



Materiais Elásticos como Elementos de Proteção em Vias Balastradas

PEDRO LISBOA GUEDELHA
(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Área de Especialização de Vias de Comunicação e Transportes

Orientadores:

Licenciado, Armando do Carmo Martins, Equiparado a Prof.
Adjunto do ISEL

Mestre, Paulo Pinto, Diretor e Sócio Gerente da CDM Portugal

Licenciada, Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, Prof. Adjunta do
ISEL, Especialista em Transportes e Vias de Comunicação pela
O.E.

Júri:

Presidente:

Doutor, João Alfredo Ferreira dos Santos, Prof. Coordenador do
ISEL

Vogais:

Licenciado, Francisco Manuel de Oliveira Sécio, Presidente da CT
143, ex-Diretor do Metro de Lisboa, Especialista em Transportes e
Vias de Comunicação

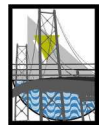


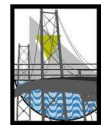
RESUMO

Nas últimas décadas o transporte ferroviário sofreu inúmeras alterações, devido às crescentes exigências impostas ao sector e à necessidade de o tornar num sistema de transporte mais competitivo, podendo assim rivalizar com os seus principais concorrentes, os transportes aéreos e rodoviários. Essas alterações, passam por, inovações à via balastrada nomeadamente, com a introdução de novos materiais, como sejam, por exemplo, os materiais elásticos, como complemento aos componentes da via tradicional, associados a métodos construtivos inovadores ou melhorados.

Assim sendo, no presente estudo pretende-se dar uma visão do estado de desenvolvimento deste tipo de soluções relacionando-as com novas formas de olhar o projeto ferroviário, sendo certo que hoje em dia é fundamental não só dar ênfase às fases de dimensionamento e execução, mas também às fases de manutenção e renovação, através de processos mais criteriosos e transparentes, nos quais a análise RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety) e LCC (Life-Cycle Cost) se assumem como cruciais para enfrentar os desafios futuros.

Palavras-chave: LCC, RAMS, Materiais elásticos, Renovação, Manutenção





ABSTRACT

In recent decades the rail transport suffered countless changes, due to the increasing demands on the sector and the need to make this transportation system more competitive, to compete with its main competitors, air and road transport. These changes are innovations in ballasted track with the introduction of new materials, such as, for example, elastic materials, to complement traditionally track components, associated with innovative and better construction methods.

Therefore, this study aims to provide an overview of the state of development of such solutions relating them to new ways of looking at the rail project, nowadays it is essential to emphasize not only the phases of design and construction, but also the maintenance and renovation phases, through more judicious and transparent processes, in which the analysis of the LCC (Life-Cycle Cost) and RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety) are likely to be crucial to meet future challenges.

Keywords: LCC, RAMS, Elastic Materials, Renewal, Maintenance





AGRADECIMENTOS

Queria começar por agradecer ao Engenheiro Armando Martins e ao Engenheiro Paulo Pinto pela forma como orientaram o meu trabalho, e por todo o apoio, disponibilidade e ajuda ao longo do desenvolvimento do mesmo.

Um especial agradecimento a todos os amigos e colegas, que no decorrer desta longa jornada contribuíram com o seu apoio e amizade.

Gostaria ainda de agradecer a todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para a realização do presente documento.

Por último, mas não menos importante, um profundo agradecimento à minha família, especialmente à minha Mãe, ao meu Pai e à minha Irmã. Obrigado pelo carinho, entusiasmo, paciência com que me acompanharam ao longo deste tempo, bem como pelas suas palavras de apoio e incentivo.





ÍNDICE

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS	v
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura	3
2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO	5
3. TIPOLOGIA DA VIA FÉRREA	9
3.1 Via Balastrada	9
3.1.1 Constituição da Via Balastrada	11
3.2 Via não Balastrada	19
3.3 Via de Apoio Misto.....	22
4. MATERIAIS ELÁSTICOS	25
4.1 Domínios de aplicação	26
4.2 Identificação de problemas.....	30
4.2.1 Deterioração dos elementos principais da via.....	31
4.2.2 Deslizamento transversal do carril	34
4.2.3 Desnívelamento e recalque da via	35
4.2.4 Variação da rigidez e conseqüente aumento dos esforços dinâmicos aplicados à via	36
4.3 Tipos de intervenção	38
4.3.1 Palmilha de carril	39
4.3.2 Palmilha de travessa	40
4.3.3 Manta de balastro	45
4.4 Benefícios dos elementos elásticos numa via.....	48
4.5 Seleção dos elementos de proteção da via	53
5. MANUTENÇÃO E RENOVAÇÃO DA VIA FÉRREA NA PERSPETIVA RAMS E LCC	61
6. CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Locomotiva Rocket, atinja velocidades na ordem dos 30 km/h [A]	5
Figura 2 - Mapa da rede ferroviária Portuguesa (agosto de 2012) [D]	6
Figura 3 - Via Balastrada [2].....	9
Figura 4 - Distribuição de cargas na estrutura ferroviária [4].....	10
Figura 5 - Partes Constituintes do carril.....	12
Figura 6 - Travessas de plástico [E].....	14
Figura 7 - Fixação rígida [F]	15
Figura 8 - Fixação elástica [G]	15
Figura 9 - Plataforma de uma via férrea [8]	17
Figura 10 - Diferentes tipologias de via não balastrada [9].....	19
Figura 11 - Camada de mistura betuminosa [12].....	22
Figura 12 - Sub-balastro granular vs. Sub-balastro betuminoso [13]	23
Figura 13 - Forças aplicadas à via férrea [16].....	26
Figura 14 - Variação da rigidez ao longo da via [18].....	28
Figura 15 - Aparelho de mudança de via [3].....	29
Figura 16 - Deterioração do carril [H]	31
Figura 17 - Desgaste ondulatório do carril [I]	32
Figura 18 - Fendilhação de travessas de betão [24].....	33
Figura 19 - Fendilhação de travessas de madeira [8].....	33
Figura 20 - Contaminação do balastro [20].....	34



Figura 21 - Deslizamento ondulatório do carril [17]	35
Figura 22 - Variação longitudinal da capacidade de suporte da plataforma na linha Madrid - Barcelona [21]	36
Figura 23 - Zonas de variação de rigidez [21].....	37
Figura 24 - Variações de rigidez vertical da via na presença de obras de drenagem transversais à via férrea [21]	38
Figura 25 - Possíveis zonas de intervenção dos materiais elásticos, adaptado [26]	39
Figura 26 - Palmilha de carril [8]	40
Figura 27 - Palmilha de travessa [8]	41
Figura 28 - Palmilha fixada através de geotêxtil como elemento de ligação [30].....	42
Figura 29 - Palmilha agrafada à travessa [30]	42
Figura 30 - Palmilha colada à travessa [30].....	42
Figura 31 - Distribuição de cargas sem palmilha [32]	43
Figura 32 - Distribuição de cargas com palmilha [32]	43
Figura 33 - Diferentes estruturas de via, adaptado [33].....	44
Figura 34 - Colocação de travessas com palmilhas resilientes [8]	44
Figura 35 - Manta de balastro [8]	45
Figura 36 - Colocação de manta de balastro [8].....	46
Figura 37 - Colocação de geotêxtil sobre a manta de balastro [8]	47
Figura 38 - Geotêxtil agrafado à manta de balastro [8].....	47
Figura 39 - Desgaste ondulatório, com e sem utilização de palmilhas de travessa [36].....	49
Figura 40 - Redução das tensões verticais com a aplicação de manta de balastro [37].....	50
Figura 41 - Redução das vibrações com a introdução de palmilha de carril e travessa [38]	51



Figura 42 - Localização dos AMV [39]	51
Figura 43 - Velocidade de vibração em AMV sem palmilha de travessa [39]	52
Figura 44 - Velocidade de vibração em AMV com palmilha de travessa [39]	52
Figura 45 - Tensão de contacto rodados/carril sem palmilha [18]	54
Figura 46 - Tensão de contacto rodados/carril com palmilha de 3000 kN/mm [18]	55
Figura 47 - Tensão de contacto rodados/carril com palmilha 50 kN/mm [18]	55



ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos e características das travessas.....	13
Quadro 2 - Classe da capacidade de carga da plataforma [7]	18
Quadro 3 - Valores de ruído produzidos pela maquinaria [22]	30
Quadro 4 - Rigidez da palmilha de travessa [29].....	41
Quadro 5 - Redução de vibrações para diferentes tipos de plataforma, com manta de balastro $C = 0,03 \text{ N/mm}^3$ [35]	46
Quadro 6 - Características da via em estudo [31].....	56
Quadro 7 - Custos iniciais para a execução de uma via férrea [31]	57
Quadro 8 - Custos de manutenção [31]	58
Quadro 9 - Critérios de utilização dos materiais elásticos [30]	59
Quadro 10 - Categorias das anomalias [41]	64





LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMV - Aparelho de Mudança de Via

BLS - Barra Longa Soldada

C - Módulo estático de assentamento

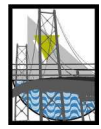
LCC - Life-Cycle Cost

RAMS - Reliability, Availability, Maintainability, Safety

UIC - Union Internationale des Chemins de Fer

VB - Via Balastrada

VNB - Via Não Balastrada





1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

O Trabalho Final de Mestrado em Engenharia Civil contempla um dos seguintes cenários:

- Dissertação de natureza científica;
- Trabalho de projeto;
- Estágio profissional com elaboração de relatório.

No âmbito do Mestrado em Engenharia Civil, da Área de Especialização de Vias de Comunicação e Transportes, optou-se pela realização de dissertação como Trabalho Final de Mestrado, pois tal permite não só consolidar conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico, ao nível dos Caminhos de Ferro, mas também adquirir novos conhecimentos em outras áreas, dada a sua especificidade, pouco abordadas no referido percurso.

Para além do interesse e do estímulo que constitui desenvolver atividade nesta área, julga-se que a realização desta dissertação possibilita também assimilar competências específicas e genéricas para a prática da Engenharia, em especial na sua componente ferroviária.

O conteúdo da Dissertação realizada tem como intuito, em primeiro lugar, compreender o que são materiais elásticos e qual a sua aplicação na ferrovia, em segundo lugar, identificar os benefícios ou inconvenientes que a utilização deste tipo de materiais trará para a via férrea, e por último, apresentar uma breve análise dos custos de execução e de manutenção dos mesmos.



1.2 Objetivos

A tendência generalizada ao longo dos últimos anos para o aumento das cargas por eixo e da velocidade de operação do material circulante, resulta numa maior tensão aplicada aos componentes e numa deterioração mais significativa e acelerada da via férrea.

Por outro lado, como forma de rentabilização dos grandes investimentos nas infraestruturas ferroviárias, existe uma forte pressão para o incremento da frequência das circulações, o aumento dos períodos de utilização e por consequência uma redução do tempo disponível para trabalhos de manutenção, fato que obriga os gestores das infraestruturas a alterarem os seus métodos de atuação.

A evolução das condições de operação, aliada à necessidade de otimização dos recursos, tem originado profundas análises comparativas entre os diversos comportamentos e custos a médio e longo prazo das vias férreas, com recurso a diversos conceitos como, por exemplo:

- RAMS (Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança);
- LCC (Life-Cycle Cost);

assumindo cada vez mais um papel imprescindível na tomada de decisão sobre o tipo de via a adotar.

