

MEDIÇÃO DE FORÇAS DE INTERACÇÃO RODA/CARRIL, EM CURVA, NUM RODADO EXTREMO DE UM VEÍCULO FERROVIÁRIO

J. Duarte Silva, R. A. Cláudio, A. J. Valido, P. J. Moita

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Instituto Politécnico de Setúbal

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia de medição de forças de interacção roda/carril baseada numa técnica híbrida, que relaciona as extensões medidas em determinados pontos das duas faces da roda, utilizando a extensometria eléctrica de resistência, com os correspondentes valores de extensão obtidos através de um modelo de elementos finitos. Esta metodologia permite obter independentemente o valor das forças lateral e vertical. Apresentam-se resultados de ensaios realizados em condições reais de funcionamento.

1- INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, devido ao rápido progresso na tecnologia dos computadores, tem-se verificado a utilização da simulação computacional nas mais diferentes áreas da engenharia.

O estudo do comportamento dinâmico de veículos ferroviários é uma das áreas onde a simulação numérica tem vindo a ter grande aplicação. É possível prever o comportamento dinâmico de um veículo na fase de projecto, evitando-se assim a construção de protótipos, o que se traduz numa redução de custos.

Quando se pretende validar um novo veículo a simulação numérica não é suficiente, sendo necessário recorrer à realização de ensaios em condições reais. A norma UIC518 [International Union of Railways (1999)] estabelece as condições para a realização dos ensaios em linha e tratamento dos respectivos resultados, com vista à aceitação de um veículo ferroviário, no que diz respeito à segurança, à fadiga da linha e ao seu comportamento dinâmico.

As condições da linha (alinhamento, qualidade, etc), as zonas de ensaio (curvas de pequeno raio, curvas de grande raio e rectas), o tipo de veículo, as condições de carga, as condições atmosféricas, as grandezas medidas, as quantidades calculadas e respectivos limites e o tratamento estatístico a aplicar aos dados, são parâmetros que se encontram definidos na norma UIC518.

A medição de forças de interacção roda/carril é um dos procedimentos necessários à aceitação de veículos ferroviários com base na norma atrás referida. As forças lateral (Y) e vertical (Q) são utilizadas, de acordo com a norma UIC518, como grandezas individuais ou fazendo parte de quantidades a ser calculadas, nas verificações relativas à segurança e à fadiga da linha.

A determinação destas forças pode ser feita indirectamente a partir da medição dos esforços transmitidos por elementos da suspensão ou por medição directa. Neste caso utiliza-se normalmente a extensometria eléctrica de resistência para medir as extensões, as quais são relacionadas com as forças de interacção roda/carril. Dada a

complexidade que envolve a instrumentação do rodado, em muitos casos são utilizados rodados especialmente concebidos para o efeito. Noutras situações são utilizados os próprios rodados dos *bogies*.

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia de medição de forças de interacção roda/carril baseada numa técnica híbrida, que relaciona as extensões medidas em determinados pontos das duas faces da roda, utilizando a extensometria eléctrica de resistência, com os correspondentes valores de extensão obtidos através de um modelo de elementos finitos. Esta metodologia permite obter independentemente o valor das forças lateral (Y) e vertical (Q).

São apresentados resultados obtidos em condições reais de funcionamento, de acordo com a norma UIC518, nas situações de tara e carga máxima, em curva e com o rodado na frente e na traseira do veículo.

2 - METODOLOGIA DE CALCULO DAS FORÇAS DE INTERACÇÃO RODA / CARRIL

A roda do veículo em ensaio (figura 1) tem 18 furos na alma, a fim de permitir a montagem do respectivo freio. Estes furos permitem que se utilizem extensómetros em ambos os lados da roda, pois é possível passar a cablagem dos extensómetros colados na face exterior para a face interior, onde pode ser instalado o sistema de condicionamento do sinal e um equipamento de telemetria para a transmissão do sinal para o sistema de aquisição de dados, instalado na caixa do comboio. Esta situação permite a utilização de uma metodologia de cálculo das forças de interacção roda carril diferente da que foi utilizada por Silva (2001), onde apenas uma face da roda podia ser utilizada para colar extensómetros.

