

# DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE CONTACTO ENTRE RODA E CARRIL, EM VEÍCULOS FERROVIÁRIOS, EM CONDIÇÕES REAIS DE FUNCIONAMENTO

J. Montalvão e Silva\*, J. Duarte Silva\*\*, L. Figueiras\*\*\*, J. D. Marques\* e A. Pereira\*\*\*

\* - Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico

\*\* - Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Setúbal

\*\*\* - Bombardier Transportation Portugal SA

## RESUMO

*No presente artigo descreve-se a metodologia desenvolvida, tanto teórica como experimental, para a medição das forças de interacção entre roda de veículos ferroviários e carril e apresentam-se alguns resultados obtidos na aplicação a veículos da CP e do Metropolitano de Lisboa.*

## 1 - INTRODUÇÃO

O trabalho descrito neste artigo resulta da participação do Instituto Superior Técnico no projecto "Dinâmica de Veículos Ferroviários" (apoiado pelo PEDIP), sob a forma de assistência técnica e científica à empresa Bombardier Transportation Portugal SA (na altura ainda Adtranz - Divisão Sorefame).

Um dos problemas associados ao funcionamento adequado de veículos ferroviários prende-se com o desgaste dos rodados dos bogies e dos carris. Por outro lado, o conforto dos passageiros tende cada vez mais a ser um factor importante na escolha dos veículos. O estudo destes fenómenos e a elaboração de modelos capazes de traduzir correctamente os comportamentos anteriores só é possível se os referidos modelos poderem ser validados. Para o efeito torna-se imprescindível obter registos que permitam determinar, em condições reais de funcionamento e conhecendo as características (defeitos) da via, não só o comportamento dinâmico a nível da

carruagem e suspensões primária e secundária como também o valor das forças, verticais e horizontais (laterais), de interacção entre roda e carril.

Neste último caso, colocam-se diversos problemas de difícil resolução. Embora se saiba que existe um número (muito limitado) de entidades capacitadas para efectuar este tipo de análise, não existe praticamente nenhuma literatura que possa ser referenciada. As metodologias utilizadas não são divulgadas evitando-se generalizar o seu conhecimento. O presente artigo descreve o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia integralmente desenvolvida pelos autores, baseada na utilização de extensometria eléctrica de resistência aplicada apenas ao lado interior da alma das rodas do bogie uma vez que não é possível ter acesso ao lado exterior. O processo baseia-se no desenvolvimento de modelos de elementos finitos da roda, devidamente testados e afinados, que servem de base à obtenção dos valores das forças (variáveis no tempo) de interacção

roda/carril a partir de registos das extensões medidas nas referidas almas (e eixos do rodado) durante a circulação do veículo ferroviário ao longo de vias conhecidas de utilização corrente.

O local utilizado para a medição implica o uso de meios telemétricos para a alimentação das pontes extensométricas e recolha dos sinais de desequilíbrio das pontes. A alternativa seria o recurso a cintas e escovas de contacto com as desvantagens decorrentes de uma maior poluição dos sinais atendendo ao local onde se teriam de encontrar, sujeito a um meio ambiente pouco limpo.

No presente artigo descreve-se a metodologia desenvolvida, tanto do ponto de vista teórico como experimental, e apresentam-se alguns resultados obtidos na aplicação a veículos ferroviários da CP e do Metropolitano de Lisboa.

A metodologia utilizada recorre a um procedimento híbrido em que as extensões medidas na alma da roda e no eixo do rodado, em condições reais de funcionamento, são comparadas com os valores teóricos obtidos em modelos de elementos finitos devidamente ajustados, a partir dos quais se determina o par de forças vertical e horizontal no ponto de contacto da roda com o carril que produz as referidas extensões. Recorre-se a algoritmos especialmente desenvolvidos para o efeito.

## 2 - PROCESSO EXPERIMENTAL

### 2.1 Parâmetros a Medir

Embora no presente artigo se pretenda descrever apenas a metodologia de medição das forças de interacção roda/carril, o trabalho desenvolvido envolvia a obtenção, em condições reais de funcionamento, de um conjunto bastante mais vasto de parâmetros dinâmicos.

A figura 1 mostra de forma esquemática um veículo ferroviário em relação ao qual se identificaram os principais parâmetros dinâmicos representativos do seu comportamento e que são descritos na tabela a seguir.

