linear.

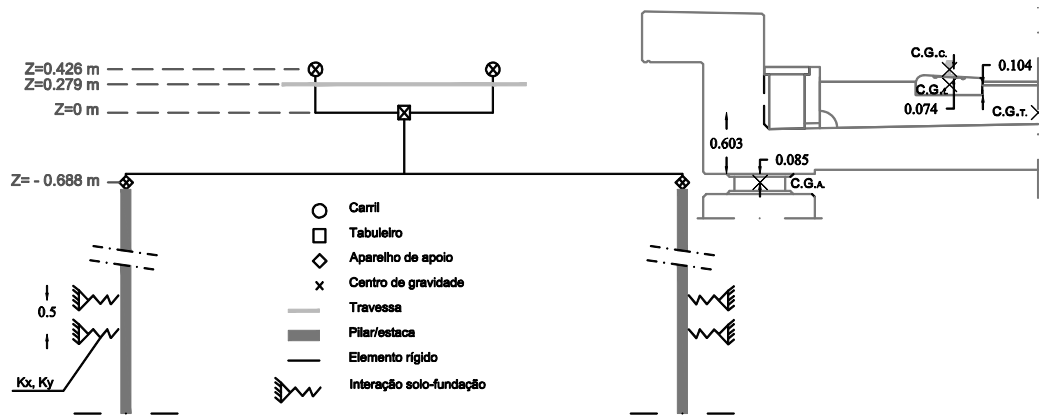


Figura 11. Elementos modelados (corte transversal).

Para simular estas características, a modelação da interface travessa-balastro combina elementos com resistência correspondente à de uma via descarregada e elementos de atrito cuja resistência depende do carregamento normal à superfície de deslizamento (Delgado et al., 2009). A resistência da interface passa assim a ser função direta da posição e das cargas do comboio, possibilitando a utilização de um único modelo para analisar as diferentes posições do comboio. Para além disso, utilizando carregamentos faseados e análises não lineares do sistema, obtêm-se os efeitos da interação via-estrutura, considerando, numa fase posterior do cálculo, o estado de tensão e de deformação da via, devido a ações anteriores, atualizando a rigidez do balastro de forma automática.

Os elementos que simulam o comportamento do balastro foram inseridos de forma alternada; com um afastamento longitudinal de 0,6 m; entre dois nós, um pertencente à travessa e outro imediatamente abaixo, criado para o efeito.

Os elementos que traduzem o comportamento da via descarregada foram modelados por molas com limite elástico (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), cujo comportamento é traduzido por uma relação carga/deslocamento do tipo da apresentada na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** Das características representadas na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** definiu-se apenas o parâmetro K_1 , que representa a rigidez do troço elástico inicial, e a força F_{SLIDE} , que representa a força limite elástico para a qual a mola plastifica, a partir do deslocamento u_0 .

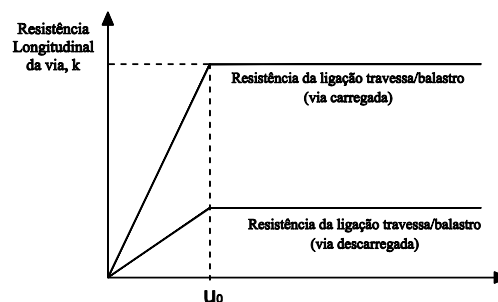


Figura 12. Relação carga - deslocamento da ligação via – tabuleiro.

O acréscimo de resistência da via carregada foi modelado por elementos com atrito, uma vez que se pretende que estes elementos só funcionem quando a via está sujeita a carregamento vertical. O comportamento do elemento é representado na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, na direção vertical, oferece uma rigidez KN , e na direção longitudinal, quando

se estabelece contacto entre os dois nós deste elemento, uma rigidez K_S . Nesta direção o elemento comporta-se de uma forma linear até se atingir a força de plastificação, $N \times \mu$. Esta força longitudinal é função do coeficiente de atrito, μ , e da carga vertical, N .

4.3. Validação experimental

O modelo numérico desenvolvido para o viaduto poente, foi calibrado e validado com base nos resultados de campanhas experimentais (Delgado, 2013b).

