

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DE RODAS DE COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS NA INFRA-ESTRUTURA

MARIA CRISTINA BEIRÃO BARBOSA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Rui Artur Bártolo Calçada

Co-Orientador: Doutor Luís Alberto de Almeida Ferreira

JUNHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais

Ao Zé Paulo

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio da FiberSensing e do Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural da FEUP. Desta forma quero agradecer particularmente aos meus orientadores, Prof. Rui Calçada e ao Doutor Luís Ferreira, pela dedicação e pela confiança em mim depositadas e pelos recursos disponibilizados.

Pela colaboração pronta sempre que solicitada quero destacar a Engenheira Cecília Vale a Engenheira Joana Delgado e o Engenheiro Ricardo Pimentel e referenciar toda a ajuda dos que participando directa ou indirectamente tornaram possível a realização da campanha experimental.

Por fim aos meus Pais e ao meu Irmão que trouxeram o suporte e a motivação para a realização desta tarefa, bem como à Eduarda pelo companheirismo e apoio constante.

RESUMO

O mau estado de conservação ou a existência de falhas nas rodas de composições ferroviárias têm diversos impactos nefastos quer para os comboios quer para a infra-estrutura onde estes circulam. O conhecimento dos efeitos e a sua detecção atempada são, por isso, do interesse geral. A informação gerada por um sistema que permita automaticamente identificar a ocorrência destes efeitos tem um elevado valor para todas as entidades intervenientes dado o impacto económico e de segurança que este problema tem actualmente.

No presente trabalho apresenta-se a base teórica, bem como resultados experimentais que servem como ponto de partida para o desenvolvimento de um sistema de monitorização automático de lisos em rodas de composições ferroviárias.

Numa primeira parte são abordados de forma teórica os efeitos da interacção veículo – via, sendo referidas as teorias que descrevem a transmissão de forças entre os comboios e os carris, dando-se particular ênfase ao facto de se criarem impactos dinâmicos devidos a defeitos nas rodas.

Numa segunda parte, com o objectivo de apresentar resultados teóricos dos efeitos de rodas defeituosas nas vias, é abordado o tema da modelação teórica apresentando resultados de cálculos numéricos efectuados para uma situação semelhante à encontrada na campanha experimental.

A campanha experimental foi realizada através da instalação de sensores de deformação nos carris utilizando a tecnologia de sensores de Bragg em fibra óptica. Esta tecnologia é particularmente adequada a esta aplicação pois os sensores de fibra óptica não requerem estímulo eléctrico nem são sensíveis a interferências electromagnéticas e de radiofrequência. Podem, além disso, ser implementados em série ao longo de uma única fibra proporcionando um *array* quase contínuo de sensores ao longo do carril. O levantamento de sistemas de identificação de defeitos actualmente comercializados permitiu definir algumas características do sistema implementado na campanha experimental.

A análise dos resultados obtidos permitiu criar bases empíricas para o desenvolvimento de um sistema automático e inovador de monitorização de defeitos em rodas.

PALAVRAS-CHAVE: caminhos-de-ferro, defeitos em rodas, impactos dinâmicos, sensores de Bragg, monitorização.

ABSTRACT

The existence of defects and poor maintenance on railway wheels has several ominous impacts both for the railway infrastructure and trains. Knowing their effects and being able to determine them in due time is of great interest. Creating an automatic monitoring system that allows the real time determination of a damaged wheel is of extreme value for the intervening entities.

In this work, the theoretical and experimental studies are the basis for the development of an automatic monitoring system for determining wheel flats in railway trains. Wheel - rail interaction effects are presented in a theoretical basis. The dynamic impacts that come from the existence of a faulty wheel are particularly referred.

The automatic calculation methods for the wheel – rail interaction are also referred. Some results of design models that simulate wheel defects are presented.

The experimental campaign that took place during this work was aimed at creating the empirical basis for the future development of a real time monitoring system. Fiber Bragg Grating sensors were used to measure strain on the rails. This technology is particularly suited for railway applications since the sensors are passive and are immune to electromagnetic interferences. The intrinsic multiplexing capability of this sensing technology allows the installation of a continuous array of sensors along the rail track. The study of existing commercialized systems of this kind allowed the definition of some of the experimental campaign characteristics.

With the generated information from the experimental campaigns it was possible to develop the basis for an innovative automatic monitoring system for determining wheel defects.

KEYWORDS: railway, wheel defect, dynamic impact, fibre Bragg grating sensors, monitoring.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 COMPOSIÇÃO DE UMA INFRA-ESTRUTURA FERROVIÁRIA BALASTRADA	1
1.1.1 SUPER-ESTRUTURA	1
1.1.1.1 Carris	1
1.1.1.2 Fixações	1
1.1.1.3 Travessas	2
1.1.2 SUB-ESTRUTURA	2
1.1.2.1 Balastro	2
1.1.2.2 Sub-balastro	2
1.1.2.3 Fundação	2
1.2 MATERIAL CIRCULANTE	2
1.2.1 COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA	2
1.2.1.1 Caixa do veículo	3
1.2.1.2 Bogie	3
2. INTERACÇÃO VEÍCULO – VIA	5
2.1 TRANSMISSÃO DE FORÇAS	5
2.3.1 FORÇAS QUASI-ESTÁTICAS	5
2.3.2 FORÇAS DE IMPACTO DINÂMICO	6
2.4 LISOS EM RODAS	7
3. MODELAÇÃO TEÓRICA	9
3.1 MODELO DE CÁLCULO	9
3.1.1 MODELO TEÓRICO DOS SISTEMAS VEÍCULO E VIA	9
3.1.1.1 Sistema “Veículo”	10
3.1.1.2 Sistema “Via”	11

3.1.2 MODELO TEÓRICO UTILIZADO	12
3.2 RESULTADOS OBTIDOS	15
3.2.1 FORÇAS DINÂMICAS NA VIA	15
3.2.2 DESLOCAMENTOS DA VIA	15

4. SISTEMA DE DETERMINAÇÃO DE DEFEITOS DE RODAS

17

4.1 VANTAGENS DE UM SISTEMA DE DETECÇÃO DE RODAS DEFEITUOSAS	17
4.2 SISTEMAS EXISTENTES	17
4.2.1 SISTEMA WILD (WHEEL IMPACT LOAD DETECTOR).....	18
4.2.2 SISTEMA ATLAS	18
4.2.3 SISTEMA WID (WHEEL IMPACT DETECTOR).....	19
4.2.4 SISTEMA GOTCHA.....	21
4.2.5 SISTEMA LASCA®	22
4.3 COMPARAÇÃO DE SISTEMAS EXISTENTES	25
4.4 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA	25
4.5 TECNOLOGIA ADOPTADA	26
4.5.1 SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA.....	27
4.5.1.1 Fibra óptica	27
4.5.1.2 Fibra óptica como elemento sensor	28
4.5.1.3 Redes de Bragg em fibra óptica	29
4.5.1.4 Sensores de Bragg em fibra óptica	30
4.5.1.5 Vantagens e desvantagens da utilização de sensores de Bragg	31
4.5.2 TECNOLOGIA DE INTERROGAÇÃO	32

5. CAMPANHA EXPERIMENTAL.....

35

5.1 LOCALIZAÇÃO	35
5.2 INSTALAÇÃO DOS SENSORES	36
5.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO	37
5.4 RESULTADOS OBTIDOS	38
5.5 ANÁLISE DE RESULTADOS	44
5.5.1 REPRESENTAÇÃO DOS DADOS E PRIMEIRO TRATAMENTO	46
5.5.2 CÁLCULO DE VELOCIDADE E NÚMERO DE EIXOS	48

5.5.3 DIFERENÇAS ENTRE EIXOS	50
5.5.4 COMPARAÇÃO DE VALORES REGISTRADOS E VALORES FILTRADOS	54
5.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS TEÓRICOS	57
 6. CONCLUSÕES	 59
6.1 CONCLUSÃO	59
6.2 TRABALHOS FUTUROS	59
 BIBLIOGRAFIA	 61

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Configuração típica de uma linha de caminho de ferro balastrada.	1
Fig. 2 Constituição comum de um bogie [3].	3
Fig. 3 Efeitos estáticos e dinâmicos [5].	6
Fig. 4 Forma da irregularidade.	7
Fig. 5 Modelo comum para simulação numérica [7].	10
Fig. 6 Modelo da via [8].	12
Fig. 7 Modelo do veículo ($\frac{1}{4}$ de bogie) [8].	13
Fig. 8 Simulação do liso.	14
Fig. 9 Força dinâmica na Via.	15
Fig. 10 Deslocamentos na Via.	16
Fig. 11 Aplicação do sistema de medição da Salient Systems, Inc.	18
Fig. 12 Sistema Atlas: a) Tipo de medição obtida; b) Aplicação na via.	19
Fig. 13 Sistema WID: a) Sensores; b) Aplicação na via.	19
Fig. 14 Sistema WID: base de dados de comboios.	20
Fig. 15 Sistema WID: base de dados de eixos.	20
Fig. 16 Sistema WID: mensagem de alarme.	21
Fig. 17 Sistema GOTCHA: a) Sensor; b) Instalação.	22
Fig. 18 Sistema GOTCHA: efeito de um defeito no sinal registado.	22
Fig. 19 Sistema LASCA®: a) Sensor; b) Esquema de medição.	23
Fig. 20 Sistema LASCA®: registo de um sensor sob a passagem de um ICE1 a 210Km/h.	23
Fig. 21 Sistema LASCA®: dados a interpretar.	24
Fig. 22 Sistema LASCA®: perfil da roda avaliada na Fig. 21.	24
Fig. 23 Esquema de aplicação do sistema SISPEFE.	26
Fig. 24 Estrutura de uma fibra óptica.	27
Fig. 25 Transmissão na fibra óptica: a) Monomodo; b) Multimodo.	28
Fig. 26 Fibra óptica como elemento sensor.	28
Fig. 27 Princípio de operação das redes de Bragg [22].	29
Fig. 28 Fabrico de redes de Bragg pelo método da máscara de fase.	30
Fig. 29 Utilização de filtros para interrogação de redes de Bragg.	32
Fig. 30 Localização dos ensaios.	35
Fig. 31 Esquema de localização dos sensores.	36

Fig. 32 Pormenor da localização dos sensores.	36
Fig. 33 Instalação dos sensores: a) alinhamento; b) posições de medição.	37
Fig. 34 Instalação pronta: a) Protecção; b) Vista geral.	37
Fig. 35 Aquisição durante a campanha experimental.	38
Fig. 36 Passagem de composições: a) Suburbano; b) Mercadorias.	39
Fig. 37 Registos para a passagem de um comboio Suburbano às 14:27.	40
Fig. 38 Registo de um só sensor para a passagem de um comboio Suburbano às 14:27.	40
Fig. 39 Pormenor da passagem de um comboio Suburbano às 14:27.	41
Fig. 40 Registos para a passagem de um comboio de Mercadorias às 17:31.	42
Fig. 41 Pormenor da passagem do Comboio de Mercadorias às 17:31.	43
Fig. 42 Diagrama de blocos - LabVIEW™.	44
Fig. 43 Filtro do tipo “Butterworth filter”.	45
Fig. 44 Resultado para a passagem do comboio de mercadorias das 14:53.	46
Fig. 45 Pormenor com apenas dois dos sensores activos (valor real e valor filtrado).	47
Fig. 46 Resultados de pormenor para dois sensores com representação sobreposta.	48
Fig. 47 Determinação da velocidade por eixo.	49
Fig. 48 Determinação da distância entre eixos.	49
Fig. 49 Velocidade por eixo de acordo com a sua posição.	50
Fig. 50 Avaliação das deformações máximas registadas por cada sensor.	51
Fig. 51 Registos sobrepostos do pico com maior disparidade de deformações.	52
Fig. 52 Registos sobrepostos do pico com menor disparidade de deformações.	52
Fig. 53 Registo do Sensor 2.	53
Fig. 54 Registo do Sensor 2 para a passagem do comboio Suburbano das 15:27.	54
Fig. 55 Exemplo de pico sem perturbações de alta frequência.	55
Fig. 56 Exemplo de pico com perturbações de alta frequência.	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características da Via	13
Tabela 2 – Características do Veículo	14
Tabela 3 – Passagens de composições registradas	39

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – área [m^2]

C_H - constante de rigidez não linear [kN/m]

C_i – coeficiente de viscosidade do elemento i [kN/m/s]

D – distância [m]

d - profundidade [m]

e - espaçamento entre apoios na fundação [m]

E – modulo de Young [Pa]

f - força de contacto [kN]

I – amplitude

I – momento de inércia [m^4]

J_i – momento de inércia à rotação do elemento i [m^4]

K_i – rigidez [kN/m]

l - comprimento [m]

l_i – distância ao centro de massa [m]

M_i - massa do elemento i [Kg]

m_i - massa por metro linear [Kg/m]

n_{ef} - índice de refração efectivo da fibra para o modo guiado pela fibra

p_e - constante fotoelástica

P_i – força de contacto [N]

Q_D – Carga de dimensionamento [kN]

Q_{est} – carga estática [kN]

r - irregularidade distribuída do carril

$r(t)$ – perfil de defeito da roda

v – velocidade

$w_i(t)$ – movimento vertical do elemento i [m]

x – coordenada [m]

x - deslocamento vertical da roda [m]

y - deslocamento vertical do carril [m]

α - coeficiente de expansão térmica [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

β_T - coeficiente de sensibilidade térmica da rede de Bragg [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

β_{ϵ} - coeficiente de sensibilidade à deformação da rede de Bragg

ε – deformação [m/m]

$\varnothing$ – coeficiente de amplificação dinâmica

$\varnothing$ – fase

Θ - polarização

λ - comprimento de onda [m]

λ_B - comprimento de onda de Bragg [m]

Λ - período da modulação [s]

ζ - dependência do índice de refração na temperatura [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

ρ - massa volúmica [kg/m^3] ou massa por metro linear [kg/m]

u - coeficiente de Poisson

$\psi_i(t)$ – rotação do elemento i [rad]

ω – frequência [Hz]

ADIF - Administrador de Infraestructuras Ferroviarias

B-WIM – Bridge Weight-In-Motion

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing

FBG – Fiber Bragg Grating

INESC – Instituto Nacional de Engenharia de Sistemas e Computação

LESE – Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural

REFER – Rede Ferroviária Nacional

RENFE – Red Nacional de Ferrocarriles Españoles

WID – Wheel Impact Detector

WILD - Wheel Impact Load Detector

WIM - Weight-In-Motion

INTRODUÇÃO

1.1 COMPOSIÇÃO DE UMA INFRA-ESTRUTURA FERROVIÁRIA BALASTRADA

A configuração de uma via de caminho de ferro balastrada é a apresentada esquematicamente na Fig. 1 [1], [2].

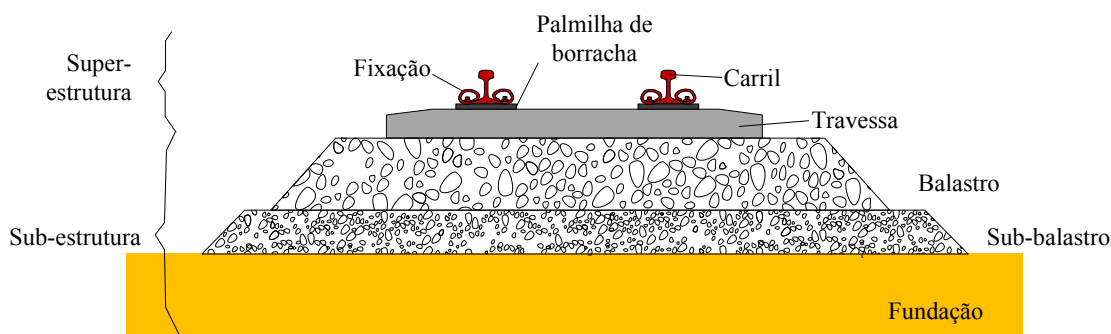


Fig. 1 Configuração típica de uma linha de caminho de ferro balastrada.

1.1.1 SUPER-ESTRUTURA

1.1.1.1 Carris

Os carris são estruturas longitudinais de aço apoiadas em travessas espaçadas de forma regular. A sua função é a de orientar os rodados. São elementos rígidos e resistentes de modo a manter sua forma e a configuração da via sem desvios, sob as cargas intensas dos rodados. A principal função estrutural dos carris é a acomodação e transmissão das cargas aplicadas para as travessas de suporte. Nas linhas mais modernas e electrificadas, os carris têm ainda a função de conduzir corrente eléctrica.

1.1.1.2 Fixações

O apoio dos carris nas travessas materializa-se através dos elementos mecânicos de fixação e por aparelhos de absorção de efeitos dinâmicos. As fixações suportam as forças verticais, longitudinais e laterais aos carris mantendo-os em posição sobre as travessas. Fazem a transmissão das forças induzidas nos carris pelas rodas, pelas variações térmicas e por outros esforços ambientais às travessas adjacentes. Na base do carril, na zona do apoio, são colocadas palmilhas que amortecem a passagem de cargas dinâmicas dos carris e das fixações para as travessas. O coeficiente de amortecimento elevado das palmilhas reduz consideravelmente a transmissão das componentes de altas frequências das forças entre os carris e os fixadores e as travessas. Em simultâneo, são elementos que

proporcionam maior resiliência à interação carril – travessa aliviando a base do carril e a zona de apoio da travessa. Desta forma reduz-se o atrito e a fissuração causada pelas componentes dinâmicas das forças transmitidas. As palmilhas de borracha são usadas em configurações de via onde as travessas são de betão, não se aplicando em travessas de madeira pelas características deste material [2].

1.1.1.3 Travessas

As travessas são vigas transversais apoiadas no balastro.

Tradicionalmente eram realizadas em madeira. No entanto, com o aparecimento do betão pré-esforçado, um material com boa durabilidade e maior período de vida útil, as novas linhas passaram a ser construídas com travessas deste material. O principal objectivo das travessas é a transmissão das forças dos carris ao balastro e, consequentemente, às fundações. Além disso, as travessas permitem a manutenção dos carris na sua posição. Assim garantem a conservação da bitola ao longo de todo o traçado, a inclinação e suportam acções longitudinais, transversais e verticais nos carris.

1.1.2 SUB-ESTRUTURA

1.1.2.1 Balastro

O balastro é uma camada permeável de agregados inertes que é usada como apoio elástico para as travessas. É tipicamente composto por gravilha de granito ou basalto, de acordo com a abundância do material na área. As funções do balastro são a transferência de cargas ao sub-balastro e a drenagem de água da super-estrutura.

1.1.2.2 Sub-balastro

O sub-balastro, camada colocada entre a fundação e o balastro, é normalmente composto por agregados mais finos e escórias. Tem as mesmas funções de transmissão de cargas à fundação.

1.1.2.3 Fundação

A fundação é a última camada a suportar e a distribuir os efeitos dinâmicos das cargas, correspondendo ao solo e rochas situadas na base das outras camadas. O solo ou rocha da fundação deve ter resistência suficiente para absorver e distribuir as cargas aplicadas, ter boa permeabilidade para permitir o escoamento de águas e não sofrer assentamentos demasiados para não comprometer o funcionamento da via ao longo do seu período útil de vida. Actualmente são aplicados materiais como os geotêxteis que permitem melhorar o desempenho do material de fundação existente.

1.2 MATERIAL CIRCULANTE

1.2.1 COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA

O material circulante é habitualmente composto por composições onde existe uma locomotiva à qual se ligam vagões ou carruagens [3]. As forças das composições são transmitidas à via pelas suas rodas. A caracterização das diversas composições faz-se comumente pelo número e distância de eixos. O número de eixos por veículo pode variar, sendo habitual bogies de dois eixos.

1.2.1.1 Caixa do veículo

A caixa do veículo é a parte da composição que transporta os passageiros e/ou as mercadorias.

1.2.1.2 Bogie

O bogie tem como função guiar as composições ao longo das linhas, garantindo a estabilidade do veículo através da sua suspensão. A suspensão é normalmente composta por molas minimizadoras de impacto e amortecedores para suavizar a viagem. A Fig. 2 apresenta um esquema de um bogie comum.

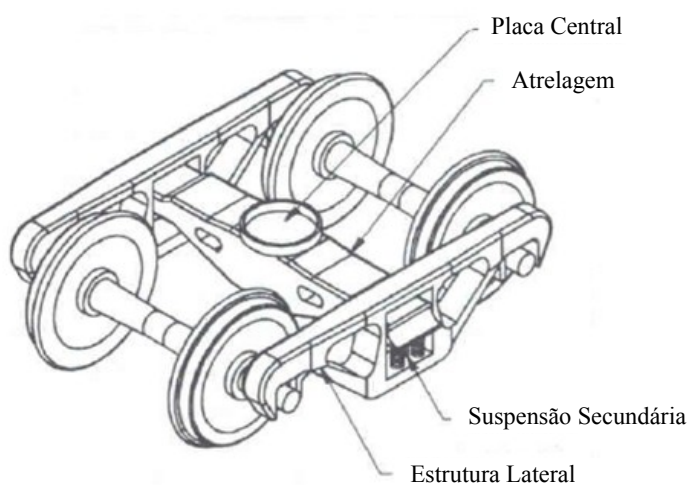


Fig. 2 Constituição comum de um bogie [3].

A roda é o elemento de contacto entre a composição ferroviária e a via. São elementos cónicos para facilitar o deslocamento de forma centrada, guiando a composição com mais facilidade minimizando os efeitos do traçado da via.

2

INTERACÇÃO VEÍCULO – VIA

Neste capítulo pretende-se apresentar os efeitos de interacção veículo – via durante a passagem de uma composição ferroviária sobre uma via balastrada. São descritos os efeitos que as cargas transmitidas provocam à infra-estrutura por defeitos nas rodas e na via, e a amplificação dinâmica de cargas de impacto criada pelo efeito conjunto das irregularidades com a velocidade.

2.1 TRANSMISSÃO DE FORÇAS

O contacto de duas peças de aço – a roda e o carril – é explicado pela teoria Hertziana de deformação. A superfície de contacto toma uma forma elíptica cuja dimensão é determinada pela força aplicada, pela rigidez e pelas curvaturas dos elementos em questão. As pressões criadas têm igualmente a forma de semi-elipse com a maior força de pressão localizada normalmente no centro da área de contacto. O valor da carga corresponde ao peso do veículo.

2.3.1 FORÇAS QUASI-ESTÁTICAS

No entanto, as forças exercidas pela passagem de um comboio sobre a linha não são apenas as forças estáticas de contacto. O facto de a composição se mover a uma determinada velocidade e de ser um sistema complexo com o bogie, a caixa e outras massas a responder a irregularidades, provoca forças com outras características.

No caso de a perturbação corresponder a irregularidades longas da via, que são carregamentos de baixa frequência (entre 0 a 20 Hz), as forças denominam-se quasi-estáticas. Para além da deformação que causaria uma carga aplicada pela roda do veículo, o carril sofre deformações devido ao comportamento do conjunto bogie – caixa do veículo e da via à passagem da carga com uma determinada velocidade.

Para efeitos de dimensionamento a contabilização dos efeitos quasi-estáticos é feita através do conceito de coeficiente de amplificação dinâmica. O coeficiente de amplificação dinâmica (ϕ) corresponde a um factor pelo qual se multiplicam as cargas estáticas (Q_{est}) de forma a obter um valor de carga de dimensionamento (Q_D) que entra em conta com o impacto das cargas quasi-estáticas na estrutura [1], [3].

$$Q_D = \phi Q_{est} \quad (1)$$

- Q_D é a carga de cálculo;
- Q_{est} é a carga estática aplicada pela roda da composição;
- σ é o coeficiente de amplificação dinâmica com um valor sempre superior a um e determinado empiricamente.

2.3.2 FORÇAS DE IMPACTO DINÂMICO

As forças dinâmicas de impacto entre a roda e a via são normalmente causadas por defeitos da via ou por defeitos nas rodas das composições. São disso exemplos os lisos nas rodas, as rodas deformadas ou corrugadas, as irregularidades de período curto nos carris, as juntas e soldaduras defeituosas, a corrosão ou descascamento. Estas deformações por impacto são normalmente muito maiores do que as obtidas por um carregamento estático da mesma magnitude de carga. O aumento deste efeito, quer por alteração da velocidade quer do defeito, pode ser de tal ordem ao ponto de poder causar o levantamento da roda em relação ao carril e a consequente perda de contacto criando, no momento em que os dois elementos se juntam de novo, um impacto ainda maior [4].

Na Fig. 3 representa-se esquematicamente as deformações sentidas na via devido aos efeitos quasi-estáticos e aos efeitos dinâmicos.