A definição ideal da rigidez vertical de uma infraestrutura de via tem influência direta no seu comportamento a médio e longo prazo, podendo reduzir significativamente a deterioração da via, quer a nível da sua geometria, quer da vida útil dos seus componentes, com forte impacto na manutenção e nos custos inerentes.

Esta definição pode ser efetuada por uma escolha criteriosa da rigidez dos diversos elementos elásticos da via ou pela introdução de novos elementos, como mecanismo de proteção e redução dos esforços na via.

Adicionalmente, esta análise é importante para a minimização da deterioração da via em zonas críticas pontuais como, por exemplo:

- Aparelhos de mudança de via;
- Zonas de transição em obras de arte.



Com a elaboração desta dissertação, pretende-se analisar a viabilidade da utilização de materiais elásticos como proteção da via férrea, tanto ao nível do dimensionamento da superestrutura como dos custos que acrescentam ao valor final da mesma.

1.3 Estrutura

A presente dissertação contempla seis capítulos, realizando-se no presente capítulo o enquadramento do tema, bem como a definição dos objetivos e a respetiva estrutura do trabalho.

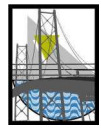
No segundo capítulo é feito um breve enquadramento histórico do transporte ferroviário, até aos dias de hoje, com principal foco na realidade Portuguesa.

No terceiro capítulo descrevem-se as várias tipologias existentes para execução de uma via férrea, com especial ênfase na caracterização da via balastrada e dos seus constituintes.

No quarto capítulo apresenta-se um dos processos de fabrico dos materiais elásticos e as suas aplicações no melhoramento da via férrea.

O quinto capítulo é dedicado à abordagem sobre os conceitos de RAMS e LCC, bem com a sua aplicação no projeto de uma infraestrutura ferroviária, apresentando-se os benefícios e contrapartidas da sua utilização.

Finalmente, no sexto capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido.





2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO

A história dos caminhos de ferro remonta ao século XV, onde sobre carris de madeira e puxados a braços ou através de tração animal, circulavam vagões usados para o transporte de minério. Mas foi em meados do século XVIII que começaram a surgir, em Inglaterra, as primeiras locomotivas a vapor (Figura 1) em consequência da Revolução Industrial que ocorrera nessa época.

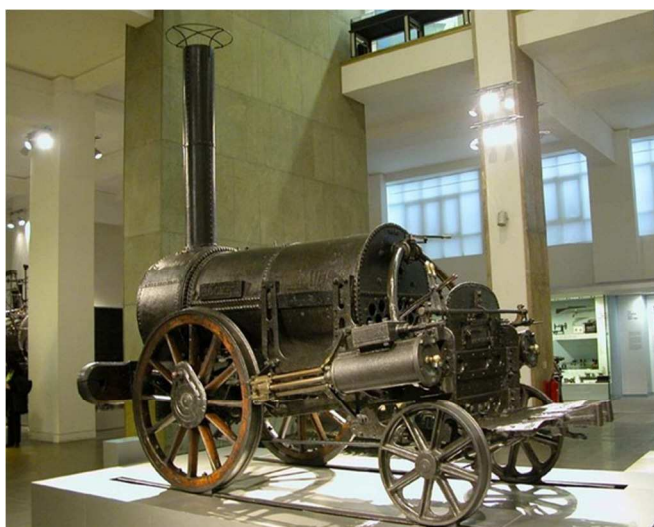


Figura 1 - Locomotiva Rocket, atingia velocidades na ordem dos 30 km/h [A]

Devido à elevada velocidade e capacidade de carga, para a época, que estas locomotivas permitiam, juntando ainda a estes dois fatores a facilidade e alta rentabilidade destas máquinas, depressa passaram a ser o transporte preferencial de mercadorias e de passageiros. As distâncias tornavam-se assim mais curtas, ajudando o desenvolvimento do comércio e acabando com o isolamento de certas regiões [B].

Em Portugal foi em meados do século XIX, que se começou a pensar no transporte ferroviário como modo de modernizar o país. Foi então fundada a Companhia das Obras Públicas que tinha como principal objetivo a construção do caminho de ferro entre Lisboa e a fronteira Espanhola.

Depressa se revelou como não sendo a solução ideal para o objetivo a que se propunha, por não existirem os recursos necessários para o desenvolvimento do mesmo.

Assim sendo, só uns anos mais tarde, e apenas com a linha entre Lisboa e o Carregado já construída, foi instituída a Companhia Real dos Caminhos de Ferro liderada por um empresário Espanhol, D. José de Salamanca, que concluiu a linha de Leste, bem como a



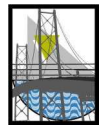
Existem ainda três ligações com a fronteira Espanhola:

- Linha de Leste (Elvas a Badajoz)
- Linha da Beira Alta (Vilar Formoso a Fuentes de Onoro)
- Linha do Minho (Valença a Tuy) [1].

Torna-se importante referir que, em tempos, a via balastrada estava igualmente associada ao Metropolitano de Lisboa, sendo no entanto as expansões da rede após 1981 efetuadas em via betonada com travessas bibloco pantufas e placas microcelulares sob as travessas correntemente designada por via STEDEF.

Permanecem ainda , em via balastrada cerca de 12 km de via dupla em galeria já que nas estações foi sempre instalada via betonada com travessões de madeira. Os troços de via balastrada são:

- entre a estação Jardim Zoológico (ex. Sete Rios) e a estação Restauradores na Linha Azul;
- entre a estação Entre Campos e a estação Marquês de Pombal II da Linha Amarela;
- entre a estação Rossio e a estação Alvalade na Linha Verde.



3. TIPOLOGIA DA VIA FÉRREA

3.1 Via Balastrada

A via balastrada (VB) é ainda nos dias de hoje a estrutura mais utilizada para a construção de uma via férrea, devido ao seu baixo custo de construção e relativa facilidade de manutenção quando equiparada com soluções de vias não balastradas.

É constituída por um sistema de camadas múltiplas (Figura 3), cada uma com funções específicas no funcionamento de toda a estrutura, camadas essas que serão objeto de uma abordagem mais pormenorizada mais à frente no presente capítulo.

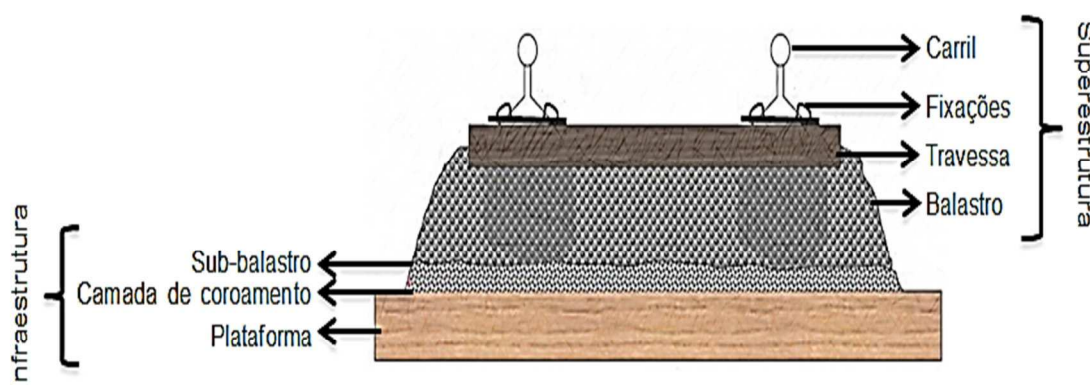


Figura 3 - Via Balastrada [2]

A via balastrada confere um comportamento estrutural elástico, devido às características particulares que o balastro apresenta. Este facto conduz à necessidade de intervenções periódicas para correção da sua geometria.

Por outro lado, o desgaste e a fragmentação, provocados essencialmente pela passagem das composições, provocam uma redução significativa do período de vida útil e diminui a resistência lateral da via, quando comparada com via não balastrada.

Outra característica muito importante que o balastro confere a este tipo de via é a capacidade de degradação das cargas provenientes das composições, como se pode observar na Figura 4 onde está representado um exemplo de como essa degradação das cargas é efetuada desde o carril até à plataforma da estrutura ferroviária [3].

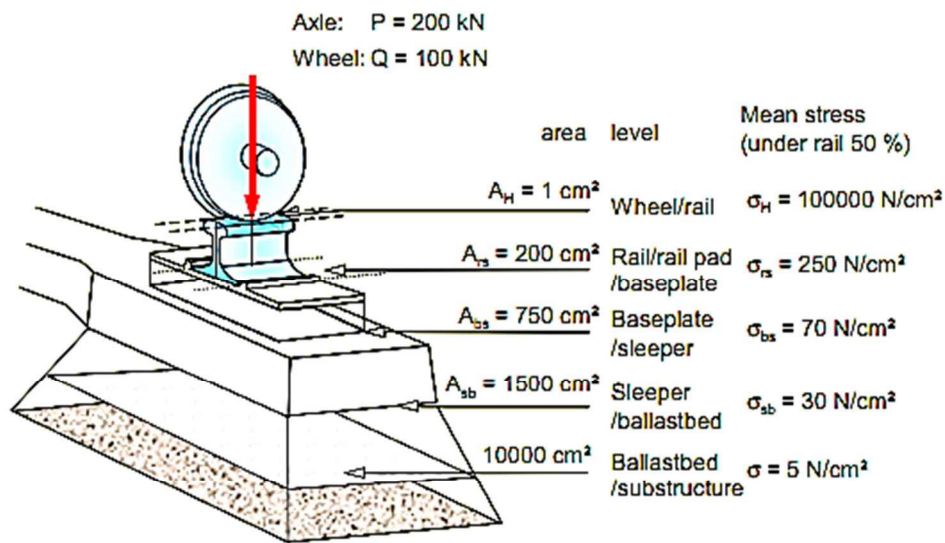
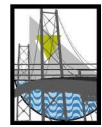


Figura 4 - Distribuição de cargas na estrutura ferroviária [4]

Assim, a via balastrada apresenta um conjunto de vantagens em relação à via em laje, tais como, [5]:

- Menores custos de execução;
- Facilidade de substituição de um elemento da estrutura da via nos processos de manutenção e conservação da via;
- Possibilidade de correção da geometria da via quando necessário ao longo da vida útil da mesma;
- Boas condições de drenagem.

Quanto às desvantagens deste tipo de via tradicional, estas são [6]:

- Necessidade periódica de intervenção para efeitos de manutenção, necessidade essa mais intensa no caso das linhas de alta velocidade ou de linhas solicitadas por veículos associados a cargas elevadas;
- Tendência do carril e travessas a perderem o apoio contínuo, ficando de certo modo suspensos em algumas zonas;



- Tempo de vida útil do balastro da ordem dos 30 anos devido ao desgaste por fricção e fragmentação dos elementos constituintes.

3.1.1 Constituição da Via Balastrada

A via férrea tem evoluído bastante ao longo dos tempos. Essa evolução deve-se ao aperfeiçoamento dos conhecimentos referentes a todos os seus constituintes e respetivas funções. A sua principal função é assegurar que o comboio circule dentro das condições mínimas de segurança e conforto.

Uma estrutura ferroviária está, normalmente, subdividida em dois grandes componentes:

- Superestrutura;
- Infraestrutura.

3.1.1.1 Superestrutura

No que diz respeito à superestrutura, esta é composta por:

- Carril;
- Travessas;
- Fixações;
- Camada de balastro.