Em vigas, a metodologia para determinação de forças aplicadas é bem conhecida, utilizando a soma dos sinais de extensómetros em faces opostas de uma mesma secção para calcular a força axial e a diferença dos sinais de extensómetros colados na mesma face em secções afastadas para determinar a força vertical, sendo anulado o efeito de outras forças.

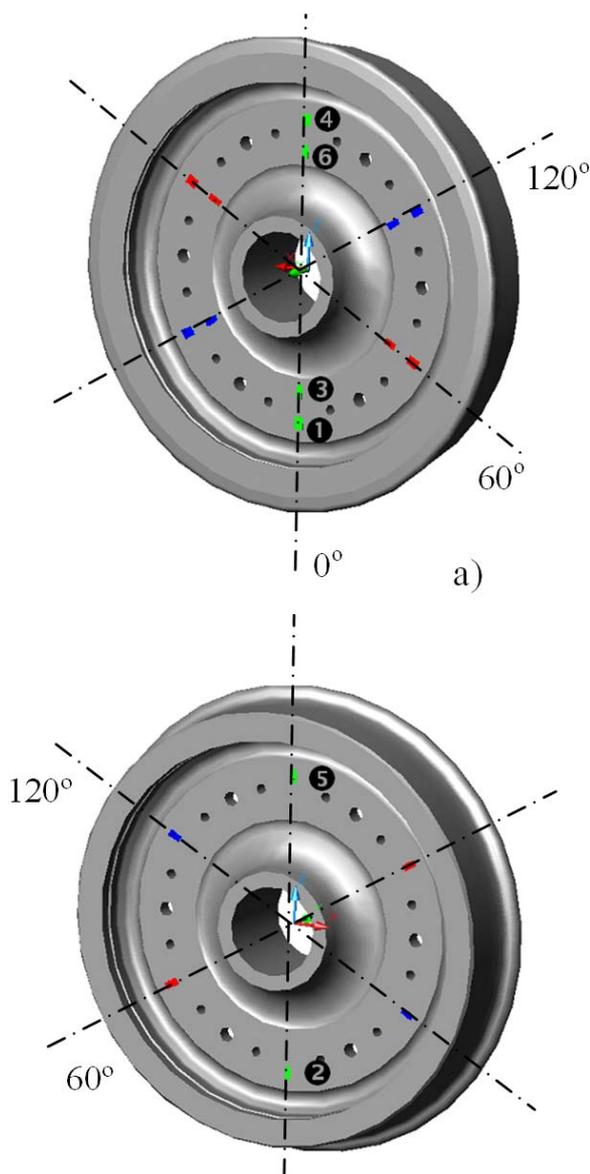


Fig. 1 - Localização dos extensómetros: a) lado interior, b) lado exterior.

Foi decidido estudar a aplicabilidade desta metodologia à roda em estudo, utilizando para o efeito a sua modelação por elementos finitos e estudando a distribuição de extensões devido a uma força vertical e a uma força lateral.

Devido à simetria, metade da roda foi modelada utilizando 11576 elementos sólidos, de 20 nós, o que, após a aplicação das condições de fronteira (restrições na superfície da roda em contacto com o eixo e na face de simetria) resultou num modelo com 170052 graus de liberdade.

A figura 2 apresenta o modelo da roda e o campo de extensões devido a uma força vertical e a uma força lateral.