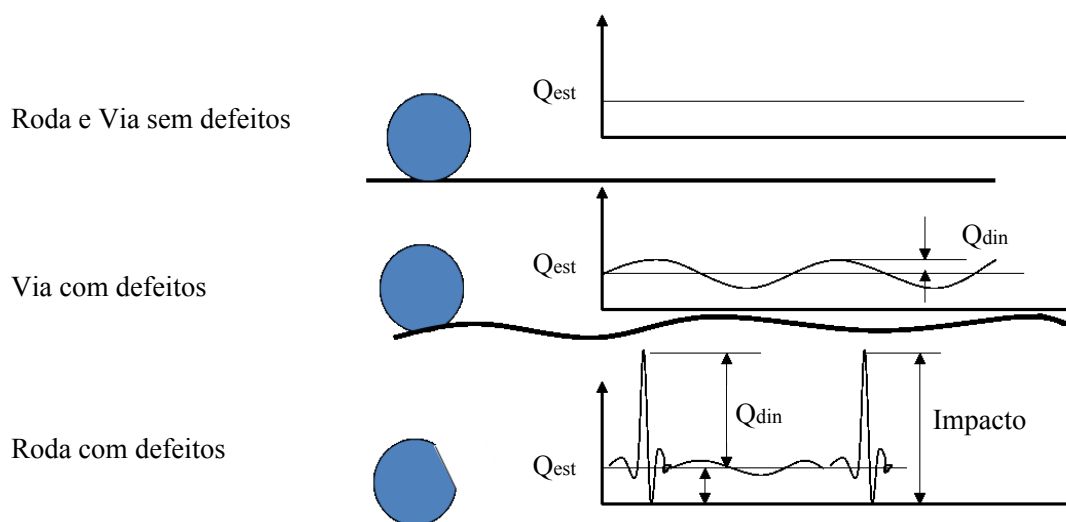


Fig. 3 Efeitos estáticos e dinâmicos [5].

A magnitude das forças de impacto é habitualmente alta, com duração no tempo muito curta (cerca de 2 a 10 ms) e com frequências elevadas [1]. Os seus efeitos não são desprezáveis e representam uma acção importante sobre as travessas, comprometendo o seu correcto dimensionamento e o seu comportamento ao longo do tempo.

As cargas de impacto por defeitos em rodas são repetitivas e degradam a estrutura por fadiga. Nomeadamente, podem provocar a fissuração das travessas de betão. Tratando-se de irregularidades no carril, o impacto dinâmico é constante no mesmo local havendo uma degradação rápida de todos os componentes da via na mesma zona. No caso de ser um defeito na roda o impacto repete-se ao longo de todo o trajecto do comboio degradando a infra-estrutura em todo o seu percurso [4].

Os métodos tradicionais de determinação de forças de interacção entre roda/carril utilizam fórmulas com factores de amplificação dinâmica que são calibrados empiricamente com base em observações e testes experimentais.

Nas forças de impacto já estudadas existem nitidamente dois picos de frequências:

- P1 – correspondente a frequências muito elevadas (> 100 Hz) e a forças de muito curta duração (< 1 ms);
- P2 – correspondente a menores frequências que o primeiro pico (30 a 90 Hz) sendo, no entanto, ainda classificado como dinâmico.

O pico P1 resulta da inércia dos carris e das travessas ao movimento vertical da roda quando esta causa a compressão na zona de contacto entre a roda e o carril. Estas forças que não afectam o balastro nem as camadas subjacentes, uma vez que são filtradas pelos carris e pelas travessas. Têm, no entanto, uma influência considerável no comportamento da interacção roda - carril.

O pico de menores frequências, P2, surge devido ao movimento de compressão do balastro causado pelo comportamento conjunto das travessas, dos carris e do veículo. São, por isso, forças que aumentam o esforço de contacto e o estado de tensão total no balastro, sub-balastro e fundação [3].

2.4 LISOS EM RODAS

Os lisos em rodas surgem quando há deslizamento da roda sobre o carril sem rotação. Isto pode suceder por não haver adesão suficiente entre a roda e o carril ou, de forma mais comum, por mau funcionamento de um travão que não permite a rotação de uma roda quando a carruagem inicia o seu movimento por a manter presa. Pode suceder, por exemplo, quando a roda aquece demasiado por efeito da frenagem “colando” os travões à roda após o arrefecimento. Durante o tempo em que a roda se mantém presa forma-se um liso na superfície de contacto. Quando a roda consegue finalmente soltar-se e inicia o movimento de rotação, cria e uma carga de impacto a cada revolução da roda [6].

Os lisos são habitualmente classificados pela sua profundidade e pelo comprimento do seu desenvolvimento (Fig. 4).

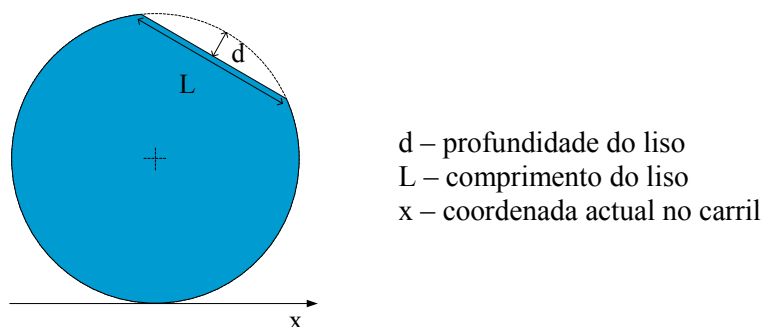


Fig. 4 Forma da irregularidade.

3

MODELAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo pretende-se apresentar alguns resultados calculados a partir da simulação teórica da passagem de uma roda com lisos sobre a via. São resultados obtidos no âmbito de outros trabalhos a decorrer na faculdade de engenharia. O modelo criado foi calibrado de modo a simular as características do local onde decorreu a campanha experimental apresentada no capítulo 5.

Procura-se, com os resultados obtidos, ter uma base para comparação dos resultados experimentais.

3.1 MODELO DE CÁLCULO

3.1.1 MODELO TEÓRICO DOS SISTEMAS VEÍCULO E VIA

A simulação teórica tem sido, nos últimos anos, uma ferramenta comum na análise da interação entre o veículo, as rodas e a via. Diversos estudos foram realizados com intenção de descrever o comportamento das estruturas durante a passagem de composições com defeitos [7]. É comum os modelos teóricos basearem-se em métodos de elementos finitos. A via é habitualmente considerada como uma viga de Euler-Bernoulli ou como viga de Timoshenko discretamente apoiada em elementos modelados como uma associação de massas, molas e amortecedores viscosos que correspondem às travessas, ao balastro, ao sub-balastro e à fundação. O balastro e o sub-balastro podem, em alternativa, ser modelados como elementos finitos em estado plano de tensão.

O material circulante é também simulado como um conjunto de massas molas e amortecedores. Na Fig. 5 apresenta-se o esquema de um modelo de cálculo comum.

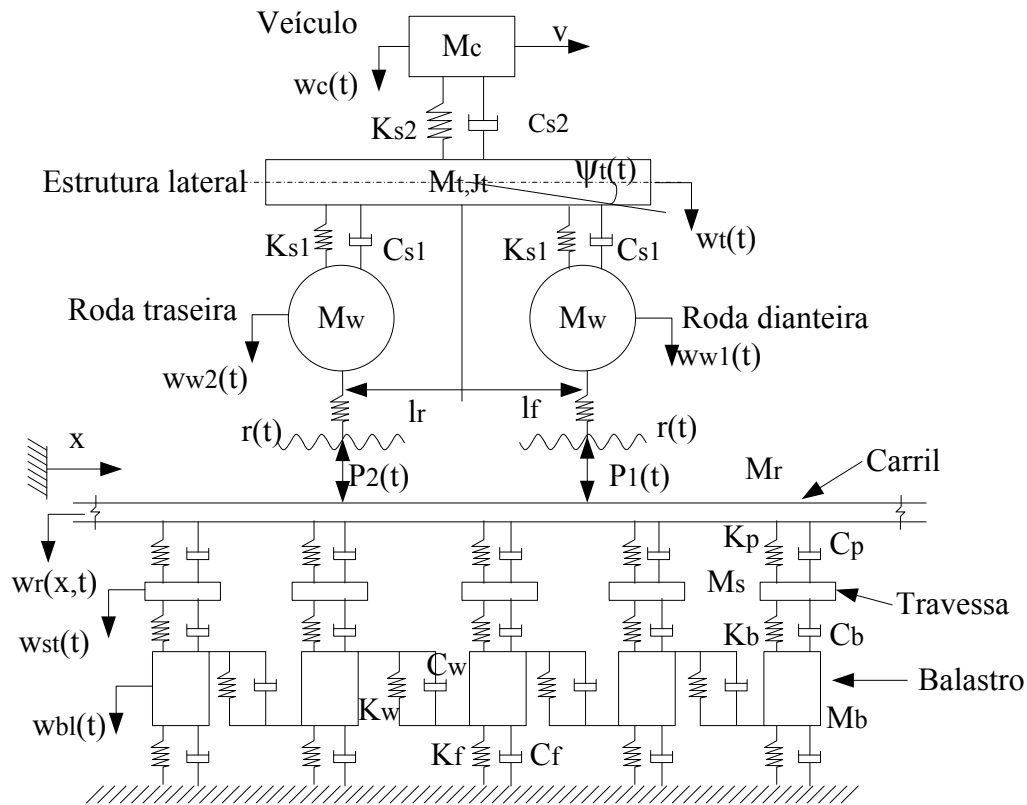


Fig. 5 Modelo comum para simulação numérica [7].

3.1.1.1 Sistema “Veículo”

O modelo do sistema veículo é um modelo dinâmico com 5 graus de liberdade:

- $w_c(t)$ – movimento vertical da caixa do veículo
- $w_t(t)$ – movimento vertical do bogie
- $\Psi_t(t)$ – rotação do bogie
- $w_{w1}(t)$ e $w_{w2}(t)$ – movimento vertical das rodas

As características dos diversos elementos são definidas por:

- K_{s1} – rigidez da mola do amortecedor primário
- K_{s2} – rigidez da mola do amortecedor secundário
- C_{s1} – amortecimento do amortecedor primário
- C_{s2} – amortecimento do amortecedor secundário
- $P_1(t)$ – força de contacto entre a roda dianteira e a via
- $P_2(t)$ – força de contacto entre a roda traseira e a via
- J_t – momento de inércia à rotação do bogie
- $r(t)$ – perfil de defeito da roda
- l_r – distância do eixo da roda traseira ao eixo do centro de massa do bogie
- l_f – distância do eixo da roda dianteira ao eixo do centro de massa do bogie
- M_c – massa da caixa do veículo
- M_t – massa do bogie
- M_w – massa da roda

3.1.1.2 Sistema “Via”

O modelo do sistema via é expresso por:

- $w_r(x,t)$ – movimento do conjunto carril, travessas e balastro
- $w_{st}(t)$ – movimento da travessa
- $w_{bt}(t)$ – movimento do balastro

E as características dos diversos elementos:

- K_p – rigidez da palmilha
- K_b – rigidez vertical do balastro
- K_w – rigidez de corte do balastro
- K_f – rigidez da fundação
- C_p – amortecimento da palmilha
- C_b – amortecimento vertical do balastro
- C_w – amortecimento ao corte do balastro
- C_f – amortecimento da fundação
- m_r – massa por metro linear do carril
- M_s – massa da travessa
- M_b – massa do “bloco” de balastro

O modelo apresentado na Fig. 5 é um exemplo dos modelos utilizados para cálculo dos efeitos da interação de veículo - via. Para casos concretos é possível a simulação com elementos simplificados que reduzem o esforço de cálculo sem alteração significativa dos resultados finais. Por exemplo, o veículo pode, de acordo com os efeitos a estudar, ser reduzido apenas a um eixo, conforme usado no modelo de cálculo apresentado à frente.

A simulação de defeitos numa roda pode ser considerada num modelo teórico utilizando uma equação que traduza o perfil da roda. Para um liso, a equação é do tipo da apresentada na Equação (2). Como já atrás foi referido, uma roda com um liso pode ser representada através das constantes que caracterizam esse defeito:

- O comprimento do liso (L)
- A profundidade de liso (D)

A equação que descreve esta irregularidade ao longo do perímetro da roda é função destes parâmetros [1].

$$r = \frac{1}{2}d \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right) \quad (2)$$

Uma outra forma de modelar um liso numa roda é representá-lo como uma irregularidade localizada no carril.

3.1.2 MODELO TEÓRICO UTILIZADO

No modelo desenvolvido no âmbito do trabalho de doutoramento, a via é modelada em 2D considerando o carril como elementos de viga Euler-Bernoulli apoiada discretamente sobre palmilhas - definidas como um sistema mecânico de mola e amortecedor em paralelo - e travessas representadas por uma massa pontual. O balastro e o sub-balastro são representados como elementos finitos de oito nós em estado plano de tensão. A fundação é representada por uma série de molas de adequada rigidez (fundação do tipo Winkler).

A via foi modelada considerando 90m de desenvolvimento com 4813 nós e 1945 elementos.

Na Fig. 6 apresenta-se o modelo de cálculo utilizado.

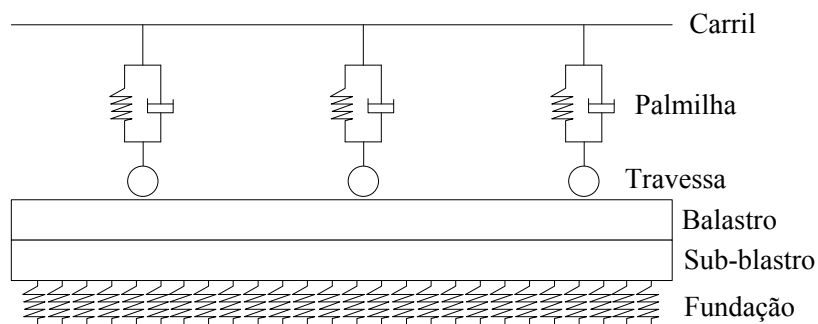


Fig. 6 Modelo da via [8].

Na Tabela 1 apresentam-se os valores considerados no cálculo (características gerais para a Linha do Norte em troços renovados) onde E é o módulo de Young do material, I o momento de inércia, A a área, ν o coeficiente de Poisson, ρ a massa volúmica ou massa por metro linear, K a rigidez, C o amortecimento, M a massa, d a distância e e o espaçamento entre apoios na fundação.

Tabela 1 – Características da Via

Elemento	Parâmetros
Carril	$E = 210 \text{ GPa}$
	$I = 3055 \text{ cm}^4$
	$A = 76,85 \text{ cm}^2$
	$\nu = 0,3$
	$\rho = 60,34 \text{ kg/m}$
Palmilha	$K_p = 1000 \text{ kN/mm}$
	$C_p = 123 \text{ kNs/m}$
Travessas	$M = 160 \text{ kg}$
	$d = 0,6 \text{ m}$
Balastro	$E = 130 \text{ MPa}$
	$\nu = 0,3$
	$\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$
Sub-balastro	$E = 120 \text{ MPa}$
	$\nu = 0,3$
	$\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$
Fundação	$K_f = 80 \text{ kN/mm}$
	$e = 0,15 \text{ m}$

Para modelo do veículo foi utilizado uma carruagem de comboio de mercadorias do tipo BS5600. Foi considerado um modelo de veículo simplificado representado por $\frac{1}{4}$ de bogie, considerado como adequado para a análise em questão [8]. Na Fig. 7 apresenta-se o esquema do modelo do veículo utilizado. As características do veículo foram retiradas da referência [9].

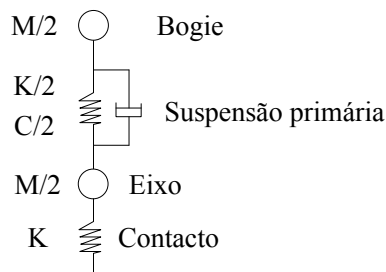


Fig. 7 Modelo do veículo ($\frac{1}{4}$ de bogie) [8].

Foi considerada a passagem do veículo a 100 km/h, correspondente à velocidade estimada na passagem de um comboio de mercadorias na campanha experimental apresentada no capítulo 5.

Tabela 2 – Características do Veículo

Elemento	Parâmetros
Bogie	M/2 = 1600 kg
Suspensão primária	K/2 = 1420 kN/m
	C/2 = 3.73 kNs/m
Eixo	M/2 = 750 kg

Para a simulação da interacção da roda sobre o carril usou-se o modelo de contacto não linear de Hertz [9] que pode ser descrito por:

$$f = \begin{cases} C_H(x - y - r)^{\frac{3}{2}} & \text{se } x - y - r > 0 \\ 0 & \text{se } x - y - r < 0 \end{cases} \quad (3)$$

onde f é a força de contacto, C_H é a constante de rigidez não linear, x o deslocamento vertical da roda, y o deslocamento vertical do carril e r a irregularidade distribuída do carril.

Para a simulação do efeito de um liso na roda, recorreu-se à introdução de um defeito na via com as mesmas características. O efeito de um liso numa roda com comprimento L e profundidade D será igual ao efeito de um defeito localizado na via com as mesmas características (Fig. 8). No cálculo efectuado utilizou-se $L = 0,1625$ m e $D = 0,5$ mm.

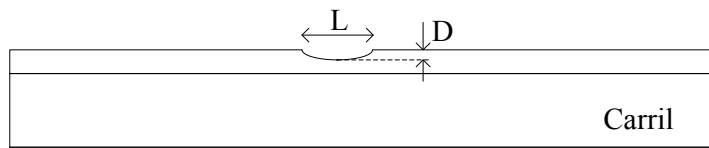


Fig. 8 Simulação do liso.

3.2 RESULTADOS OBTIDOS

3.2.1 FORÇAS DINÂMICAS NA VIA

Para o modelo atrás caracterizado, os resultados de força dinâmica obtidos para o caso de uma passagem de uma roda sem defeito e de uma roda com defeito apresentam-se na Fig. 9. Os resultados apresentados estão centrados num impacto onde se vê claramente que a carga dinâmica sofre aumentos devido à presença da imperfeição. A carga máxima na situação de roda perfeita é de aproximadamente 70 kN sendo aumentada para 100 kN na existência de um liso.

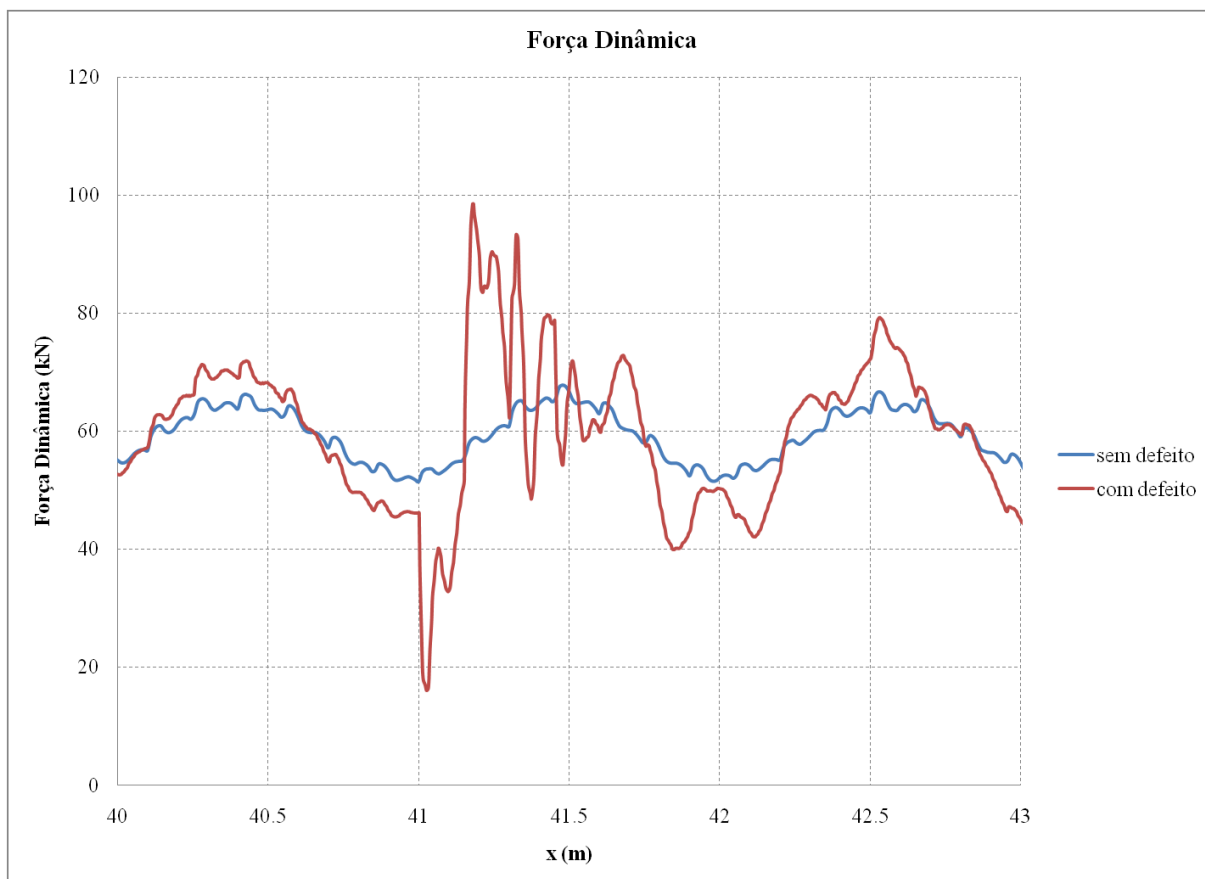


Fig. 9 Força dinâmica na Via.

3.2.2 DESLOCAMENTOS DA VIA

Relativamente ao efeito de um liso nos deslocamentos registados pelo carril, pode observar-se, conforme apresentado na Fig. 10, que no instante da passagem há perturbações de alta frequência para além do efeito do aumento de deslocamento.

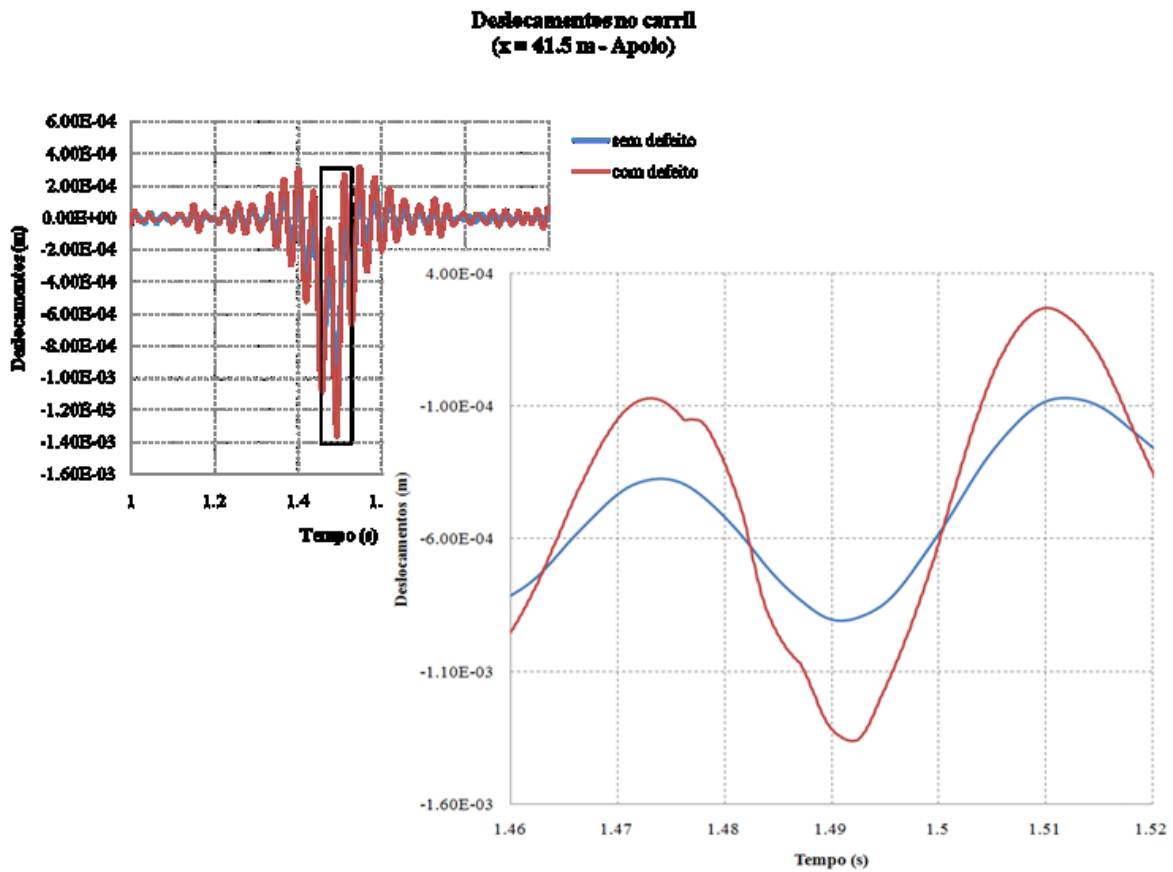


Fig. 10 Deslocamentos na Via.