Carril

É um dos elementos mais importantes da superestrutura, porque é o elo de ligação entre o material circulante e o resto da estrutura, guiando-o ao longo da linha férrea. Ao carril exige-se que cumpra as seguintes funções [3]:

- Realizar o guiamento das rodas;
- Resistir às tensões produzidas pelo material circulante e transmiti-las aos outros elementos estruturais;



- Servir de condutor das correntes de sinalização, bem como o retorno da corrente de tração.

Nos primórdios dos caminhos de ferro, os carris eram fabricados em ferro fundido, mas atualmente são perfis de aço laminado resistindo melhor às solicitações a que estão sujeitos como, por exemplo, uma maior velocidade, uma maior capacidade de carga da composição e uma maior intensidade de tráfego [3].

O carril é constituído, como se pode constatar na Figura 5, por três partes distintas:

- Cabeça, em que a face superior forma a mesa de rolamento;
- Alma, que faz a união entre a cabeça e a patilha;
- Patilha, base inferior que assenta na travessa e que devido à sua forma alargada aumenta a resistência à alteração da inclinação transversal do carril.

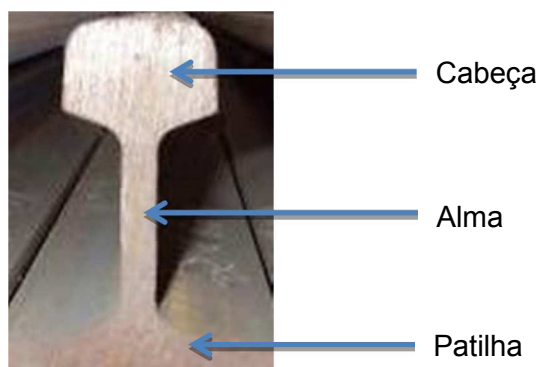


Figura 5 - Partes Constituintes do carril

Atualmente, regra geral, recorre-se a carris do tipo UIC 60 (com aproximadamente 60 kg/m) que são instalados na via e soldados entre si, formando a barra longa soldada (BLS). Deste modo, é possível atenuar uma parcela dos efeitos dinâmicos associados à existência de juntas dos carris e, conseqüentemente, reduzir a velocidade de deterioração da via [7].

Travessas

São elementos colocados transversalmente à via que fazem a ligação entre o carril e a camada de balastro. Como foi referido anteriormente, o material circulante transmite tensões ao carril, que por sua vez são dissipadas através das travessas para o balastro.



Assim sendo, as travessas deverão apresentar as seguintes funções [3], [7]:

- Manter a bitola da via;
- Garantir a estabilidade e a geometria da via;
- Transmitir os esforços do carril para o balastro.

Quanto ao material, as travessas podem ser de madeira, betão (monobloco ou bibloco) e metálicas. Estas últimas nunca foram usadas em Portugal. No Quadro 1 [3] apresenta-se um breve resumo das suas características.

Quadro 1 - Tipos e características das travessas

Travessas de madeira	Travessas de betão	Travessas metálicas
Pinho e Azobé	Betão armado	Aço laminado
Fácil fabrico e manuseamento	Elevado peso dificulta o manuseamento	Leves (cerca de 80 kg)
Bom nivelamento	Boa estabilidade da via devido ao elevado peso	Fácil colocação
Não garante uma fixação eficaz	Boa fixação	Problemas de oxidação e corrosão
Duração de serviço variável (12 a 20 anos)	Maior durabilidade	Ampliam o nível de ruído
Causa a degradação das florestas	Matéria-prima praticamente inesgotável	Não garantem o isolamento necessário para serem usadas em linhas eletrificadas

Em sintonia com as evoluções registadas em outros componentes de via, as travessas também seguem a tendência natural da evolução, com o intuito de melhorar a seu desempenho e neste caso concreto o meio ambiente.

Assim sendo, alguns estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de desenvolver travessas provenientes de materiais plásticos (Figura 6). Este tipo de tecnologia ainda se encontra numa fase inicial de estudo, havendo poucos casos práticos em que permitam concluir da existência de vantagens na sua aplicação.



Figura 6 - Travessas de plástico [E]

Fixações

Fruto do aumento das cargas transportadas e velocidades do material circulante, houve necessidade de melhorar os sistemas de fixação carril/travessa existentes tornando-os mais robustos e flexíveis.

Assim, deixaram de usar-se as fixações rígidas (Figura 7) por estas necessitarem de manutenção constante, por não garantirem o aperto permanente do carril e possibilitarem o deslocamento longitudinal deste.

Passaram a usar-se as fixações elásticas (Figura 8). Este tipo de fixações permite aumentar o ciclo de vida da via por necessitar de uma manutenção mais desfasada e por contribuir ainda para um melhoramento do conforto dos passageiros devido à diminuição dos ruídos e vibrações produzidos pelo material circulante. As referidas fixações apresentam ainda uma componente de isolamento elétrico da via.

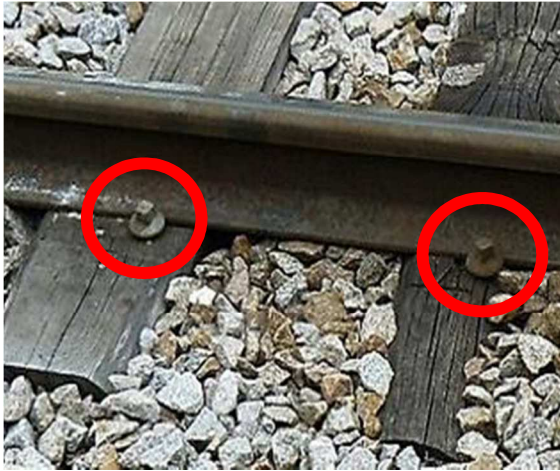
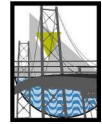


Figura 7 - Fixação rígida [F]

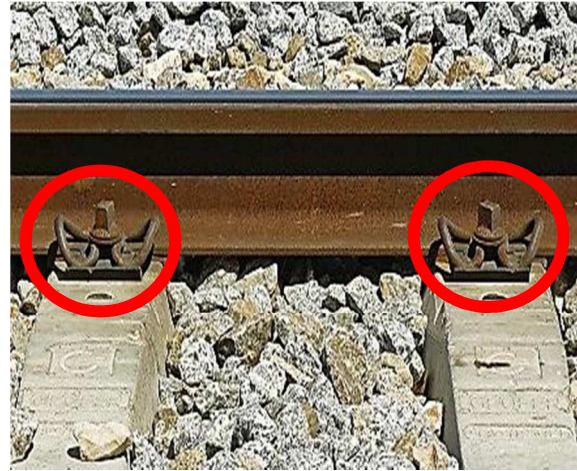


Figura 8 - Fixação elástica [G]

Camada de Balastro

A camada de balastro desempenha um papel fundamental no comportamento da via, quer no que diz respeito à estabilidade vertical, quer relativamente à estabilidade horizontal.

O balastro resiste às forças com componente vertical pela resistência direta das partículas de balastro. As forças laterais e longitudinais são equilibradas pelo atrito que se gera entre as partículas de balastro e as travessas.

Esta camada é formada por material granular resultante da britagem de rochas duras e são (ex.: granitos e dioritos). Entre outras características exigidas, destaca-se a elevada resistência ao desgaste e à fragmentação. Esta camada deverá garantir as seguintes funções [7]:

- Apoio das travessas e distribuir para a plataforma os efeitos das cargas rolantes;
- Amortecer solicitações provocados pelas circulações ferroviárias;
- Opor-se eficazmente às deslocções transversais e longitudinais da via;
- Drenar as águas pluviais;
- Permitir uma fácil manutenção geométrica da via (trabalhos de ataque e ripagem).



De modo a garantir o desempenho das funções acima descritas, há um aspeto que não pode ser descurado, a granulometria do balastro, que deverá compatibilizar a função drenante com a resistente.

Se para efeitos de drenagem, o ideal seria uma granulometria descontínua de modo a garantir um melhor escoamento das águas, por outro lado, uma granulometria contínua garante uma maior resistência às cargas provenientes do tráfego ferroviário.

Assim sendo, para se chegar a um equilíbrio relativo a estas duas funções e de acordo com a Especificação Técnica Portuguesa (IT.GEO.01), o balastro deverá apresentar uma granulometria entre os 2 a 6 cm, enquanto que a camada deverá apresentar uma espessura de 25 a 30 cm [7].

3.1.1.2 Infraestrutura

A infraestrutura é composta por:

- Camada de sub-balastro;
- Camada de coroamento;
- Plataforma.

Camada de sub-balastro

A camada de sub-balastro apresenta um papel relevante na estrutura da linha férrea, sendo esta, executada entre a camada de balastro e a de fundação devido à necessidade de proteger a plataforma, e reduzir o nível de tensão dos solos, mantendo deste modo a espessura do balastro constante. Deste modo, é possível uma utilização sistemática dos equipamentos mecânicos, em operações de conservação e reabilitação da via.

Esta camada é normalmente constituída por materiais bem graduados, que apresentem boa resistência ao desgaste, e a sua granulometria deve proporcionar as funções de filtro e de separação entre o balastro e a fundação. Desta forma contribui-se assim, para que a camada de sub-balastro seja pouco deformável e apresente baixa permeabilidade, permitindo assim, a proteção das camadas inferiores, nomeadamente o núcleo dos aterros.



Camada de coroamento

Este tipo de camada é normalmente executada quando o solo de fundação não apresenta os requisitos mínimos para a função que lhe é exigida, visto ser constituída por solos de melhor qualidade que a dos terrenos “in situ” e apresenta, geralmente, uma espessura da ordem dos 150 mm. Esta camada permite ainda uma transição suave entre a plataforma e a camada de sub-balastro, evitando assim o recurso a grandes espessuras do material do sub-balastro.

Plataforma

A plataforma é constituída pelos terrenos que servem de apoio às camadas adjacentes da estrutura ferroviária. As suas características e o comportamento dos materiais que a constituem condicionam o dimensionamento dessas mesmas camadas, de tal forma que em muitos casos é necessário proceder ao melhoramento dos solos “in situ”, ou mesmo promover a sua substituição, por estes não apresentarem as exigências mínimas de qualidade.

Durante a fase de construção, a plataforma deve dispor de uma capacidade de carga suficiente que permita o tráfego dos equipamentos necessários para a execução das camadas sobrejacentes, como mostra a Figura 9. A sua superfície deve constituir um elemento de proteção dos trabalhos de terraplenagens.