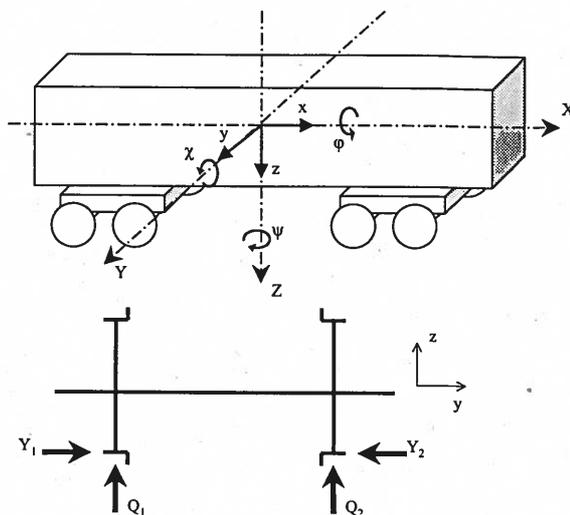


Figura 1 – Parâmetros dinâmicos a medir.

Parâmetros de Medição	Ref
Acelerações segundo as direcções vertical e lateral na caixa de eixo	A <sub>x</sub> , A <sub>y</sub>
Acelerações segundo as direcções vertical e lateral na estrutura do bogie	B <sub>x</sub> , B <sub>y</sub>
Acelerações segundo as direcções vertical e lateral na caixa	C <sub>x</sub> , C <sub>y</sub>
Acelerações segundo as 3 direcções na caixa	D <sub>x</sub> , D <sub>y</sub> , D <sub>z</sub>
Acelerações segundo as direcções vertical e lateral na caixa	E <sub>x</sub> , E <sub>y</sub>
Velocidades angulares segundo as 3 direcções num extremo do bogie	F <sub>x</sub> , F <sub>y</sub> , F <sub>z</sub>
Velocidades angulares segundo as 3 direcções na caixa	G <sub>x</sub> , G <sub>y</sub> , G <sub>z</sub>
Deslocamentos angulares segundo as 3 direcções num extremo do bogie	H <sub>x</sub> , H <sub>y</sub> , H <sub>z</sub>
Deslocamentos angulares segundo as 3 direcções na caixa	I <sub>x</sub> , I <sub>y</sub> , I <sub>z</sub>
Extensões na direcção radial da roda	J <sub>1</sub> ...J <sub>8</sub>
Extensões na direcção axial do eixo	J <sub>9</sub> ...J <sub>12</sub>
Velocidade de rotação do rodado	L <sub>1</sub>

De entre todos os parâmetros listados na tabela anterior, apenas são de interesse para o presente artigo as extensões medidas nas direcções radial da roda e axial do eixo (a partir das quais se determinam as forças Q e Y de interacção roda/carril) assim como a velocidade de rotação do rodado.

### 2.2 Extensómetros Eléctricos de Resistência

Dadas as características do rodado, apenas era possível o acesso ao lado interior do mesmo. O procedimento adoptado consistiu em medir as extensões na alma da roda, na direcção radial, e a meio vão do eixo do rodado, na direcção axial. No que se refere à roda, foi decidido utilizar 8 extensómetros colados em iguais intervalos angulares ao longo de uma circunferência correspondente à zona de maior sensibilidade à deformação (determinada previamente através de um modelo de EF), como se mostra esquematicamente na figura 2.

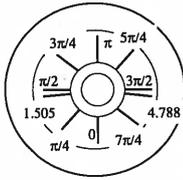


Figura 2 - Localização dos extensómetros na roda.

Os extensómetros anteriores foram ligados em  $\frac{1}{4}$  de ponte obtendo-se assim, para cada um, o valor da extensão no local onde se encontrava colado. Utilizaram-se ainda 4 extensómetros colados a intervalos de  $90^\circ$  a meio vão do eixo do rodado. Cada dois extensómetros, diametralmente opostos, foram ligados em  $\frac{1}{2}$  ponte de forma a eliminar as leituras de valores correspondentes aos esforços axiais.

Utilizaram-se extensómetros HBM modelo 1-LY116/350, de  $350 \Omega$ , compensados para aço.

### 2.3 Medida e Transmissão de Dados

Um dos maiores problemas associados à decisão de colocar extensómetros eléctricos de resistência no rodado resulta da dificuldade em alimentar as pontes extensométricas e de medir o desequilíbrio das mesmas. O recurso a sistemas de contacto com escovas não pareceu adequado uma vez que tende a produzir ruído poluindo os sinais e dificultando a sua leitura. Foi portanto decidido recorrer à utilização de meios telemétricos, tendo-se, para o efeito, consultado o mercado internacional e adoptado um sistema de origem americana especialmente concebido e construído para o presente trabalho (Figura 3).