A primeira campanha experimental desenvolvida foi a de vibração ambiental que consistiu em colocar acelerómetros piezoelétricos em pontos-chave, determinados com o apoio da modelação numérica, com vista à determinação das configurações dos vários modos transversais da estrutura para efetuar uma calibração geral do modelo numérico e dos parâmetros das molas que simulam os coeficientes de reação do solo. Para o tratamento dos resultados experimentais, recorre-se a métodos de identificação modal. A determinação de um cenário de interação-solo de fundação a adotar foi efetuada de forma a aproximar as configurações modais e as frequências de vibração da estrutura obtidas por via experimental e numérica.

Na segunda campanha experimental foram controlados os efeitos de interação via-estrutura, nesse sentido, efetuaram-se medições: das variações da tensão no carril, recorrendo a extensómetros devidamente compensados para os efeitos da temperatura; dos deslocamentos na extremidade do troço do tabuleiro, entre troços de tabuleiro, bem como relativos entre o carril e o tabuleiro, através de LVDT's; e, temperaturas do carril e do tabuleiro, com RTD's e PT100, respetivamente.

Os pontos onde se instalaram os sensores foram determinados através do modelo numérico pré-calibrado com base nos resultados experimentais retirados da campanha de caracterização dinâmica.

A validação permitiu demonstrar que as técnicas de modelação numérica e as de instrumentação são adequadas à previsão dos efeitos de interação via-estrutura.

A calibração do modelo numérico revelou-se essencial para a validação das técnicas de modelação utilizadas e para a avaliação dos efeitos de interação via-estrutura.

5 ANÁLISES DE SEGURANÇA

São apresentadas aplicações a um caso real, onde foram analisados modelos de barra tridimensional em ANSYS a fim de demonstrar a capacidade do procedimento proposto.

Estudaram-se análises de segurança à encurvadura para diferentes níveis do estado de conservação da via e para cenários extremos de carregamento permitindo identificar condições que podem comprometer a estabilidade da via sob a ação de tráfego ferroviário.

No modelo utilizado para as análises de segurança consideram-se os aparelhos de dilatação do carril e uma imperfeição geométrica no carril em forma de meio cosseno, com um comprimento, λ , de 12 m e uma amplitude, δ , de 16 mm (Figura 1). Estas características correspondem às das imperfeições consideradas nos estudos paramétricos da ERRI-D202/RP11, (1999). Relativamente à configuração do viaduto, a imperfeição foi introduzida sobre a junta de tabuleiro entre os troços T7 e T8 ($x = 400$ m).

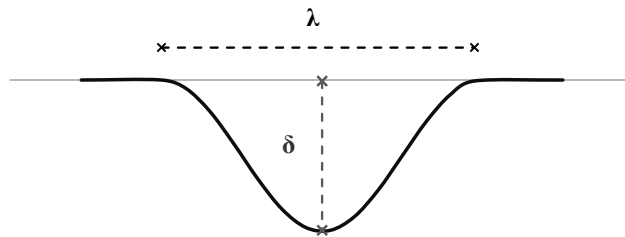


Figura 1. Imperfeição introduzida no modelo.

Considerou-se para o deslocamento correspondente à força limite, W_p , um valor de 2 mm nas direções lateral e longitudinal. Na direção transversal da via, a força limite da resistência do balastro admitida foi de 10 kN/m e de 20 kN/m para condições de via descarregada e carregada, respetivamente. Para a força limite da resistência longitudinal consideraram-se valores, para a via descarregada, de 20 kN/m e, para a via carregada, de 40 kN/m.

Relativamente ao modelo anteriormente houve necessidade de introduzir as fixações. Estes elementos foram simulados por seis molas, três com rigidez elevada nas direções longitudinal, transversal e vertical e outras três com rigidez à rotação igual a 150 kN.m/rad, por metro de via, o que corresponde a 45 kN.m/mola, tal como foi considerado nos estudos paramétricos da ERRI-D202/RP11 (1999). Estes elementos foram introduzidos 7,5 cm abaixo da do carril, entre dois nós criados para o efeito (Figura 2).

