

Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC
Escola de Engenharia da UFMG
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
<http://www.fumec.br/revistas/construindo/index>

ISSN 2318-6127 (online)
ISSN 2175-7143 (impressa)
Recebido em 05/06/2019
Aceito em 26/06/2019

MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE ZONAS DE TRANSIÇÃO DA VIA FÉRREA

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE DYNAMIC BEHAVIOUR OF A RAILWAY TRANSITION ZONE

Alves Ribeiro, Cristina

Engenheira Civil, PhD, FEUP

ana.ribeiro@fe.up.pt

Calçada, Rui

Engenheiro Civil, PhD, FEUP

ruiabc@fe.up.pt

RESUMO

As zonas de transição de rigidez da via, que ocorrem, por exemplo, entre zonas em aterro e obras de arte, constituem singularidades importantes na via que têm atraído especial atenção por parte das entidades gestoras das infraestruturas ferroviárias de vários países. A grande necessidade de manutenção e renovação, que implicam custos muito elevados, estão na origem da preocupação generalizada.

O trabalho apresentado neste artigo foi desenvolvido na FEUP com a colaboração da REFER, e teve como principal objetivo fornecer contributos para a compreensão do comportamento dinâmico das zonas de transição, através da realização de estudos experimentais e numéricos. A zona estudada consistiu numa zona de transição aterro-atravesamento inferior à via, situado ao km 40+250 da Linha do Norte no trecho Vila Franca de Xira (norte) – Azambuja.

A instrumentação efetuada no local consistiu na realização de ensaios de receptância da via, ensaios para a passagem de tráfego ferroviário e na monitorização sincronizada das respostas dinâmicas do veículo e da via. Relativamente ao ensaio para a passagem de tráfego ferroviário realizou-se a monitorização de deslocamentos recorrendo a um sistema de medição sem contacto baseado em tecnologia laser, de deslocamentos na interface carril-travessa, de acelerações nas travessas e de cargas de tráfego na via. Com a monitorização efetuada pretendeu, para além da avaliação do comportamento dinâmico da zona de transição, validar os modelos numéricos desenvolvidos.

Palavras-chave: Via-férrea, monitorização dinâmica, zonas de transição

ABSTRACT

Along the railway track it is common to find zones where vertical track stiffness variations occur, as for example, transitions from track in embankment to track over a concrete structure. The high maintenance needs, call the attention of infrastructure managers and researchers of several countries.

The work presented in this paper were developed in FEUP with the collaboration of REFER and intended to understand the dynamic behaviour of transition zones by experimental and numeric studies. This zone consists of a at a culvert transition zone, located at km 40+250 at the Northern line of the Portuguese railway network in Vila Franca de Xira (north) – Azambuja.

The experimental work consisted in: performing receptance tests for the characterisation of the dynamic stiffness of the track in various transition zones; performing dynamic tests for the passage of Alfa Pendular trains at a speed of 220 km/h, for the characterisation of the dynamic response of the track in terms of rail displacement and sleeper acceleration along the transition zone as well as rail-sleeper relative displacement and train dynamic loads; synchronised monitoring of the dynamic response of the track and of the inspection vehicle EM120 from REFER, in order to relate the accelerations of the axle, bogies and vehicle box with its position in the transition. The experimental work intended to analyse the dynamic behaviour of the transition zone calibrate and validate the numeric models.

Keywords: railway track, dynamic monitoring, transition zones

1. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Em conjunto com a REFER, selecionou-se para realização deste estudo um troço de via onde ocorre uma passagem hidráulica, a PH126 A, que se apresenta na Figura 1, na qual a estrutura de betão se localiza relativamente próxima da via. Esta estrutura localiza-se ao km 40+250, no sub-troço Alhandra-Setil, trecho Vila Franca de Xira (norte) - Azambuja (Figura 1).

Figura 1: Passagem hidráulica PH126A



Fonte: Autor, 2012

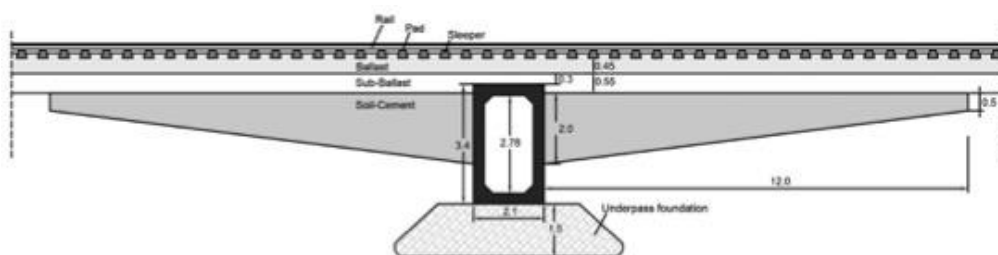
A renovação desta zona da via data de 2006 e consistiu na demolição de uma estrutura antiga e na construção de uma nova passagem. Segundo indicado na memória descritiva do projeto, quase todas as passagens hidráulicas existentes se encontravam subdimensionadas do ponto de vista hidráulico, tendo-se procedido à sua substituição por novas passagens com maior secção.

A transição entre a via em aterro e a via sobre a PH é efetuada através de cunhas de material tratado, construídas dos dois lados da PH, que têm um desenvolvimento longitudinal igual a 12 m

e uma largura de 8,80 m. As cunhas situam-se sob a camada de sub-balastro e têm altura de 2 m na extremidade junto à estrutura da PH e 0,50 m na outra extremidade.

A estrutura da pH (Figura 2) tem 3,4 m de altura e 2,1 m de largura e é fundada num prisma de enrocamento de 1,50 m de altura, envolvido em geotêxtil. A camada de balastro apresenta uma altura média de 45 cm, a camada de sub-balastro apresenta uma altura de 55 cm na zona da via sobre as cunhas de transição e 25 cm sobre a estrutura da pH. As travessas são elementos monobloco pré-esforçadas de betão com 315 kg com 2,60 m de comprimento. O espaçamento entre travessas é de 0,60 m. O carril é do tipo UIC60, sendo a bitola igual a 1,678 m. As palmilhas são Vossloh (modelo Zw687a).