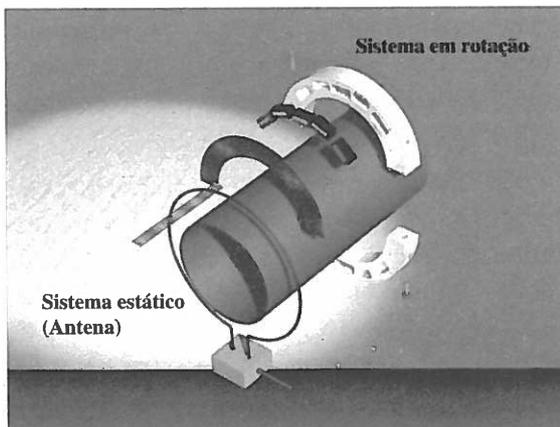
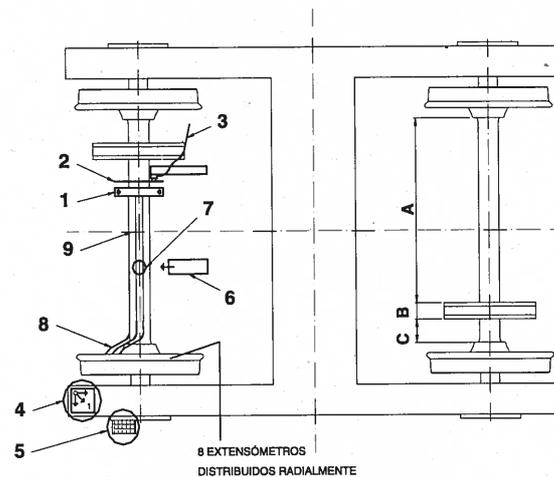


Figura 3 - Esquema do sistema de telemetria.

Este sistema assenta na utilização de métodos de indução electromagnética para a alimentação das pontes extensométricas e obtenção dos valores de desequilíbrio das mesmas pontes. As pontes são constituídas por elementos incorporados num colar fixo rigidamente ligado ao veio (sistema em rotação na figura 3) e os sinais são recolhidos por meio de uma antena que se mantém estática, sem contacto com os órgãos em rotação.

Para complementar o procedimento, recorreu-se ainda à utilização de um tacómetro electromagnético com vista à leitura da velocidade de rotação do veio.

As figuras 4 a 8 mostram, tanto esquematicamente como na situação real, exemplos da aplicação da metodologia descrita a alguns dos veículos ferroviários ensaiados.

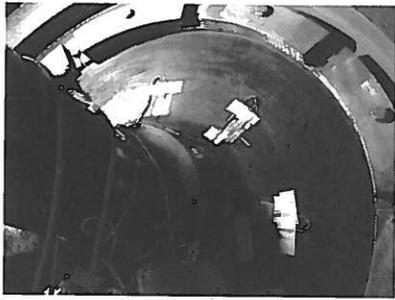


- 1 - Colar rotativo com pontes extensométricas e sistema de emissão/recepção de sinais.
- 2 - Antena fixa.
- 3 - Cabos de ligação da antena à unidade de recepção.
- 4 - Unidade de medição inercial no bogie.
- 5 - Acelerómetros.
- 6 - Tacómetro electromagnético.
- 7 - Referência rotativa para o tacómetro.
- 8 - Cabos de ligação aos extensómetros na alma da roda.
- 9 - localização dos extensómetros no eixo.

Figura 4 - Representação esquemática da montagem do equipamento sensor e telemétrico no rodado do bogie.

### 2.4 Controlo, Recepção e Registo dos Sinais

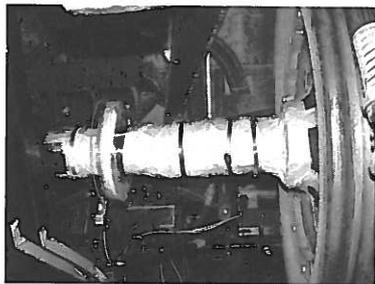
Todo o processo de aquisição de sinais (figura 9) assim como a gravação dos mesmos em disco rígido foi efectuada por



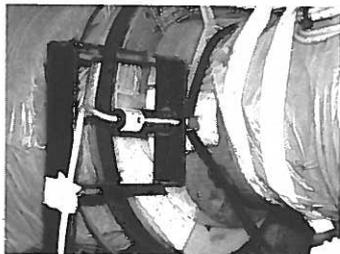
**Figura 5** – Colocação dos extensómetros no lado interior da alma da roda de um dos veículos ensaiados.



**Figura 6** – Montagem do sistema telemétrico.



**Figura 7** – Vista geral do conjunto montado no rodado e protegido contra poeiras, água e óleo.

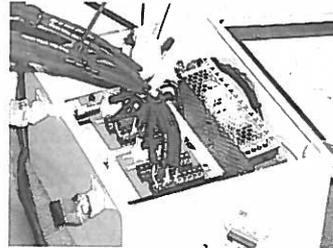


**Figura 8** – Montagem do tacómetro.

intermédio de um computador tipo PC dotado de uma placa de aquisição Data Translation DT3010 com 1.25 MS/s de velocidade de aquisição. Os sinais oriundos das pontes extensométricas eram previamente recolhidos através de uma unidade de recepção do sistema de telemetria (figura 10).