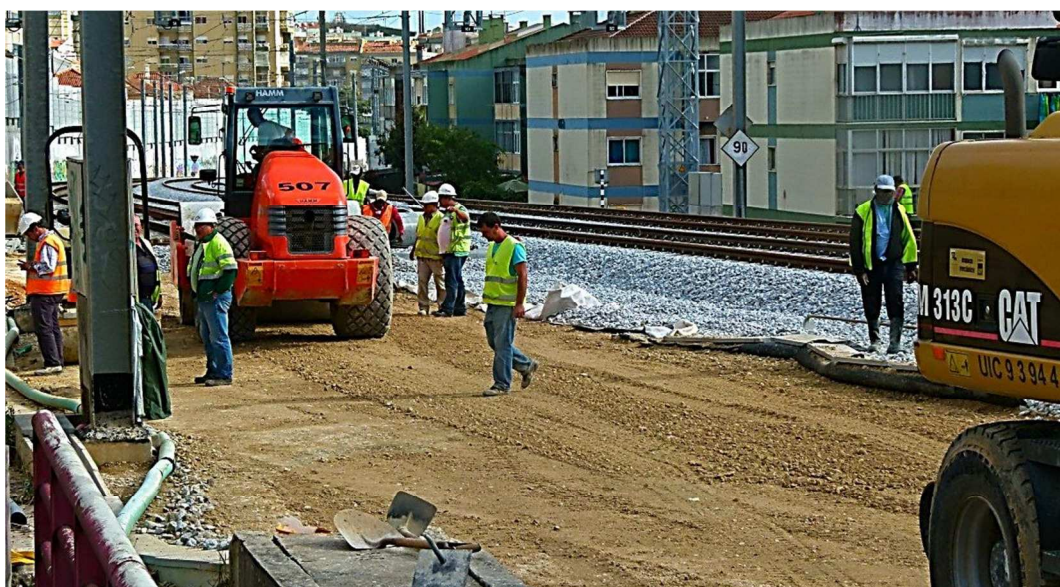


Figura 9 - Plataforma de uma via férrea [8]



No que diz respeito às suas funções, estas passam por [9]:

- Servir de apoio à superestrutura e às camadas de apoio da via e suportar as tensões impostas pelas cargas repetidas, sem atingir a rotura e sem deformações excessivas;
- Manter uma posição estável no tempo, não sendo muito afetada pelas ações ambientais, como os ciclos de molhagem e secagem associados à pluviosidade;
- Resistir ao atrito e ao desgaste causados pelo balastro e sub-balastro, fenómenos que tendem a causar a passagem de finos e conseqüentemente assentamentos;
- Constituir uma adequada superfície para colocação e compactação do sub-balastro.

As plataformas são classificadas segundo a UIC como:

- P1 - medíocre;
- P2 - média;
- P3 - boa.

Esta classificação depende do solo de fundação existente, podendo, se não apresentar as características necessárias para o tipo de plataforma desejada, ser melhorado de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 - Classe da capacidade de carga da plataforma [7]

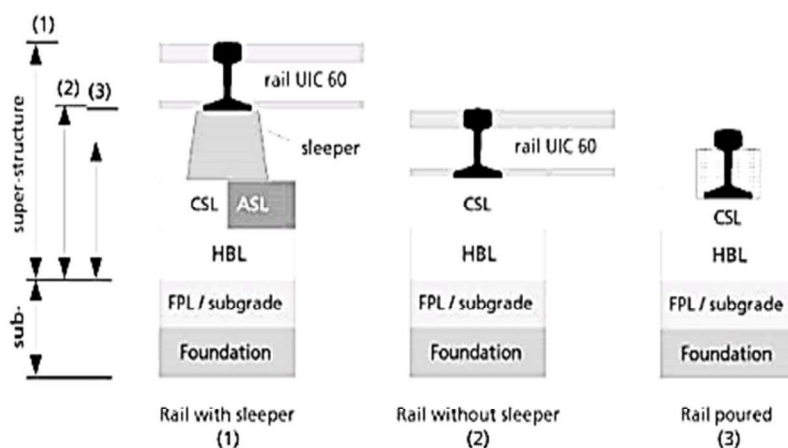
QUALIDADE DO SOLO DE FUNDAÇÃO	CLASSE DA PLATAFORMA	CAMADA DE LEITO	
		Qualidade do material	Espessura (m)
QS1	P1	QS1	-
	P2	QS2	0,5
	P2	QS3	0,35
	P3	QS3	0,5
QS2	P2	QS2	-
	P3	QS3	0,35
QS3	P3	QS3	-

3.2 Via não Balastrada

A via não balastrada (VNB) é uma forma de execução de uma via férrea, desenvolvida para responder ao rápido processo de degradação que se verifica na qualidade da via e aos cada vez maiores custos de conservação e de manutenção associados à mesma. Este tipo de via surge ainda como forma de garantir a estabilidade de circulação das composições com o conforto e a segurança necessários.

Embora o tema do presente documento seja a utilização de materiais elásticos em vias balastradas, apresentam-se em seguida algumas considerações sobre VNB.

A principal característica deste tipo de via, como o próprio nome indica, é a ausência de balastro na sua estrutura. Na Figura 10 estão representadas várias soluções de via não balastrada.



CSL - laje de betão (*Concrete Supportive Layer*); ASL - camada de mistura betuminosa (*Asphalt Supportive Layer*); HBL - agregados tratados com ligante hidráulico (*Hydraulically-Bonded Layer*); FPL - Camada de protecção contra o gelo (*Frost protection layer*); subgrade - leito de via.

Figura 10 - Diferentes tipologias de via não balastrada [9]

A VNB, tem sido usada com sucesso em todo o mundo nos mais diversos tipos de transportes ferroviário, nomeadamente em linhas de alta velocidade, zonas portuárias, metro ligeiro e metro pesado, devido à sua robustez, durabilidade e integração em meio urbano, em comparação com a via balastrada.

Devido a imposições do meio circundante à via, como é o caso de metros ligeiros de superfície, que por circularem conjuntamente com outros meios de transporte, nomeadamente o rodoviário, condicionam o recurso a vias balastradas



O que faz deste tipo de estrutura uma solução viável é a combinação quase perfeita entre as duas características acima expostas (robustez e durabilidade), resultando num “ciclo de custo de vida” equilibrado que é um fator muito importante nos dias de hoje.

Este facto deve-se e muito às necessidades mínimas de manutenção periódica que este tipo de via necessita. Teoricamente, os trabalhos de conservação de uma VNB limitam-se à substituição dos carris com desgaste excessivo, das peças de fixação deterioradas por fadiga e dos elementos de apoio resiliente envelhecidos, sempre e quando o desempenho destes elementos afeta a qualidade da circulação [7].

Em construções novas ou mesmo em renovações de via onde existam dificuldades físicas de projeto como, por exemplo, um número considerável de obras de arte (pontes, viadutos ou túneis) este tipo de via é especialmente interessante do ponto de vista da construção e conservação das zonas de transição. Além disso, permite ainda aumentar a largura da entre via em zonas com limitações de espaço, por possibilitar uma secção transversal reduzida, ou ainda diminuir a espessura da estrutura quando existem limitações na profundidade de construção [6].

Este tipo de estrutura, em comparação com a via balastrada tradicional, apresenta um conjunto de vantagens, destacando-se as seguintes, [5], [6]:

- Diminuição dos trabalhos de manutenção durante a vida útil da via, que resultará numa elevada disponibilidade da mesma, reduzindo em 20 a 30 % os custos de manutenção comparativamente com a via balastrada;
- Aumento significativo do tempo de vida útil da via, sendo esta normalmente dimensionada para 60 anos num solo de suporte com assentamentos pouco significativos;
- Solução para o problema da projeção do balastro em linhas de alta velocidade devido à passagem dos comboios;
- Uma maior estabilidade da via, aliada a um maior controlo de rigidez, que evitará mais eficazmente o aparecimento de problemas, como o desgaste ondulatório do carril ou mesmo a alteração da posição da via em vias com sobrelevações elevadas e com utilização mista de comboios de mercadorias e passageiros;



- Devido ao seu reduzido peso e altura, este tipo de solução é a mais apropriada para pontes e túneis;
- Possibilidade de criar cruzamentos de nível de modo a serem proporcionadas condições adequadas ao atravessamento rodoviário.

Apesar de todas estas potencialidades a favor da via não balastrada, esta não deixa de exibir alguns pontos adversos enquanto solução alternativa à via balastrada. Referem-se, algumas desvantagens da via não balastrada, [5], [6]:

- Elevados custos construtivos;
- Alterações na via são possíveis mas implicam um elevado número de operações, as quais muito complexas e de elevados custos;
- Aplicação deste tipo de vias no solo requer uma preparação extra e mais cuidada no que diz respeito às fundações de modo a evitar assentamentos que possam danificar a estrutura da via;
- Maiores níveis de ruído (quando comparada com a via balastrada).

Embora os custos iniciais de construção da via não balastrada possam ser elevados, esses custos podem ser compensados ao longo da sua vida útil, através da redução da manutenção, gerando assim uma solução mais económica quando se avalia uma dimensão temporal mais alargada.

Mas ainda assim, as vias sem balastro presentemente só são economicamente viáveis quando os seus custos de construção não excedem em mais de 30 a 40% os custos de uma via balastrada. No entanto, esta discussão tem necessariamente que ser feita com base em modelos de avaliação de custos globais, [11].

Assim sendo, após análise dos prós e contras relativos à via não balastrada, cabe ao projetista conjuntamente com o dono de obra, decidir perante as inúmeras soluções existentes para este tipo de via a que mais se adequa ao projeto pretendido.

3.3 Via de Apoio Misto

Em alternativa às soluções apresentadas nos capítulos anteriores, existe uma solução intermédia, designada via de apoio misto. Esta solução é caracterizada pela colocação de uma camada de mistura betuminosa sob o balastro (Figura 11) em substituição do sub-balastro tradicional de material granular. Existem outras soluções deste tipo de via, em que a mistura betuminosa é acrescentada ao próprio sub-balastro, ou soluções em que o próprio balastro é envolvido com o betume.



Figura 11 - Camada de mistura betuminosa [12]

A principal vantagem na utilização deste tipo de via traduz-se em conseguir conjugar algumas das principais características da via balastrada (fácil alinhamento, adequada rigidez, fixações ordinárias e utilização em trabalhos de manutenção de equipamento convencional [7]) com as características das misturas betuminosas.

Estas características permitem proteger o balastro contra a contaminação proveniente das águas de drenagem e permitem ainda, para a mesma tensão vertical, reduzir a espessura do mesmo numa quantidade considerável conforme se pode observar na Figura 12.

Por sua vez, o balastro protege a mistura das variações das temperaturas e ajuda a manter o módulo de deformabilidade praticamente constante.

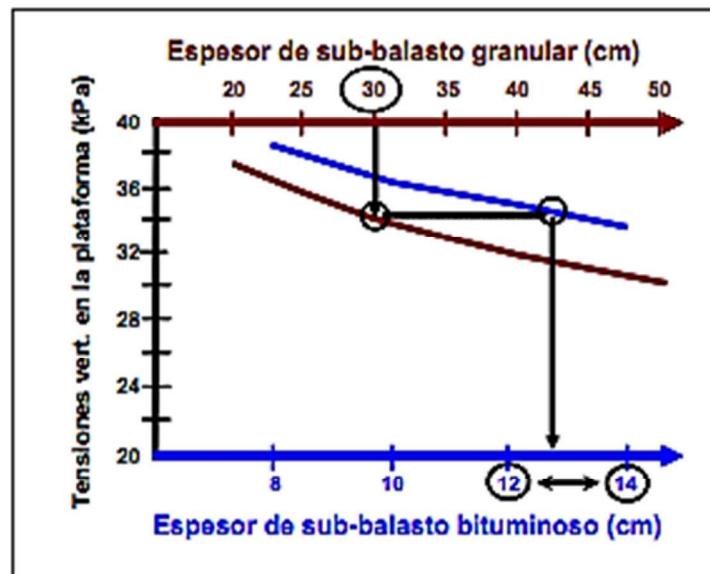
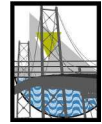
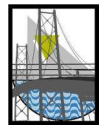


Figura 12 - Sub-balastro granular vs. Sub-balastro bituminoso [13]

Por outro lado, para além das vantagens já mencionadas, a via de apoio misto apresenta alguns fatores que prejudicam a sua utilização. São eles os seguintes:

- Maior custo de execução;
- Maior complexidade nos trabalhos de manutenção e de renovação da via;
- Por estar coberta pelo balastro, torna-se difícil detetar anomalias na camada betuminosa;
- Um transporte descuidado poderá provocar variações de temperaturas prejudiciais à mistura.