Figura 2: Geometria da zona de transição



Fonte: Autor, 2012

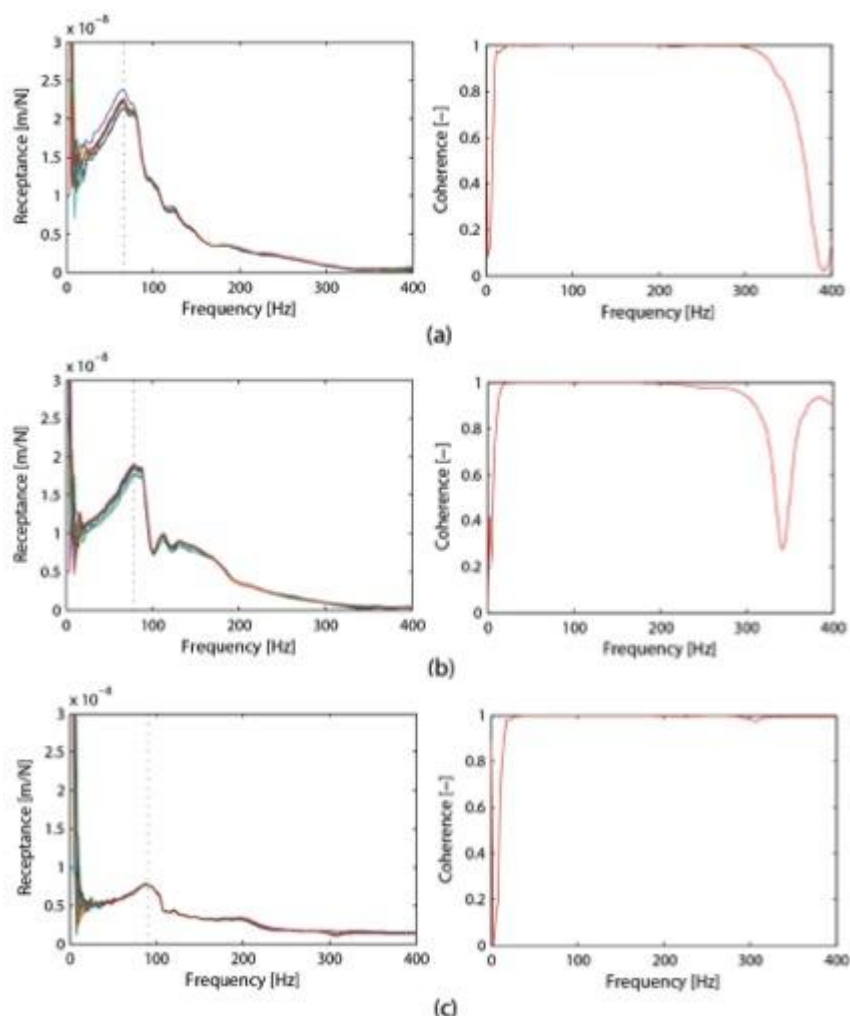
2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A realização de ensaios experimentais para compreensão do funcionamento das zonas de transição consiste numa opção interessante e que tem sido adotada em trabalhos levados a cabo por entidades gestoras das infraestruturas ferroviárias um pouco por todo o mundo (Berggren, 2009; ERRI, 1999; Li & Davis, 2005; SUPERTRACK, 2002-2005). A monitorização desta zona de transição consistiu na recolha de diversas grandezas que permitiram por um lado compreender o funcionamento geral da zona de transição e, por outro lado, calibrar e validar os modelos numéricos desenvolvidos (Alves Ribeiro, 2012; Alves Ribeiro, Calçada, & Delgado, 2017). O trabalho desenvolvido teve ainda o objetivo de validar modelos numéricos desenvolvidos (Alves Ribeiro, Calçada, & Delgado, 2018).

2.1. ENSAIO DE RECEPTÂNCIA DA VIA

A realização destes ensaios teve como finalidade a obtenção de funções de receptância que traduzem a deformabilidade dinâmica da via em função da frequência, permitindo identificar algumas frequências ressonantes características do comportamento dinâmico da via, sendo particularmente úteis na calibração de modelos numéricos. O ensaio foi realizado em três zonas

diferentes da via: sobre a PH (Zona C), sobre a cunha de solo-cimento (Zona B) e na zona em aterro (Zona A).



O ensaio consistiu na excitação do carril, sobre uma travessa e no vão entre duas travessas, com um martelo instrumentado e avaliação da resposta da via através de acelerómetros criteriosamente colocados nas travessas e no carril. O conhecimento da ação e da resposta possibilita o cálculo das funções de transferência. A excitação foi efetuada sem a via carregada uma vez que o ensaio decorreu com a via em operação.

Apresenta-se na Figura 3 os resultados obtidos para as três zonas ensaiadas. Cada gráfico contém a sobreposição de 10 curvas que são resultado obtidos em 10 ensaios realizadas em cada zona. A sobreposição das curvas evidencia a boa coerência dos resultados no intervalo de frequência do ensaio, de 20 Hz a 300 Hz.

Figura 3: Funções de receptância e coerência obtidas na (a) zona A, (b) zona B e (c) zona C

Fonte: Autor, 2012

Os valores de receptância obtidos na parte inicial da curva (correspondentes à resposta quase-estática da via) nas três zonas permite concluir que a que a flexibilidade dinâmica da via sobre a estrutura (zona C) é 60% inferior à obtida na via sobre a zona de aterro (zona A), sendo a flexibilidade dinâmica obtida na via sobre a cunha de transição (zona B) cerca de 20% inferior à obtida na via sobre a zona de aterro.