**Figura 9** – Computador com placa de aquisição de dados.



**Figura 10** – Unidade de recepção dos sinais telemétricos.

O software de aquisição foi desenvolvido a partir de uma aplicação informática designada por HP VEE que é uma linguagem de programação visual otimizada para construir aplicações na área da medição e teste de equipamentos.

### 3 - DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS DE CONTACTO RODA/CARRIL

O processo de cálculo desenvolvido para obter os valores das forças de contacto roda/carril baseia-se numa técnica híbrida que consiste na comparação do sinal obtido pelos extensómetros colados na roda e eixo do rodado em estudo com resultados numéricos obtidos ao fazer uma análise da roda pelo método dos elementos finitos (MEF), correctamente validado.

O fluxograma da figura 11 mostra esquematicamente os procedimentos destinados à obtenção dos valores instantâneos das forças de contacto objectivo do trabalho.

O estudo em questão, composto pelas diversas etapas descritas no fluxograma anterior, baseou-se ainda na utilização de software adequado. O software utilizado foi o MATLAB, para as tarefas de tratamento de sinal e comparação de resultados, e o ANSYS, no cálculo das extensões da roda pelo MEF.

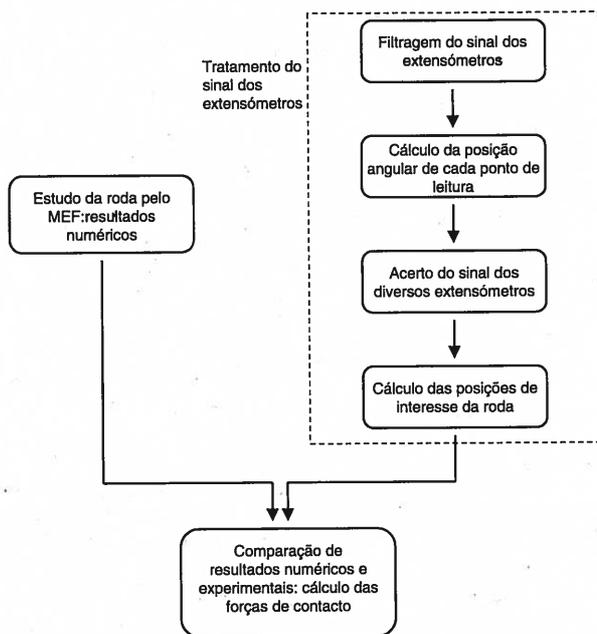


Figura 11 – Metodologia de obtenção das forças de contacto roda/carril.

### 3.1 Modelação da Roda

Com o intuito de fazer esta análise, foi desenvolvido um modelo de elementos finitos, representado na figura 12. Neste caso, o modelo representa a roda do veículo ML95 do Metropolitano de Lisboa; a circunferência a vermelho representa a cota onde foram colados os extensómetros no ensaio experimental.

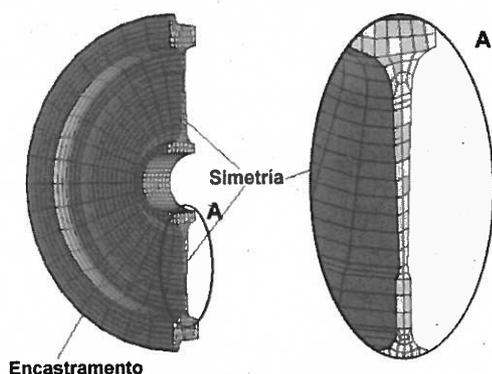


Figura 12 – Modelo de elementos finitos de uma roda.

Uma vez que o sistema em estudo apresenta simetria em relação à superfície representada em detalhe em A, só foi modelada meia roda.

Como condições de fronteira considerou-se que a roda se encontra encastrada nos pontos de contacto com o

eixo e simetria segundo o plano descrito no parágrafo anterior.

Numa primeira fase, validou-se a metodologia de modelação através do modelo de um rodado que foi testado estaticamente em laboratório (figuras 13 e 14). Da comparação entre os resultados dos ensaios estáticos e do modelo numérico foi possível afinar o modelo a fim de garantir a necessária fiabilidade para os ensaios dinâmicos. Utilizaram-se, para este estudo laboratorial, extensómetros eléctricos colados em diversos pontos da alma e eixo do rodado. As cargas estáticas foram aplicadas recorrendo a actuadores óleo-hidráulicos conforme se mostra na figura 13.