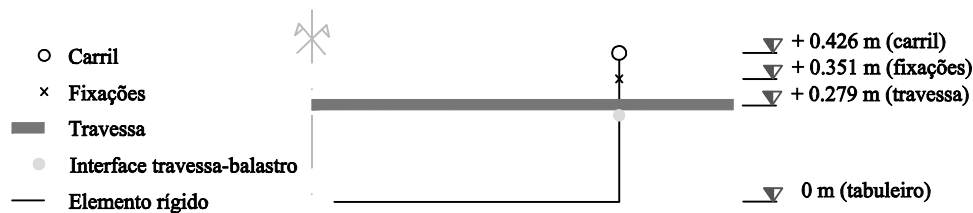


Figura 2. Posição das fixações na secção transversal do modelo.

Relativamente às ações da temperatura assumiu-se variações crescentes da temperatura do tabuleiro e da temperatura do carril com uma relação (T_t/T_c) de $\frac{1}{4}$. A adoção destes valores teve por base as temperaturas registadas no ensaio efetuado in situ, no qual se verificou uma variação de 6,25 °C no tabuleiro e de 25 °C no carril.

Os efeitos da retração e da fluência não foram considerados pelo facto da via ter sido instalada muito depois da construção do viaduto admitindo-se que nessa altura as deformações relativas a estes efeitos já tinham sido dissipadas.

Na Figura 3 apresentam-se curvas que ilustram o aumento progressivo da tensão nos carris, para temperaturas sucessivamente crescentes. Para facilitar a interpretação dos resultados colocaram-se linhas verticais em correspondência com a posição das juntas de tabuleiro.

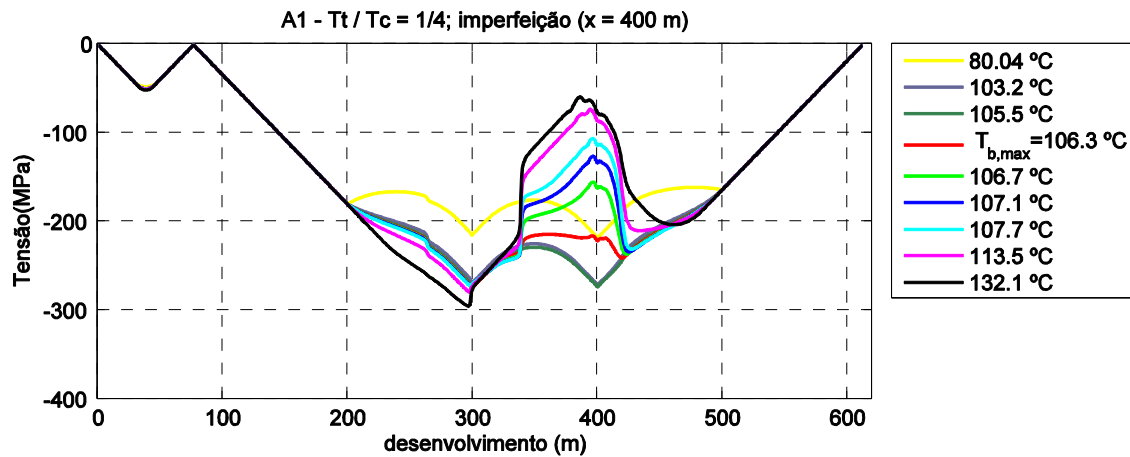


Figura 3. Evolução da tensão no carril para o modelo A1, com imperfeição ($x = 400$ m).

Na Figura 3 observa-se que as tensões no carril crescem à medida que aumenta a temperatura, mantendo-se as curvas referentes à tensão semelhantes ao nível da forma, até se atingir a temperatura de encurvadura ($T_{b,max}$), igual a 106,3 °C. A partir desta temperatura verifica-se uma diminuição do valor da tensão nas zonas correspondentes a grandes deformações da via, zona de encurvadura, e um aumento deste valor nas zonas adjacente.

É de referir que a tensão no carril é nula nos aparelhos de dilatação do carril, 24 m antes da junta de tabuleiro entre os troços T4 e T5 ($x = 76$ m) e 12 m depois do encontro E2 ($x = 612$ m), entre estes aparelhos a tensão aumenta até uma espécie de patamar. Esta distribuição da tensão do carril é semelhante à existente em plena via, mas neste caso, na zona correspondente ao patamar existem picos de tensão sobre as juntas de tabuleiro e diminuições a meio vão dos troços, devido ao efeito da dilatação do tabuleiro.