Será espectável, nos resultados experimentais, observar este tipo de perturbações no espectro de deformações criado pela passagem de uma roda com defeitos.

4

SISTEMA DE DETERMINAÇÃO DE DEFEITOS DE RODAS

Neste capítulo é feita a descrição de um sistema idealizado para a determinação do estado de conservação das rodas do material circulante.

Em primeiro lugar faz-se um levantamento dos sistemas actualmente existentes ou em desenvolvimento que se propõem à resolução do mesmo problema: a identificação de rodas defeituosas à passagem de uma composição, sem a interrupção do normal funcionamento da linha. Por último, é feita uma comparação entre os métodos e apresenta-se o esboço de um sistema potencialmente concorrente.

4.1 VANTAGENS DE UM SISTEMA DE DETECÇÃO DE RODAS DEFEITUOSAS

As vantagens imediatas da utilização de um sistema de detecção de rodas defeituosas são o aumento da segurança e a redução de custos de manutenção. Os defeitos nas rodas aceleram o processo de degradação da via e dos veículos pelo que, quando detectadas, permitem a realização de manutenções preditivas e reparações mais leves.

Uma realidade que se verifica na maioria das redes ferroviárias consiste no facto de as entidades responsáveis pela infra-estrutura e as responsáveis pelo material circulante serem distintas criando-se uma dificuldade de regularização e controlo.

Um sistema de detecção de falhas em rodas é vantajoso para o dono da infra-estrutura que pode assim regular o nível de impactos dinâmicos que aceita nas suas vias, bem como para o dono do material circulante que consegue evitar danos maiores nas suas composições.

4.2 SISTEMAS EXISTENTES

De um modo geral, os sistemas de detecção de rodas defeituosas não se destinam unicamente à determinação dos defeitos. Frequentemente, o mesmo esquema sensor permite a determinação de outras características importantes tais como a velocidade e a carga por eixo. São disso exemplo os sistemas aqui apresentados que acrescentam a capacidade de determinação de cargas através de algoritmos de medição de peso em movimento (WIM – weight-in-motion).

Correndo o risco de não se encontrar completa, apresenta-se de seguida uma lista de sistemas encontrados no mercado actual.

4.2.1 SISTEMA WILD (WHEEL IMPACT LOAD DETECTOR)

A Salient Systems, Inc apresenta-se como sendo uma empresa inovadora de sistemas de detecção de falhas em real-time para a indústria de caminhos-de-ferro [10], [11]. O sistema WILD (Wheel Impact Load Detector) é um sistema de determinação de forças verticais aplicadas à estrutura ferroviária baseado na utilização de bandas extensométricas de resistência aplicadas nos carris.

O sistema consegue determinar as cargas nominais de cada roda, bem como cargas de pico, carga dinâmica e a razão entre estas duas grandezas. Determina também as cargas por eixo, a velocidade e o comprimento do comboio bem como a identificação da composição. Com base nesta informação o sistema faz o levantamento do total de cargas transportadas por linha, por comboio e por várias unidades de tempo (semana, mês, ...) assim como as condições atmosféricas registadas localmente.

A Salient publicita características do sistema como a resolução de 50 N com uma exactidão de 1% para medições estáticas e de 2% para medições dinâmicas. A gama de velocidades aceites vai desde os 50 até aos 300 km/h para operação entre os 0 °C e os 55°C. O sistema é instalado ao longo de 16 m da linha, conforme indicado na Fig. 11.

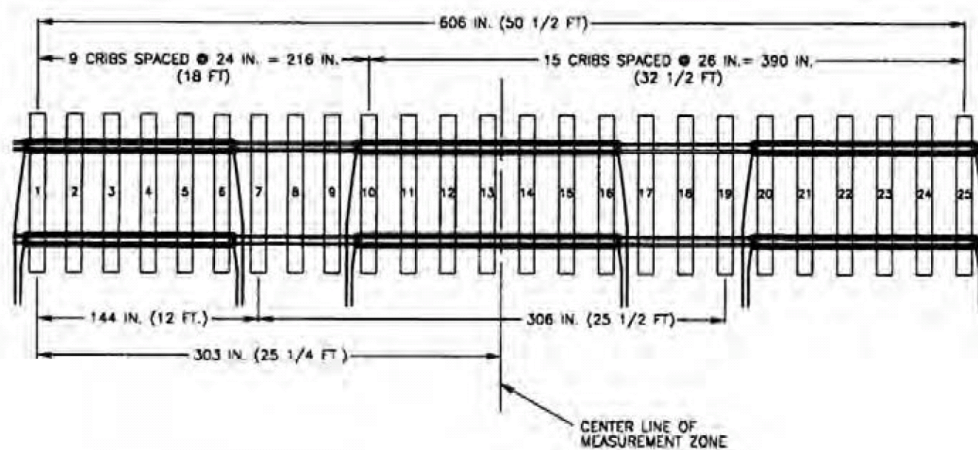


Fig. 11 Aplicação do sistema de medição da Salient Systems, Inc.[10]

4.2.2 SISTEMA ATLAS

O grupo VAE apresenta-se como sendo um dos líderes no mercado em soluções para vários tipos de transporte ferroviário, desde alta velocidade até ao metro [12]. No seu portfolio pode encontrar-se o sistema Atlas de determinação de lisos em rodas [13].

O sistema consiste na medição de deformações com extensómetros de resistência eléctrica que são convertidas em forças de reacção de cada travessa (R_n), num comprimento de confiança (entre T1 e T2) conforme apresentado no esquema da Fig. 12. O comprimento de medição é habitualmente de 4 m.

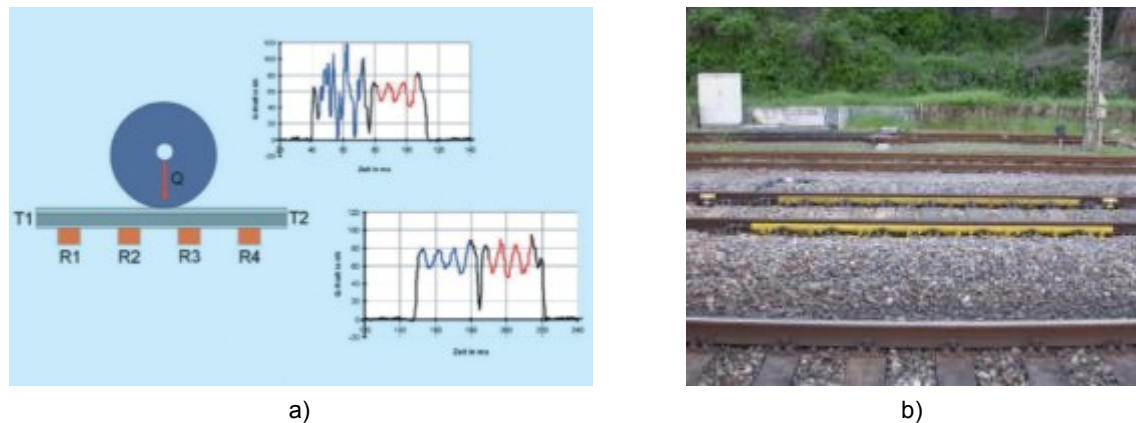


Fig. 12 Sistema Atlas: a) Tipo de medição obtida; b) Aplicação na via. [13]

Este sistema permite a identificação de defeitos em rodas de composições a circular entre os 60 e os 500 km/h e com cargas entre 1 a 70 t por roda. As temperaturas operacionais vão desde os -30 °C até aos 70 °C.

Tal como os sistemas apresentados anteriormente, é apontado como tendo um custo reduzido e permitindo o registo contínuo com geração de alarmes e com a identificação da localização do defeito.

4.2.3 SISTEMA WID (WHEEL IMPACT DETECTOR)

O sistema de determinação de impactos dinâmicos WID consiste na medição das deformações a meio vão entre travessas, através da aplicação de “balanças” sob o carril (Fig. 13). Foi instalado em alguns locais na rede ferroviária de Espanha para avaliação pela administração das infra-estruturas deste país (ADIF).

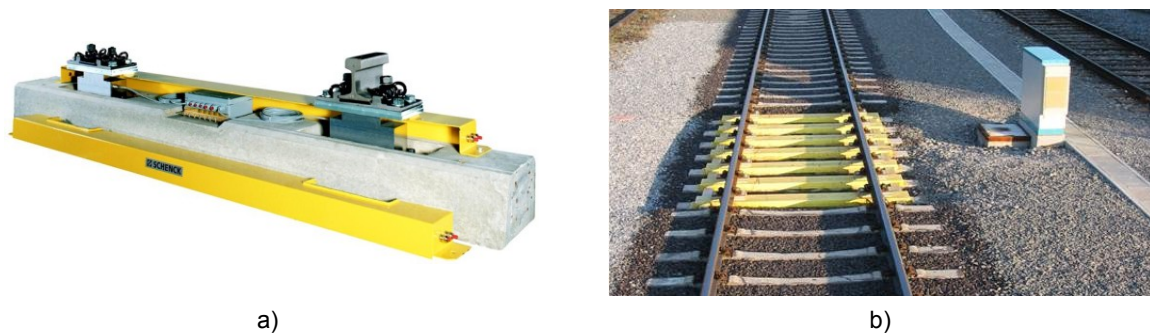


Fig. 13 Sistema WID: a) Sensores; b) Aplicação na via. [5]

O WID aplicado pela ADIF faz o processamento da informação guardando-os em duas bases de dados: uma para os comboios e outra para os eixos (Fig. 14 e Fig. 15). O sistema permite a identificação das composições que ultrapassam o valor de limite definido para impacto dinâmico (300 kN) e para carga máxima (25 t) [5]. Sempre que um limite é ultrapassado, é enviada uma mensagem de alarme para o centro de controlo de tráfego. Na Fig. 16 apresenta-se um ecrã típico da base de dados e da mensagem de alarme.

WheelChex Report Analysis: 'K:\ichex\WheelChex\Data\Current-3.db'

Archivo Ver Ayuda

Informe	Emplazamiento	Vía	Fecha	Velocidad (km/h)	Max Wheel Peak (kN)	Max Axle Load (Toneladas)	Max Axle
233615	Torredembarra	Track 1 Normal	01/09/2003 2:18:02	91.0	155	22.3	
233614	Torredembarra	Track 1 Normal	01/09/2003 0:24:10	147.0	187	22.1	
233613	Torredembarra	Track 1 Normal	01/09/2003 0:12:34	140.0	151	21.2	
233612	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/2003 23:25:47	158.0	184	21.8	
233611	Torredembarra	Track 1 Normal	31/08/2003 22:59:23	140.0	151	22.1	
233610	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/				
233609	Torredembarra	Track 1 Normal	31/08/				
233608	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/				
233607	Torredembarra	Track 1 Normal	31/08/				
233606	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/				
233605	Torredembarra	Track 1 Normal	31/08/				
233604	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/				
233603	Torredembarra	Track 1 Normal	31/08/				
233602	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/				
233601	Torredembarra	Track 1 Normal	31/08/				
233600	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/				
233599	Torredembarra	Track 1 Normal	31/08/				
233598	Torredembarra	Track 1 Normal	31/08/				
233597	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/				
233596	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/				
233595	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/				
233594	Torredembarra	Track 1 Normal	31/08/				
233593	Torredembarra	Track 1 Normal	31/08/				
233592	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/				
233591	Torredembarra	Track 1 Normal	31/08/				
233590	Torredembarra	Track 2 Normal	31/08/				

WheelChex Visible Fields

☒ Informe No.
☐ Nombre PM
☒ Emplazamiento
☒ Track name
☒ Fecha
☐ Tag count
☐ Identificación
☐ Headcode
☒ Velocidad
☐ Cómputo de ejes
☐ Dirección inversa
☒ Max wheel peak
☐ Max wheel peak axle
☐ Max wheel peak side
☒ Tonnage
☒ Max axle load
☒ Max axle load axle
☐ Wheel count left
☒ Wheel count right
☒ Train length
☐ Axle overload count
☐ Axle overload warning count
☐ Axle overload alarm count
☐ Wheel flat count
☐ Wheel flat info count
☐ Wheel flat warning count
☐ Wheel flat alarm count
☐ Wheel flat emergency count
☐ Axle load warn limit
☐ Axle load alarm limit
☐ Wheel flat info limit
☐ Wheel flat warn limit
☐ Wheel flat alarm limit
☐ Wheel flat emerg limit

Total reports: 18856 No filtering Date range: 15/06/2003 to 16/09/2003

Inicio Bandeja de entrada... Wheelchex Repo... 17:49

Fig. 14 Sistema WID: base de dados de comboios. [5]

Corel Paradox - [Table: K:\ichex\...\Current-3.db]

File Edit View Format Record Tools Window Help

	Report	RR	Axle No	Wheel Left Mean	Wheel Right Mean	Wheel Left Peak	Wheel Right Peak	Axle Spe	Dist	For	Overlap
1	132014	3	1	75	78	87	106	68	0		
2	132014	3	2	73	77	92	92	68	25		
3	132014	3	3	66	72	80	90	68	174		
4	132014	3	4	69	70	82	84	68	199		
5	132014	3	5	53	64	66	76	67	247		
6	132014	3	6	55	62	66	75	67	273		
7	132014	3	7	56	56	68	68	67	426		
8	132014	3	8	60	51	70	61	67	451		
9	132014	3	9	64	72	75	97	67	498		
10	132014	3	10	64	71	89	90	67	524		
11	132014	3	11	78	68	100	87	66	673		
12	132014	3	12	75	75	97	99	66	698		
13	132015	3	1	92	82	118	112	185	0		
14	132015	3	2	86	83	113	113	185	30		
15	132015	3	3	90	91	113	114	185	140		
16	132015	3	4	81	89	109	125	185	170		
17	132015	3	5	65	64	90	86	185	203		
18	132015	3	6	62	64	81	85	185	233		
19	132015	3	7	76	81	118	104	185	390		
20	132015	3	8	75	80	94	106	185	420		
21	132015	3	9	75	75	106	97	185	577		

Table: K:\ichex\...\Current...

View

Inicio Bandeja de entr... Wheelchex Repo... Corel Paradox... 17:54

Fig. 15 Sistema WID: base de dados de eixos. [5]

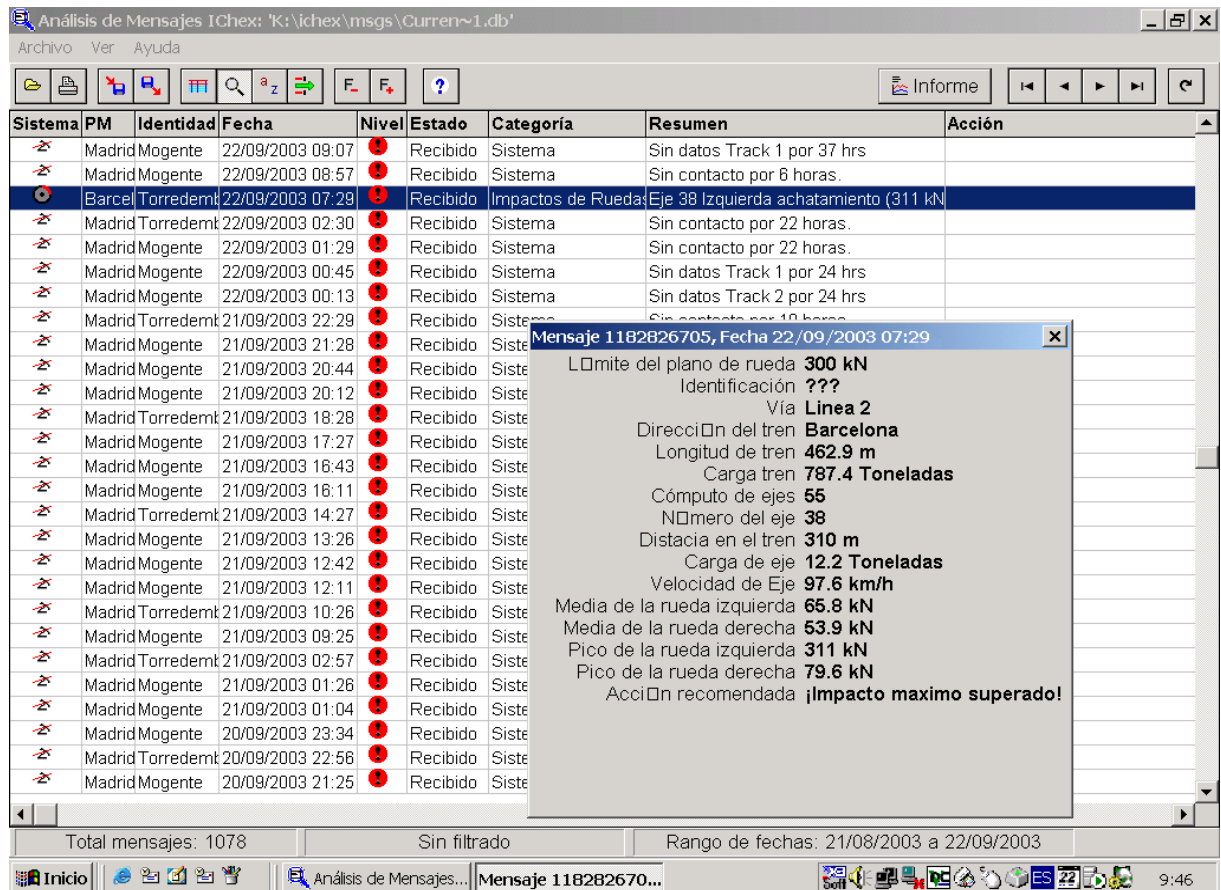


Fig. 16 Sistema WID: mensagem de alarme. [5]

Ao longo do tempo, por via experimental, o sistema permitiu aferir defeitos em rodas com erros <3% e pesos com erros <2%.

4.2.4 SISTEMA GOTCHA

O sistema Gotcha [14] consiste, de forma semelhante ao anterior, na instalação de sensores de deformação nos carris (Fig. 17). Neste caso, os sensores são de fibra óptica e são instalados entre travessas para determinar a flexão do carril.

O sistema utiliza 4 ou 6 sensores por carril (quanto maior o número de sensores instalados, melhor a exactidão do sistema) determinando a força de pico gerada por cada roda e analisando a deformação que esta gera no carril, distinguindo assim o tipo de defeito presente naquela roda. Permite também gerar dados sobre o número de eixos, a identificação da composição, velocidades e acelerações e fazer um levantamento da tonelagem da via, pesquisável a partir dos diversos parâmetros.

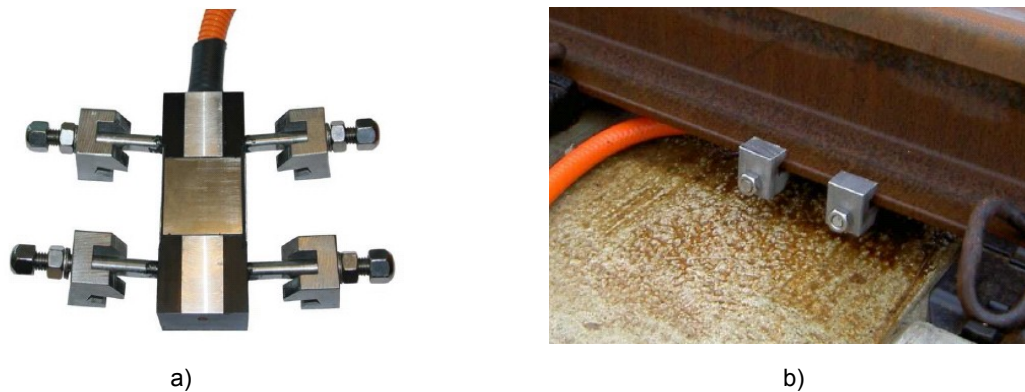


Fig. 17 Sistema GOTCHA: a) Sensor; b) Instalação. [14]

Na Fig. 18 apresenta-se um exemplo da flexão registada por um dos sensores do sistema devida à passagem de um bogie de dois eixos. No efeito da passagem da primeira roda é visível a presença de um defeito grande [14].

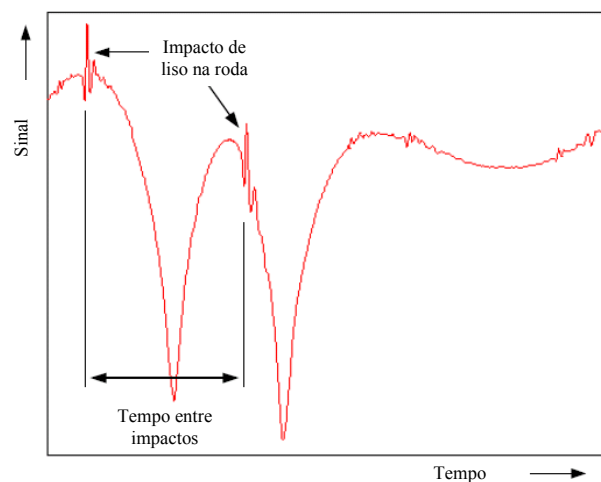


Fig. 18 Sistema GOTCHA: efeito de um defeito no sinal registado. [14]

A informação gerada pelo sistema GOTCHA é guardada numa base de dados podendo ser consultada e trabalhada por diversos utilizadores. Permite também a definição de alarmes e gera relatórios periódicos.

4.2.5 SISTEMA LASCA[®]

O sistema LASCA[®] é um sistema que foi desenvolvido pela Deutsche Bahn Netz para a monitorização automática da qualidade dos veículos circulantes nas infra-estruturas ferroviárias.

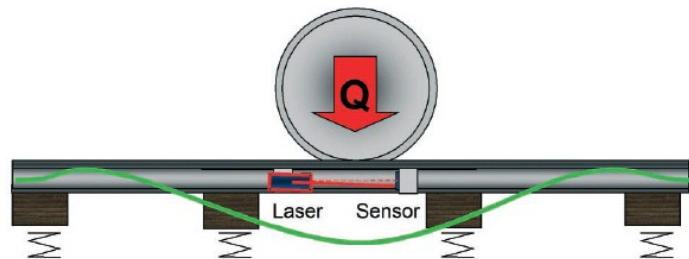
Consiste na utilização de 6 sensores laser por carril que determinam a flexão criada entre travessas pela passagem de uma roda (Fig. 19). O sistema tem uma resolução de 100 N e uma gama de medição praticamente ilimitada (uma carga de 100 kN corresponde apenas a 10% da gama de medição) [15]. As vantagens apontadas para este sistema são o facto de não interferir com a operação normal da via,

ser de fácil instalação e de poder ser facilmente mudado de local. A forma como os dados são tratados e guardados permite a geração de alarmes e acesso controlado.

Este sistema permite a determinação das mesmas grandezas e fornece as informações semelhantes aos apresentados anteriormente.



a)



b)

Fig. 19 Sistema LASCA®: a) Sensor; b) Esquema de medição. [15]

O registo obtido por um dos sensores devido à passagem dos diversos eixos está representado na Fig. 20. No entanto, o sistema apenas avalia uma parte dos dados recolhidos. Nomeadamente os picos registados para a mesma roda pelos 6x2 sensores (Fig. 21).