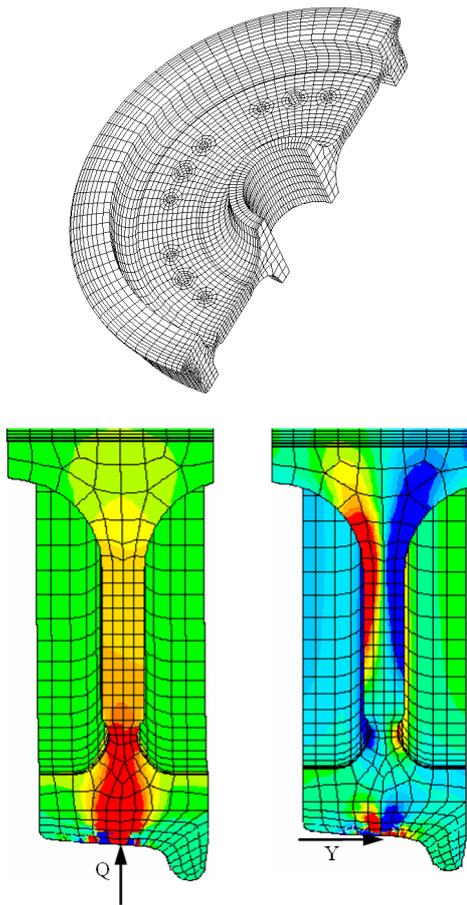


Fig. 2 - Modelo de elementos finitos e campo de extensões

A análise das extensões numa secção da alma a igual distância dos furos mostra que o seu comportamento é semelhante ao de uma viga, pelo que foi decidido utilizar o valor da extensão em dois pontos opostos (pontos 1 e 2 da figura 1) para calcular o valor da força Q e o valor das extensões de dois pontos radialmente distantes (pontos 1 e 3 da figura 1) para calcular a força Y, obtendo-se:

$$\begin{aligned} Q &= K_1 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \\ Y &= K_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \end{aligned} \quad (1)$$

Cada roda pode ser instrumentada com extensómetros nas seis secções radiais disponíveis a igual distância dos furos, figura 1. A medição das forças nas duas rodas de um mesmo rodado exige a instalação de 24 canais de medição.

Atendendo ao elevado custo de um canal de telemetria, foi decidido utilizar os extensómetros diametralmente opostos (extensómetros 4, 5 e 6 da figura 1), cuja resposta também é proporcional à força

aplicada, embora de intensidade muito menor, para construir pontes completas, passando as forças Q e Y a ser calculadas pelas expressões

$$\begin{aligned} Q &= K_3 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_4 - \varepsilon_5) \\ Y &= K_4 (\varepsilon_1 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4 - \varepsilon_6) \end{aligned} \quad (2)$$

Utilizando o modelo de elementos finitos, foram efectuadas simulações numéricas considerando sete pontos de contacto roda/carril e duas situações de carga, (Q=1[N] e Y=0[N]; Q=0[N] e Y=1[N]). Alguns dos resultados obtidos encontram-se representados nas Tabelas 1 e 2. As constantes K₃ e K₄ apresentam os valores médios de -7.17×10⁸ [N] e 5.97×10⁸ [N], com uma variação de 2,6% e 0,3%, respectivamente.

Tabela 1 - Cálculo de K₃ para determinação da força Q

Força aplicada	Posição contacto	←Lado interior (verdugo) ---- Lado exterior →			
		0.0232	0.0000	-0.0240	-0.0375
	Raio	-0.4274	-0.4250	-0.4238	-0.4227
	Q [N]	1	1	1	1
	Y [N]	0	0	0	0
Valores de extensão calculados	ε1 [ε]	-7.87E-10	-6.63E-10	-5.19E-10	-4.33E-10
	ε2 [ε]	-5.10E-10	-6.79E-10	-8.34E-10	-9.21E-10
	ε3 [ε]	-7.58E-10	-5.45E-10	-3.18E-10	-1.89E-10
	ε4 [ε]	1.30E-11	3.35E-11	5.53E-11	6.78E-11
	ε5 [ε]	5.12E-11	2.65E-11	1.63E-12	-1.23E-11
	ε6 [ε]	9.64E-11	3.22E-11	-3.35E-11	-7.01E-11
	ε1+ε2-ε4-ε5 [ε]	-1.36E-09	-1.40E-09	-1.41E-09	-1.41E-09
	K ₃ [N]	-7.35E+8	-7.14E+8	-7.09E+8	-7.09E+8