4. MATERIAIS ELÁSTICOS

Com as profundas transformações que o setor ferroviário tem vindo a sofrer ao longo dos anos, em consequência do aparecimento das linhas de alta velocidade, tanto as vias como os veículos sofreram alterações para puderem acompanhar essa evolução.

O aumento das cargas por eixo e da velocidade de operação do material ferroviário circulante, conduzem a uma maior tensão aplicada aos componentes e, por conseguinte, uma deterioração mais significativa nos elementos da estrutura da via férrea.

Como forma de maximizar a disponibilidade da via e minimizar essa deterioração, foi necessário encontrar processos mais conscientes e transparentes, nos quais a introdução de materiais elásticos resilientes e de rigidez variável desempenham um papel crucial para enfrentar estes novos desafios, existindo disponíveis no mercado diversas soluções baseadas em diferentes tipos de matérias base com características variadas, dependendo da utilidade futura do mesmo.

Os sistemas elásticos, já utilizados anteriormente com outros objetivos, assumem assim um papel importante como elementos de proteção da via, porque devido às suas características físicas e mecânicas são imprescindíveis à tecnologia moderna.

Destacam-se nessas características a capacidade elástica e ainda a capacidade de que este tipo de material tem de retomar a sua forma inicial após estar exposto a forças de compressão ou tração [14].

Esses mesmos elementos elásticos, têm vindo a ser utilizados exponencialmente ao longo dos anos, tendo essa utilização começado ao nível do carril. A introdução de elementos elásticos suplementares a outros níveis da superestrutura, como ao nível da travessa ou do balastro, surgiram pela necessidade, entre outras, de [15]:

- Permitir o amortecimento das tensões a outros níveis da estrutura;
- Diminuir o desgaste dos componentes da superestrutura, prolongando o ciclo de vida dos mesmos;
- Reduzir as operações de manutenção da via e os custos inerentes;
- Condicionar as vibrações / ruído estrutural gerados pela circulação ferroviária.

4.1 Domínios de aplicação

No dimensionamento estrutural de uma via férrea, no que diz respeito à superestrutura e infraestrutura, é imprescindível ter em conta os diferentes tipos de ações, provocadas maioritariamente pelas solicitações estáticas e dinâmicas do material circulante e pelas variações da temperatura, as quais conduzem à dilatação e contração dos carris.

Esses conjuntos de ações traduzem-se por forças verticais, laterais e longitudinais (Figura 13), que devido ao seu carácter cíclico provocam desgaste nos diferentes componentes que constituem a ferrovia [7]. Existem vários fatores que influenciam as forças referidas, desde logo, se estamos na presença de uma via de alta velocidade ou de uma via para o transporte de mercadorias.

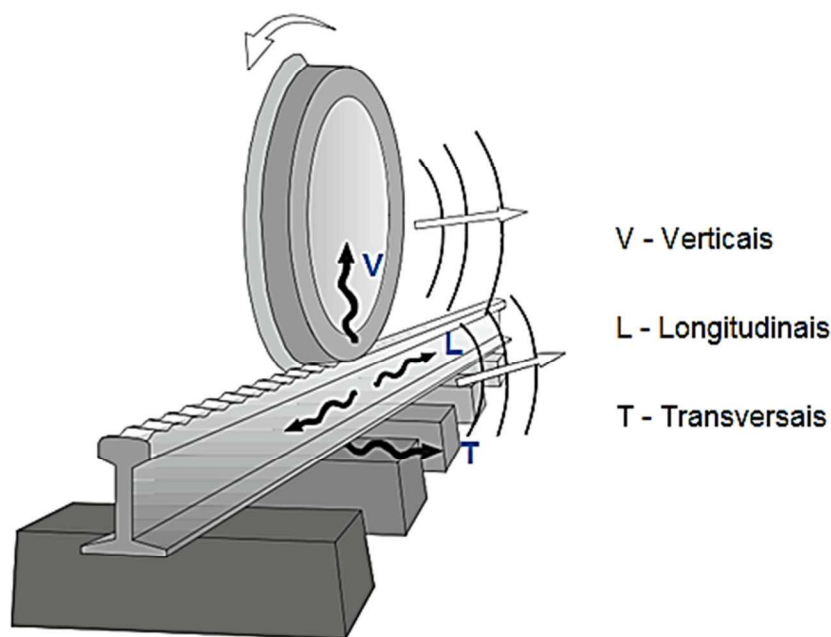


Figura 13 - Forças aplicadas à via férrea [16]

Forças Verticais

Atuam perpendicularmente à via, são provenientes essencialmente do peso do material circulante, e transmitidas para a estrutura através do contato roda-carril, enquanto carga estática. Porém, estas cargas verticais sofrem variações que fazem delas, ações com características dinâmicas, resultantes dos mais diferentes fatores (desigual repartição do peso de um eixo, defeitos nos rodados, etc.) [17].



Forças Longitudinais

Estas forças devem-se essencialmente às variações de temperatura e de fenação, mas podem também ter origem no choque dos rodados com os topos dos carris, em zonas com juntas e em deformações elásticas do carril, que resultam da ocorrência de depressões e levantamentos à passagem da roda do comboio, que geram uma onda no carril [4], [7].

Forças Transversais

São provocadas, essencialmente, pela força centrífuga quando o veículo circula em curva e pelo movimento de lacete que corresponde a oscilações laterais do comboio quando circula em reta.

No que diz respeito às forças atuantes na via, as linhas de alta velocidade requerem um tratamento mais cuidado em relação às restantes, desde logo pelas velocidades a praticar o que requer uma geometria mais exigente.

Este tipo de via deve apresentar um traçado simples, o mais retilíneo possível e com raios nas secções curvas de elevada dimensão, para permitir que o material circulante consiga praticar as velocidades para que foi dimensionado.

Este tipo de necessidade, raios elevados e inclinações reduzidas traduzem-se numa maior dificuldade na aderência à orografia e por conseguinte conduzem à necessidade de obras de arte (pontes, viadutos e túneis) o que leva ao aparecimento de um elevado número de zonas de transição.

Devido às várias rigidezes dos solos de fundação apresentadas ao longo da via, como se pode ver através da Figura 14 referente a uma medição feita num troço de alta velocidade, ou mesmo em variações de VB para VNB muito comuns neste tipo de via.

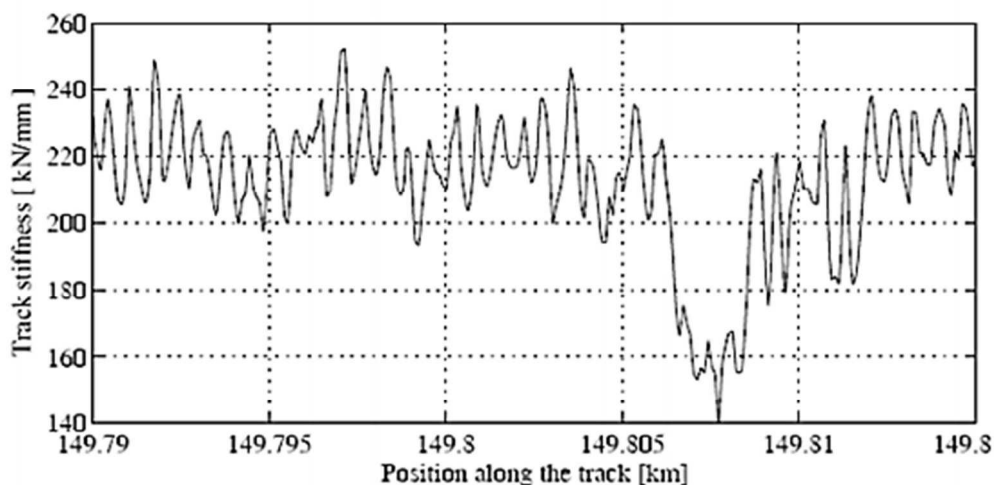


Figura 14 - Variação da rigidez ao longo da via [18]

Os problemas que tendem a ocorrer nas zonas de transição assumem um maior impacto quando são praticadas altas velocidades, uma vez que as forças transmitidas pelos comboios à via são maiores e agravadas pelos efeitos dinâmicos inerentes a essas velocidades [19].

Mas não é só nas linhas de alta velocidade que se deve ter cuidados para proteção da via. Nas linhas convencionais, essas preocupações também devem estar presentes, desde logo pela presença do transporte de mercadorias.

Este tipo de transporte, devido aos volumes de carga por eixo normalmente transportados e à ausência de suspensão secundária, por ser um dos componentes mais dispendiosos do material circulante, e de as próprias mercadorias, de um modo geral, não necessitarem de conforto [20], conduzem a um aumento significativo das forças transmitidas à via férrea, levando a uma deterioração mais rápida de todos os componentes desta, aumentando, deste modo, a periodicidade dos ciclos de manutenção da via, levando a um acréscimo dos custos de operação inerentes à via ferroviária [21].

Mas, não são só os vários tipos de composições que interferem na degradação da via. A passagem destes pelos AMV são uma das maiores causadoras da produção de vibrações e conseqüente ruído, conduzindo à deterioração do sistema ferroviário.

Os AMV são executados para permite a mudança do material circulante de uma via para outra, implicando a movimentação das lanças, levando ao aparecimento de descontinuidades (Figura 15) na superfície de rolamento. Com a passagem das



composições por essas descontinuidades (em particular nas cróssimas), origina um maior número de impactos e por conseguinte são transferidas para a estrutura tensões com maior intensidade, conduzindo a uma maior degradação da mesma.

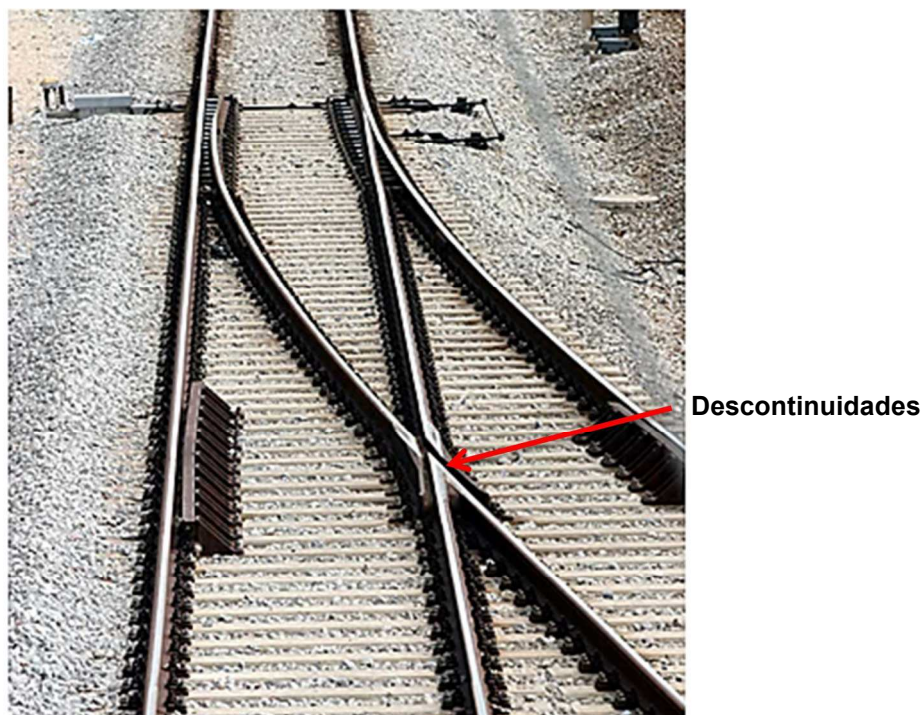


Figura 15 - Aparelho de mudança de via [3]

Intrínsecos a todos os sistemas ferroviários, estão o ruído e as vibrações produzidos, que são dependentes, entre outras coisas, da velocidade, do estado de manutenção da via e do material circulante.