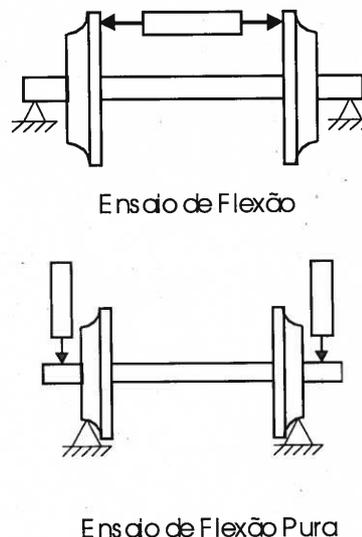


Figura 13 – Ensaios estáticos de validação.

Uma vez validada a metodologia de modelação, procedeu-se ao estudo dos rodados a utilizar nos veículos ferroviários em estudo. Um dos problemas a analisar tem que ver com o facto de a roda contactar com o carril através de um “ponto” de contacto cuja posição varia ao longo do perfil do rodado.

Assim, simulou-se o carregamento no estudo teórico fazendo variar o ponto de contacto (de aplicação das forças) ao longo da superfície de contacto da roda. A análise do modelo de elementos finitos consistiu nos seguintes passos: i)

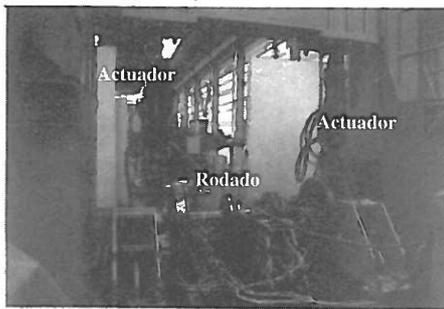


Figura 14 - Procedimento laboratorial para os ensaios estáticos de validação.

Aplicação de forças verticais e laterais isoladamente em cada um dos pontos de contacto (2 kN); ii) Leitura dos valores de extensão radial ao longo da circunferência de colagem dos extensómetros; esta circunferência representa as posições sucessivas que os extensómetros tomam durante a rotação da roda.

Nas figuras 15 a 17, estão representados três pontos de contacto, assim como a curva de extensões radiais para cada uma das forças, ao longo da circunferência de colagem dos extensómetros.

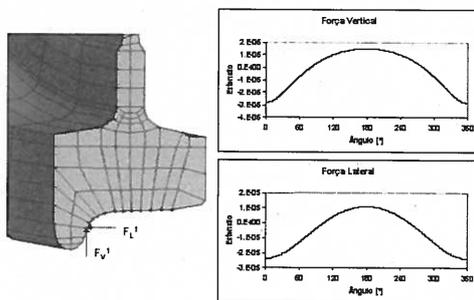


Figura 15 - Análise do ponto de contacto 1.

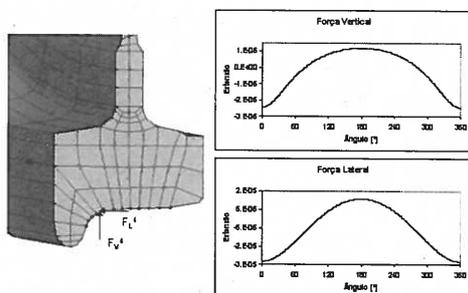


Figura 16 - Análise do ponto de contacto 4.

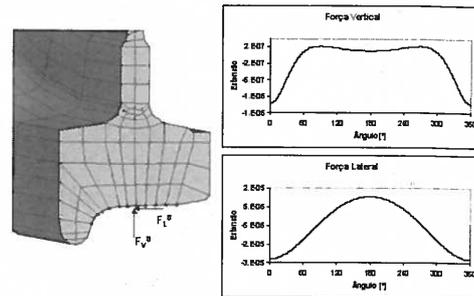


Figura 17 - Análise do ponto de contacto 8.

Analisando as figuras anteriores, pode-se constatar que a variação do ponto de aplicação tem uma importância maior na aplicação da força vertical, já que a curva de resposta das extensões varia não só em forma como em amplitudes, quando comparada com a força lateral, que não tem quase alterações.

Fazendo variar as forças de contacto ao longo de todos os pontos de contacto possíveis, obtemos os registos de extensão radial apresentados nas figuras 18 e 19.

Nestes gráficos pode-se observar uma vez mais a importância da variação do ponto de contacto para cada uma das forças. Chama-se a atenção para dois pontos particulares nos gráficos, situados nos  $86.23^\circ$  (1.505 rad) e  $273.77^\circ$  (4.778 rad), para os quais a extensão radial não varia com o ponto de contacto. Este ponto tem uma grande importância em todo o processo de cálculo das forças de contacto, como se verá mais adiante.