Os picos das tensões ocorrem devido aos movimentos opostos dos tabuleiros e as diminuições a meio dos troços, devido à dilatação do carril ser acompanhada por uma dilatação do tabuleiro.

É de referir que embora os aparelhos de apoio sejam todos iguais, as estacas têm solos de fundação distintos, pelo que o centro de dilatação térmico do tabuleiro pode não coincidir com o seu centro geométrico. Por isso a diminuição brusca da tensão na abcissa 263 m, que corresponde à variação do sentido de dilatação do tabuleiro, não coincide com o seu centro geométrico (ver Figura 3).

De acordo com a secção 3 realizou-se uma análise de segurança, determinando-se os valores de $T_{b,max}$ e $T_{b,min}$ através das curvas representados na Figura 4.

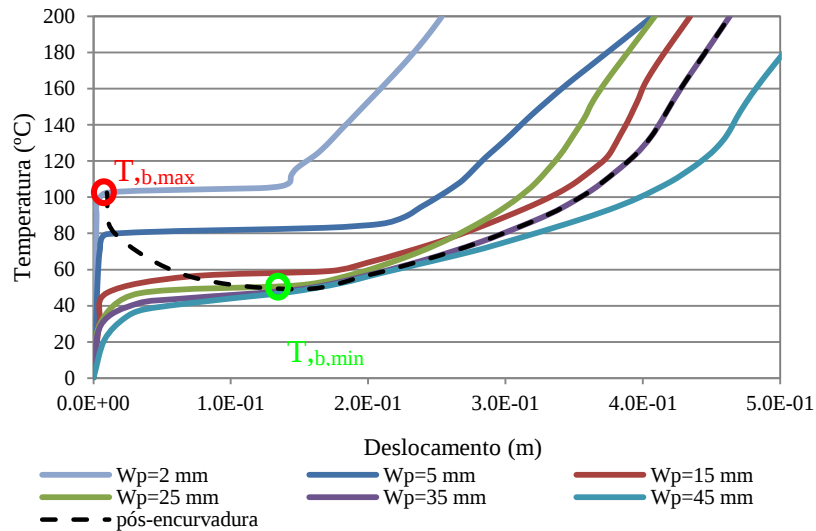


Figura 4. Determinação do valor $T_{b,min}$ e $T_{b,max}$.

Da análise do gráfico anterior conclui-se que, a $T_{b,max}$ é igual a 106 °C, tal como se observou na Figura 3. A $T_{b,min}$ é de 50 °C o que corresponde à temperatura acima da temperatura de referência (30 °C) à qual se pode expor o carril sem que a via encurve, ou seja 80 °C.

Foram estudadas várias análises de encurvadura no sentido de perceber em que medida este fenómeno é afetado pelas ações ferroviárias não só ao nível da posição do comboio mas também pela possibilidade de frenagem; pelas características do alinhamento da via; pelo estado de compactidade do balastro; e pelas características da configuração dos viadutos (Delgado (2013a)).

Do estudo efectuado concluiu-se que os cenários mais gravosos ao nível da estabilidade da via são aqueles em que se considera a configuração real do viaduto (contemplando a curva à saída do viaduto), uma imperfeição da via sobre a junta de tabuleiro entre os troços T8 e T9, a via carregada entre esta junta T9 e o aparelho de dilatação próximo do encontro E2, incluindo a ação de frenagem.

Numa primeira análise considerou-se uma imperfeição com $\delta = 16$ mm e $\lambda = 8$ m (comprimento que se revelou mais desfavorável), e mantiveram-se as da resistência lateral do balastro. Numa segunda análise, para além destas características da imperfeição ($\delta = 16$ mm e $\lambda = 8$ m) considerou-se, para o balastro descarregado uma força limite, K , igual a 8 kN/m e para o balastro carregado igual a 15 kN/m, o valor do deslocamento para a força limite (u_0) foi considerado igual a 0,002 m.