Existem no sistema ferroviária muitas fontes possíveis de produção de ruído e vibrações, sintetizando-se alguns de seguida [16]:

- Ruído de rolamento;
- Ruído em pontes, em que as pontes metálicas são as mais ruidosas apresentando valores entre 10 a 20 dB a mais que, por exemplo uma via balastrada;
- Ruído aerodinâmico;
- Ruído nos segmentos curvos do traçado;



- Vibração e ruído transmitidos pelos componentes da via para o solo.

Outro fator importante na produção de ruído, são as operações de manutenção de via, porque para a execução desses trabalhos é necessário o uso de maquinaria pesada (atacadeiras, regularizador de via, etc.,...) que produzem ruídos significativos, como se pode verificar através do seguinte quadro.

Quadro 3 - Valores de ruído produzidos pela maquinaria [22]

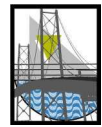
Equipamentos	Valores de Ruído (dB)
Atacadeira	83
Regularizador de Via	82
Estabilizador de Via	83
Atacadeira Manual	76
Pá-carregadora	80

4.2 Identificação de problemas

Para uma ótima exploração de uma linha férrea, existem parâmetros que têm de ser considerados [7]:

- Gestão de transportes, que diz respeito à gestão de tráfego propriamente dita;
- Qualidade da via, que inclui os parâmetros de conforto e segurança, aliados à qualidade resultante das características dos materiais usados no dimensionamento da mesma.

Ao longo do tempo estes parâmetros refletem uma degradação natural dos constituintes da via. Para que essa deterioração aconteça de uma forma controlada e sem causar danos, principalmente, ao utilizador, têm de ser executadas medidas de manutenção e renovação



Antes de se pensar que solução será a mais adequada para o problema em questão, é necessário fazer o reconhecimento do local para se detetar a origem do problema em si. Dado os custos de execução deste tipo de operações serem elevados, é necessário que a sua execução seja pensada e ponderada tornando-se assim, imprescindível realizar um diagnóstico correto e coerente, identificando os problemas. Referem-se em seguida alguns dos problemas usualmente existentes numa via férrea.

4.2.1 Deterioração dos elementos principais da via

Carril

A interação roda-carril é uma particularidade do caminho de ferro. Contudo, a passagem do material circulante origina o desgaste da superfície de contato através da descolagem de pequenas partículas de poeira metálica, antes do seu estado final de desgaste por fratura devido à fadiga dos metais (Figura 16).

Assim, o desgaste e a fadiga apresentam-se como uns principais agentes de deterioração do carril.

No caso do desgaste, este verifica-se com maior intensidade nos segmentos curvos de raio diminuto do traçado, sendo normalmente usados lubrificadores de via para minimizar este efeito.

Quanto à fadiga, esta é provocada pelo contato dos rolamentos do material circulante com o carril, provocando no carril o efeito de rebarbas, podendo ser minimizado através da esmerilagem de carril.



Figura 16 - Deterioração do carril [H]



Outro processo de deterioração do carril deriva da acumulação de deformações resultantes dos desgastes provocados pela passagem regular dos comboios, conduzindo a uma degradação longitudinal progressiva. Assim, quando na mesa de rolamento se detectam deformações afastadas regularmente, estamos na presença de desgaste ondulatório (Figura 17).

O desgaste ondulatório ao deformar o perfil do carril, provocará o aparecimento de pontos de pressão unitária elevada, onde se aparecerão ao nível do plano de rolamento certos tipos de defeitos designadamente [22]:

- Aplanamento da cabeça do carril;
- Rebarbas;
- Escamação;
- Esmagamentos;
- Fissuras transversais.

As deformações, consequência do desgaste ondulatório, vão amplificar todas as formas de solicitações à estrutura do carril, particularmente nos locais em curva ou onde se verificam maiores esforços de aceleração e travagem.



Figura 17 - Desgaste ondulatório do carril [1]



Travessas

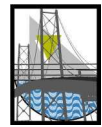
Relativamente às travessas, independentemente do tipo de material que as compõe (madeira, betão ou metal) com a passagem sucessiva das composições originam-se fortes impactos na estrutura da via. Esses impactos, dependendo da capacidade, ou falta dela em muitos casos, de amortecimento dos elementos da superestrutura, conduzem ao aparecimento de anomalias, designadamente fendas, como se pode observar na Figura 18 e na Figura 19, comprometendo as funções para as quais foram dimensionadas.



Figura 18 - Fendilhação de travessas de betão [24]



Figura 19 - Fendilhação de travessas de madeira [8]



Balastro

Em relação à camada de balastro, as suas características vão-se alterando ao longo do tempo, como consequência de certos fatores, designadamente:

- Do esmagamento causado por ações mecânicas durante as obras de manutenção e renovação da via, e pela circulação dos comboios;
- Do desgaste e fragmentação provocados pelas ações físicas e químicas associadas ao meio ambiente;
- Da migração de partículas finas, quer das que se depositam na via, quer das que ascendem da plataforma de fundação.

Estes fenómenos podem conduzir à contaminação do balastro (Figura 20) com material fino, o que leva à sua colmatção, à perda das suas características, nomeadamente de resiliência e de permeabilidade e, conseqüentemente, à impossibilidade de esta camada desempenhar as funções para que é dimensionada [7].



Figura 20 - Contaminação do balastro [20]

4.2.2 Deslizamento transversal do carril

Este tipo de deterioração é consequência das pancadas provocadas pelo contato dos rodados com o carril, originando vibrações, que induzidas à estrutura e conjugadas com a instabilidade e baixa resistência lateral, devido a vários fatores (isolados ou conjugados)



que a via pode apresentar (má qualidade dos solos de fundação, má compactação desses mesmos solos, amplitudes térmicas, etc.), provocam um deslocamento transversal do carril em relação à via (Figura 21).

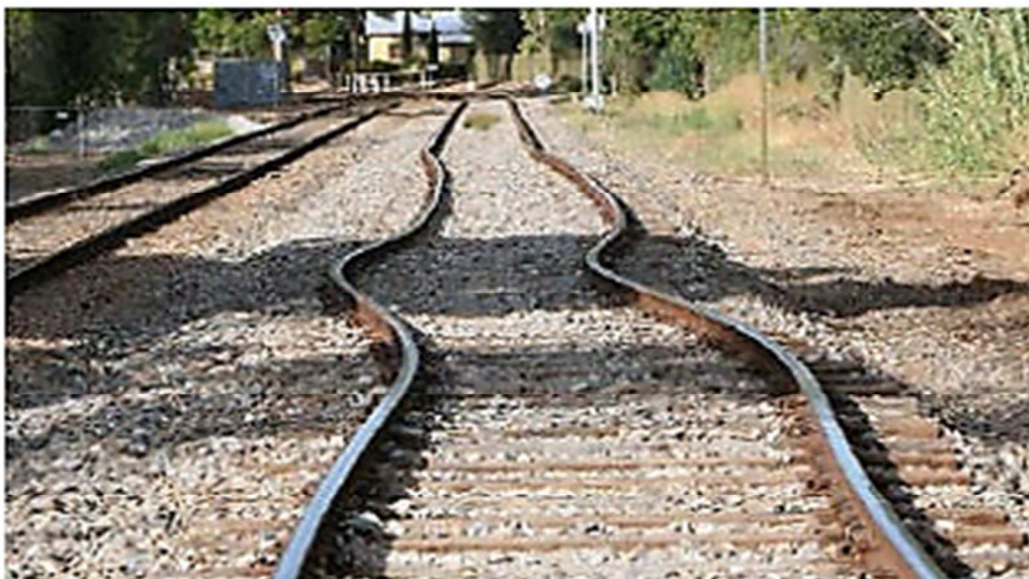


Figura 21 - Deslizamento ondulatório do carril [17]

4.2.3 Desnívelamento e recalque da via

Devido à má compactação dos solos de fundação ou somente à passagem do material circulante, a plataforma e o balastro poderão sofrer assentamentos verticais significativos provocando o desnívelamento da via férrea.

Este fenómeno causa inúmeras perturbações ao nível da capacidade de rolamento da via podendo até conduzir ao descarrilamento.

É normalmente mais preocupante ao nível dos traçado em curva da via férrea, dado ser unicamente nestes elementos que a cabeça do carril não se encontra à mesma cota em ambas as filas (esquerda e direita), para permitir que o veículo consiga efetuar a curva à velocidade prevista. Esta patologia é muitas vezes corrigida através da adição de balastro.



4.2.4 Variação da rigidez e consequente aumento dos esforços dinâmicos aplicados à via

As variações de rigidez verificadas ao longo de uma linha férrea ocorrem devido aos vários tipos de solos em que se assenta a superestrutura. As constantes alterações de geologia do solo (argilas, rocha, etc.), espessuras, tipo de materiais, irão inevitavelmente conduzir a diferentes valores no que à capacidade de suporte vertical diz respeito.

Tal leva em alguns casos a uma acentuada irregularidade de terreno, onde o módulo de elasticidade chega facilmente a variações de 50% em distâncias inferiores a 100 metros, como se pode verificar através da Figura 22, referente a ensaios realizados na linha de alta velocidade Madrid - Barcelona [21].

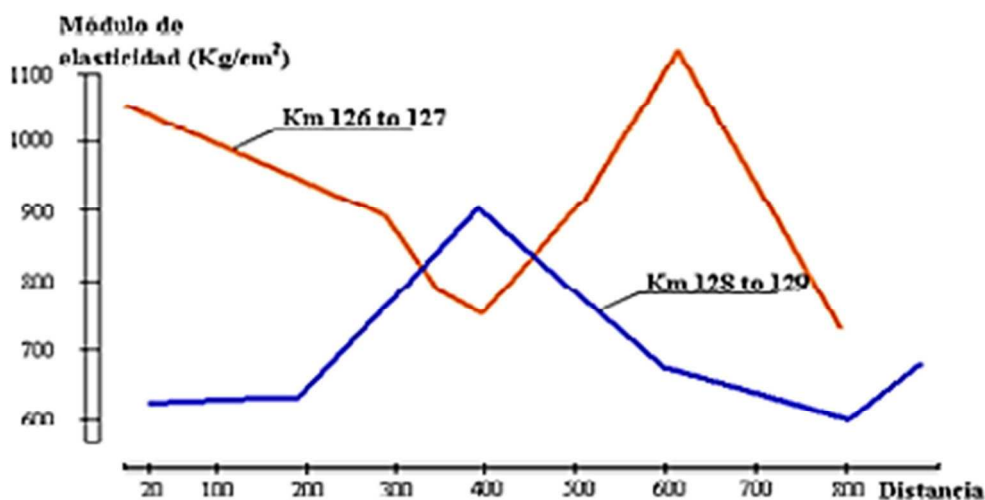


Figura 22 - Variação longitudinal da capacidade de suporte da plataforma na linha Madrid - Barcelona [21]

Por outro lado, e conforme já referido, com as velocidades que hoje se praticam nas linhas férreas, a adaptação dos requisitos do traçado, exigidos pelas mesmas, aos condicionantes do terreno, provocam um aumento significativo do número de obras de arte e, conseqüentemente, zonas de transição (Figura 23).