Na figura 20 está representada uma curva dum sinal típico dum extensómetro, obtido durante os ensaios reais, onde se podem observar as variações anteriormente descritas.

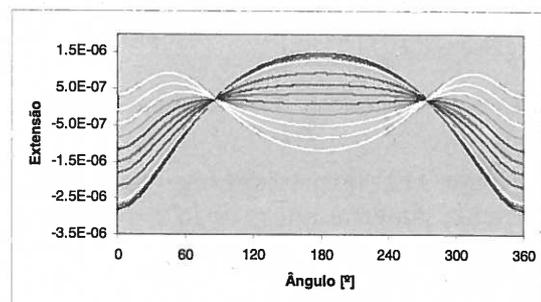


Figura 18 - Variação da extensão radial com o ponto de contacto para o caso da força vertical.

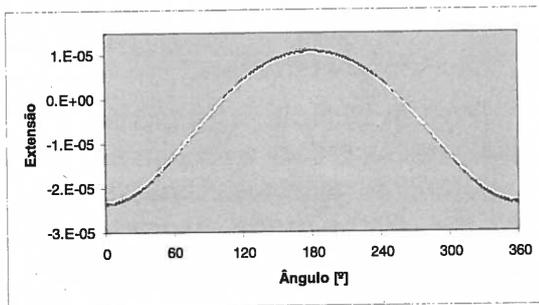


Figura 19 - Variação da extensão radial com o ponto de contacto para o caso da força horizontal.

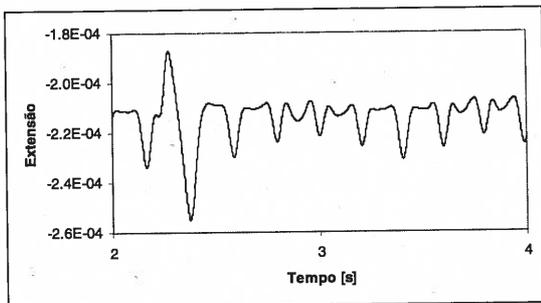


Figura 20 - Resposta típica de um extensómetro colado na roda.

### 3.2 Procedimento

Para efeito deste trabalho realizaram-se ensaios em três veículos ferroviários diferentes (figura 21), sendo dois deles da CP e um do Metropolitano de Lisboa. Os ensaios consideraram a obtenção de registos em troços de via previamente definidos pelos utilizadores (CP e ML) e incorporando zonas de recta e zonas de curva. O presente artigo apenas faz referência à obtenção das forças de contacto em troços de via muito aproximadamente rectilíneos em que não existe a possibilidade de contacto simultâneo em dois pontos do perfil da roda com o carril (casos em que o verdugo da roda encosta ao carril).



Figura 21 - Veículos ensaiados (carruagem do ML na linha de Arroios, Corail na linha da Estação do Oriente e UQE na linha de Sintra).

Uma vez recolhidos os registos dos sinais dos extensómetros (velocidade de aquisição igual a 1000 Hz), foram submetidos a um processo de filtragem a

fim de eliminar o ruído poluente. Os sinais recolhidos em Volt foram ainda convertidos em valores de extensão com base na sensibilidade do equipamento de telemetria ( $s=77.866 \mu\epsilon/V$ ).

O sinal dos extensómetros da roda padece dos mesmos problemas que o dos extensómetros do eixo: não se sabe qual o zero destes, ou seja, qual o valor de extensão de referência, definida no momento de colagem do extensómetro na roda. No caso dos extensómetros do eixo, este problema foi resolvido subtraindo a cada um dos sinais a sua média; no caso da roda, este processo não pode ser utilizado, pois o valor médio não é igual para todos os extensómetros, ou seja, a variação da extensão não é a mesma para os diversos sensores.

O processo utilizado para fazer o acerto das leituras da roda foi o seguinte: Nas posições a  $90^\circ$  e  $270^\circ$ , os extensómetros devem ter o mesmo valor de extensão, visto que a roda e o seu carregamento apresentam simetria em relação a um plano que passa pelo extensómetro a  $0^\circ$ ; devido a este facto, pode-se calcular um factor de acerto para pares de extensómetros colados em oposição.

O acerto de extensómetros colados a  $90^\circ$  é feito tendo em atenção que a diferença de extensão lida quando temos extensómetros a  $0^\circ$  e  $270^\circ$  deve ser a mesma quando estes estão a  $90^\circ$  e  $0^\circ$ , respectivamente. Aplicando estes dois processos aos extensómetros da roda conseguimos fazer o acerto destes entre eles; deve-se notar que a referência das novas curvas é um valor de extensão desconhecido, ou seja, é o valor inicial (zero definido anteriormente) para um dos extensómetros. Uma vez que para se fazer o cálculo das forças se vão utilizar diferenças entre pontos de medição e não valores absolutos, como se verá mais adiante, este facto não tem qualquer importância para o processo em estudo.