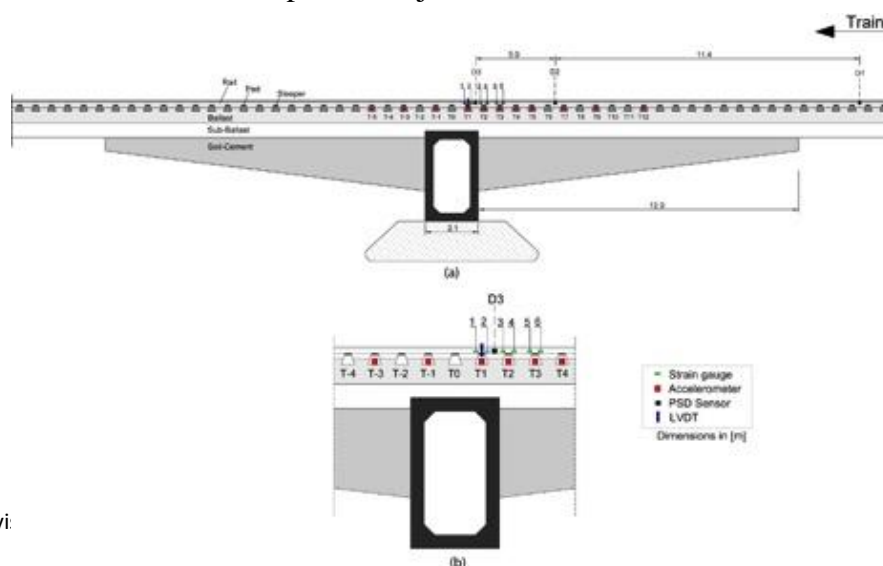
A análise destas funções permite ainda identificar com clareza o pico de ressonância correspondente à vibração global da via, onde carril e travessas vibram sobre as camadas da via, que depende da rigidez da fundação. Verifica-se que este pico ocorre para uma frequência de 65.9 Hz na zona A, 78,1 Hz na zona B e 90.3 Hz na zona C, verificando-se, portanto, um aumento gradual da frequência à medida que se passa da zona A para a zona C.

As características da fundação da via variam ao longo da transição (aterro – zona A, cunha de transição – zona B e estrutura da pH – zona C) e esta variação é acompanhada por uma variação nas frequências ressonantes: a redução da flexibilidade dinâmica da via é acompanhada pelo aumento da frequência ressonante. Sendo a rigidez dinâmica o inverso da flexibilidade, os resultados obtidos estão de acordo com a variação de rigidez expectável para a zona de transição.

2.2. ENSAIO PARA A PASSAGEM DE TRÁFEGO FERROVIÁRIO

Apresenta-se na Figura 4 uma representação esquemática da instrumentação da via contendo: acelerómetros nas travessas (T-5 a T12), dispositivo de medição de deslocamento sem contacto (PSD) no carril (pontos D1, D2 e D3), transdutor de deslocamento (LVDT) para medição do deslocamento relativo entre o carril e a travessa instalado na travessa T1 e extensómetros instalados em 6 secções do carril junto à estrutura da pH (pontos 1 a 6) para avaliação das cargas.

Figura 4: Representação esquemática do plano de instrumentação da via: (a) vista geral e (b) pormenor junto à estrutura da PH



Fonte: Autor, 2012

A aquisição destas grandezas foi efetuada recorrendo ao sistema apresentado na Figura 5, onde é possível identificar o computador portátil, uma unidade de aquisição compacDAQ 9172 da marca *National Instruments* com entrada para 8 módulos, a unidade de condicionamento de sinal usada para aquisição dos deslocamentos com o sistema laser (caixa cinza colocada na frente da unidade de aquisição) e uma unidade para condicionamento do sinal do LVDT (caixa vermelha). De referir que a frequência de aquisição neste ensaio foi de 2000 Hz.

Figura 5: Sistema de aquisição montado no campo experimental: (a) sistema completo e (b) pormenor da unidade de aquisição compacDAQ 9172



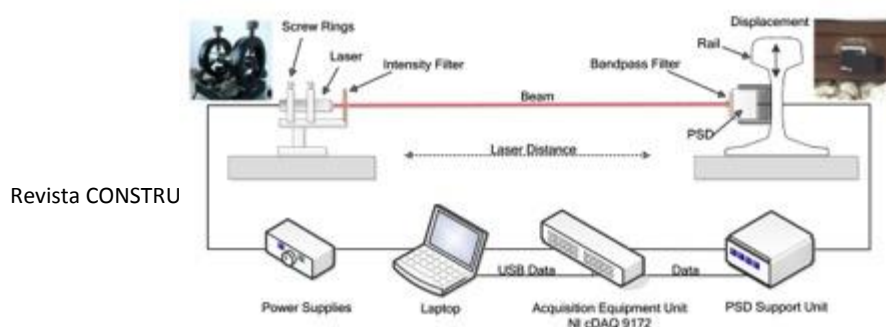
Fonte: Autor, 2012

Foi analisada a resposta dinâmica da via ao longo da zona de transição para a passagem do comboio Alfa Pendular a uma velocidade máxima de 220 km/h.

2.2.1. MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS DA VIA

O deslocamento vertical do carril foi medido recorrendo a um método sem contacto que se baseia em tecnologia laser. O princípio de funcionamento deste sistema consiste na emissão de um feixe pelo laser que é recebido pelo PSD, *Position Sensitive Detector* (da marca Hamamatsu, modelo C10443), que se encontra fixo ao objeto cujo deslocamento se pretende medir, por exemplo, o carril ou a travessa. No sensor PSD é determinada a posição do centro de gravidade do feixe do laser incidente. Assim, a variação da posição do centro de gravidade do feixe permite conhecer com rigor a variação de posição do sensor PSD e assim estimar o deslocamento vertical e horizontal (no caso do sensor usado) do ponto instrumentado. O esquema apresentado na Figura 6 resume o procedimento seguido para a medição.

Figura 6: Representação esquemática do processo de medição do deslocamento sem contacto recorrendo a um laser e a um sensor PSD



Fonte: Pinto et. al, 2013

Antes da aplicação do sistema em campo, e com o intuito de testar e validar o sistema e os resultados obtidos, realizaram-se em laboratório vários ensaios estáticos e dinâmicos. Maiores detalhes sobre o sistema ótico, o sistema de aquisição e os testes realizados pode ser consultado em Pinto et al. (2013).

Para a monitorização do ponto D1 o apoio do laser consistiu num tripé colocado sobre o maciço de ancoragem da catenária, ponto onde se verificou que o deslocamento vertical era reduzido. Para a monitorização dos pontos D2 e D3 escolheu-se como apoio do laser a estrutura da PH, uma vez que se verificou que o deslocamento vertical neste ponto era muito pequeno. O sensor PSD foi instalado numa estrutura metálica feita para o efeito, que foi colada no carril nos pontos a instrumentar. Na Figura 7 apresentam-se imagens da montagem completa do sistema de medição dos três pontos da via.