Tabela 2 - Calculo de K₄ para determinação da força Y

Força aplicada	Posição contacto	←Lado interior (verdugo) ---- Lado exterior →			
		0.0232	0.0000	-0.0240	-0.0375
	Raio [mm]	-0.4274	-0.4250	-0.4238	-0.4227
	Q [N]	0	0	0	0
	Y [N]	1	1	1	1
Valores de extensão calculados	ε1 [ε]	-6.76E-10	-6.65E-10	-6.60E-10	-6.50E-10
	ε2 [ε]	6.57E-10	6.35E-10	6.26E-10	6.22E-10
	ε3 [ε]	-3.30E-09	-3.28E-09	-3.26E-09	-3.25E-09
	ε4 [ε]	2.86E-11	3.08E-11	3.22E-11	3.36E-11
	ε5 [ε]	-1.57E-11	-1.82E-11	-1.95E-11	-2.06E-11
	ε6 [ε]	9.73E-10	9.66E-10	9.63E-10	9.61E-10
	ε1-ε3+ε4-ε6 [ε]	1.68E-09	1.68E-09	1.67E-09	1.67E-09
	K ₄ [N]	5.95E+08	5.95E+08	5.99E+08	5.99E+08

Embora as simulações utilizadas no cálculo de K_3 não considerem a existência de força lateral, a aplicação da expressão (2) para o cálculo de Y permite concluir que numericamente se determina uma força lateral proporcional (6,6%) à força vertical aplicada. Analogamente, nas simulações utilizadas para o cálculo de K_4 , onde não é aplicada qualquer solicitação vertical, determina-se uma força Q , proporcional (2,7%) à força lateral aplicada. Esta constatação permite corrigir as expressões (2) para:

$$\begin{aligned} Q_{\text{corrigido}} &= Q - Y \times 2,7\% \\ Y_{\text{corrigido}} &= Y - Q \times 6,6\% \end{aligned} \quad (3)$$

Para validação da metodologia foram realizados ensaios laboratoriais, em que foram aplicadas forças verticais e horizontais conhecidas à roda [Cláudio (2002)]. Destes ensaios conclui-se que a força vertical é medida com uma precisão de 6,7% e a força lateral de 1,8%.

Com esta metodologia a frequência de medição das forças é seis vezes a frequência de rotação da roda, o que é insuficiente para cumprir as especificações da UIC 518. Por este motivo foi decidido investigar a metodologia utilizada por [Jolly (1975)], em que os valores das forças laterais calculadas com estensómetros em várias secções radiais em dois lados da roda eram somados em cada instante, obtendo-se uma resposta quase constante.

Aplicando o mesmo conceito desenvolvido por Jolly ao caso da roda em estudo, em que estamos limitados a 6 secções, foi decidido somar o sinal das pontes completas que permitem o cálculo da força lateral a 0° , 60° e 120° . Esta resposta é quase constante e periódica (figura 3). A utilização do mesmo procedimento aos módulos dos sinais que permitem o cálculo da força vertical, conduz a uma resposta periódica, mas com uma amplitude significativa (figura 3).

A substituição das constantes K_3 e K_4 por polinómios de grau 6, dependentes da posição angular e determinados pelo método dos mínimos quadrados, permite a obtenção das forças de interacção roda/carril em contínuo, sendo mantida a correcção introduzida.

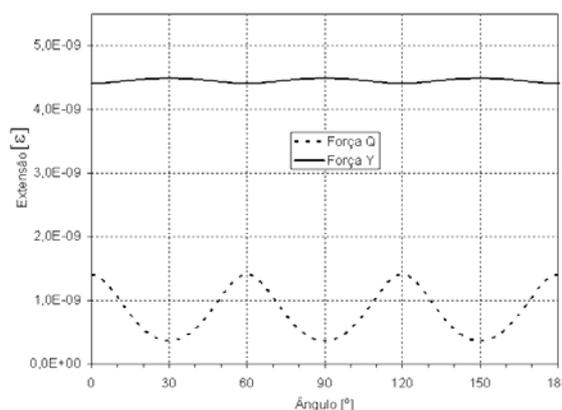


Fig. 3 - Combinação das extensões calculadas por elementos finitos a 0° , 60° e 120° (ver figura 1).