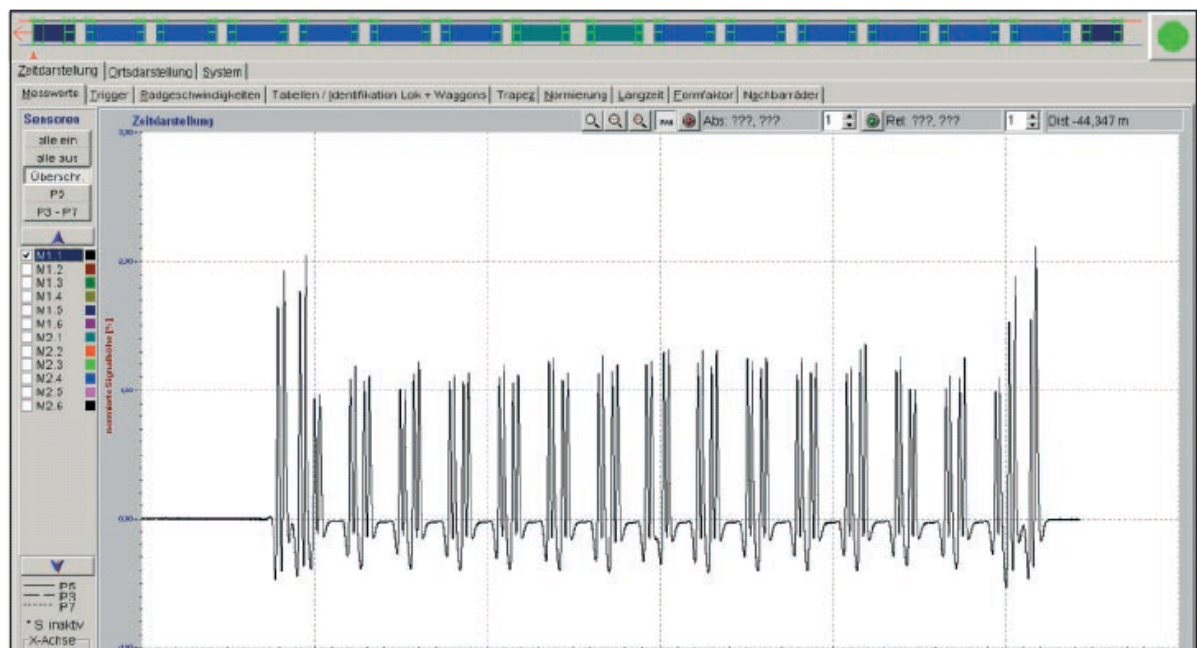


Fig. 20 Sistema LASCA®: registo de um sensor sob a passagem de um ICE1 a 210Km/h. [15]

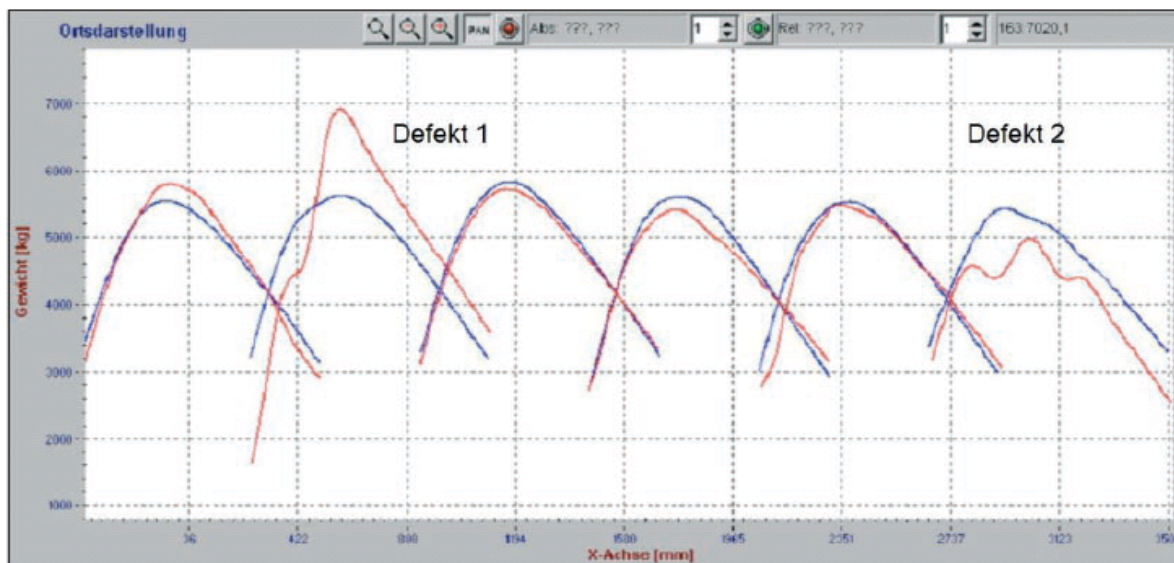


Fig. 21 Sistema LASCA®: dados a interpretar. [15]

Na Fig. 21 a Deutsche Bahn Netz exemplifica os dados que são analisados para a determinação de defeitos. A roda da esquerda, representada pela linha azul, aparenta não ter defeitos, enquanto que na roda da direita, a vermelha, é possível identificar duas perturbações devidas a defeitos. Na Fig. 22 apresenta-se o perfil da roda da direita medido em estaleiro com o sistema INNOtec's RUDI. Desta forma é demonstrada a boa correlação dos dados recolhidos pelo sistema Lasca® e pela avaliação habitual do perfil de rodas.

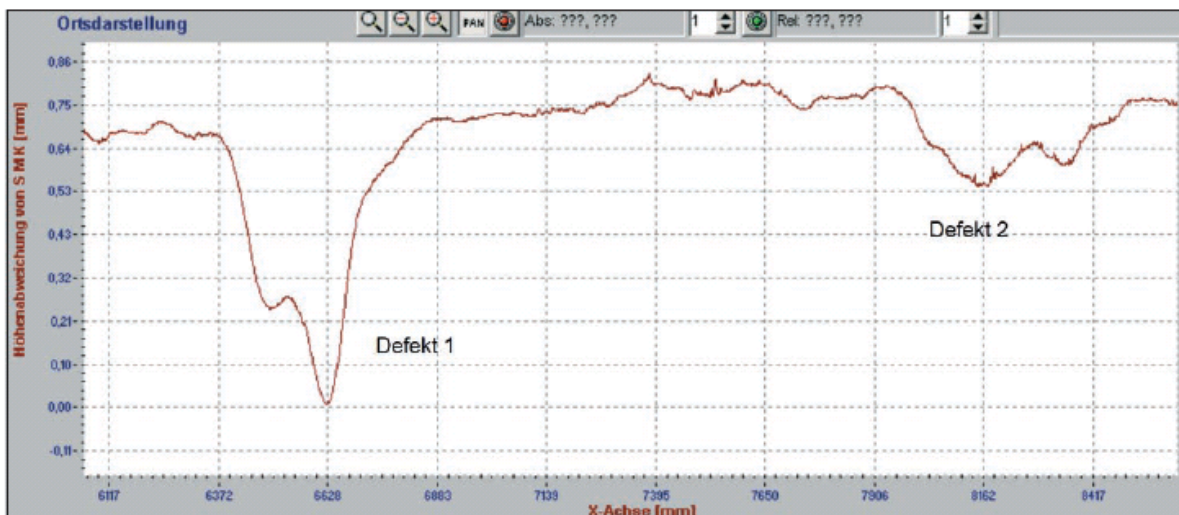


Fig. 22 Sistema LASCA®: perfil da roda avaliada na Fig. 21. [15]

4.3 COMPARAÇÃO DE SISTEMAS EXISTENTES

Todos os sistemas acima representados baseiam o seu funcionamento na determinação de cargas, quer aplicadas à estrutura, quer de reacção. Os métodos são variáveis, sendo o mais comum a determinação da flexão do carril entre travessas, seguindo-se a medição de deformações nos carris.

A determinação da existência e caracterização de lisos são baseadas em resultados de testes que estabelecem valores de referência de cargas dinâmicas de impacto. Estes valores são os usados para comparação a cada passagem de composições.

As especificações técnicas dos sistemas variam ligeiramente. As temperaturas de operação devem abranger as situações extremas que muitas vezes são observadas em campo. O sistema da Salient apresenta a menor faixa de temperaturas (de 0°C a 55°C) o que poderá dificultar a sua utilização em alguns locais. Já os sistemas Atlas e Gotcha aparentam estar preparados para um grande leque de ambientes. Relativamente às velocidades, mais uma vez são estes dois que se colocam em vantagem com a possibilidade de utilização com velocidades de 330 km/h para o sistema Gotcha e 500 km/h para o Atlas. A exactidão de todos os sistemas na determinação da carga por eixo situa-se entre 1% e 10%.

A facilidade de instalação em campo dos sistemas é variável. Sistemas como o apresentado pela ADIF requerem instalação de “travessas instrumentadas” pelo que são indicados para vias novas ou em recuperação. A sua aplicação requer a interrupção da circulação da via e a remoção/alteração de alguns dos seus elementos. Já os sistemas baseados em medição de extensões no carril recorrendo a bandas extensométricas – da Salient Systems e da Atlas – podem ser aplicados sem necessidade de remover elementos. No entanto, tratando-se de componentes eléctricos, por questões de segurança, a sua aplicação deverá ser efectuada sem a linha se encontrar em funcionamento. Os restantes sistemas apresentam soluções de instalação muito versáteis, sendo possível a instalação rápida, com a linha em funcionamento e possibilitam ainda a alteração do local de medição de uma forma simples, uma vez que usam ligações aparafusadas.

4.4 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA

Um dos objectivos deste trabalho é o de constituir uma base sólida para o desenvolvimento de um sistema de monitorização automático de determinação de defeitos em rodas.

Partindo dos registos da deformação dos carris aquando da passagem de uma composição, estima-se ser possível a criação de um algoritmo que automaticamente faça a identificação de eventos anómalos, ou seja, impactos dinâmicos passíveis de causar danos na via originados por defeitos nas rodas. No caso de uma roda apresentar imperfeições, os sinais e o espectro de deformação terá perturbações de frequência elevada que não se sentiriam se a roda fosse perfeita.

Procura-se que seja possível, partindo dos dados da campanha experimental realizada no âmbito deste trabalho, a criação de um sistema semelhante aos já existentes apresentando as suas vantagens e minimizando as suas desvantagens.

O desenvolvimento do sistema é realizado no âmbito da operação da FiberSensing, sendo o seu apoio fundamental para a adopção da tecnologia de sensores de Bragg em fibra óptica.

A utilização de sensores de Bragg em fibra óptica, apresentados de seguida, pode permitir o registo da deformação dos carris de forma particularmente efectiva e competitiva relativamente aos sistemas acima analisados. De facto, as suas características de imunidade a interferências electromagnéticas e de rádio frequência, bem como a possibilidade de se poderem colocar muitos sensores de deformação

ao longo de uma mesma fibra, permitem diminuir drasticamente a complexidade do sistema e facilitar a sua instalação. Por outro lado, ao permitir a transmissão em longas distâncias sem perdas, esta tecnologia torna possível a colocação do sistema em lugares remotos, sem a necessidade de alimentação eléctrica no local.

O sistema desenvolvido pode ser complementado com um sistema de determinação de peso-em-movimento (WIM - weight in motion) anteriormente estudado [16], [17]. Com a utilização da mesma tecnologia e com um reduzido número de sensores, é possível a total caracterização das composições como a sua tipologia, carga por eixo, velocidade e aceleração. A ocorrência de eventos pode ainda ser correlacionada com uma fotografia da composição no instante da passagem. Na Fig. 23 apresenta-se o esquema de medição do sistema de determinação de carga em composições ferroviárias da FiberSensing – o SISPEFE.

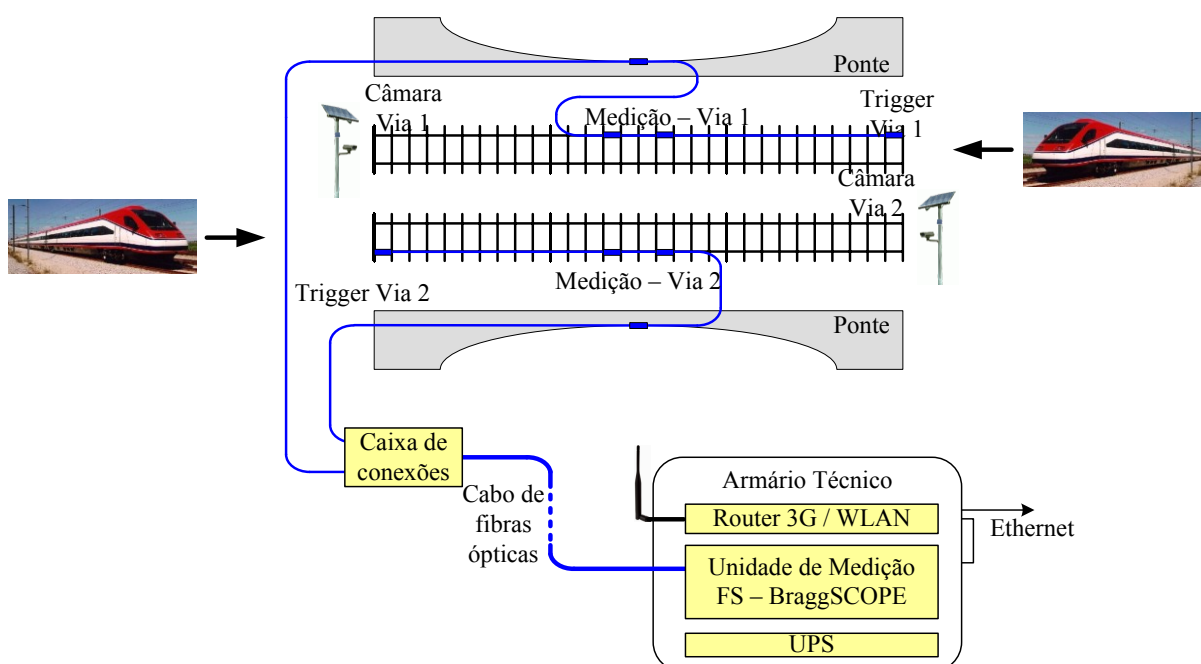


Fig. 23 Esquema de aplicação do sistema SISPEFE.

O sistema completo para a pesagem de comboios numa via contém um ramo óptico com quatro sensores em série. Um destes sensores é utilizado para gerar o sinal de *trigger* que acciona a aquisição dinâmica dos sinais provenientes dos outros três sensores correspondentes à via em que é detectada a aproximação de uma composição. Esses três sensores em série medem, para cada via, a deformação em dois pontos distintos do carril e um ponto da estrutura da ponte.

4.5 TECNOLOGIA ADOPTADA

Os sensores escolhidos para esta aplicação foram sensores de deformação em fibra óptica, baseados em redes de Bragg.

A aplicação de sensores de Bragg em fibra óptica na monitorização de estruturas tem-se tornado cada vez mais frequente [18], [19]. As características particulares desta tecnologia tornam-os apropriados para a medição de grandezas estruturais sem algumas das desvantagens atribuídas aos sensores

convencionais. A crescente oferta deste tipo de sensores e das respectivas unidades de medição facilitam largamente as condições para a sua aplicação.

Esta tecnologia sensora é referenciada como excelente para aplicações em carris de caminhos-de-ferro na medição de deformações, uma vez que são imunes a interferências electromagnéticas e de radiofrequência não sendo afectados pelo ruído que muitas vezes compromete a utilização de extensómetros convencionais neste tipo de infra-estruturas [20], [21].

4.5.1 SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

4.5.1.1 Fibra óptica

As fibras ópticas, constituídas essencialmente por sílica, apresentam a sua estrutura dividida por camadas. A transmissão de luz processa-se maioritariamente na camada interior da fibra - no núcleo (Fig. 24) - onde o índice de refração é ligeiramente superior devido à utilização de dopantes.

Existem vários tipos de fibras ópticas que se dividem em dois grandes grupos de acordo com a forma como permitem a transmissão de luz: monomodo ou multimodo (Fig. 25). As fibras monomodo permitem a transmissão de apenas um sinal de luz, enquanto que as multimodo, por terem um núcleo de maior diâmetro, permitem a inserção de luz em diversas direcções possibilitando a transmissão de diversos sinais simultaneamente. A parte que envolve o núcleo denomina-se por bainha. Sendo constituída também por sílica, tem como principal função a redução das perdas de transmissão do sinal que viaja pelo núcleo. Além disso, aumenta a resistência mecânica e protege a camada central de agressões ambientais. O revestimento primário é uma camada adicional de protecção contra contaminações exteriores constituída por acrilato.

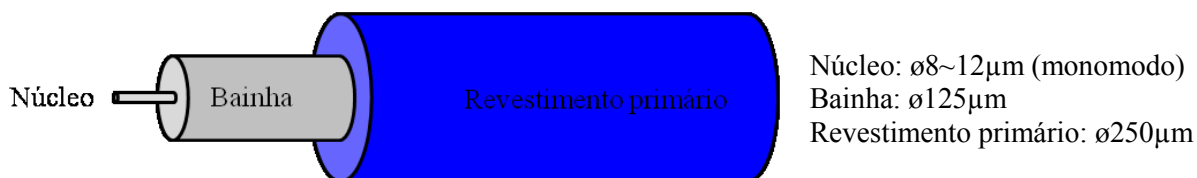


Fig. 24 Estrutura de uma fibra óptica.

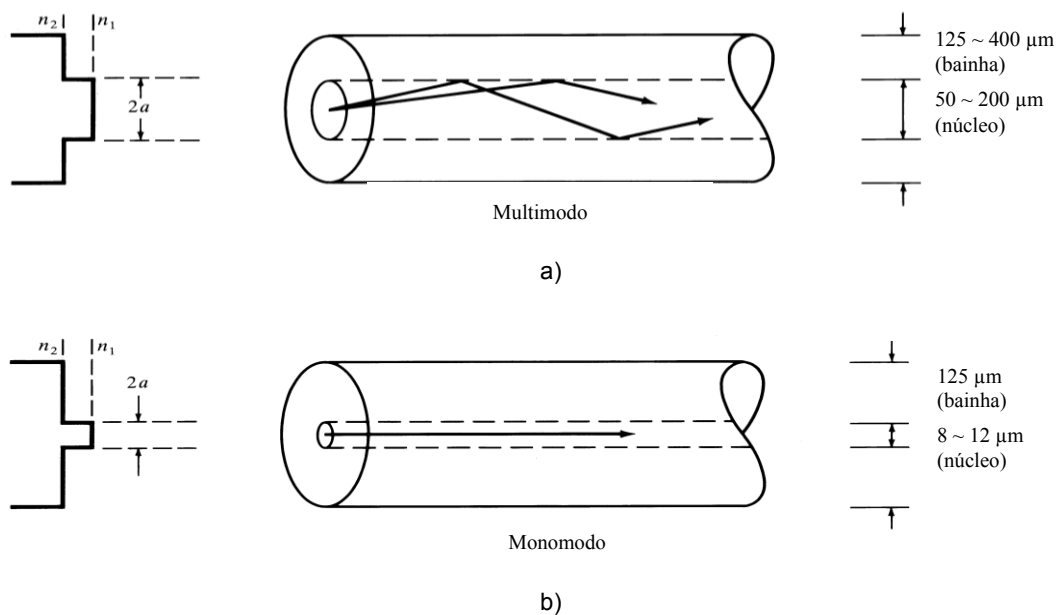


Fig. 25 Transmissão na fibra óptica: a) Monomodo; b) Multimodo.

4.5.1.2 Fibra óptica como elemento sensor

Sendo a fibra óptica um meio privilegiado de transmissão de luz é natural que, havendo qualquer perturbação num local específico imposta por uma variação no ambiente que a rodeia, se consiga detectar variações nas características da luz propagada, como sejam:

- A amplitude (I);
- O comprimento de onda (λ);
- A frequência (ω);
- A fase (ϕ);
- A polarização (θ).

Na Fig. 26 ilustra-se o funcionamento de uma fibra óptica como sensor. A luz é emitida por uma fonte óptica com características conhecidas. O mensurando, grandeza a medir (temperatura, pressão, deformação, deslocamento, força, campo magnético, etc...), altera as características da luz transmitida pela fibra que são medidas pelo detector e comparadas com as iniciais. Conhecendo a relação entre a variação das características da luz e a variação do meio, é possível quantificar a alteração que se deu meio.

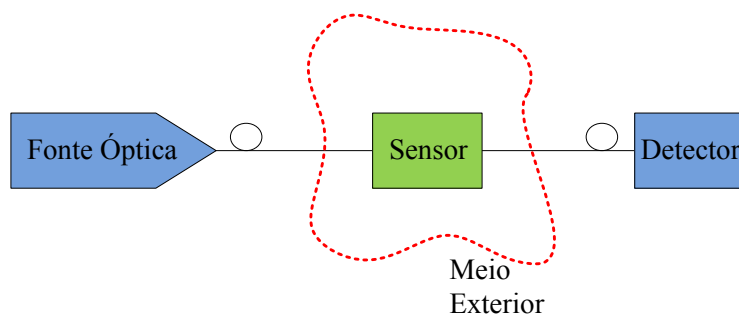


Fig. 26 Fibra óptica como elemento sensor.

4.5.1.3 Redes de Bragg em fibra óptica

As redes de Bragg em fibra óptica são microestruturas permanentemente inscritas no núcleo de uma fibra óptica monomodo que reflectem um espectro estreito de luz, centrado no comprimento de onda de Bragg (λ_B), quando iluminadas por uma fonte de espectro largo (Fig. 27).

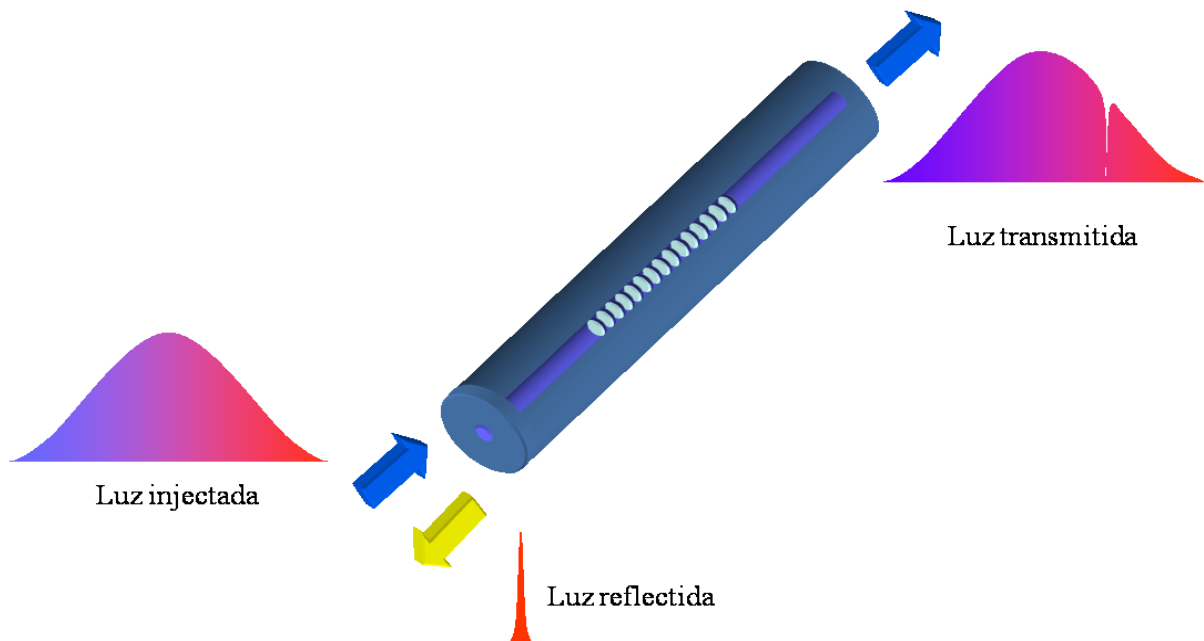


Fig. 27 Princípio de operação das redes de Bragg [22].

A escrita de redes de Bragg em fibras ópticas tornou-se possível com a descoberta da sua propriedade de fotossensibilidade em 1978 por Hill [22], [23]. Modulando o índice de refração do núcleo de uma fibra óptica de forma periódica numa pequena extensão, através da exposição lateral a radiação laser UV, consegue-se gerar uma microestrutura ressonante que origina uma reflexão forte centrada no comprimento de onda de Bragg. O comprimento de onda central do espectro reflectido é dado pela equação:

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda, \quad (4)$$

onde λ_B é o comprimento de onda de Bragg, n_{ef} é o índice de refração efectivo da fibra para o modo guiado pela fibra e Λ é o período da modulação [22].

O processo mais usado na escrita destas estruturas é, actualmente, o método da máscara de fase por ser provavelmente o método mais reprodutível e simples. A máscara de fase é uma rede de difracção usada em transmissão, que consiste numa série de depressões longitudinais na superfície de um substrato de sílica. Quando um feixe de luz incide sobre a máscara, é dividido em duas ordens difractadas.

Na Fig. 28 apresenta-se o seu princípio de funcionamento. A sobreposição dos feixes difractados cria um padrão de interferência que torna possível o fabrico das redes de Bragg. Ao colocar uma fibra

óptica fotossensível sob a máscara de fase, esta irá sofrer alterações no índice de refração nos locais onde nos máximos de interferência formando a rede de Bragg.