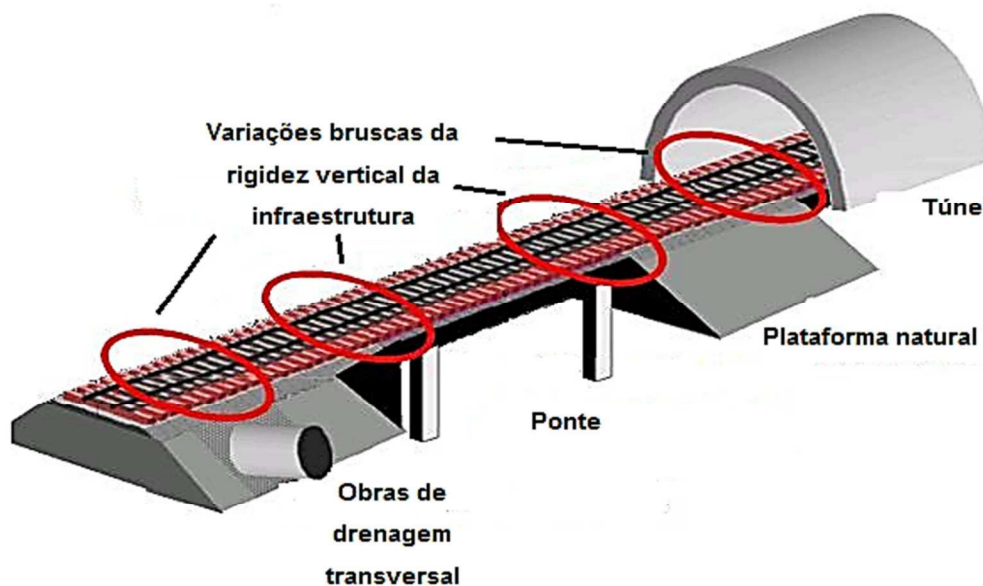


Figura 23 - Zonas de variação de rigidez [21]

As zonas de transição, tais como áreas contíguas a uma ponte, por apresentarem uma grande alteração de rigidez numa curta distância, podem ostentar problemas consideráveis quando submetidas a cargas dinâmicas, as quais podem gerar impactos que contribuem para uma degradação acelerada da via e, conseqüentemente, maiores ações de manutenção e menor espaço de tempo entre as mesmas.

Uma ponte constituída por um tabuleiro de betão sobre pilares de elevada rigidez, confere à via um módulo demasiadamente elevado quando comparado com as zonas em aterro da via adjacentes à ponte.

Uma mudança abrupta da rigidez da via não causa nem contribui só por si para a sua própria degradação mas, as forças dinâmicas elevadas, quando associadas a um pequeno desnível entre as superfícies, podem induzir forças de impacto elevadas [25].

Uma outra situação muito frequente na via férrea, que condiciona a sua capacidade de resistir às tensões, são as obras de drenagem transversal situadas abaixo da via férrea, especialmente quando estas se encontram a profundidades pouco reduzidas.

As obras de drenagem com dimensão significativas, podem contribuir para uma variação de rigidez vertical da via na ordem dos 40% para fundações flexíveis e de 90% (Figura 24) para fundações rígidas [21].

Essas variações sofrem ainda um acréscimo quanto mais próximas da base da travessa se encontrarem.

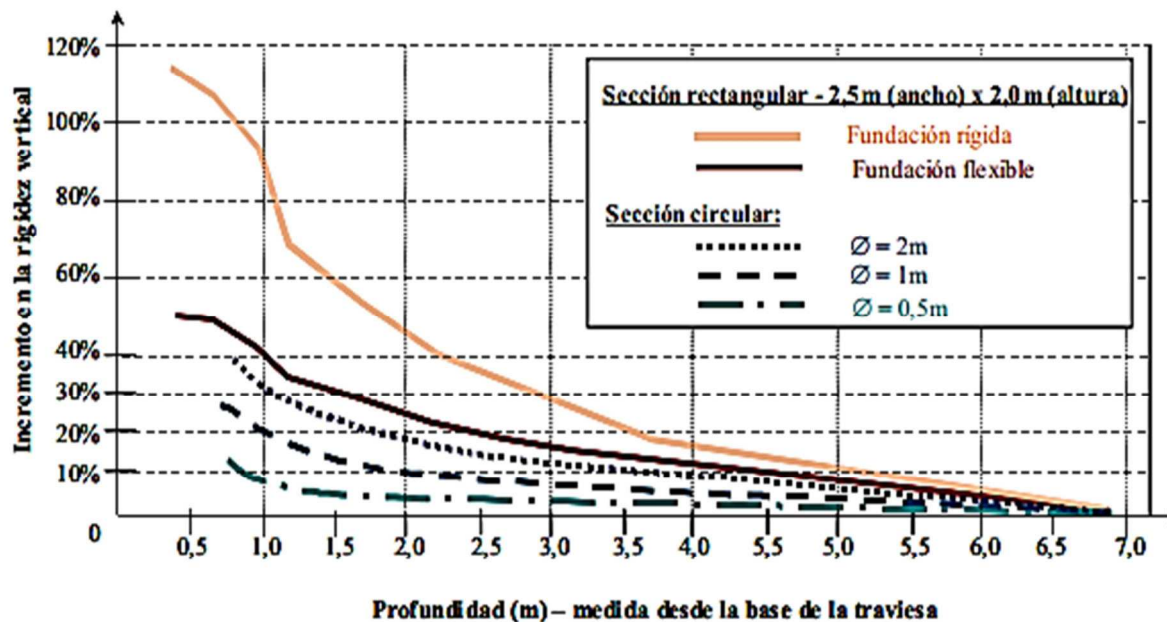


Figura 24 - Variações de rigidez vertical da via na presença de obras de drenagem transversais à via férrea [21]

Assim, é importante referir que as obras de drenagem são um fator importante a ter em conta no dimensionamento da via férrea, desde logo, devido aos diâmetros cada vez maiores das mesmas, resultante de questões de projeto, ou para facilidades de manutenção, ou ainda devido às características especiais que alguns projetos requerem, designadamente em termos de alta velocidade.

4.3 Tipos de intervenção

Ao transferir a carga do carril para o resto da estrutura, ocorre uma diminuição gradual da intensidade das tensões visto que a carga vai sendo absorvida à medida que vai descendo na estrutura até chegar à plataforma da via.

Para além da dimensão da área de contato, a rigidez de cada um dos elementos que compõe a estrutura da via desempenha um papel essencial na absorção das tensões.

De modo a ser possível aumentar essa absorção nos diferentes níveis da estrutura, existem disponíveis vários tipos de soluções que quando aplicados em certas zonas estratégicas, individualmente ou conjugados entre si, possibilitam, entre outras coisas, um aumento substancial dessa absorção.

Essa intervenção, como podemos ver através da Figura 25, pode ser efetuada em três níveis distintos. São eles:

- Palmilha de Carril;
- Palmilha de Travessa;
- Manta de Balastro.

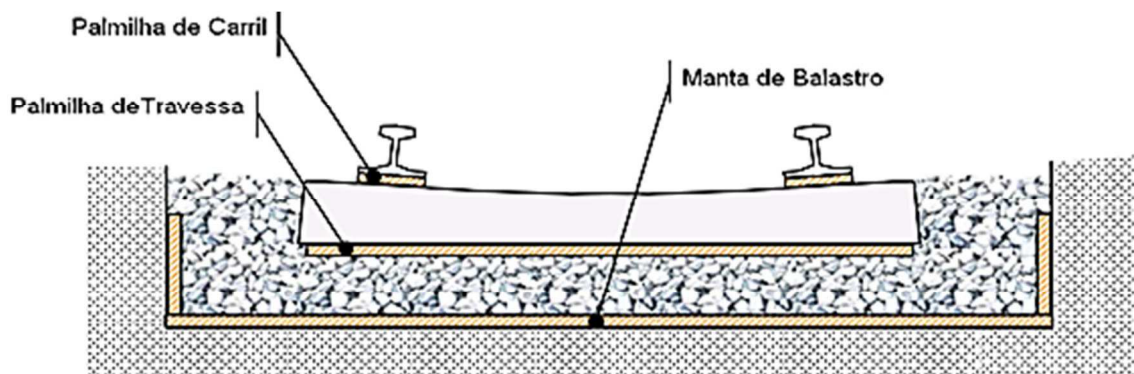


Figura 25 - Possíveis zonas de intervenção dos materiais elásticos, adaptado [26]

Assim sendo, os materiais elásticos deverão apresentar um conjunto de requisitos, para que deste modo consigam executar as funções para as quais foram dimensionados, que são as seguintes [15]:

- Forte resistência contra o contato abrasivo provocado pelas arestas do balastro;
- Manter as suas propriedades elásticas durante a sua expectativa;
- Resistência à vibração dinâmica de acordo com os requisitos de aplicação;
- Fácil instalação e manutenção, usando maquinaria convencional.

4.3.1 Palmilha de carril

A palmilha de carril (Figura 26) é dos componentes de proteção de via mais usado na estrutura da via férrea. Este material resiliente constitui o primeiro nível de proteção da via sendo colocado entre o carril e a travessa.

Com uma espessura que, em geral, pode ir dos 5 mm aos 10 mm, este material apresenta uma rigidez, que varia de acordo com as cargas aplicadas e com o nível de

atenuação requerido para a sua utilização futura, que oscila dos 40 kN/mm até aos 350 kN/mm. [27].

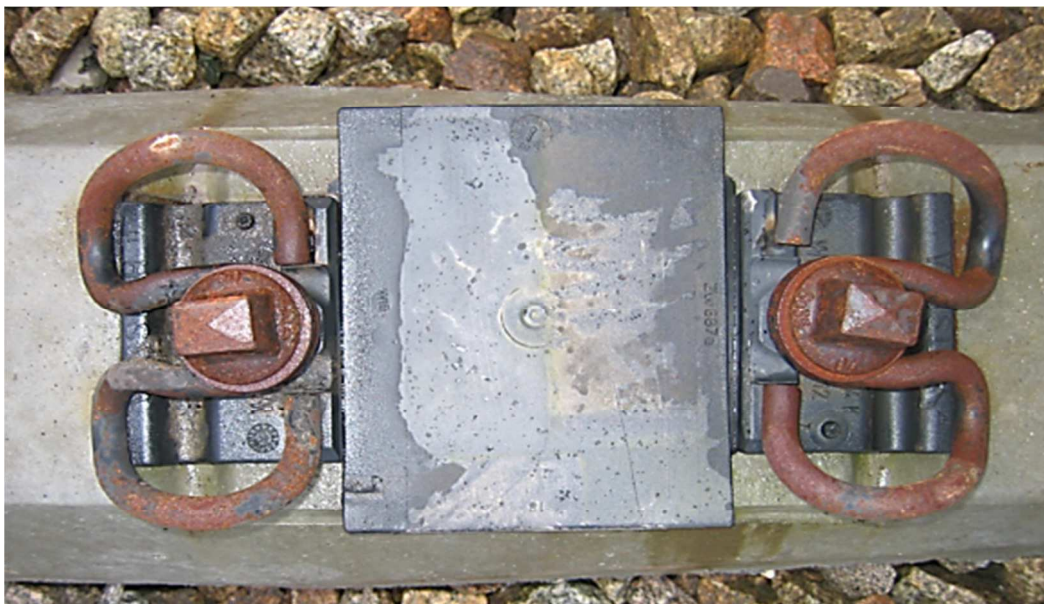


Figura 26 - Palmilha de carril [8]

Esta solução permite efetuar a transferência das tensões produzidas pelo material circulante, do carril para a travessa, amortecendo as vibrações geradas e reduzindo, desta forma, o ruído.