3 - CONDICIONAMENTO E MEDIÇÃO DE SINAIS

Para a realização dos ensaios em condições reais de funcionamento foi instrumentado um rodado do extremo do veículo, do tipo reboque (sem tracção), no qual o sistema de travagem foi removido.

De acordo com a metodologia atrás já descrita, as forças foram obtidas tendo por base medições efectuadas com extensómetros (HBM LY11 – 6/350, compensados para aço) colados na alma das rodas.

Foi utilizado um equipamento KMT - MT32, de 16 canais, para condicionamento, transmissão por telemetria e recepção dos sinais dos extensómetros (figuras 4 e 5).

Os módulos de condicionamento são dedicados à extensometria (KMT MT32-STG), desempenhando as funções de excitação da ponte a 4 Volts, amplificação de 1000x do sinal, ajuste de zero, filtragem



Fig. 4 - Roda com extensómetros devidamente isolados, módulos condicionadores e de telemetria, antenas emissora e receptora.

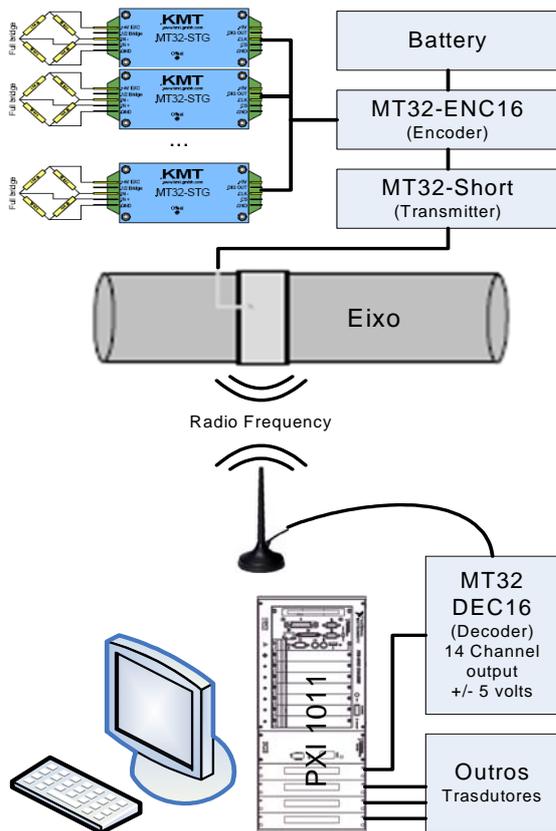


Fig. 5 - Cadeia de medição.

do sinal a 1500Hz e digitalização com uma resolução de 12 bits, tendo sido instalados o mais perto possível dos extensómetros. O *encoder* (KMT MT32-ENC16) gera um sinal único, através da codificação dos sinais digitais de todos os módulos de aquisição. O módulo de transmissão condiciona o sinal do *encoder* (KMT MT32-Short) e transmite-o através de uma antena enrolada ao veio. A transmissão de dados é feita a uma velocidade de 640 Kbits/s, o que equivale a 40kSamples/s. A antena de recepção foi instalada num ponto fixo da caixa, a cerca de 0,20 metros da antena emissora. Uma unidade *decoder* (KMT MT32-DEC16) disponibiliza os dados recebidos em formato analógico para serem registados.

Foram montados dois módulos de condicionamento, ligados em $\frac{1}{4}$ ponte, para medir o sinal de dois extensómetros colados no eixo, em posição diametralmente oposta, para medição da velocidade do veículo e posterior sincronização dos sinais.

Além dos 14 canais de telemetria (6 para cada roda e 2 para o eixo) foram registados mais 57 canais (aceleração, deslocamento,

extensão e temperatura), em diversos pontos do veículo, de forma a cumprir as exigências da UIC518. Nos ficheiros de medições foi também incluída informação referente à posição do veículo em linha e às condições do ensaio.