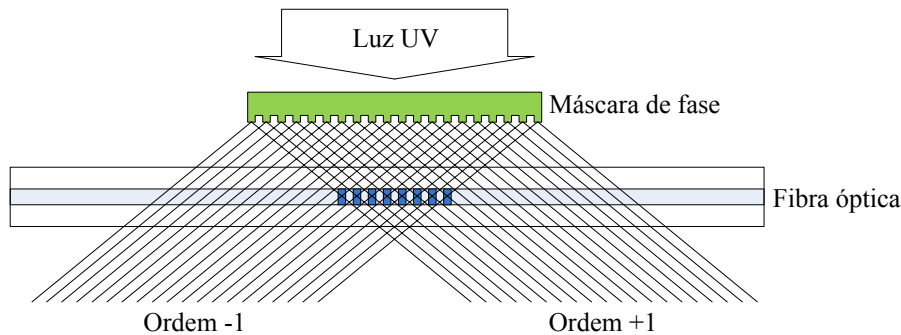


Fig. 28 Fabrico de redes de Bragg pelo método da máscara de fase.

4.5.1.4 Sensores de Bragg em fibra óptica

Sendo o comprimento de onda reflectido pela rede de Bragg (λ_B) dependente do índice de refração (n_{ef}) e do período da rede (Λ), como se viu na Equação (4), pode aferir-se que o comprimento de onda é também função dos parâmetros físicos que influenciam estas duas grandezas [18]. Desta forma pode falar-se de sensores de Bragg em fibra óptica.

As principais grandezas que influenciam o comprimento de onda reflectido pelas redes de Bragg são a deformação e a temperatura.

Fazendo variar a temperatura tanto alteramos o período da modelação devido à expansão térmica da sílica, como se altera o índice de refração (n_{ef}). Diferenciando a equação que estabelece a condição de Bragg (Equação (4)) obtemos a sua dependência à temperatura:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} \right) \Delta T = (\alpha + \zeta) \Delta T = \beta_T \Delta T \quad (5)$$

onde β_T é a o coeficiente de sensibilidade térmica da rede de Bragg, α o coeficiente de expansão térmica da rede (aproximadamente o da sílica pura: $0,55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) e ζ a dependência do índice de refração na temperatura ($6,7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ para comprimentos de onda no infravermelho e temperaturas inferiores a 200°C). Para comprimentos de onda próximos de 1550 nm obtém-se uma sensibilidade à temperatura da rede de Bragg de 11,2 pm/ $^\circ\text{C}$ (Equação (6)).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \beta_T \lambda_B \quad (6)$$

Ao aplicar-se deformação a uma rede de Bragg, é alterado o seu período bem como o índice de refração devido à variação do estado de tensão da fibra. Diferenciando a equação de Bragg (Equação (4)), desta vez em ordem à deformação, obtém-se:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} \underset{\Delta\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}}{=} \left(1 + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial \epsilon}\right) \Delta\epsilon = (1 + p_e)\Delta\epsilon = \beta_\epsilon \Delta\epsilon \quad (7)$$

onde p_e é a constante fotoelástica da sílica ($\sim -0,22$) e β_ϵ a sensibilidade do sensor à deformação. Mais uma vez, para comprimentos de onda na ordem dos 1550 nm, a sensibilidade de um sensor de Bragg à deformação é 1,2 pm/ $\mu\epsilon$ (Equação (8)).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\epsilon} = \beta_\epsilon \lambda_B \quad (8)$$

4.5.1.5 Vantagens e desvantagens da utilização de sensores de Bragg

Apesar de se tratar de uma tecnologia recente e com algumas desvantagens relativamente às tecnologias convencionais de monitorização, os sensores de Bragg em fibra óptica têm vindo a revelar-se cada vez mais indicados para diversos tipos de aplicações de monitorização. As principais características da fibra óptica e do princípio de funcionamento dos sensores de Bragg em fibra óptica conferem uma série de vantagens a este tipo de sensores.

Como todos os sensores baseados em fibra óptica, os sensores de Bragg:

- apresentam baixas perdas permitindo distâncias grandes entre os sensores e os equipamentos de leitura tornando-se adequados à monitorização remota;
- são imunes a interferências electromagnéticas ou de radiofrequência tornando-se muito atractivos para aplicações onde existam campos electromagnéticos;
- são elementos passivos e isolados electricamente de forma intrínseca podendo ser usados em ambientes perigosos (por exemplo, explosivos);
- têm dimensões e peso reduzido;
- apresentam sensibilidades elevadas;
- possibilitam a aquisição de grandezas distintas numa só fibra garantindo a multifuncionalidade da rede;
- são fiáveis a longo termo.

Para além do acima referido, os sensores de Bragg apresentam algumas vantagens que advêm da sua particularidade e forma de funcionamento:

- a capacidade intrínseca de multiplexagem permitindo a inscrição de diversas redes de Bragg numa só fibra;
- a capacidade de medir grandezas absolutas sem a necessidade de referenciação ou zeragem pelo facto de as grandezas serem determinadas por alteração de comprimento de onda reflectido e não de intensidade de sinal, o que torna a leitura independente da unidade de medição e também das perdas de sinal que possam surgir com o tempo.

Como desvantagens, os sensores deste tipo apresentam o facto de:

- serem constituídos por fibra de vidro que, no seu estado natural e não protegido, é um elemento bastante frágil;
- apresentarem a necessidade de cuidados de limpeza e manuseamento na realização de conexões de forma a minimizar perdas de sinal

- terem sensibilidade à deformação e à temperatura simultaneamente.

Actualmente as ferramentas disponíveis para o manuseamento de fibras ópticas, largamente desenvolvidas devido ao *boom* da sua utilização em redes de comunicação, permitem que se ultrapassem facilmente as características negativas de fragilidade e de particularidade de manuseamento. A simultaneidade de variações de temperatura e de deformação no sensor, torna necessária a compensação do efeito da temperatura quando apenas se pretende obter a deformação. Existem várias técnicas para este efeito. Desde a utilização de um sensor de temperatura próximo do sensor a compensar, até ao desenho mecânico de sensores que sejam auto-compensados, passando pela utilização de fibras especiais onde se consegue distinguir os dois efeitos. No caso particular desta aplicação, o problema da temperatura não se coloca, na medida em que se tratam sempre de medições curtas no tempo, passando a ser desprezável o efeito da temperatura que tem sempre uma variação lenta que não se faz notar durante cada evento.

4.5.2 TECNOLOGIA DE INTERROGAÇÃO

A interrogação de um sensor de rede de Bragg em fibra óptica corresponde à aquisição do seu comprimento de onda reflectido em cada instante [23].

Existem variadas técnicas de interrogação de redes de Bragg. Para o caso de medições a elevadas frequências de amostragem, o método utilizado nesta campanha de medições foi o da filtragem óptica. No teste realizado foi utilizada uma unidade de medição da FiberSensing baseada na plataforma BraggSCOPE™, que foi desenvolvida por esta empresa e que recorre à utilização de filtros ópticos integrados.

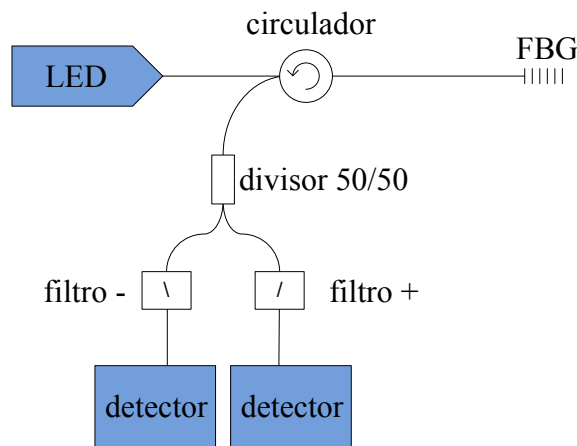


Fig. 29 Utilização de filtros para interrogação de redes de Bragg.

A Fig. 29 ilustra o funcionamento do conceito de filtragem óptica utilizado na BraggSCOPE™. O sensor, iluminado por uma fonte de espectro largo, reflecte uma pequena fatia espectral daquela, que é enviada a um conjunto de filtros cuja transmissibilidade varia linearmente com o comprimento de onda, permitindo assim a sua determinação. Sendo cada filtro igual, mas com declive contrário, a identificação do comprimento de onda reflectido fica independente da intensidade do pico reflectido (as flutuações de potência originam variações idênticas em ambos os filtros e são facilmente eliminadas utilizando um processamento como o indicado na Equação (9)). Esta técnica pode ser utilizada para ler mais do que um sensor em simultâneo utilizando filtros em diferentes bandas de

comprimentos de onda e técnicas DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) para separar os sinais provenientes de cada sensor de Bragg [25].

$$\frac{(S_1 - S_2)}{(S_1 + S_2)} \quad (9)$$

A BraggSCOPETM utiliza quatro bandas centradas em 1541,49 nm, 1547,86 nm, 1554,28 nm e 1560,75 nm e com ± 1.6 nm de gama de medição, permitindo a leitura simultânea de 4 sensores na mesma fibra.

No caso particular da unidade usada nos testes efectuados, o número de sensores que é possível interrogar simultaneamente foi duplicado, havendo dois canais ópticos aos quais podem ser ligadas duas fibras ópticas com quatro sensores cada uma.

5

CAMPANHA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos na campanha experimental realizada no âmbito deste trabalho. A campanha teve por objectivo a aquisição de registos para análise dos efeitos de lisos em rodas nos carris, bem como servir de base para o desenvolvimento de um algoritmo de identificação destes problemas.

5.1 LOCALIZAÇÃO

A campanha experimental desenvolveu-se na linha do Norte da rede Nacional de Caminhos de Ferro na localidade de Canelas, Aveiro, conforme indicado na Fig. 30.



Fig. 30 Localização dos ensaios.

5.2 INSTALAÇÃO DOS SENSORES

Os sensores de deformação foram aplicados ao longo do carril em oito posições, conforme indicado esquematicamente na Fig. 31. Os sensores de deformação cedidos para aplicação na campanha experimental foram do tipo mini-poliamida [24]. Os sensores foram instalados a meio vão entre travessas na patilha do carril esquerdo da via Lisboa-Porto (Fig. 32).

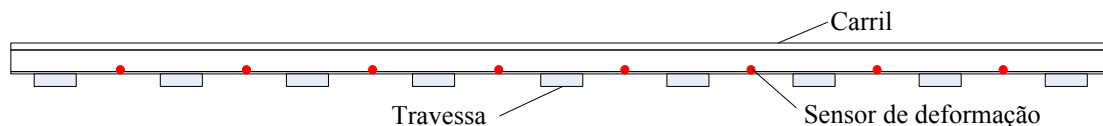


Fig. 31 Esquema de localização dos sensores.

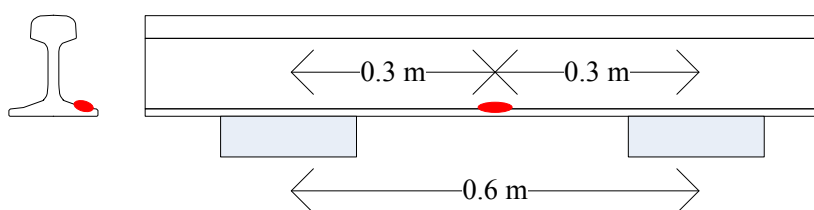


Fig. 32 Pormenor da localização dos sensores.

A escolha do número de sensores prendeu-se com o facto de se pretender monitorizar no mínimo um desenvolvimento correspondente à volta completa de uma roda. O diâmetro habitual das rodas das composições que circulam sobre a rede Nacional é de aproximadamente 1m, pelo que um desenvolvimento completo se processa numa distância de cerca de três metros. Deste modo, seria necessário instalar, no mínimo, sensores entre 7 travessas ($6 \times 0,6 = 3,6\text{m}$). Uma vez que a tecnologia aplicada para a aquisição destes sensores de deformação de forma simultânea e sincronizada estava limitada a 8 sensores, foi este o número utilizado.

Optou-se por uma primeira campanha experimental apenas com um carril instrumentado, uma vez que para obter dados para os dois carris bastaria efectuar a instalação no outro carril. Nesta campanha experimental também não foi considerada a excentricidade da roda sobre o carril. Para esse efeito, seria necessária a instalação um sensor de cada lado do carril na sua secção transversal.

Os sensores de deformação de poliamida aplicam-se mediante a colagem sobre uma superfície previamente regularizada e sem sujidades ou ferrugem. Pelo facto de se tratar de uma instalação não permanente, utilizou-se da protecção das fibras mais simples ($\varnothing 900 \mu\text{m}$). As fotografias da Fig. 33 ilustram alguns passos da instalação dos sensores em campo. A superfície do carril foi lixada para regularizar e remover a ferrugem. Após a regularização, a superfície foi limpa com álcool e os sensores colados com cianocrilato (“super cola 3”).



Fig. 33 Instalação dos sensores: a) alinhamento; b) posições de medição.

Por fim aplicou-se uma protecção com fita de butileno (que impede a entrada de sujidade e humidade para o sensor) e com fita de alumínio para o encaminhamento das fibras de entrada e saída do sensor. Mesmo sendo esta uma instalação para um curto prazo, justificou-se a protecção mínima dos sensores para não se degradarem com a passagem das composições. A Fig. 34 demonstra o aspecto da instalação.



Fig. 34 Instalação pronta: a) Protecção; b) Vista geral.

5.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Para interrogação dos sensores instalados foi utilizada uma unidade de medição da FiberSensing que permite a leitura de sensores de forma dinâmica. A taxa de aquisição utilizada nestes sensores situou-se entre as 500 e as 2000 amostras por segundo. A sua escolha deveu-se ao facto de se esperarem efeitos dinâmicos na infra-estrutura com frequências acima dos 100 Hz e abaixo dos 1000 Hz.

A unidade de medição utilizada tem um interface gráfico de fácil utilização onde se podem criar e configurar sensores de acordo com a aplicação. Por defeito, os dados fornecidos pela unidade são em variação de comprimento de onda. Para este ensaio, os sensores foram configurados para que o resultado final fosse uma unidade de engenharia: deformação em micrometro/metro (10^{-6} m/m).

A Fig. 35 mostra o sistema de aquisição durante a campanha experimental.

Conforme indicado na Secção 4.4.1, a relação de um sensor de Bragg com a deformação é de 1,2 pm/ $\mu\epsilon$ (ver página 31). Para o caso particular de ensaios rápidos o efeito da temperatura torna-se desprezável não sendo necessária a sua correcção. Assim sendo, os sensores foram todos configurados com uma equação de calibração do tipo:

$$\varepsilon = \frac{x}{0,0012} \quad (10)$$

onde ε é a deformação em micrometro/metro e x é a variação de comprimento de onda em nanómetros registada.

Os dados podem ser exportados em formato .txt sendo compatíveis com a maioria dos programas de tratamento de dados.



Fig. 35 Aquisição durante a campanha experimental.

5.4 RESULTADOS OBTIDOS

A campanha experimental como a que foi realizada, apesar da curta duração, permitiu a obtenção de bastantes resultados por se tratar da linha do Norte, a linha com mais tráfego do país. Após a instalação iniciou-se a gravação da passagem das composições sobre o carril instrumentado registando diversos eventos. A Fig. 36 exemplifica dois desses eventos correspondentes à passagem de um comboio suburbano e um comboio de mercadorias.



Fig. 36 Passagem de composições: a) Suburbano; b) Mercadorias.

No total foram registadas passagens de 10 composições:

Tabela 3 – Passagens de composições registadas

Hora	Tipo de comboio	Taxa de aquisição (S/s)	Ficheiro
14:27	Suburbano	500	1427_urb.txt
14:53	Mercadorias	1000	1453_merc.txt
15:27	Suburbano	1000	1527_urb.txt
16:25	Suburbano	2000	1625_urb.txt
16:50	Alfa	2000	1650_alfa.txt
16:56	Suburbano	2000	1656_urb.txt
17:26	Suburbano	2000	1726_urb.txt
17:31	Mercadorias	2000	1731_merc.txt
17:36	Mercadorias	2000	1736_merc.txt
17:57	Suburbano	1000	1757_urb.txt

Os registos correspondem às deformações do carril em função do tempo devido às passagens das composições.

No primeiro exemplo (Fig. 37) apresenta-se a deformação para a passagem de um Suburbano adquirida a uma taxa de 500 amostras por segundo.

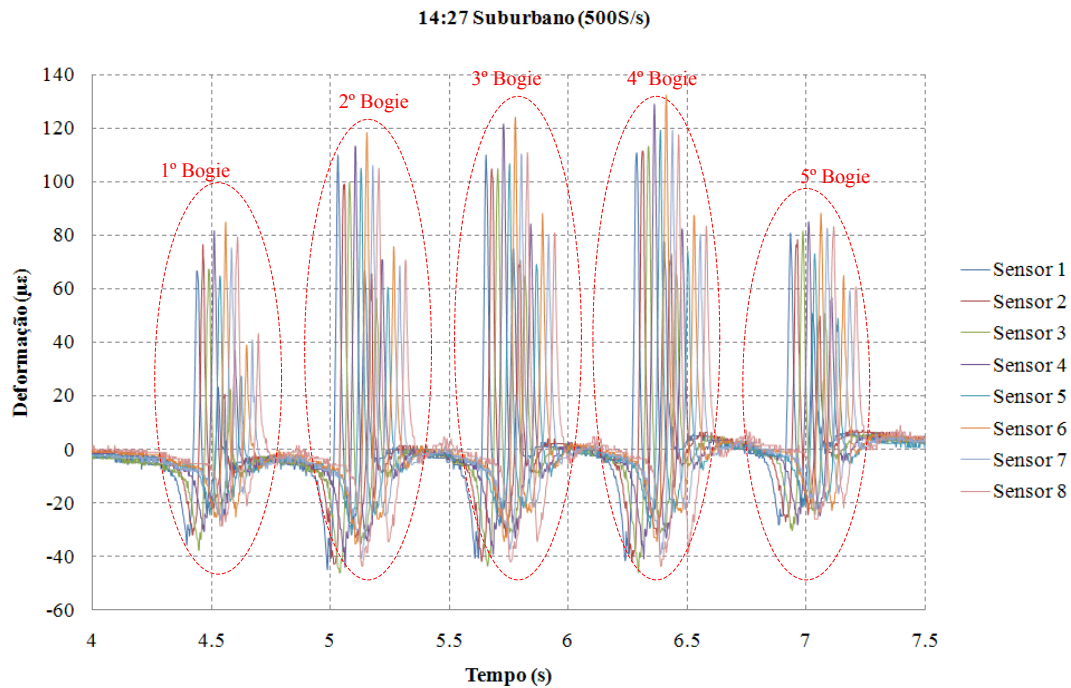


Fig. 37 Registos para a passagem de um comboio Suburbano às 14:27.

Na Fig. 37 é claramente identificável a passagem dos bogies sobre as diversas posições monitoradas. Pode-se observar, pela figura, que a composição tinha 5 bogies de dois eixos.

Visualizando o registo de um só sensor é mais fácil esta identificação. Na Fig. 38 está representado o registo de deformações do sensor 6.

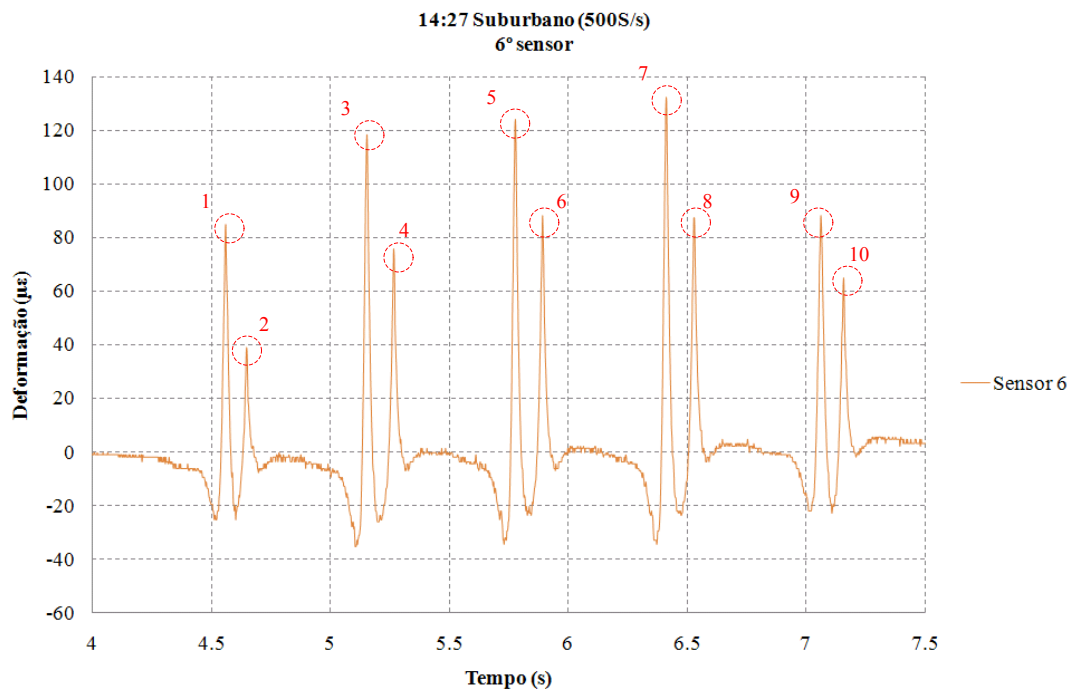


Fig. 38 Registo de um só sensor para a passagem de um comboio Suburbano às 14:27.

Na mesma figura observam-se dez picos de deformação que correspondem ao número de eixos da composição. Também se constata que para cada bogie, o pico de deformação é sempre mais elevado para o primeiro eixo do que para o segundo. Na origem deste facto poderá estar um efeito dinâmico no comportamento da via associado à velocidade de passagem do comboio e nunca um efeito estático, na medida em que, quando o segundo eixo está na solicitação máxima ao primeiro sensor, o primeiro eixo já se encontra a aproximar do sexto sensor tendo uma influência na deformação do primeiro sensor desprezável.

Na Fig. 39 apresenta-se um pormenor dos resultados para a passagem dos dois eixos do quarto bogie.

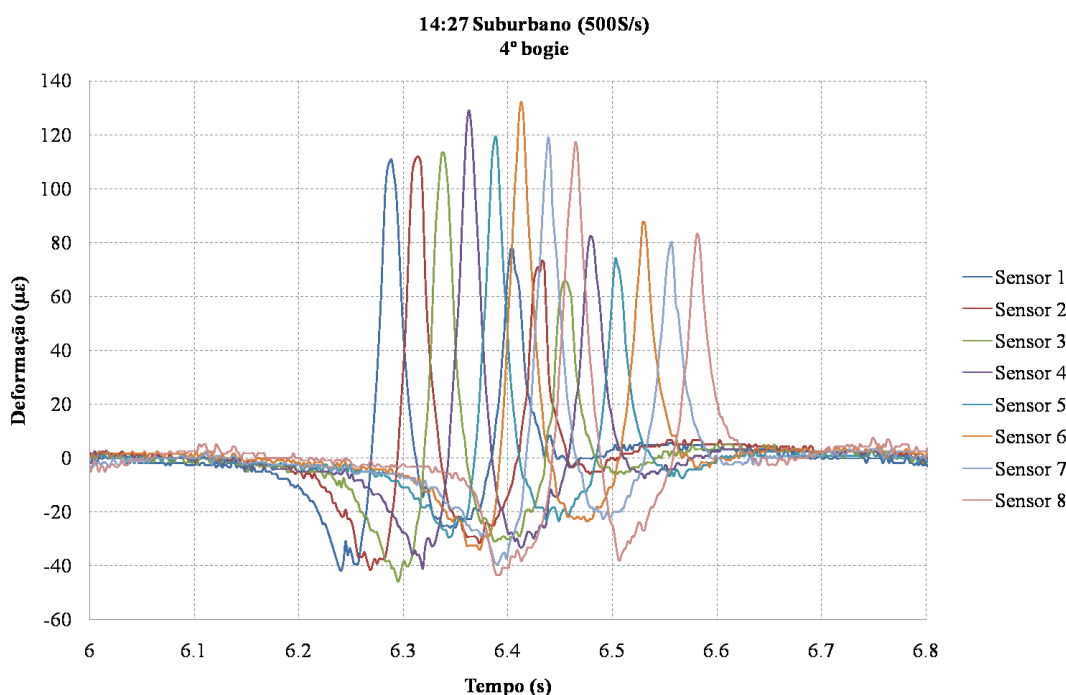


Fig. 39 Pormenor da passagem de um comboio Suburbano às 14:27.

Identifica-se, para cada sensor, a passagem dos dois eixos observando-se que o efeito atrás referido (de diferença de magnitude entre a deformação devida ao primeiro eixo e ao segundo) é comum para todos os sensores. Pode observar-se ainda que existem algumas diferenças de magnitude em picos que teoricamente estão a ser provocados por cargas de igual valor e à mesma velocidade.

A título de exemplo, apresenta-se também o registo da passagem de um comboio de mercadorias a uma taxa de aquisição de 2000 amostras por segundo (Fig. 40).