Figura 7: Pontos de apoio do sistema laser para medição do deslocamento do carril: (a) no maciço

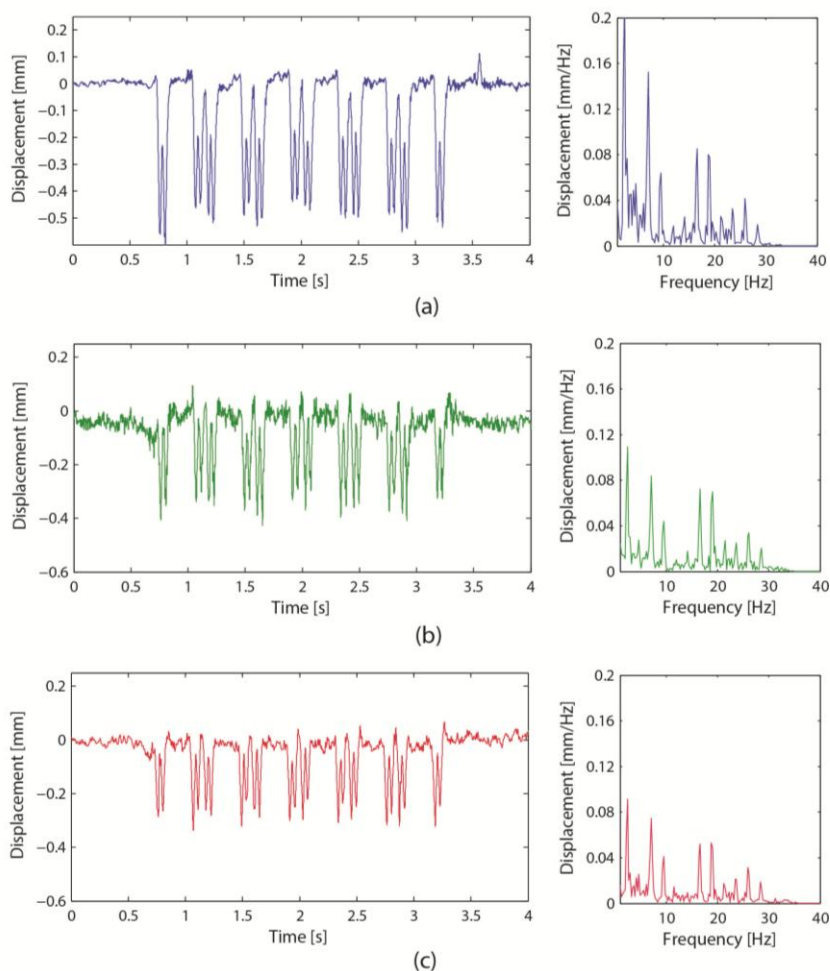


de ancoragem da catenária e (b) na estrutura de betão da PH

Fonte: Autor, 2012

O deslocamento vertical obtido nos três pontos instrumentados é apresentado na Figura 8, onde se apresenta também o conteúdo em frequência da resposta, para a passagem do comboio Alfa Pendular a 220 km/h. Em todos os registos é possível visualizar com bastante nitidez a passagem dos 24 eixos do comboio.

Figura 8: Registo temporal e conteúdo em frequência do deslocamento vertical do carril nos pontos (a) D1, (b) D2 e (c) D3 para a passagem do comboio Alfa Pendular a 220 km/h

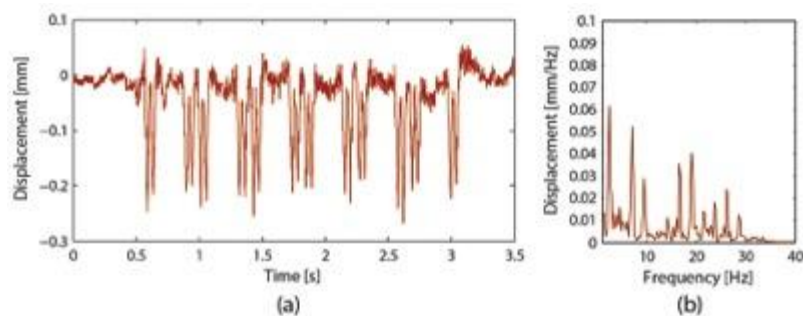


Fonte: Autor, 2012

A análise comparativa dos três registos permite verificar que existe uma tendência para a diminuição do deslocamento vertical do carril do ponto D1, localizado na zona em aterro da via, para o ponto D2, localizado na via sobre a cunha de transição, e deste para o ponto D3, localizado na via sobre a PH. O deslocamento vertical médio obtido é igual a 0,50 mm em D1, a 0,35 mm em D2 e a 0,28 mm em D3, o que traduz uma redução de cerca de 45% no deslocamento dinâmico devido a variações ao nível da fundação da via, de via em aterro para via sobre a estrutura de betão da PH. Relativamente ao conteúdo em frequências apenas se apresenta o registo para frequências baixas uma vez que o registo do deslocamento apresenta fundamentalmente contributos nesta gama de frequências que correspondem à excitação induzida pela passagem dos eixos do veículo. Verifica-se em todos os registos uma boa concordância entre o conteúdo medido nos três pontos notando-se maior magnitude no registo correspondente ao ponto D3 e menor no ponto D1, o que está perfeitamente concordante com as diferenças verificadas em termos do deslocamento.

O sistema de medição do deslocamento vertical utilizado no carril pode ser facilmente adaptado à medição do deslocamento das travessas. Apresenta-se na Figura 9 o deslocamento vertical da travessa T1 para a passagem do comboio Alfa Pendular a 220 km/h, para esta determinação o sensor PSD foi instalado na travessa e o laser colocado no mesmo ponto em que se efetuou a monitorização do ponto D3.