O registo dos dados foi feito utilizando um sistema da National Instruments (PXI 1011), composto por um computador (NI 8171, PIII 800MHz, 256MB, 20GB) e uma placa de aquisição A/D (NI 6070E, 1.25 MSamples/s, 12 bits, 8 canais). Este sistema inclui ainda dois módulos para leitura de tensão (SCXI – 1102C, 32 canais +/- 10volts) e dois módulos condicionadores para pontes de extensometria (SCXI – 1520, 8 canais, configurável em termos de ganho, filtro, tipo de ponte, resistência dos extensómetros e tensão de excitação).

Foram desenvolvidas várias aplicações em LabView 6.1 para aquisição, visualização e tratamento de dados. Devido ao elevado volume de dados a registar, resultante do número de canais adquiridos, da velocidade de aquisição e das centenas de quilómetros percorridos, estes foram gravados em formato binário.

4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As figuras seguintes apresentam a variação das forças Q e Y em diferentes situações. A aceleração “a” mencionada nestas figuras é a componente não compensada da aceleração total, resultante das acelerações centrífuga e da gravidade. Esta componente é nula quando a aceleração total é perpendicular ao plano dos carris.

A situação de carga máxima foi simulada com pesos correspondentes a 615 passageiros.

As rodas 1 e 2 correspondem às rodas direita e esquerda, respectivamente quando o rodado se encontra na posição dianteira. As forças Y são consideradas positivas quando dirigidas da roda 1 para a roda 2.

Todos os gráficos apresentados foram obtidos em curvas para a esquerda, de raio inferior a 400 metros.

A figura 6 mostra a variação da força Y ao longo de 50m, num veículo em curva e

em situação de carga máxima, quando o rodado instrumentado se encontra na frente ou na traseira do veículo. É notório um menor valor desta força quando o rodado se encontra na traseira do veículo. Este efeito, tem a ver com o facto de, quando se encontra na posição dianteira, o rodado estar a fazer o guiamento do veículo.

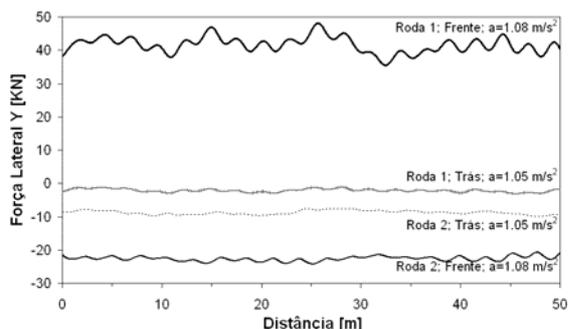


Fig. 6 - Comparação entre o valor de força lateral medida à frente e a trás. Veículo em curva em situação de carga máxima.

A influência da aceleração não compensada no valor da força Q pode ser verificada na figura 7, tendo em consideração que em linha recta o valor médio desta força é de 57,8kN em cada roda (valor obtido através da pesagem do veículo). A diferença entre os valores médios da força Q nas rodas 1 e 2 aumenta com o valor absoluto da aceleração não compensada. Quando esta aceleração é negativa a roda 2 apresenta valores de Q superiores ao da roda 1.

A soma dos valores médios das forças Q nas duas rodas é de 117,6kN ($a=1.08\text{m/s}^2$) e 116,7kN ($a=-0,37\text{m/s}^2$), o que representa um desvio de 1,7% e 1,0% em relação à pesagem do veículo.