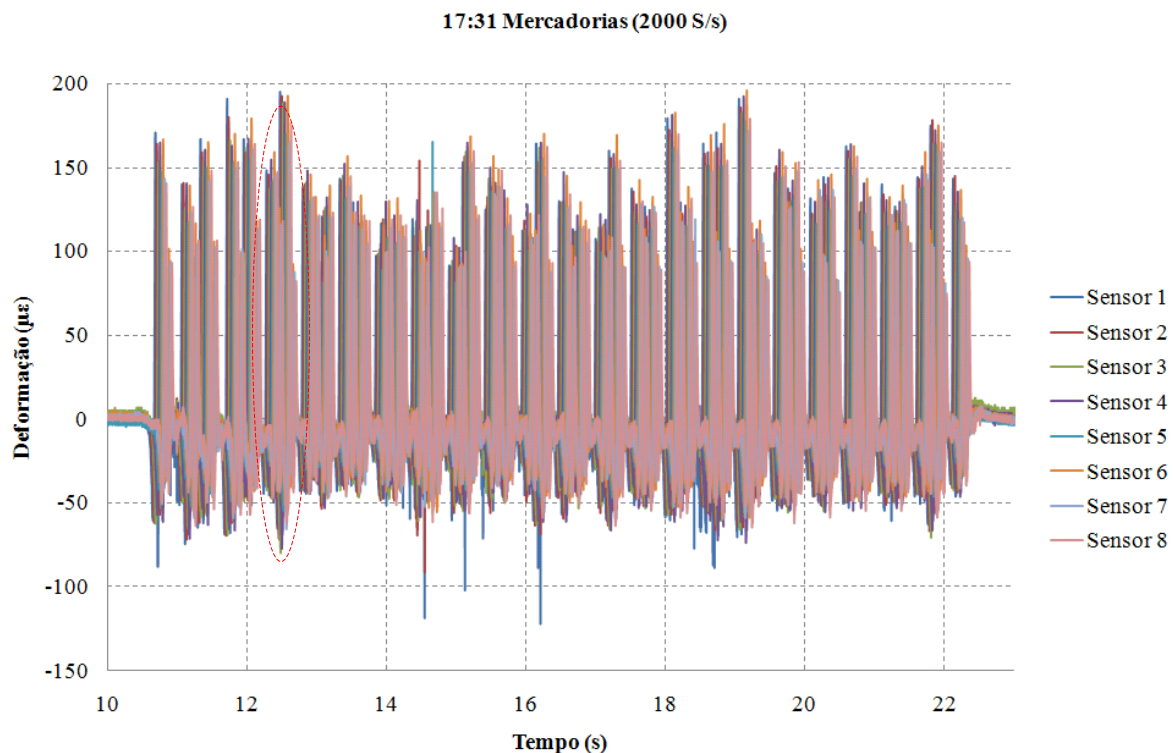


Fig. 40 Registos para a passagem de um comboio de Mercadorias às 17:31.

Na Fig. 40 já é mais difícil a visualização individual dos rodados. Sendo estes em maior número, logo menos espaçados no gráfico e com a escala de tempo mais apertada, a visualização conjunta dos dados obtidos por todos os sensores é confusa.

Na Fig. 41 apresenta-se o pormenor destes dados correspondente aos dois bogies assinalados na Fig. 40. O mesmo fenómeno, de diferenças acentuadas de deformação entre a passagem do primeiro e do segundo eixo, pode ser observado para a passagem deste comboio.

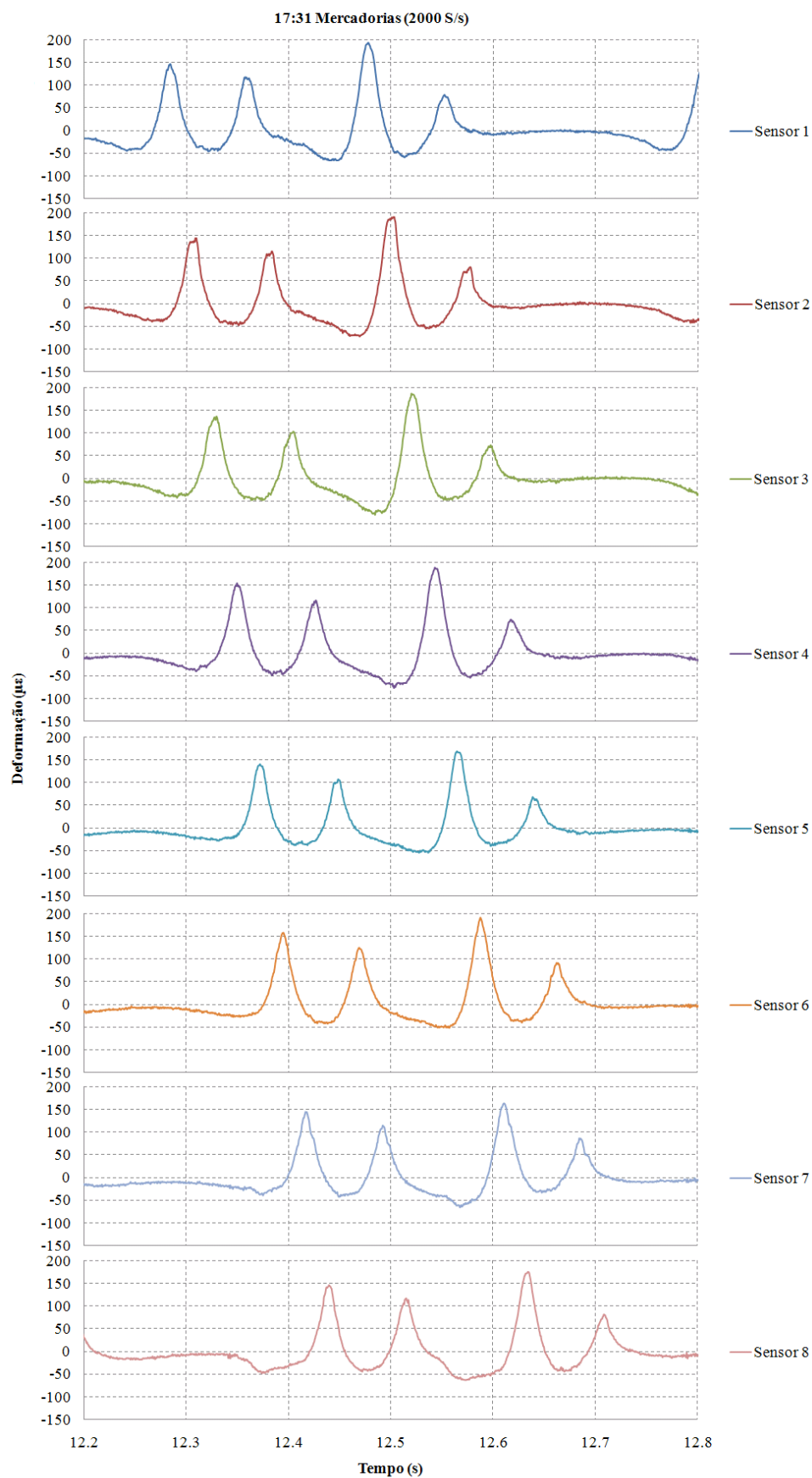


Fig. 41 Pormenor da passagem do Comboio de Mercadorias às 17:31.

5.5 ANÁLISE DE RESULTADOS

A ferramenta utilizada para a análise dos resultados obtidos foi o programa LabVIEW™. Este programa permite fazer programação avançada de forma simples. Contém já uma biblioteca alargada de funções que facilitam o tratamento dos dados. Em simultâneo, permite a visualização dos dados de forma rápida e sem as limitações de representação do Excel. A programação é realizada de forma muito gráfica permitindo visualizar facilmente o fluxograma de cálculo. Na Fig. 42 apresenta-se parte do código desenvolvido para a análise dos dados.

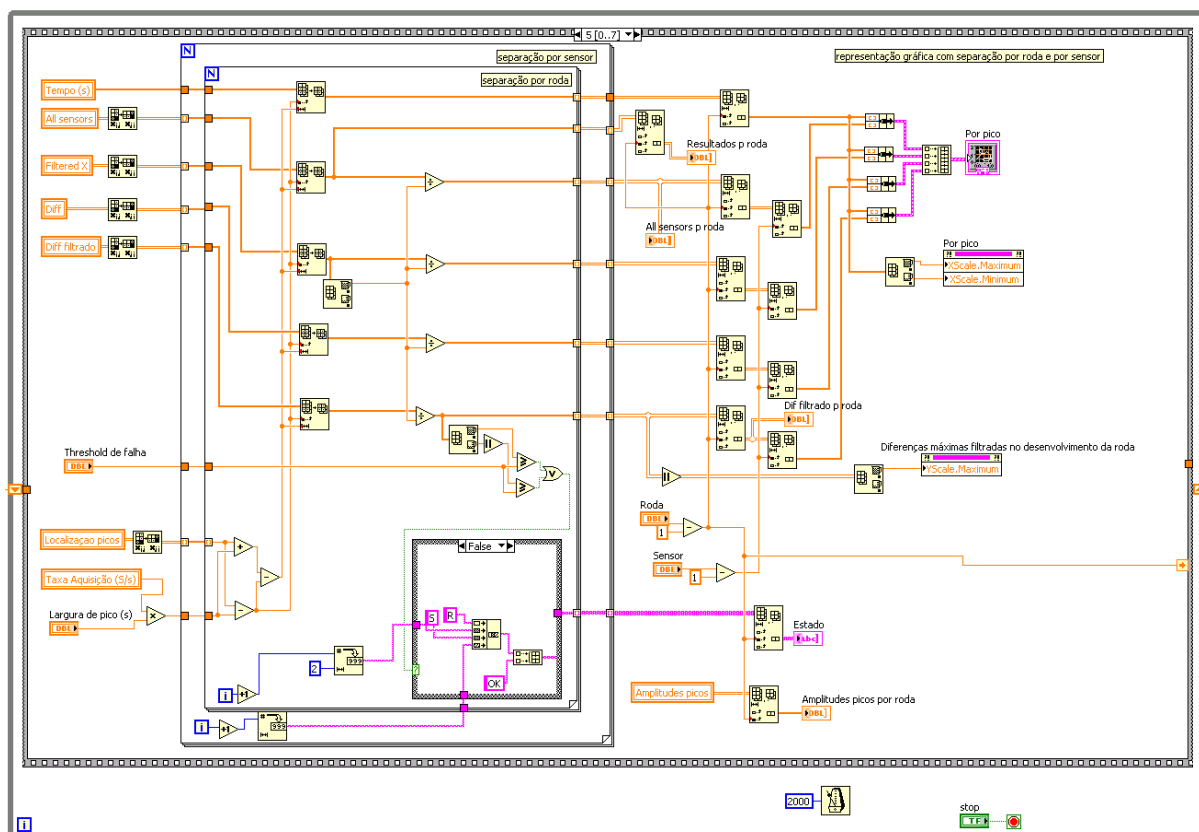


Fig. 42 Diagrama de blocos - LabVIEW™.

O programa desenvolvido faz o tratamento dos dados permitindo de forma célere analisar qualquer dos ficheiros de dados obtidos na campanha experimental:

- Realiza uma translação do sinal por forma a que o início do evento esteja com deformação zero.
- Aplica um filtro passa baixo ao sinal gravado para se eliminar ruídos de alta frequência da deformação registada pelos sensores. O filtro realizado é do tipo “Butterworth filter” que apresenta a forma da Fig. 43. É um filtro com transmissão decrescente suave e com dependência monotónica na frequência. Para os resultados foi usado um filtro de ordem 10 com a frequência de corte mínima nos 50 Hz e a máxima na metade da frequência de amostragem.
- Determina o número e a posição dos picos utilizando a função “Peak Detect” para os valores de deformação filtrados e para os valores de deformação não filtrados.

- O limite de deformação a partir do qual se considera existir um pico é um valor determinado de forma iterativa. Inicialmente o valor deste limite é 5 micrometros/metro e vai sendo incrementado de 1 micrometro/metro até que o número de picos encontrado em cada sensor seja o mesmo. Desta forma é possível eliminar picos de sinal que não correspondem à passagem de um eixo e garantir que não é necessário ajustar manualmente o limite a usar na subrotina de “Peak Detect” para os diferentes níveis de deformação registados em cada evento.
- As posições do primeiro pico identificado para cada sensor, quer nos valores de deformação registados, quer nesses valores após aplicação do filtro, são comparadas para se poder eliminar o “atraso” criado pelo filtro. A média das diferenças entre as posições do primeiro pico identificado para o sinal filtrado e para o sinal registado é a translação a aplicar ao sinal filtrado para que os picos correspondam à mesma coordenada de tempo.
- Determina a velocidade e a distância entre eixos da composição, bem como o comprimento total do veículo.
- Calcula as deformações máximas registadas comparando, para cada eixo, as diferenças do pico de deformação registado por cada sensor.
- Separa as deformações registadas, bem como o resultado destas após aplicação do filtro passa baixo, por sensor e por eixo. Desta forma torna-se possível a visualização de cada pico individualmente e a sua comparação com o valor filtrado.
- Utiliza a identificação dos picos realizada anteriormente, normalizando os valores de deformação pelo máximo do filtrado.
- Determina a diferença entre os valores reais e os valores filtrados à qual aplica um filtro passa alto (também do tipo “Butterworth”) para eliminar diferenças que se devam ao desfasamento entre os dois picos. Este valor é comparado com um limite, que é um parâmetro regulável pelo utilizador, a partir do qual se define a existência de um defeito na roda.

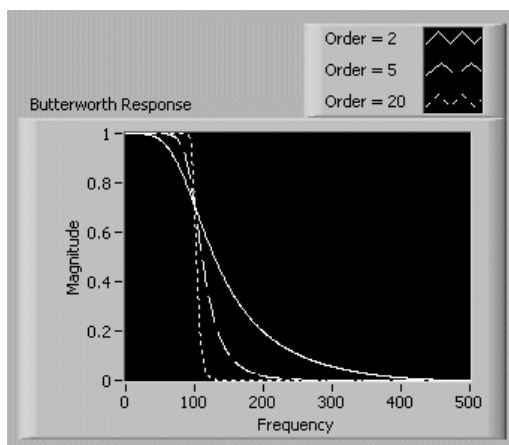


Fig. 43 Filtro do tipo “Butterworth filter”.

De forma a não tornar o texto exaustivo, seleccionou-se um ficheiro de dados recolhido na campanha experimental para exemplificar os cálculos e procedimentos efectuados.

5.5.1 REPRESENTAÇÃO DOS DADOS E PRIMEIRO TRATAMENTO

Na Fig. 44 Apresenta-se o interface gráfico criado com os resultados correspondentes à passagem do comboio de mercadorias das 14:53.

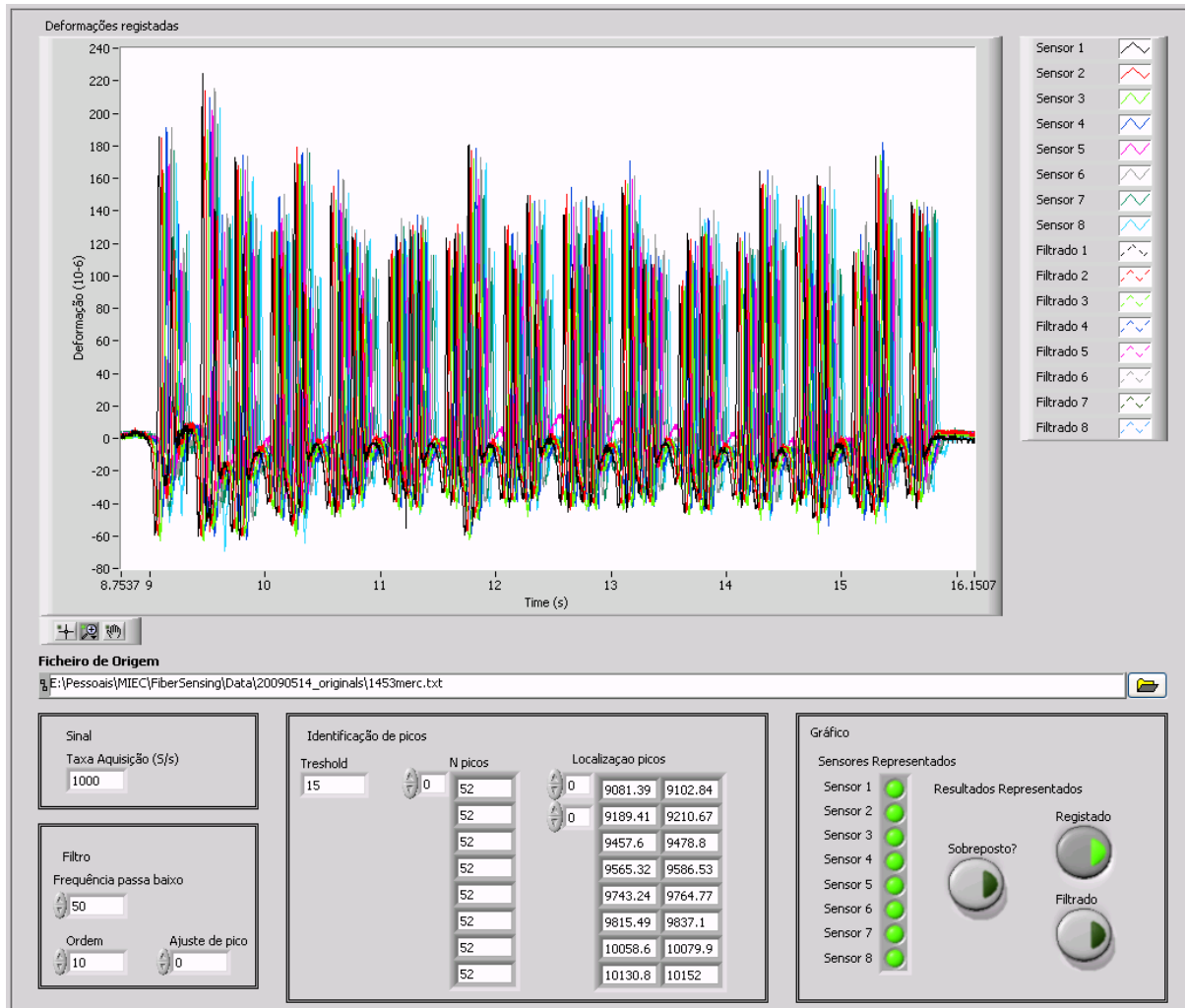


Fig. 44 Resultado para a passagem do comboio de mercadorias das 14:53.

Para análise dos resultados é possível seleccionar quais os sensores a representar no gráfico, escolher ou não a visualização do filtro aplicado, bem como aplicar uma janela de *zoom* ao gráfico.

No painel apresentado na Fig. 44 é possível visualizar, no canto inferior esquerdo, a taxa de aquisição a que o evento foi gravado, definir a frequência e a ordem do filtro passa baixo a aplicar ao sinal, e também realizar um ajuste manual à correcção de posição dos picos do filtro explicado anteriormente.

No quadro de identificação de picos podem visualizar-se as iterações que vão sendo realizadas ao limite (*“threshold”*) a aplicar à subrotina *“Peak Detect”*. A identificação de picos só termina quando o número de picos encontrado para o registo de cada sensor for igual.

No quadro do canto inferior direito da Fig. 44 faz-se a selecção do que é para ser apresentado na área do gráfico, como por exemplo seleccionar-se os sensores a representar (indicação a verde claro significa que o sensor é desenhado no gráfico e a verde escuro não). É também neste quadro que se

escolhe se se representam os valores reais ou os filtrados ligando ou desligando o botão correspondente. Existe ainda a possibilidade de realizar a apresentação de todos os picos correspondentes ao mesmo eixo coincidentes uns com os outros para comparação mais directa das suas amplitudes e forma.

Na Fig. 45 pode observar-se o mesmo interface, agora com um *zoom* sobre parte dos dados (primeiros dois bogies de dois eixos), e com menos sensores (apenas o sensor 1 e o sensor 5). Ilustra-se assim a facilidade do programa em alterar a forma de visualização e, desta forma, facilitar a interpretação.

A Fig. 46 representa os mesmos dados com a opção de visualização com os picos sobrepostos. Este modo de visualização permite a rápida comparação dos valores de deformações registados para cada eixo.

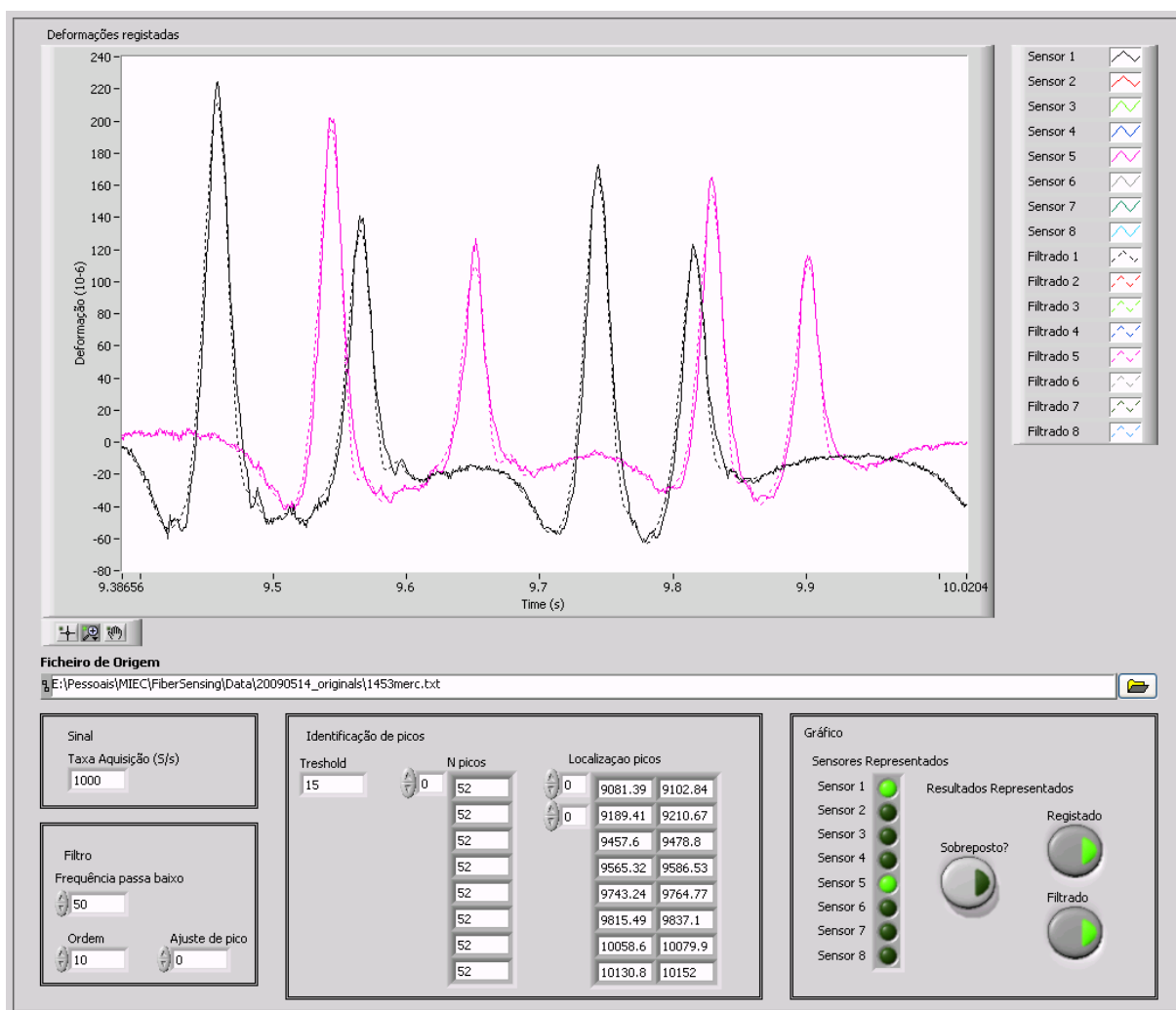


Fig. 45 Pormenor com apenas dois dos sensores activos (valor real e valor filtrado).