Figura 9: Registo temporal e conteúdo em frequência do deslocamento vertical da travessa para a passagem do comboio Alfa Pendular a 220 km/h



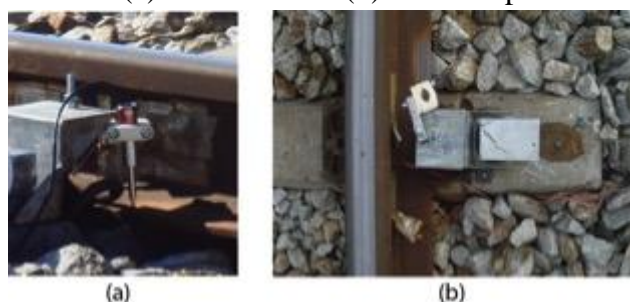
Fonte: Autor, 2012

O valor médio do deslocamento vertical da travessa T1 é de 0,22 mm. Como o deslocamento médio do carril neste ponto (ponto D1) é de 0,28 mm, pode concluir-se que o deslocamento da travessa corresponde a cerca de 80% do deslocamento total da via nesta secção.

2.2.2. MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS RELATIVO CARRIL-TRAVESSA

Com o intuito de monitorizar o deslocamento relativo entre o carril e a travessa realizou-se na via a instalação que se representa na Figura 10. O dispositivo metálico em forma de Z encontra-se fixo na travessa T1 junto ao sistema de fixação do carril e segura um LVDT cuja ponteira se encontra em contacto com o patim do carril. Por questões de montagem, devido ao sistema de fixação do carril, a medição do deslocamento foi efetuada sobre a palmilha, mas perto da extremidade da travessa. O sensor usado para este ensaio apresenta uma gama de medição de $\pm 2,5$ mm.

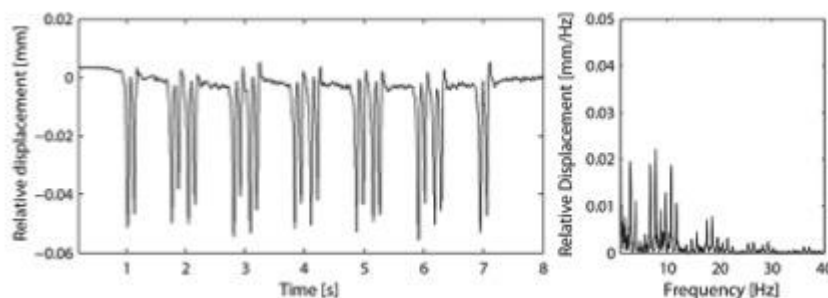
Figura 10: Posicionamento do LVDT para medição do deslocamento relativo entre a travessa e o carril: (a) vista lateral e (b) vista em planta



Fonte: Autor, 2012

Na Figura 11 apresenta-se o registo temporal do deslocamento vertical relativo entre o carril e a travessa obtido para a passagem do Alfa Pendular a 90 km/h.

Figura 11: Registo temporal do deslocamento relativo carril travessa para a passagem do comboio Alfa Pendular a 90 km/h



Fonte: Autor, 2012

Conforme se pode verificar é possível identificar com facilidade a passagem dos 24 eixos do comboio. Para este ensaio obteve-se um valor máximo de deslocamento sensivelmente igual a 0,05 mm. Estabelecendo comparação com os valores de deslocamento obtidos no carril no ponto D1 e na travessa T1, embora os registos tenham sido obtidos para velocidades diferentes, pode concluir-se que o valor obtido corresponde a cerca de 18% do deslocamento vertical da via obtido neste ponto, sendo sensivelmente igual à diferença entre o deslocamento do carril (0,28 mm) e o deslocamento da travessa T1 (0,22 mm).

Tendo por base o valor da rigidez estática das palmilhas da via e a carga aplicada pelo comboio Alfa Pendular esperava-se um valor um pouco mais elevado da deformabilidade da palmilha, o que sugere que a rigidez das palmilhas depois de instaladas na via é consideravelmente superior do que a referida pelo fabricante.

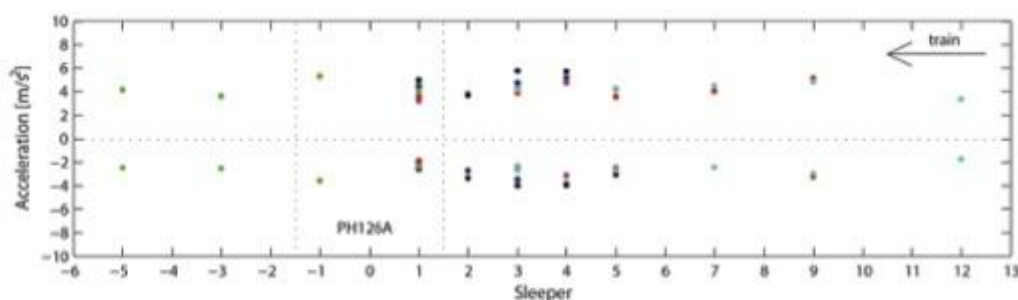
2.2.3. ACELERAÇÃO DAS TRAVESSAS

Efetou-se também o registo das acelerações em várias travessas ao longo da zona de transição para a passagem de tráfego ferroviário. Neste estudo e face ao nível de vibração envolvido adotaram-se acelerómetros piezoelétricos (da marca PCB modelo 393A03) que apresentam gama de medição de $\pm 50g$.

A análise do conteúdo em frequência dos resultados obtidos permite verificar que existe contributo da gama de frequências até 80 Hz, assim como na gama de altas frequências que estão relacionadas com outras fontes de excitação como irregularidades das rodas e do carril. De forma a excluir o contributo destas frequências foi utilizado um filtro passa baixo *Chebyshev tipo II* com frequência de corte igual a 80 Hz.

Apresentam-se na Figura 12 os valores máximos e mínimos da aceleração vertical das travessas localizadas ao longo da zona de transição, considerando apenas frequências entre 0 e 80 Hz. Encontram-se sobrepostos os valores obtidos em diferentes aquisições realizadas para a passagem do comboio Alfa Pendular na mesma travessa.