A comparação das curvas experimentais e numéricas foi feita recorrendo a valores de grandezas medidas em pontos particulares destas; os pontos

escolhidos foram os correspondentes às seguintes posições angulares (em rad): 0,  $\pi/4$ ,  $\pi/2$ ,  $3\pi/4$ ,  $\pi$ ,  $5\pi/4$ ,  $3\pi/2$ ,  $7\pi/4$  e ainda 1.505 e 4.788 radianos.

O cálculo das forças de contacto é feito recorrendo a uma função de optimização pertencente ao software MATLAB, especialmente concebida para aproximar resultados experimentais a expressões teóricas. No presente caso, a expressão teórica não é mais que uma aproximação polinomial a cada uma das curvas de extensão obtidas pelo método dos elementos finitos.

A função de optimização calcula os parâmetros que melhor aproximam as curvas numéricas às experimentais, com base num critério de minimização do erro obtido pelo método dos mínimos quadrados. Assim, se considerarmos que uma curva experimental é a composição de duas curvas teóricas, uma devida à força vertical e outra devida à força lateral, multiplicadas cada uma por um parâmetro que nos dá a sua magnitude,  $\alpha_1 T_V + \alpha_2 T_L$ , a aproximação é feita calculando o erro em cada um dos pontos de interesse definidos anteriormente:

$$\min \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^5 (\alpha_1 T_V^i + \alpha_2 T_L^i - E^i)^2 + (\alpha_1 T_V'^3 + \alpha_2 T_L'^3 - E'^3)^2}$$

com

- $\alpha_1$  parâmetro de optimização relativo à força vertical
- $\alpha_2$  parâmetro de optimização relativo à força lateral
- $T_V^i$  extensão no ponto  $i$  devida à força vertical, calculada pelo MEF
- $T_L^i$  extensão no ponto  $i$  devida à força lateral, calculada pelo MEF
- $E^i$  extensão no ponto  $i$  obtida nas leituras experimentais
- $T_V'^3$  derivada da curva de extensão no ponto 3 devida à força vertical, calculada pelo MEF
- $T_L'^3$  derivada da curva de extensão no ponto 3 devida à força lateral, calculada pelo MEF

$E^3$  derivada da curva de extensão no ponto 3 obtida nas leituras experimentais

Deve-se realçar a importância do cálculo das extensões no pontos situados a 1.505 e 4.788 radianos: Uma vez que o zero dos extensómetros é desconhecido, podemos definir o zero das curvas como a extensão medida nestes pontos, quer para as curvas experimentais quer para as teóricas, obtendo-se assim um valor de referência válido nos dois casos.

O algoritmo de optimização fornece como output um número de pares de parâmetros  $(\alpha_1, \alpha_2)$  igual ao número de pontos de contacto adoptados na superfície de contacto. A escolha do par (ou intervalo de pares) que melhor se adapta à curva experimental, ou seja, a escolha do ponto de contacto roda-carril e do par de forças, é feita recorrendo às extensões medidas no eixo no mesmo instante de tempo. Assim, se calcularmos a extensão teórica a que o eixo está sujeito na localização do extensómetro e a compararmos com a lida no mesmo instante, podemos escolher o ponto de contacto roda-carril. A figura 22 ilustra este procedimento.

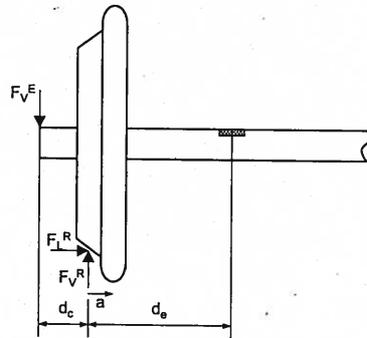


Figura 22 – Recurso às extensões lidas nos extensómetros do eixo.

A distância  $a$  na figura representa a variação do ponto de contacto roda/carril; esta grandeza pode fazer variar a extensão calculada no eixo até 25%.

A força  $F_v^E$  é calculada subtraindo à força  $F_v^R$  o peso duma roda e meio eixo, uma vez que não se sabe a sua magnitude.