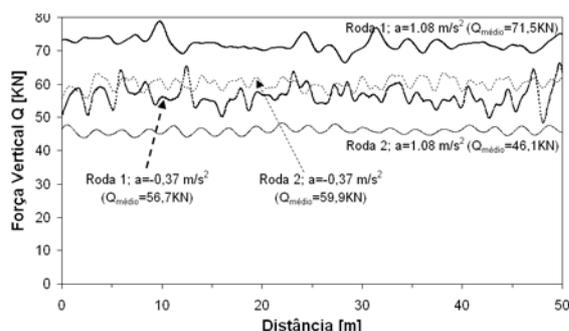


Fig. 7 - Força vertical medida em curva para duas acelerações não compensadas diferentes. Medição no eixo da frente em situação de carga máxima

As figuras 8 e 9 apresentam o valor das forças Y e Q em situação de tara e carga máxima, para valores semelhantes da aceleração não compensada. No caso da força Y (figura 8) o efeito da maior massa do veículo é mais significativo na roda 1 (roda exterior) e quase inexistente na roda 2. Este efeito influencia de igual modo a força vertical nas duas rodas.

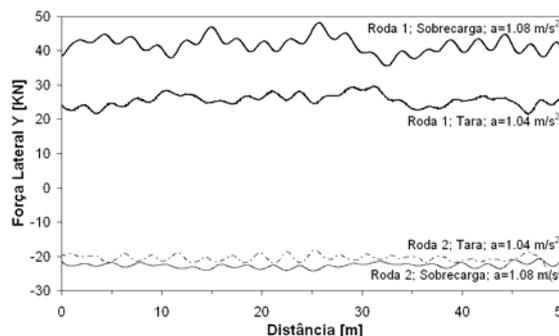


Fig. 8 - Força lateral medida em curva, no rodado da frente, em situação de tara e carga máxima.

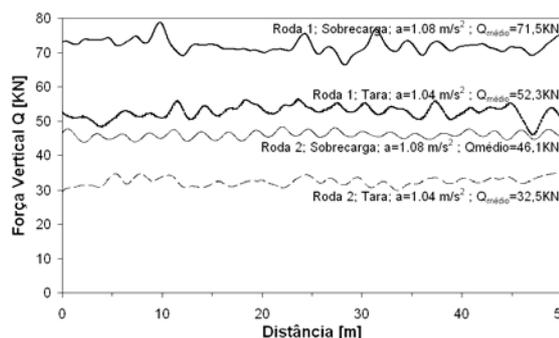


Fig. 9 - Força vertical medida em curva, no rodado da frente, em situação de tara e carga máxima.

Tendo em conta que a pesagem do veículo em tara conduziu a um valor de 89,5kN no eixo dianteiro, verifica-se que a soma das forças verticais correspondentes a esta situação, representadas na figura 9, apresentam um desvio de -5,2%.

5 – CONCLUSÕES

Foi desenvolvida e implementada uma nova metodologia para determinação de forças de interacção roda/carril, permitindo a determinação destas forças em contínuo.

Esta metodologia utiliza simulações numéricas, baseadas num modelo de elementos finitos, para a determinação dos parâmetros de calibração das forças vertical

e lateral, obtidas através da resposta de extensómetros colados nas duas faces da alma roda.

São apresentados alguns resultados de ensaios realizados em condições reais de funcionamento, onde se verifica a influência da carga, da aceleração não compensada e da posição do rodado no veículo no valor das forças Q e Y.

Os resultados apresentados mostram o bom desempenho da metodologia desenvolvida.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio dos Eng^{os} Lamy Figueiras, Aristides Chaves e António Pereira na realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

International Union of Railways, Testing and acceptance of railway vehicles from the point of view of dynamic behaviour, safety, track fatigue and running behaviour”, UIC code 518, 2nd Edition, October 1999

Silva, J.M., Silva, J.D., Figueiras, L., Marques, J.D., Pereira, A., Desenvolvimento de técnicas de medição das forças de contacto roda e carril em veículos ferroviários, em condições reais de funcionamento, Mecânica Experimental, No. 6, pág. 99-108, 2001

Joly, Roland, Essais de Dynamique Ferroviaire, Extrait de la revue générale des chemins de fer, Juillet-Août, 1975

Cláudio, R., Ensaio laboratorial do rodado de um veículo ferroviário, 2as Jornadas Politécnicas de Engenharia Mecânica, Automóvel, Organização e Gestão Industrial, Energia e Ambiente, 2002.