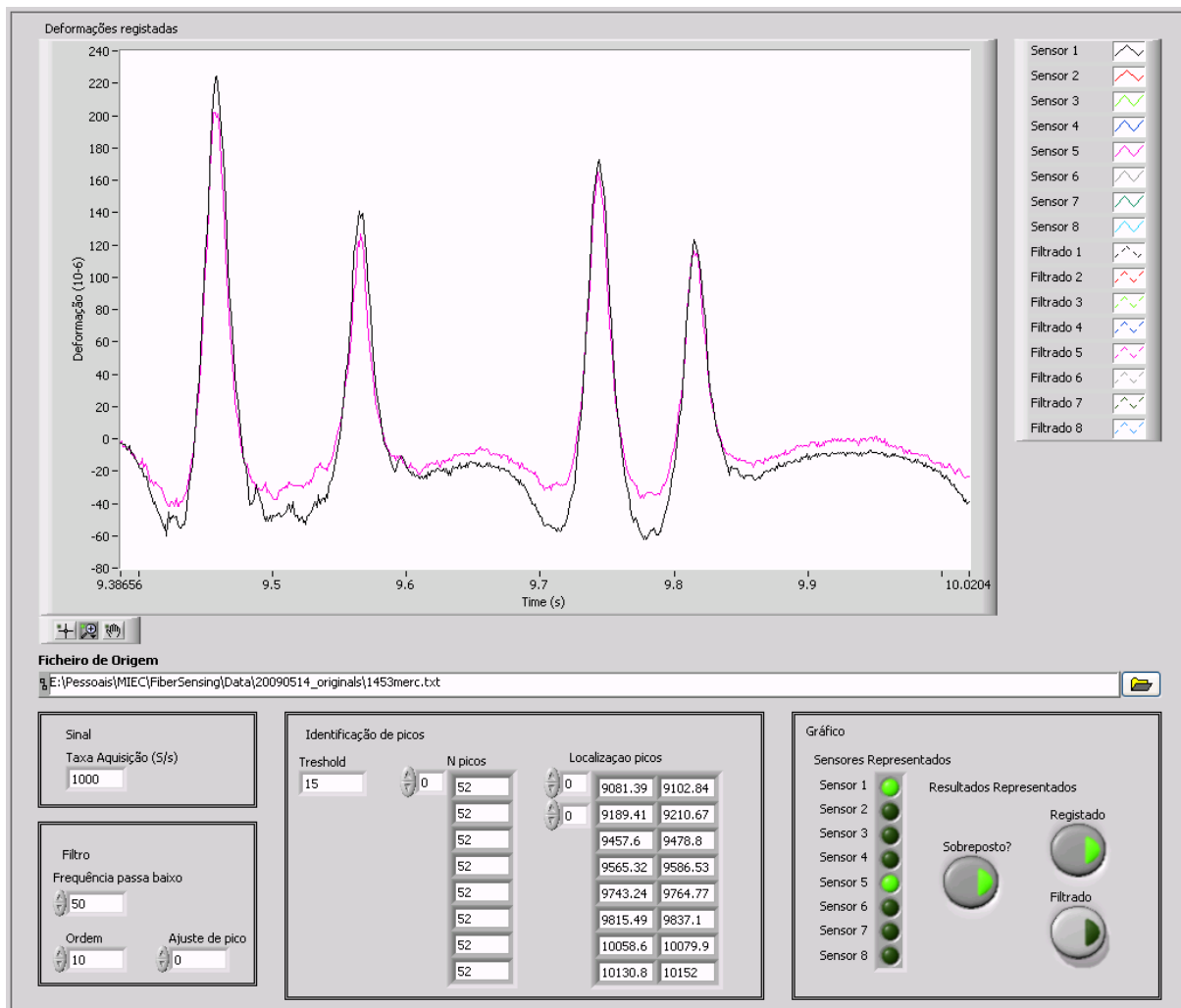


Fig. 46 Resultados de pormenor para dois sensores com representação sobreposta.

5.5.2 CÁLCULO DE VELOCIDADE E NÚMERO DE EIXOS

O programa calcula e representa a velocidade bem como o afastamento de cada eixo.

O cálculo da velocidade de cada eixo efectua-se dividindo a distância entre o último e o primeiro sensor pela diferença de tempo entre a passagem do eixo sobre esses sensores (Fig. 47).

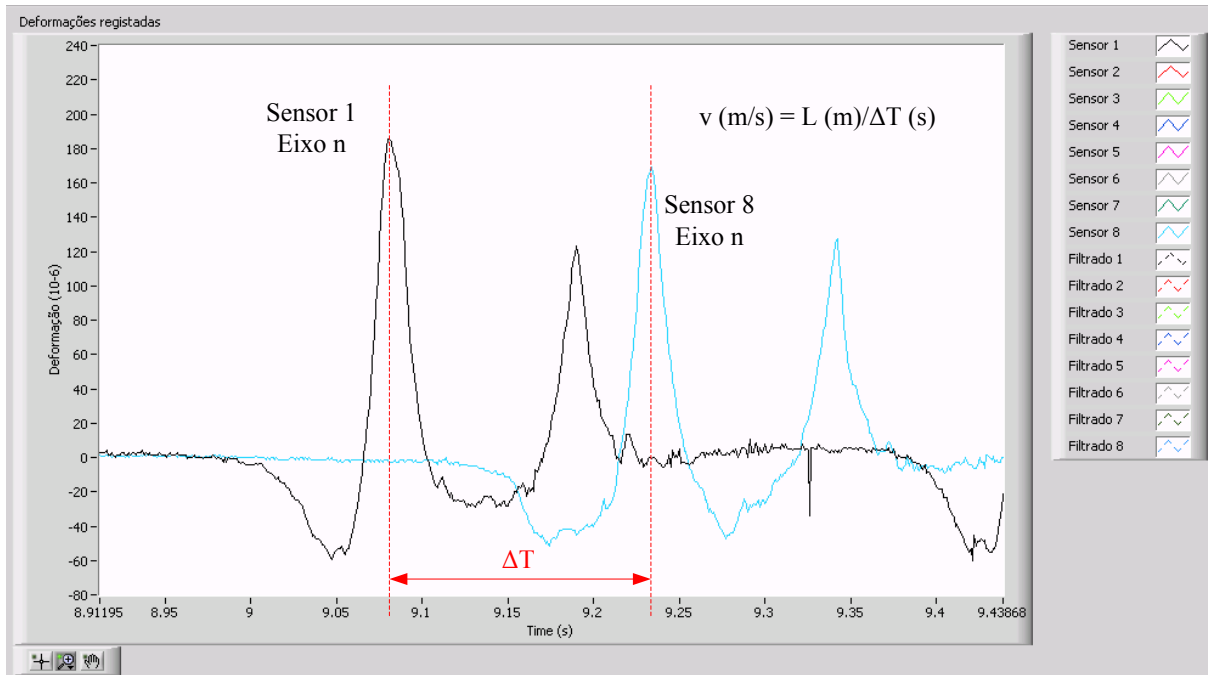


Fig. 47 Determinação da velocidade por eixo.

Conhecendo a velocidade de cada eixo, é possível obter a distância entre eixos, conforme indicado na Fig. 48, utilizando a diferença de tempos entre a passagem de dois eixos consecutivos pelo mesmo sensor.

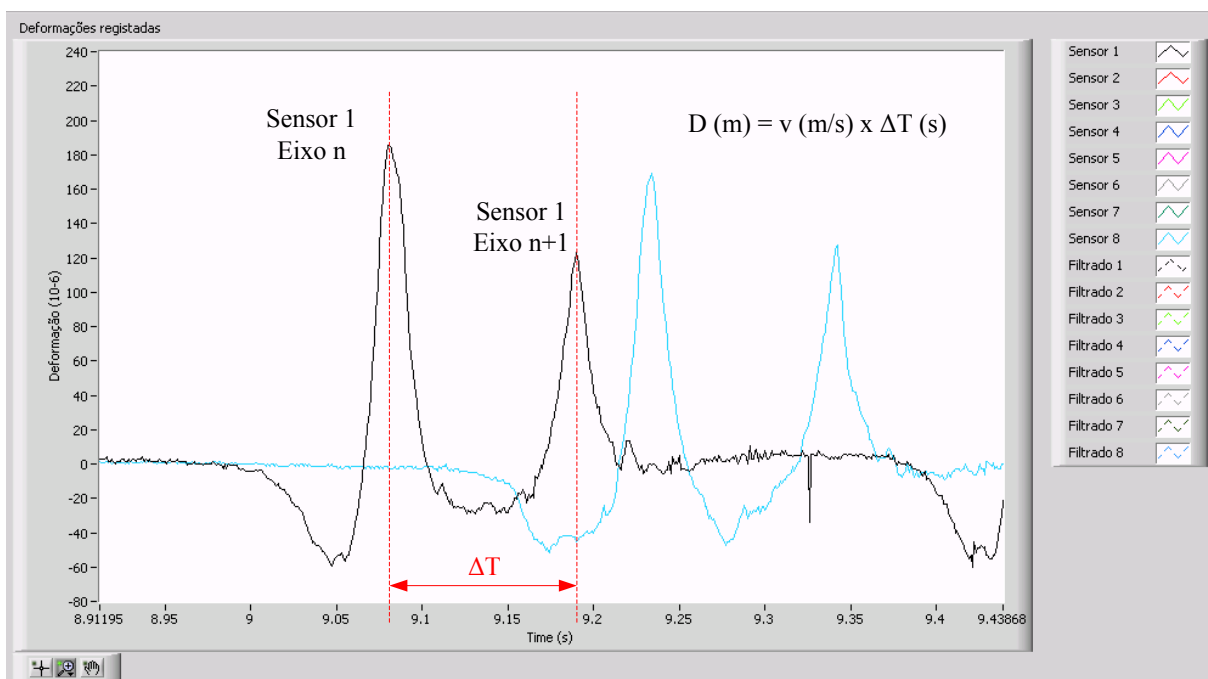


Fig. 48 Determinação da distância entre eixos.

No interface gráfico criado, a representação da velocidade por eixo é representada de acordo com a posição do eixo na composição, conforme a Fig. 49.

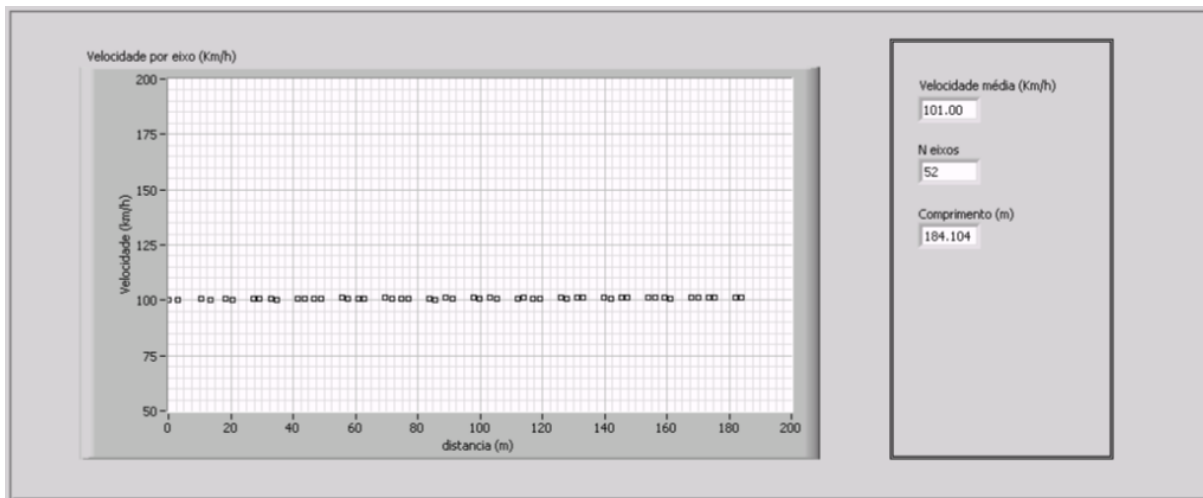


Fig. 49 Velocidade por eixo de acordo com a sua posição.

5.5.3 DIFERENÇAS ENTRE EIXOS

Idealmente, a passagem de um mesmo eixo sobre os vários sensores deveria apresentar deformações iguais. As variações de amplitude de picos correspondentes ao mesmo eixo podem dever-se a:

- Defeitos nas rodas;
- Excentricidades na carga
- Posicionamento do sensor desviado do meio vão
- Sensor desviado do alinhamento do carril
- Diferença de comportamento do carril
- Afastamento das travessas
- Desgaste
- Defeitos
- Etc.

No entanto, apenas os dois primeiros pontos deveriam criar alterações na amplitude dos picos de forma diferente de roda para roda. Com o objectivo de eliminar os efeitos do carril e de posicionamento do sensor, experimentou-se calcular as diferenças de deformação registadas por cada sensor devido à passagem de cada eixo. Na Fig. 50 apresenta-se o interface que disponibiliza esta informação. O gráfico do topo representa as deformações de pico de cada sensor para as passagens dos diversos eixos.

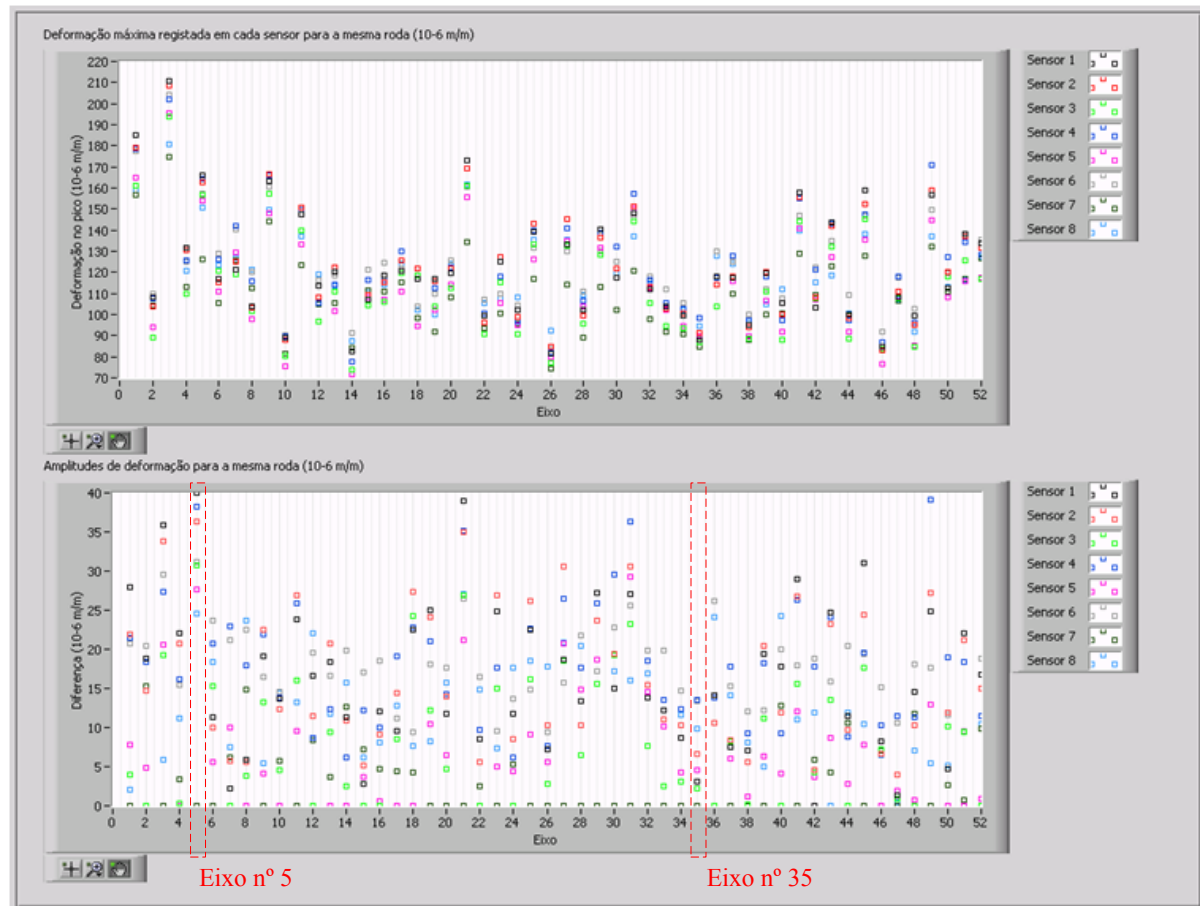


Fig. 50 Avaliação das deformações máximas registadas por cada sensor.

Observando o gráfico de cima da Fig. 50 verifica-se que existe uma variação de deformação máxima de eixo para eixo, mas que esta não é igual de sensor para sensor, registando-se uma dispersão nos resultados dos vários sensores para o mesmo eixo. O valor quantitativo a avaliar, no caso de se pretender um cálculo automático, será a diferença de amplitude máxima de cada eixo para os diversos sensores. No interface de interpretação de dados criado, o gráfico de baixo representa as diferenças absolutas verificadas de roda para roda, considerando como referência o sensor com o pico de menor amplitude.

Na Fig. 51 estão representados os registos de deformação para a passagem do 5º eixo - correspondente ao eixo com maior dispersão de deformações registadas – e na Fig. 52 estão representados os registos correspondentes ao 35º eixo – eixo com menor disparidade de deformações registadas.

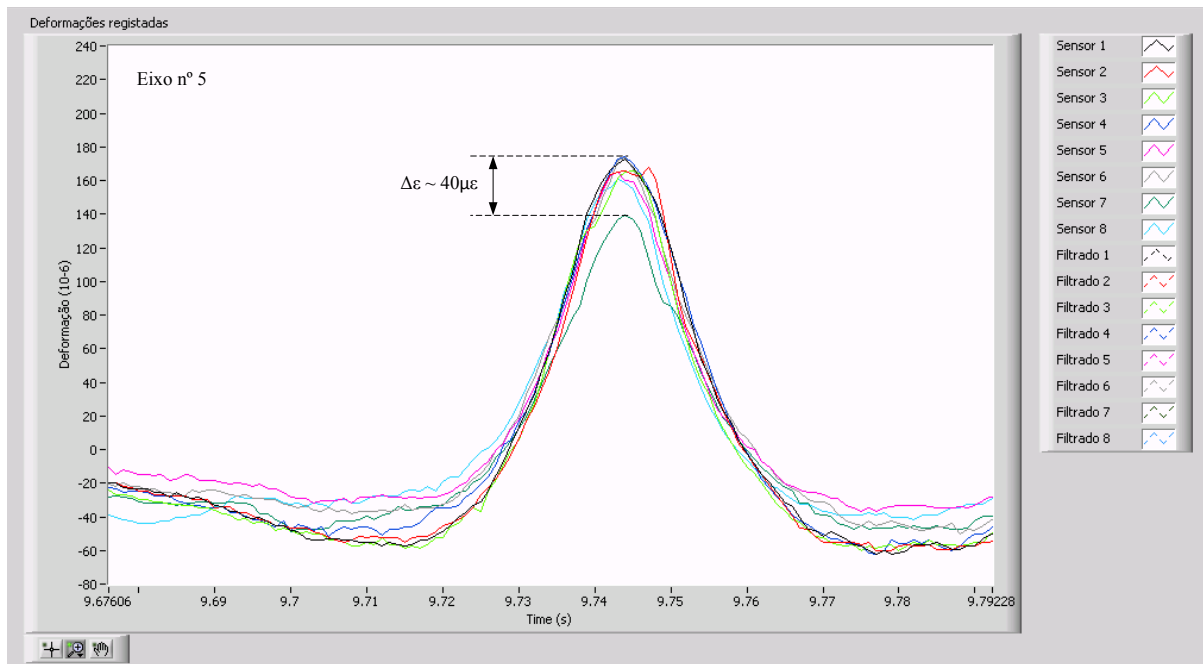


Fig. 51 Registos sobrepostos do pico com maior disparidade de deformações.

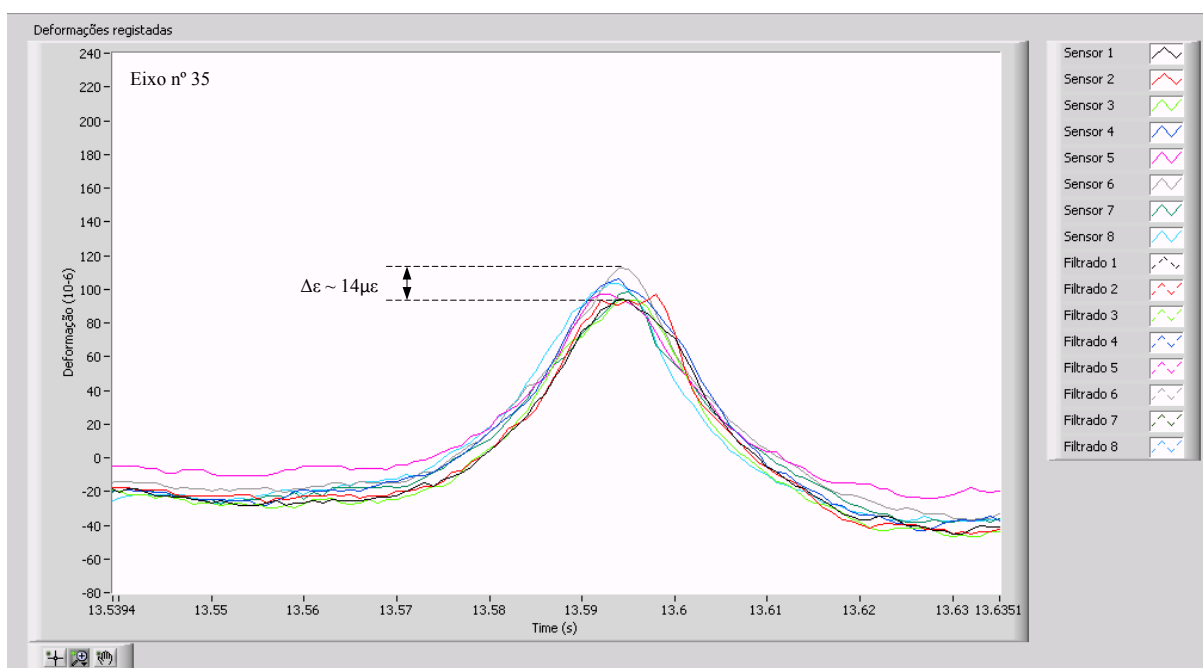


Fig. 52 Registos sobrepostos do pico com menor disparidade de deformações.

Nestas duas figuras é possível verificar que o espectro do segundo sensor apresenta irregularidades semelhantes. Este fenómeno foi observado na maioria dos registos deste sensor, pelo que se conclui que estes impactos se devem a um defeito localizado na linha e não no material circulante. Na Fig. 53 estão representadas as deformações registadas para a passagem do comboio que foi utilizado como exemplo. É visível, na maioria dos picos correspondentes aos eixos, perturbações no espectro

registrado, corroborando a afirmação anterior. Este fenômeno acontece para todos os eventos registrados. A Fig. 54 demonstra o mesmo fenômeno para a passagem do Suburbano das 15:27.

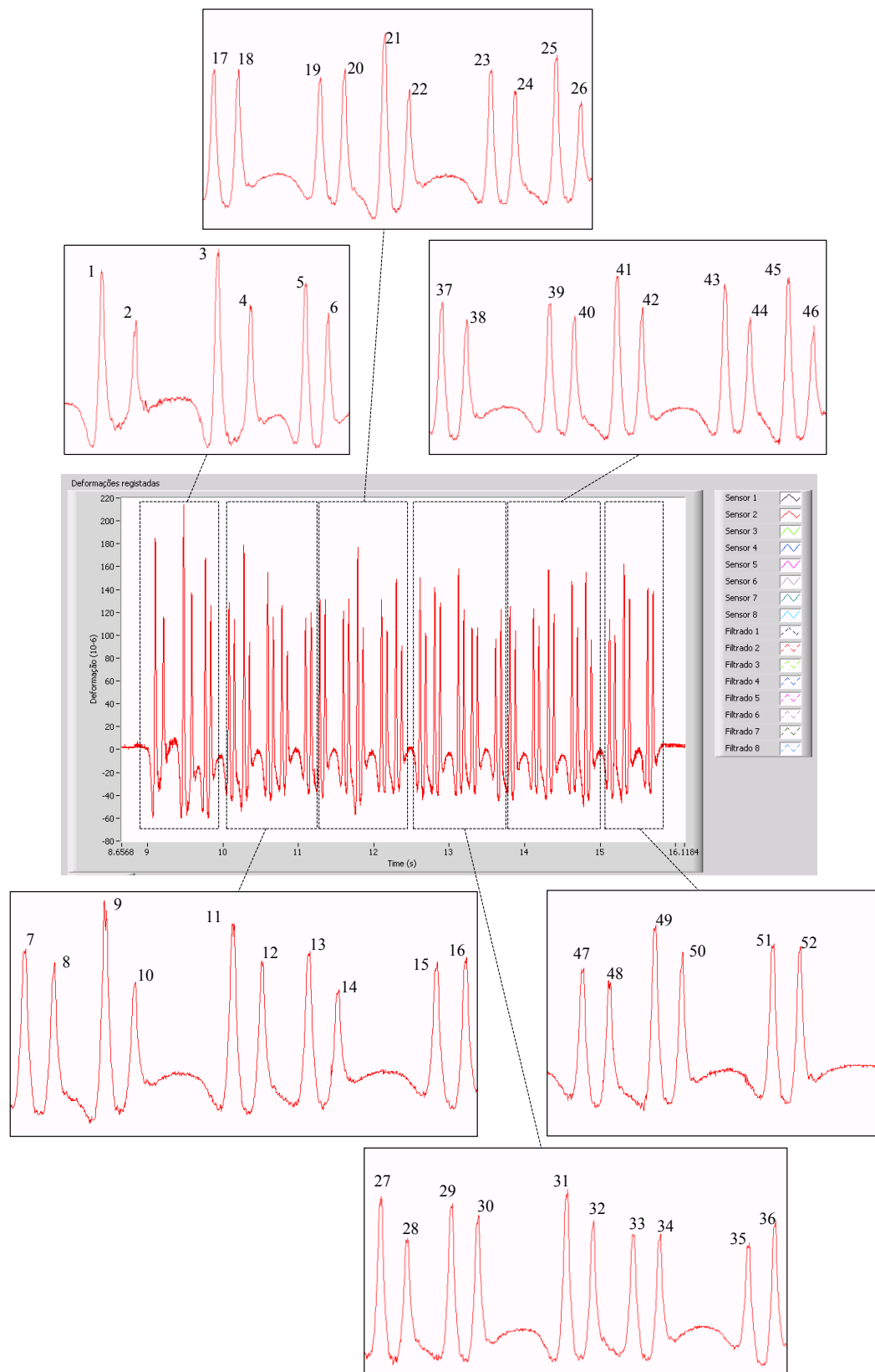


Fig. 53 Registro do Sensor 2.