De acordo com os regulamentos é prática comum reservar uma temperatura de 50 °C, acima da temperatura de referência, para os efeitos das ações térmicas. Entende-se por isso que se a encurvadura ocorrer para uma temperatura inferior a 50 °C não há margem de segurança relativamente a este fenómeno.

Os resultados do modelo com variação do comprimento de encurvadura estão apresentados na Figura 5.

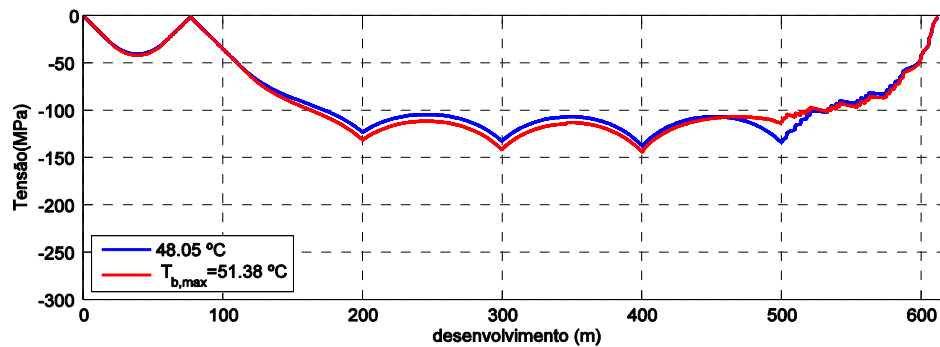


Figura 5. Tensões do carril antes e depois da encurvadura considerando a posição crítica da imperfeição e comprimento $\lambda = 8$ m.

A alteração do comprimento da imperfeição de $\lambda = 12$ m para $\lambda = 8$ m da via provoca uma diminuição acentuada do valor da $T_{b,max}$, uma vez que para este modelo a $T_{b,max}$ é igual a 51,38 °C, aproximadamente 30 °C inferior à temperatura de encurvadura obtida para o modelo com $\lambda = 12$ m ($T_{b,max} = 80,1$ °C). Esta variação é comparável à obtida com a instalação da temperatura de referência e provoca uma diminuição da tensão, para a qual se verifica a encurvadura de 70 MPa, por isso estes comprimentos de imperfeição devem ser controlados.

Na Figura 6 apresentam-se os resultados para o modelo com resistência lateral reduzida e com a imperfeição mais desfavorável ($\delta = 16$ mm e $\lambda = 8$ m).

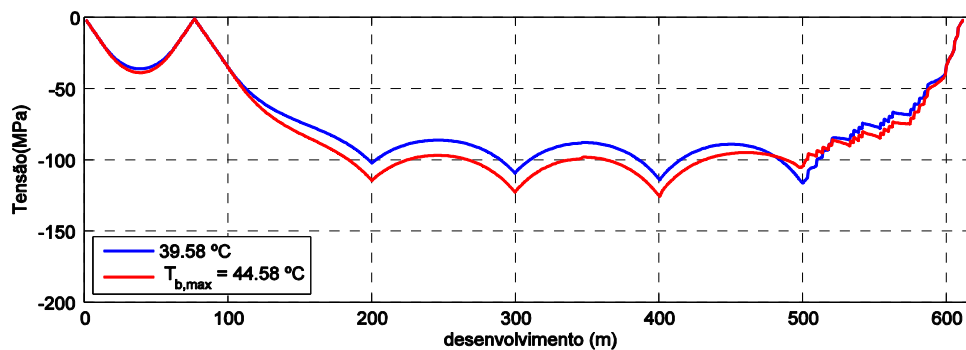


Figura 6. Tensões do carril antes e depois da encurvadura considerando a posição e o comprimento críticos da imperfeição e força limite lateral $K = 8$ kN/m para o balastro descarregado e 15 kN/m para o balastro carregado.

A redução da resistência lateral do balastro provoca uma redução significativa da $T_{b,max}$ apresentando uma diferença de 7 °C relativamente à do modelo com força limite lateral de 10 kN/m e 20 kN/m para balastro descarregado e carregado, respetivamente. Admitindo as condições de manutenção da via assumidas para este modelo, quando o comboio freia no viaduto, a temperatura de encurvadura é de 44,58 °C, abaixo do limite de 50 °C.