O momento calculado no extensómetro é dado por

$$\begin{aligned}
 M_e &= F_V^E (d_c + d_e) - F_V^R (d_e - a) + F_L^R r_d = \\
 &= (F_V^R - M_{RE}) (d_c + d_e) - F_V^R (d_e - a) + F_L^R r_d = \\
 &= F_V^R (d_c + a) + F_L^R r_d - M_{RE} (d_c + d_e)
 \end{aligned}$$

com

$M_e$  momento aplicado na cota de localização do extensómetro (eixo)

$F_V^E$  força vertical aplicada na caixa de eixo

$F_V^R$  força vertical aplicada na roda

$F_L^R$  força lateral aplicada na roda

$M_{RE}$  peso de meio rodado

$d_c$  distância da caixa de eixo ao ponto de contacto médio

$d_e$  distância do ponto de contacto médio ao extensómetro

$a$  distância do ponto de contacto médio ao ponto de contacto real

$r_d$  raio da roda

A influência do ponto de contacto no braço da força lateral aplicada na roda é desprezável quando comparada com a força vertical.

A extensão vem dada por

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_e}{E} = \frac{M_e \cdot r_e}{EI} = \frac{4M_e}{Er_e^3}$$

com

$\hat{a}_e$  extensão na direcção axial calculada no ponto de leitura do extensómetro

$\hat{o}_e$  tensão na direcção axial calculada no ponto de leitura do extensómetro

$r_e$  raio do eixo

$E$  módulo de elasticidade do material

$I$  momento de inércia da secção

## 4 - RESULTADOS

Tal como se referiu anteriormente, este trabalho apenas incidiu sobre a determinação de valores das forças de contacto roda/carril em troços aproximadamente rectilíneos em que não existe a possibilidade de contacto do carril com o verdugo da roda.

Nas figuras 23 e 24 mostram-se alguns dos resultados obtidos a partir da metodologia exposta neste artigo.

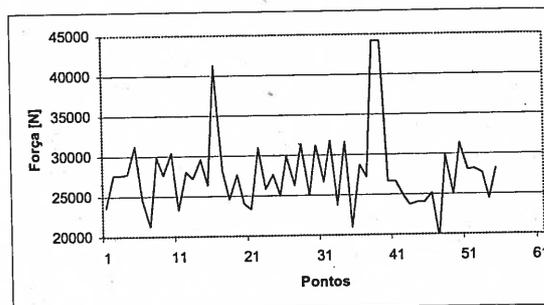


Figura 23 – Variação da força vertical no troço entre as estações de Arroios e Anjos do Metropolitano de Lisboa.

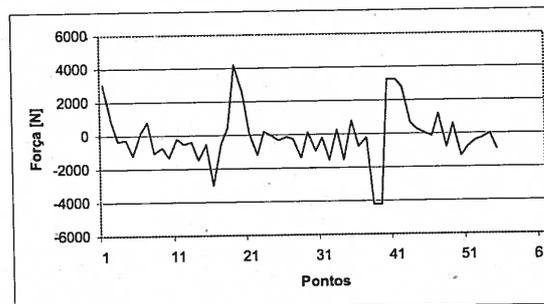
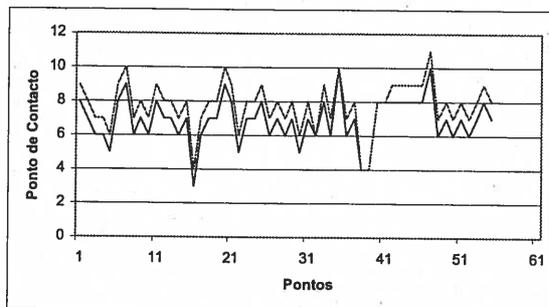


Figura 24 – Variação da força lateral no troço entre as estações de Arroios e Anjos do Metropolitano de Lisboa.

Os resultados anteriores foram comparados, com sucesso, com previsões teóricas obtidas em estudos de simulação em que um modelo do veículo foi submetido a perturbações definidas com base em valores medidos dos defeitos da via nos mesmos troços.

É ainda interessante verificar que a metodologia desenvolvida permite determinar a variação do ponto de contacto entre roda e carril e, conseqüentemente, permite visualizar o movimento de lacete a que o bogie está sujeito durante o percurso (figura 25).



**Figura 25** – Variação do ponto de contacto roda/carril no troço entre as estações de Arroios e Anjos do Metropolitano de Lisboa.

## 5 - CONCLUSÕES

Foi desenvolvida e implementada uma metodologia de medição das forças instantâneas de contacto entre roda e carril de um veículo ferroviário. A metodologia assenta num procedimento híbrido que

recorre à comparação de valores experimentais de extensões no rodado, obtidos em condições reais de funcionamento, com valores teóricos de modelos de elementos finitos correctamente afinados.

## 6 - AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar os seus agradecimentos aos membros do consórcio que realizou o projecto “Dinâmica de Veículos Ferroviários”, apoiado pelo PEDIP, em particular à empresa Bombardier Transportation Portugal SA, pela colaboração sempre prestada e por ter permitido a presente publicação.