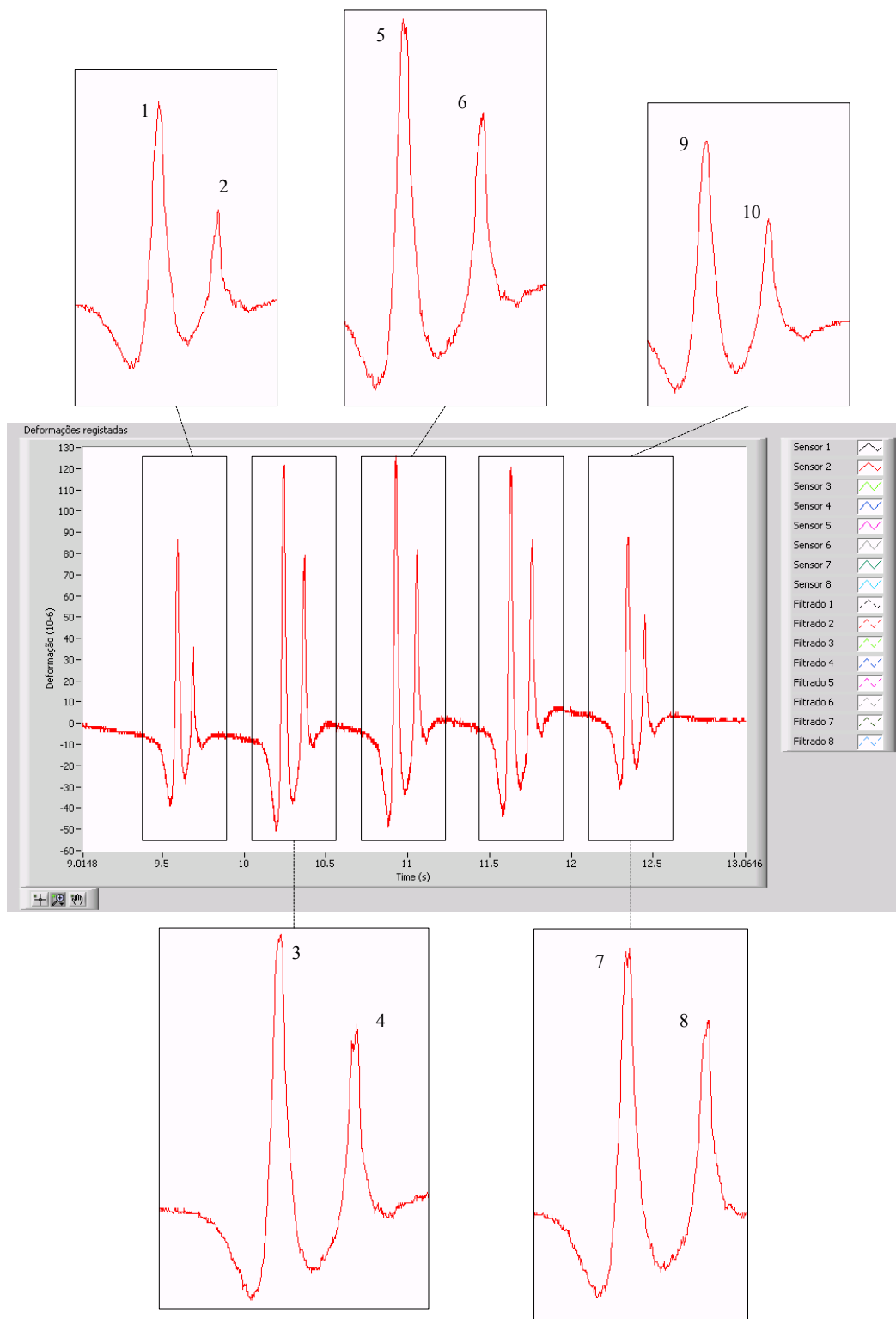


Fig. 54 Registo do Sensor 2 para a passagem do comboio Suburbano das 15:27.

5.5.4 COMPARAÇÃO DE VALORES REGISTADOS E VALORES FILTRADOS

A comparação dos valores reais com os valores filtrados permite identificar anomalias de frequências mais elevadas que se podem atribuir a defeitos nas rodas. Uma outra abordagem para a identificação

de defeitos em rodas baseia-se, precisamente, nas diferenças entre os valores filtrados a baixas frequências e os valores realmente registados. As Fig. 55 e Fig. 56 apresentam registos da passagem sobre um sensor de uma roda sem perturbações e de uma roda com perturbações, respectivamente.

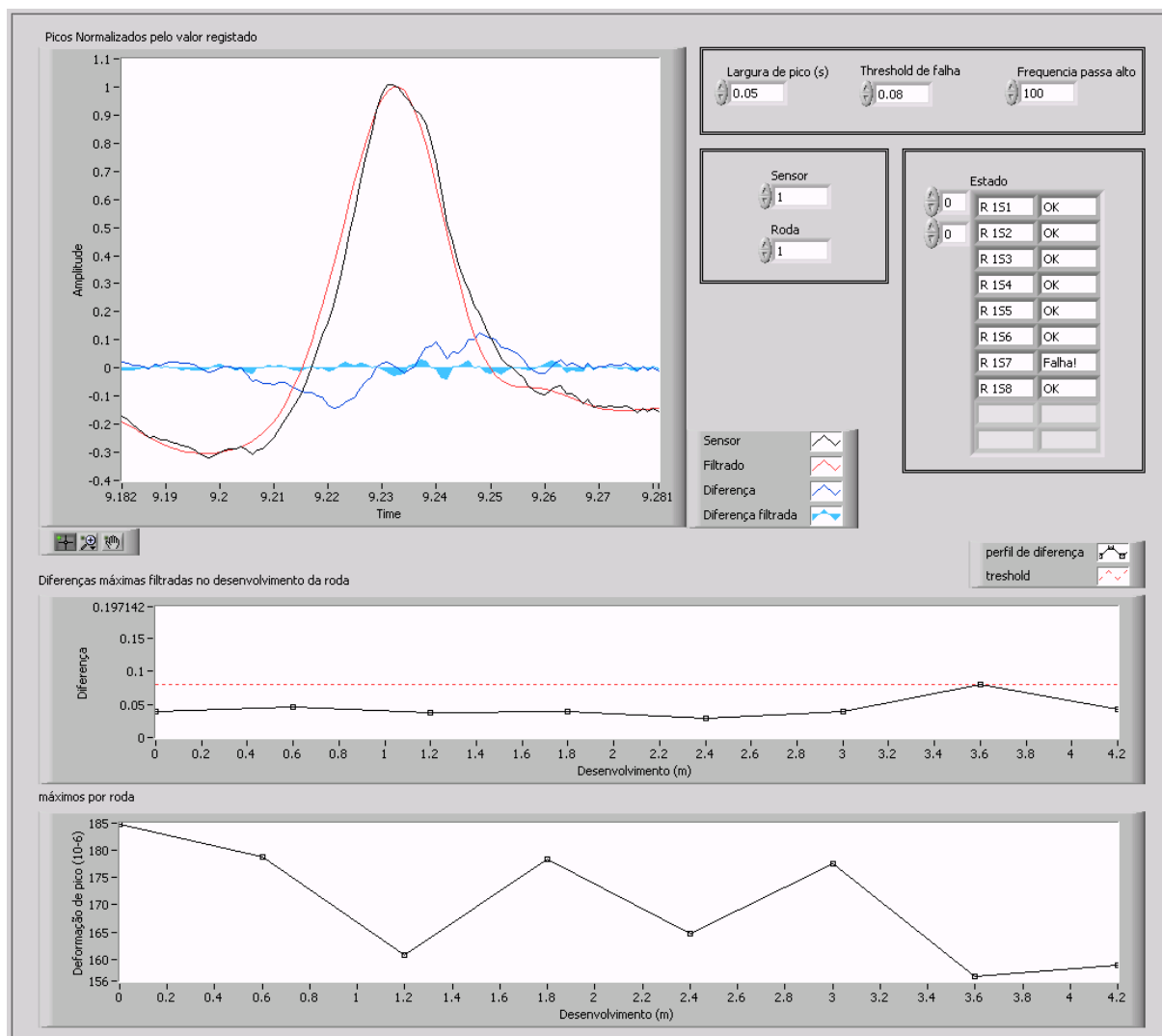


Fig. 55 Exemplo de pico sem perturbações de alta frequência.

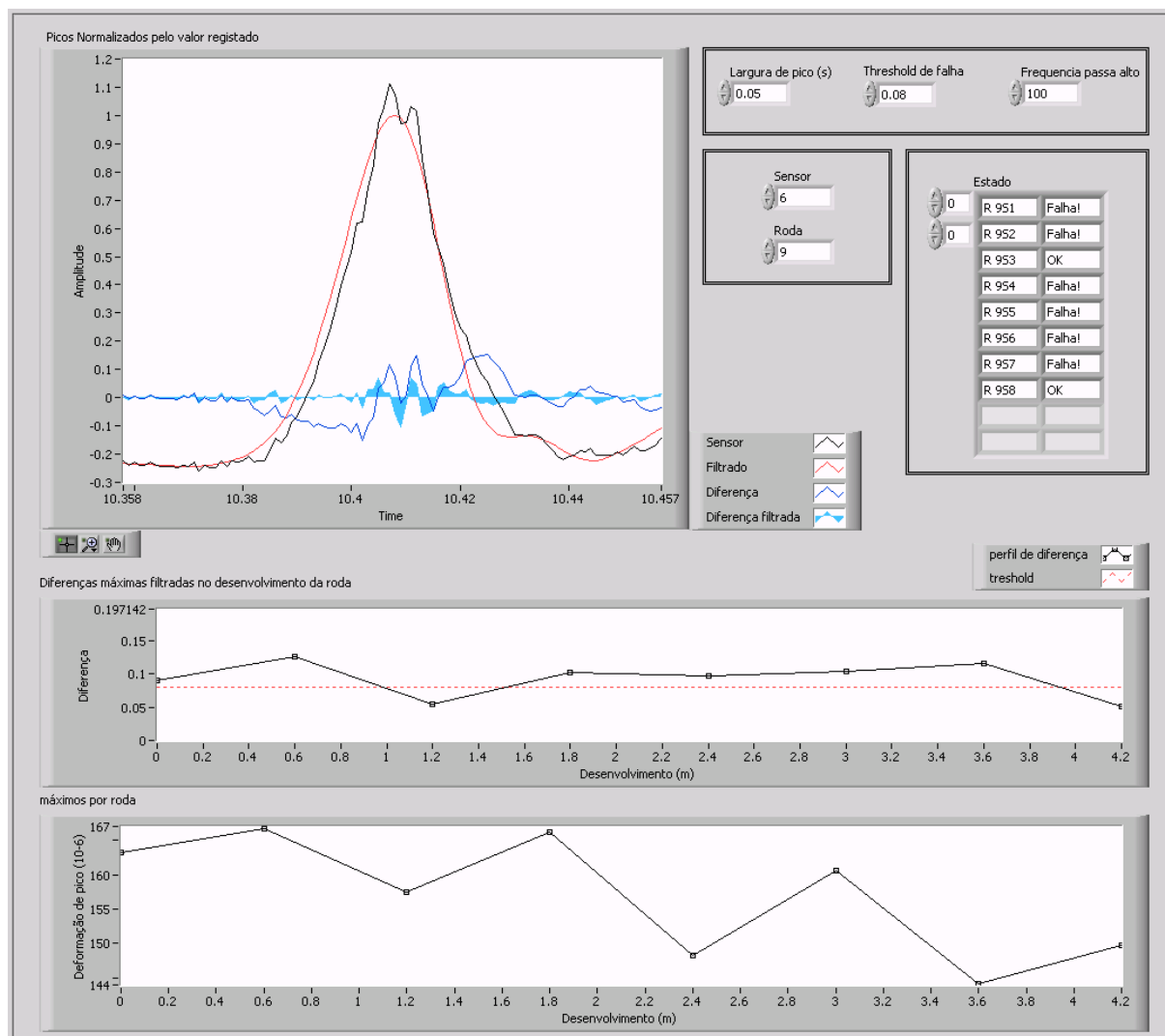


Fig. 56 Exemplo de pico com perturbações de alta frequência.

O interface representa os valores normalizados pelo valor filtrado máximo. As linhas do gráfico têm a seguinte correspondência:

- A preto o pico identificado com os seus valores reais;
- A vermelho o resultado filtrado para esse pico;
- A azul a diferença entre os dois picos – é visível que há alguns efeitos de baixas frequências ainda presentes nesta diferença e que não são causados pelas perturbações verificadas no pico real registado;
- A azul sombreado o resultado da diferença tratado com um filtro passa alto, obtendo-se apenas a contribuição das variações de frequências mais elevadas (o filtro utilizado é o mesmo que o descrito na página 45, mas para permitir a passagem de altas frequências).

No canto superior direito do interface gráfico pode-se definir alguns dos parâmetros utilizados:

- Largura de pico (s) – corresponde ao tempo para cada lado do centro do pico representado e avaliado;

- *Threshold* de falha – corresponde ao valor da diferença filtrada a partir do qual se considera que existe falha;
- Frequência passa alto (Hz) – corresponde à frequência a utilizar no filtro passa alto aplicado às diferenças entre os valores de deformação reais e filtrados passa baixo.

Por baixo do quadro de parâmetros pode-se escolher qual o sensor e qual o eixo a representar no gráfico. À direita deste está apresentado o resultado correspondente ao eixo seleccionado para todos os sensores. No caso de haver valores da diferença filtrada que ultrapassam o valor limite definido, o estado da roda é indicado como “Falha!”. No caso desse limite não ser ultrapassado, o quadro indica “OK”.

No gráfico intermédio desta janela do interface gráfico podem ser observados os valores da diferença máxima entre valores reais e valores filtrados, após a aplicação do filtro passa alto, para cada roda na sua passagem sobre cada sensor. O limite definido para se considerar a existência ou não de falha está também representado conseguindo-se, desta forma, obter a visualização do estado da roda ao longo do seu perímetro.

O gráfico de baixo representa os valores de pico para a deformação que foi registada à passagem sobre cada sensor, da mesma roda.

5.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS TEÓRICOS

A comparação directa dos resultados experimentais com os resultados obtidos na simulação teórica efectuada não é simples. Há alguns factores, que se prendem com a forma como foram realizados os ensaios e com as capacidades do programa de cálculo adoptado, que fazem com que os resultados tenham de ser olhados tendo em atenção as diferenças dos dois casos.

Em primeiro lugar, os resultados experimentais não são acompanhados de um conhecimento detalhado da envolvente, pelo que a simulação, embora calibrada para um cenário ajustado, pode não representar a realidade de forma exacta. Em particular, as características da via foram escolhidas de acordo com o que é conhecido como prática na sua construção e como comum na geologia da área, não havendo qualquer caracterização quantitativa da envolvente. Também as características escolhidas para a simulação do liso não são relacionáveis com as da realidade experimental, uma vez que a qualidade dos rodados registados na campanha não foi caracterizada.

Em segundo lugar, os resultados obtidos na simulação teórica são forças dinâmicas na via e deslocamentos na via, enquanto que os resultados experimentais directos são deformações no carril. Não sendo as grandezas de relação imediata entre si, não é possível fazer o confronto directo de resultados.

No entanto, ao observar os resultados de força dinâmica na via, verifica-se que, devido ao defeito na roda, surge um impacto que faz variar a força transmitida à via de forma rápida e intensa (Fig. 9) que é semelhante ao efeito observado na medição de deformações se se “anular” o efeito estático. No programa desenvolvido, este efeito corresponde ao valor que é obtido no final do processamento e a partir do qual se julga ser possível fazer a identificação de lisos nas rodas – o resultado da diferença entre o valor de deformação filtrado e o valor realmente registado (Fig. 56).

6

CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÃO

A existência de defeitos em rodas de veículos ferroviários é nefasta quer para a infra-estrutura quer para a própria composição. O controlo da qualidade dos rodados dos comboios que circulam sobre uma via é, portanto, de extrema importância para a infra-estrutura e para o material circulante aumentando a segurança e reduzindo os custos de manutenção.

A realização de uma campanha experimental permitiu reunir uma série de dados que se revelaram de grande utilidade para a criação de uma base metodológica de determinação automática de defeitos em rodas.

Analisando as deformações provocadas pela passagem de comboios nos carris em diferentes localizações ao longo do desenvolvimento de uma roda é possível identificar eventos anómalos que se podem atribuir a defeitos presentes nas rodas. A passagem de uma roda com perturbações cria impactos de magnitude e frequências elevadas.

A identificação automática de defeitos a partir da análise dos espectros de deformação registados pelos sensores mostrou-se possível utilizando quer a deformação de pico de cada roda em cada ponto, quer a influência das altas frequências no sinal obtido.

A tecnologia adoptada – sensores de Bragg em fibra óptica – revelou-se indicada para aplicações em caminhos-de-ferro uma vez que é intrinsecamente imune a interferências electromagnéticas, permitindo a aquisição de sinais limpos a diversas taxas de aquisição de sensores aplicados directamente no carril.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Apesar de os resultados serem positivos, sentiu-se a falta de informação para a interpretação total dos dados da campanha experimental. Observou-se que há vários efeitos que podem influenciar as deformações de forma semelhante e que a sua distinção numa campanha como a realizada é praticamente impossível. Para a criação de uma base de dados com informação suficiente para a correcta definição de parâmetros e limites, torna-se necessário um estudo não só dos efeitos da passagem de um comboio sobre a via, mas também da caracterização do estado real da composição e da via no local de ensaio.

Em particular os dados gerados pela passagem sobre a via deverão ser correlacionados com a caracterização do perfil da roda de forma a conhecer-se o estado real do elemento. Assim, considera-se importante que se realizem mais ensaios e que o estudo seja continuado, quer em ambiente real com a

envolvente bem caracterizada, quer em laboratório, para definir de forma mais precisa parâmetros a utilizar na identificação de defeitos em rodas.

Mantendo o propósito de criar um sistema comercializável de identificação de situações que possam prejudicar tanto a infra-estrutura como o material circulante, torna-se imperativo que se estude de forma objectiva o custo - benefício de um sistema deste género. As mais-valias de um sistema de determinação de defeitos em rodas são óbvias: aumento de segurança, diminuição de custos de combustível e redução da degradação da via e dos veículos, permitindo reduzir os custos de manutenção. No entanto, a quantificação destes valores e a sua comparação com o investimento num sistema de determinação automática é crucial para haver aceitação por parte das entidades intervenientes, em particular dos donos da infra-estrutura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Remennikov, A., Kaewunruen, S. *A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction*. Structural control and health monitoring Structural Control Health Monitoring 2008, 15:207-234, 1st October 2008, John Wiley & Sons, Ltd.
- [2] Couto, A., *Apontamentos teóricos da cadeira de Caminhos de Ferro*, Faculdade e Engenharia da Universidade do Porto, Dep. Civil, Secção de Vias de Comunicação, 2007/2008
- [3] Steffens, D. *Identification and development of railway track dynamic behaviour*. Dissertação de Mestrado, Faculty of Built Environment and Engineering Queensland University of Technology, 2005.
- [4] Remennikov, A., Kaewunruen, S. *Simulating shock loads in railway track environments: experimental studies*. Proceedings of 14th international congress on sound and vibration, 9 to 12th July 2007, Cairns, Australia.
- [5] Lozano, A., *Testing and deployment of Wheel impact detectors on RENFE*. Track Vehicle Interaction Workshop - Wayside and onboard detection devices. 17th February 2005, UIC, Paris, França."
- [6] Dahlberg, T. *Track issues*. In Handbook of Railway Vehicle Dynamics, pp 143-175, Taylor and Francis Group, 2006.
- [7] Uzzal, R., Ahmed, W. Rakheja, S. *Dynamic analysis of railway vehicle track interactions due to wheel flat with a pitch-plane vehicle model*. Journal of Mechanical Engineering, December 2008, Transaction of the Mech Eng Div, The institution of engineers, Bangladesh.
- [8] Vale, C., Calçada, R. *Influência da camada de suporte no comportamento dinâmico da via em laje de betão para tráfego ferroviário de alta velocidade*. 3as Jornadas Luso Espanholas de Geotecnia, Junne 2009, Madrid.
- [9] Calçada, R. *Efeitos dinâmicos em pontes resultantes do tráfego ferroviário a alta velocidade*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.
- [10] <http://www.salientsystems.com/wild.pdf>, 13th May 2008.
- [11] [/www.salientsystems.com](http://www.salientsystems.com)
- [12] <http://www.voestalpine.com/vae/en/company/overview.html>, 4th November 2008
- [13] http://www.voestalpine.com/vae/en/products/railway_infrastructure/switchsystems/electronic_systems/hazard_notification/foa_altlas.html, 4th November 2008
- [14] <http://www.gotchamonitoringsystems.com/pdf/Description.pdf>, 14th February 2009
- [15] LeDosquet, G., Pawellek, F., Muller-Boruttau, F., *Lasca: Automatic monitoring of the running quality of railway vehicles*. Railway Technical Review 2, 12th April 2007, pp 34-39, Germany.
- [16] Pimentel, R., Barbosa, B., Costa, N., Ribeiro, D., Ferreira, L., Araújo, F., Calçada, R., *Development of a commercial fibre optic based Weight-In-Motion system for railway traffic characterization*, SEON07 - V Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors, 29th June 2007, Aveiro
- [17] Pimentel, R., Barbosa, B., Costa, N., Ribeiro, D., Ferreira, L., Araújo, F., Calçada, R., *Hybrid fibre optic / electrical measurement system for characterization of railway traffic and its effects on a short span bridge*, IEEE Sensors Journal – Special Edition on Optical Fibre Sensors, Volume 8, Number 7, July 2008.

- [18] K. Kincade, *Fibre sensors lay groundwork for structural health monitoring*, Laser Focus World 42 (2), 63-67, 2005.
- [19] F. Ansari, *Sensing issues in civil structural health monitoring*, Springer, Dordrecht, 2005
- [20] P. Boffi, R. Bratovich, F. Persia, A. Barberis, M. Martinelli, A. Basso, G. Bucca, A. Nicchio, M. Bocciolone, *Fibre sensor for collector strain monitoring in the pantograph-catenary interaction*, 18th Int. Conference on Optical Fibre Sensors, 23rd to 27th October 2006, Cancun
- [21] Chung-Yue Wang, Hao-Lin Wang, Ming-Hung Chen, *Structural health monitoring activities of applying optical fibre sensors in Taiwan*, 18th Int. Conference on Optical Fibre Sensors, 23rd to 27th October 2006, Cancun.
- [22] Araújo, F. *Redes de Bragg em Fibra Óptica*. Dissertação de doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 1999
- [23] Ferreira, L. *Interrogação de Sensores de Bragg em Fibra Óptica*. Dissertação de doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 1999
- [24] http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=27287&documentId=61, 21st July 2009.
- [25] López-Higuera, J M, *Handbook of optical fibre sensing technology*, John Wiley & Sons, Chichester, 2002