Figura 12: Valores máximos e mínimos da aceleração vertical das travessas ao longo da zona de transição (sinal filtrado a 80 Hz)



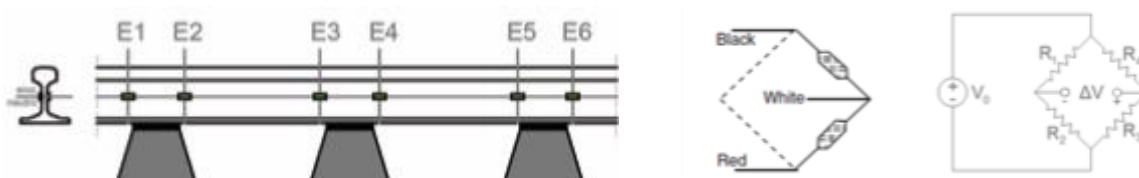
Fonte: Autor, 2012

Estes resultados permitem concluir que não existem variações significativas da aceleração vertical ao longo da zona de transição. Pode ainda concluir-se que as diferentes aquisições efetuadas na mesma travessa apresentam valores bastante coerentes.

2.2.4. CARGAS APLICADAS NA VIA

As cargas dos eixos foram determinadas através da instalação de extensómetros na alma do carril conforme esquematizado na Figura 13. A técnica aplicada nesta medição baseia-se em princípios básicos da distribuição de tensões numa peça em flexão. Neste caso verifica-se que nos pontos da superfície neutra o estado de tensão é um estado tangencial puro, pelo que as direções principais fazem ângulos de 45° com o eixo da peça.

Figura 13: Representação esquemática dos extensómetros e da sua instalação no carril



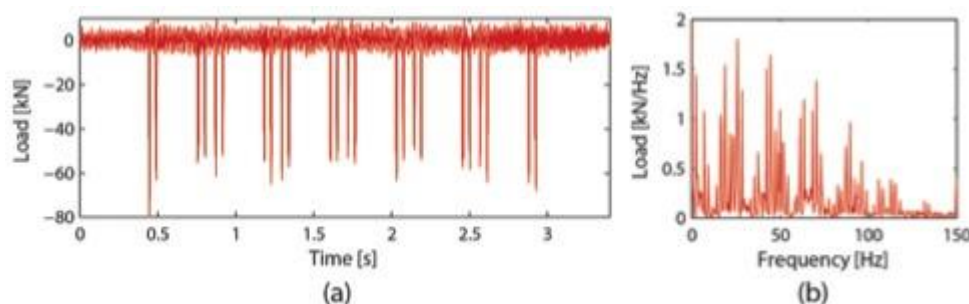
Fonte: Autor, 2012

Para esta instalação foram seleccionados extensómetros tipo roseta (Vishay, modelo LEA-06-W125F-350/3R). Nas secções analisadas foram instalados extensómetros em ambas as faces do carril e montados em ponte completa de Wheatstone de forma a eliminar o eventual efeito de excentricidade da carga aplicada pela roda no carril.

Este procedimento permite determinar as extensões nas direções principais nas quais é possível estimar o esforço transversal. Considerando a lei de Hooke que relaciona a distorção e a tensão tangencial e considerando que a tensão tangencial pode ser relacionada com o esforço transversal, é determinado este esforço em todas as secções instrumentadas. A diferença entre o esforço transversal obtido em duas secções do carril localizadas em travessas consecutivas permite estimar a carga de eixo do veículo (Alves Ribeiro, 2012).

Na Figura 14 apresenta-se o registo temporal e o conteúdo em frequência da variação da carga dinâmica entre as secções E2 e E3 para a passagem do comboio Alfa Pendular a 220 km/h. Resultados semelhantes foram obtidos entre as secções E4 e E5.

Figura 14: Cargas por eixo avaliadas para a passagem do comboio Alfa Pendular a 220 km/h



Fonte: Autor, 2012

Este procedimento pode ser aplicado para averiguar se ocorrem variações significativas da componente dinâmica da carga ao longo de determinada zona da via, bem como variações das reações nas travessas. Para tal, é necessário instrumentar uma maior extensão da via avaliando a carga em vários "tramos" e apoios do carril.

2.3. MONITORIZAÇÃO SINCRONIZADA DAS RESPOSTAS DINÂMICAS DO VEÍCULO E DA VIA

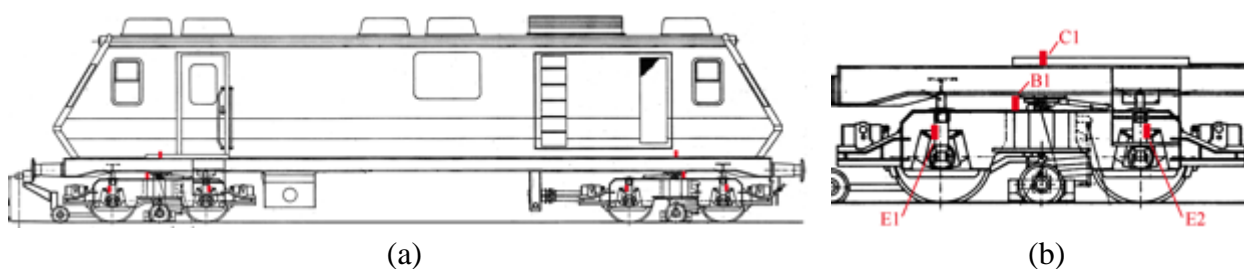
Efetua-se a monitorização sincronizada da via e do veículo de inspeção da via EM120 da REFER quando este passa pelo campo experimental.

Foram monitorizadas as acelerações nos eixos, bogies e caixa do veículo e deslocamentos do carril nos pontos D1 e D3 e acelerações das travessas T1, T3 e T5. A sincronização das aquisições foi efetuada através de referência horária fornecida por dois sistemas GPS, tendo-se instalado um na via e outro no veículo. A informação emitida pelo GPS é registada nos sistemas de aquisição da via e do veículo juntamente com as restantes grandezas monitorizadas.

A instrumentação do veículo foi efetuada com recurso a acelerómetros com gama de medição de $\pm 5g$, $\pm 50g$ e $\pm 500g$ consoante os componentes a monitorizar, a caixa do veículo, os bogies ou o

eixo do veículo, respetivamente. Na Figura 15 (a) apresenta-se um esquema da EM120 onde se assinalam a vermelho os locais onde se instalaram os acelerómetros. Na Figura 15 (b) é possível ver com maior detalhe a instrumentação da parte dianteira do veículo. Designa-se por C1 o ponto da caixa na zona dianteira do veículo, B1 o bogie dianteiro e por E1 e E2, respetivamente, o primeiro e o segundo eixos do bogie dianteiro de veículo. A instrumentação foi efetuada do lado do veículo em correspondência com o carril esquerdo da via descendente onde foi realizada a monitorização da via.