6 CONCLUSOES

A encurvadura na via ocorre sob a forma de grandes deformações acompanhadas da libertação da tensão nos carris. Este fenómeno caracteriza-se por curvas deslocamento-temperatura que apresentam um máximo, a que corresponde a temperatura de encurvadura ($T_{b,max}$) e um mínimo a que corresponde a temperatura de segurança ($T_{b,min}$).

A utilização do método de Newton-Raphson com estabilizador (método indireto), efetuando sucessivas iterações através de diferentes análises com variação do deslocamento para a força de pico da resistência lateral do balastro no ANSYS, revelou-se um método eficiente para a determinação das temperaturas, de segurança e de encurvadura.

A aplicação do método indireto a um caso real cujo modelo numérico foi validado através de ensaios experimentais permitiu perceber qual a evolução das tensões nos carris para diferentes estados da via férrea. A conjugação dos fatores mais gravosos para a estabilidade da via férrea permitiu determinar temperaturas de segurança sucessivamente mais baixas.

Com as análises realizadas torna-se evidente que para pontes com raio abaixo de 1500 m devem ser efetuados estudos cuidados da estabilidade da via que considerem os efeitos de interação via-estrutura, no sentido de determinar as características críticas das imperfeições da via com respeito ao local da sua inserção.

AGRADECIMENTOS

Este artigo refere a investigação realizada com o apoio financeiro da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal – Ref. SFRH/BD/37912/2007. Os autores agradecem ainda a colaboração prestada pela REFER no âmbito do projeto de Investigação e Desenvolvimento “Estudos avançados de análise da interação via-estrutura num viaduto do novo ramal de ligação ferroviária ao porto de Aveiro”, bem como à empresa J.L. CÂNCIO MARTINS - Projetos de Estruturas, Lda, relativamente aos elementos fornecidos relativos ao projeto do viaduto.

REFERENCIAS

ANSYS, 2007. *Structural Analysis Guide*, Release 11.0.

Delgado, J., Calçada, R., Delgado, R., 2014. Análise experimental e numérica da interação via-estrutura num viaduto ferroviário, *56º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON)*.

Delgado, J., 2013a. *Interação via ponte em linhas ferroviárias*. PhD thesis, Universidade do Porto, Porto.

Delgado, J., Calçada, R., Delgado, R., 2013b. Validação experimental de um modelo numérico de análise da interação via-estrutura no viaduto poente do novo ramal de ligação ferroviária ao porto de Aveiro. *Livro de atas do Terceiro Congresso Nacional em Segurança e Conservação de Pontes-Porto*, pp. 32-41. ISBN 978-989-98405-1-5.

Delgado, J., Calçada, R., Delgado, R., 2009. Influência do histórico do carregamento na análise da interacção via-ponte em linhas ferroviárias de alta velocidade. *Livro de actas do Primeiro Congresso Nacional em Segurança e Conservação de Pontes, Lisboa*, pp. 249 -256. ISBN 978-989-20-1559-0.

ERRI-D202/RP11, 1999. Improved Knowledge of Forces in CWR Track (Including Switches), Specialists' Committee D 202, European Rail Research Institute, Utrecht, Netherlands.

Esvelde, C., 2001. *Modern Railway Track. Second Edition*, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.

J. Carvalho, J. Delgado, R. Calçada, R. Delgado., 2013. A new methodology for evaluating the safe temperature in continuous welded rail tracks, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 13, No.2, 2013.

REFER 2005a. Ligação Ferroviária ao Porto de Aveiro, Ramal Ferroviário de Acesso ao Porto de Aveiro. *Obras de Arte Especiais, Projecto de Execução, Memória Descritiva e Justificativa*. Algés.

REFER, 2005b. Ligação Ferroviária ao Porto de Aveiro, Ramal Ferroviário de Acesso ao Porto de Aveiro. *Peças desenhadas, Projecto de Execução, Memória Descritiva e Justificativa*. Algés.

Santos, J. A., 2008. *Fundações por estacas acções Horizontais* - Elementos Teóricos, In O. Geotécnicas (Ed.), Instituto Superior Técnico.

Van, M. A., 1997. *Stability of continuous welded rail track*. PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft University Press, Delft, Netherlands.