Figura 15: Representação esquemática do veículo EM120: (a) vista global com localização dos acelerómetros (marcados a vermelho) e (b) pormenor de instrumentação da zona dianteira do veículo



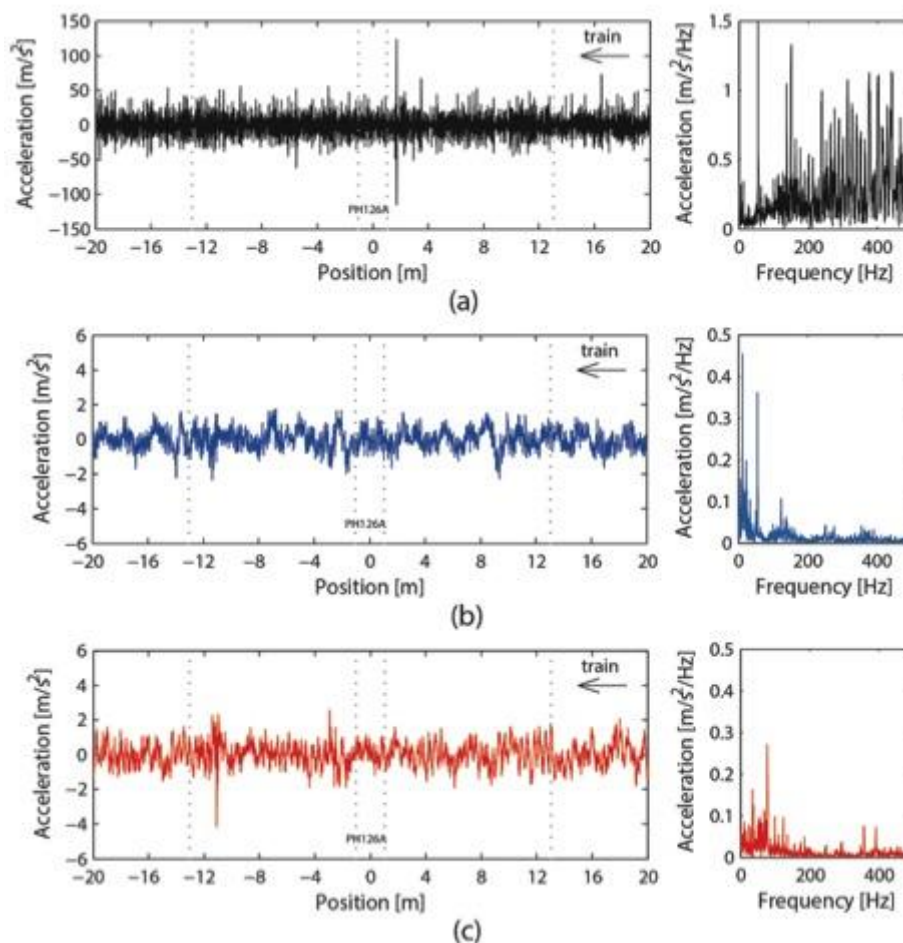
Fonte: Autor, 2012

A sincronização dos registos das acelerações do veículo com as medições na via permite identificar com clareza o instante em que o eixo do veículo passou pela zona de transição. Com a informação fornecida pelo GPS o acerto temporal entre as duas aquisições é feito de forma muito simples, sendo a identificação da posição do veículo efetuada através do registo dos deslocamentos medidos no carril. De referir ainda que a EM120 passou no local a 100 km/h.

Apresenta-se na Figura 16 a variação das acelerações dos eixos do bogie dianteiro (E1), do bogie (B1) e da caixa (C1), onde as linhas verticais representam os limites da estrutura de betão da pH e os limites das cunhas de solo-cimento. A aquisição foi efetuada a 2000 Hz.

Pela análise destes registos verifica-se que a aceleração vertical dos eixos é muito mais elevada do que a do bogie ou da caixa do veículo. O registo da aceleração dos eixos é dominado por muitos 'picos' que estão normalmente associados a irregularidades da via e das rodas, como a presença de juntas ou defeitos do carril ou de lisos nas rodas do veículo. Estes 'picos' não são identificados nos registos de aceleração do bogie e da caixa, devido à filtragem assegurada pelas suspensões do veículo.

Figura 16: Registo temporal e conteúdo em frequência da aceleração vertical (a) do eixo E1, (b) do bogie B1 e (c) da caixa C1 do veículo na passagem pela zona de transição a 100 km/h



Fonte: Autor, 2012

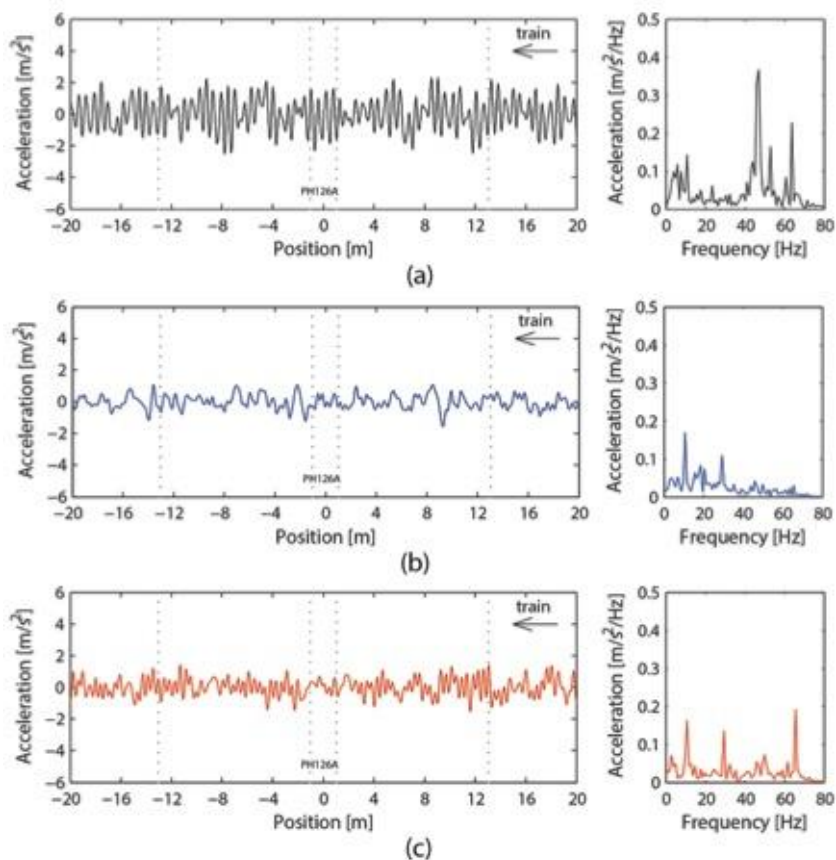
De forma a eliminar as altas frequências registadas foi aplicado aos resultados um filtro passa baixo (Chebychev tipo II) com frequência de corte de 80 Hz (Figura 17).

Conforme se pode observar não se verificam variações significativas da aceleração do veículo na passagem pela zona de transição. O registo das acelerações dos eixos é dominado por uma frequência de vibração sensivelmente igual a 45,8 Hz que corresponde à excitação paramétrica induzida pelo espaçamento entre travessas quando a EM120 circula a 100 km/h (27,5 m/s). Esta excitação não é identificada nos bogies nem na caixa devido ao efeito de filtro introduzido pelas suspensões do veículo.

Conclui-se com este estudo que a presença desta zona de transição não provoca efeitos dinâmicos no sistema veículo-via. Este cenário justifica-se uma vez que, por um lado nesta zona de transição existem cunhas de solo-cimento entre a estrutura de betão da PH e a zona da via em aterro que suavizam a variação de rigidez existente. Por outro lado, a velocidade de circulação do veículo

instrumentado foi relativamente baixa o que também pode contribuir para inibir a amplificação dos efeitos dinâmicos.

Figura 17: Registo temporal e conteúdo em frequência da aceleração vertical filtrada (a) do eixo E1, (b) do bogie B1 e (c) da caixa C1 do veículo na passagem pela zona de transição



Fonte: Autor, 2012

Esta metodologia de medição demonstrou ser bastante eficaz uma vez que permite conhecer simultaneamente a variação da aceleração do veículo e a posição onde esta ocorreu. Pretende-se no futuro fazer a sua aplicação, mas instrumentando o comboio Alfa Pendular. Neste caso como o veículo se desloca a velocidade mais elevada a amplificação dos efeitos dinâmicos em zonas de transição que apresentem problemas torna-se mais evidente.

3. CONCLUSÕES

Este artigo descreve o trabalho experimental desenvolvido numa zona de transição localizada na linha do Norte da rede ferroviária portuguesa com o objetivo de avaliar a influencia da variação de rigidez da via no comportamento dinâmico do sistema veículo-via.

As principais conclusões foram as seguintes:

- Os ensaios de receptancia permitiram identificar claramente os picos de ressonância correspondentes à vibração global da via em diferentes zonas ao longo da zona de transição; a flexibilidade dinâmica da via sobre a estrutura é cerca de 60% inferior à obtida na via sobre a zona de aterro; a flexibilidade dinâmica da via sobre as cunhas de transição é cerca de 20% inferior do que a obtida na via sobre a zona de aterro. Verifica-se ainda que a redução da deformabilidade dinâmica da via é acompanhada por um aumento da frequência de ressonância.
- O deslocamento dinâmico da via sobre a estrutura é cerca de 45% inferior ao obtido na via sobre a zona de aterro; sobre a cunha de transição o deslocamento é cerca de 30% inferior ao obtido na via sobre a zona de aterro. Verifica-se ainda que a resposta dinâmica apresenta contributos de frequências na ordem dos 0 a 30 Hz, associados à excitação induzida pela passagem dos eixos do veículo.
- A aceleração das travessas apresentou contributos na gama das altas frequências, associadas fundamentalmente a irregularidades do carril e rodas. Estes contributos foram eliminados pela aplicação de um filtro passa-baixo a 80 Hz. Os valores filtrados de aceleração das travessas não apresentaram variações significativas ao longo da zona de transição, o que permite verificar que não existem problemas como o aparecimento de travessas flutuantes.
- A monitorização sincronizada das respostas dinâmicas do veículo e da via permitiu obter registos da resposta dinâmica do veículo na passagem pela zona de transição. Tendo por base os resultados obtidos pode concluir-se que não existem efeitos dinâmicos importantes associados à passagem do veículo pela zona de transição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES RIBEIRO, C. **Transições aterro-estrutura em linhas ferroviárias de alta velocidade: análise experimental e numérica.** 2012. PhD, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

ALVES RIBEIRO, C., CALÇADA, R., & DELGADO, R. **Experimental assessment of the dynamic behaviour of the train-track system at a culvert transition zone** - Engineering Structures- 2017 - 138 - 1 - (215-228).

ALVES RIBEIRO, C., CALÇADA, R., & DELGADO, R. **Calibration and experimental validation of a dynamic model of the train-track system at a culvert transition zone** - Structure and Infrastructure Engineering- 2018 - 14 - 5 - (604-618).

BERGGREN, E. **Railway track Stiffness. Dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance.** 2009. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.

ERRI. 1999. D 230.1 / RP3, State of the art report. Embankment structure transition, *Bridge ends*.

Utrecht, Netherlands: European Rail Research Institute.

LI, D., & DAVIS, D. **Transition of Railroad Bridge Approaches** - Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE- 2005 - 131 - 11 - (1392-1398).

PINTO, N. M. P., ALVES RIBEIRO, C., MENDES, J., & CALÇADA, R. **Dynamic monitoring of railway track displacement using an optical system** - Proc IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit- 2013 - 229 - 3 - (280 - 290).

SUPERTRACK. 2002-2005. Sustained performance of railway tracks, Vol. 2013: Union Internationale des Chemins de fer (UIC).