Sendo assim, a palmilha de carril confere uma atenuação do ruído à via de 3 dB a 5 dB, contribuindo para um maior conforto dos utilizadores [28]. Mais ainda, devido à sua característica resiliente permite diminuir consideravelmente certos tipos de deterioração, expostas no capítulo 4.2, do próprio carril e da travessa adjacente.

4.3.2 Palmilha de travessa

As palmilhas de travessa (Figura 27) são um material elástico, em geral, com 5 mm a 20 mm de espessura que é fixado na parte inferior da travessa, permitindo resistir a forças verticais máximas de 250 kN [29].

São assim, ideais para as vias de alta velocidade por contribuírem para a absorção das vibrações (até 15 dB) provocadas pela passagem das composições [30].

Essa atenuação faz com que os movimentos do balastro sejam menores, diminuindo, assim, a sua degradação mecânica e melhorando a estabilidade da via. As palmilhas

têm, deste modo, um papel fundamental para o aumento do ciclo de manutenção da via férrea. Contribuem ainda para a diminuição do desgaste ondulatório do carril.



Figura 27 - Palmilha de travessa [8]

No que diz respeito à rigidez deste material, a mesma é variável dependendo da função a desempenhar pela palmilha, como se pode verificar através do quadro seguinte.

Quadro 4 - Rigidez da palmilha de travessa [29]

CAMPO DE APLICAÇÃO	RIGIDEZ
Melhoramento da qualidade da via	$0,20 \text{ N/mm}^3 < C \leq 0,35 \text{ N/mm}^3$
Redução das vibrações transportado pelo solo	$0,10 \text{ N/mm}^3 < C \leq 0,20 \text{ N/mm}^3$

As palmilhas podem ser fixadas às travessas de três formas [30]:

- Através de um geotêxtil, como elemento de ligação, normalmente usado em travessas de betão (Figura 28);
- Coladas, para travessas de betão ou madeira (**Error! Reference source not found.**);
- Agrafadas, para travessas de madeira (Figura 29).

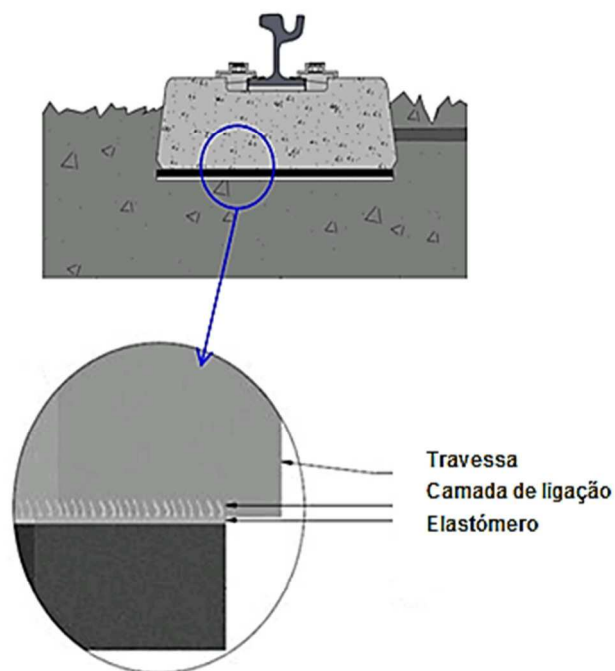


Figura 28 - Palmilha fixada através de geotêxtil como elemento de ligação [30]



Figura 29 - Palmilha agrafada à travessa [30]



Figura 30 - Palmilha colada à travessa [30]

Um fator igualmente muito importante para o uso das palmilhas de travessa nas linhas férreas é a diminuição da degradação do balastro ao longo do ciclo de vida da via, devido a um aumento de 30% da área de contacto do balastro com a travessa [31].



Desta forma, permitem distribuir simultaneamente as cargas provenientes do material circulante por um maior número de travessas, consequência do aumento dessa área de contato, como se pode ver através da Figura 31 e da Figura 32.

Isto conduz a uma pressão de contacto reduzida e, além disso, o desgaste abrasivo das pedras do balastro decresce substancialmente.

Esse aumento da área de contacto travessa/balastro, possibilita também uma diminuição significativa da espessura da camada de balastro sendo que essa espessura não deverá ser menor que 20 cm, de modo a manter a boa performance da via [29].

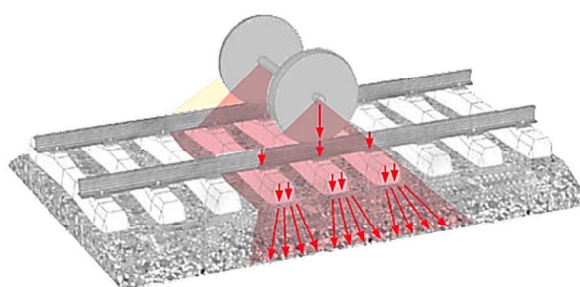


Figura 31 - Distribuição de cargas sem palmilha [32]

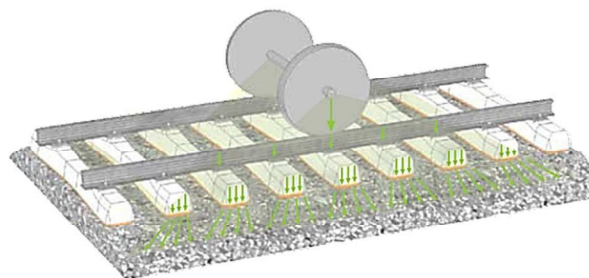


Figura 32 - Distribuição de cargas com palmilha [32]

Quando é executada uma via férrea seria benéfico que a fundação que suporta toda a estrutura apresentasse propriedades e módulos de rigidez constantes ou, pelo menos, semelhantes. Mas, conforme foi referido, raramente acontece, devido aos mais diversos fatores, tais como:

- As propriedades dos solos de fundação;
- As zonas de transição nas obras de arte;
- As zonas de transição entre estruturas de vias diferentes (Figura 33).

A alteração da rigidez da via vai sendo mais ou menos aleatória ao longo de toda a linha férrea, produzindo diferentes tipos de tensões ao longo do percurso, prejudiciais para o ciclo de vida da mesma.

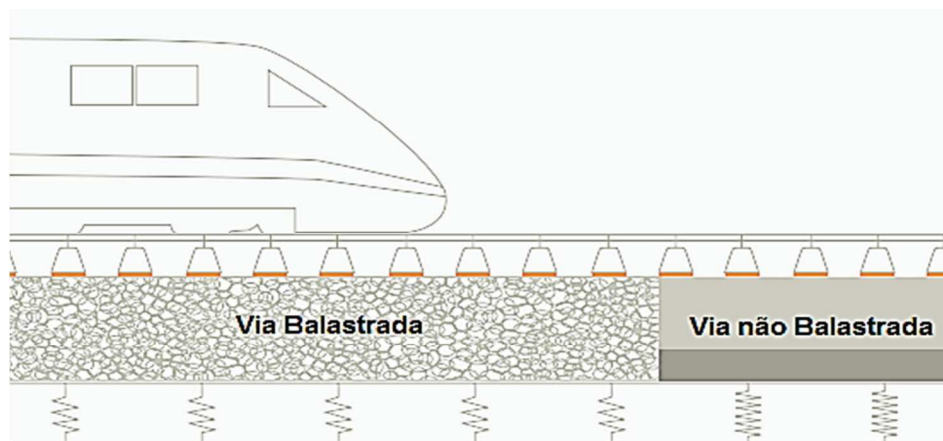


Figura 33 - Diferentes estruturas de via, adaptado [33]

Devido às características elásticas que as palmilhas de travessa detêm, essas variações de rigidez podem ser, de certo modo, compensadas, diminuindo drasticamente as vibrações quando da passagem por essas zonas de conflito, permitindo uma circulação agradável e segura do material circulante e contribuindo para o conforto dos utilizadores.

No que diz respeito à aplicação das palmilhas de travessa em obra, trata-se de um processo relativamente simples visto as palmilhas já virem de fábrica, na maior parte das vezes, unidas às travessas, bastando apenas efetuar a colocação das mesmas no local próprio (Figura 34).



Figura 34 - Colocação de travessas com palmilhas resilientes [8]

4.3.3 Manta de balastro

As mantas de balastro representam o último nível de proteção possível para o melhoramento da superestrutura.

Este material resiliente é colocado sobre a plataforma de fundação, antes mesmo da colocação da camada de balastro (Figura 35), apresentando, em geral, uma espessura que pode variar entre os 15 a 30 mm e uma rigidez na ordem dos $0,03 \text{ N/mm}^3$ até $0,22 \text{ N/mm}^3$ [35].



Figura 35 - Manta de balastro [8]

A manta de balastro tem como principais objetivos, o combate às vibrações causadas pelo material circulante, que neste caso atinge níveis de atenuação na ordem dos 20 dB, impedindo que essas vibrações sejam transmitidas pelo solo de fundação às estruturas vizinhas causando ruído. E ainda, de conferir uma maior flexibilidade à estrutura da via, possibilitando reduzir a degradação do camada de balastro.

Este material, como se mostra no Quadro 5, tem um melhor comportamento quando executado sobre uma superfície rígida (laje de betão), do que quando executado sobre uma plataforma em terreno natural, devido às irregularidade que o mesmo poderá apresentar [35].

Quadro 5 - Redução de vibrações para diferentes tipos de plataforma, com manta de balastro C = 0,03 N/mm³ [35]

Tipo de plataforma	Frequência	
	31,5 Hz	63 Hz
Rígida	55%	90%
Aterro natural	50%	75%

A manta de balastro contribui também para a redução da espessura da camada de balastro e impede a bombagem de finos da fundação para o balastro, combatendo, deste modo, a contaminação do mesmo.

Ao nível da utilização, as mantas de balastro apresentam muitas semelhanças com as palmilhas de travessa, mas a sua aplicação, por causa do seu elevado custo comparando com os materiais anteriormente descritos, é feita de uma forma mais estratégica.

Assim, estas utilizam-se mais nas zonas de uma variação considerável de rigidez, ou seja, nas obras de arte, zonas de transição como, por exemplo, a passagem de uma via balastrada para um via em laje, e por fim, em zonas próximas de habitações para combater o ruído estrutural e as vibrações provocadas pela passagem das composições, como já foi dito anteriormente.

No que diz respeito à aplicação das mantas de balastro, esta é executada em duas partes. Na primeira, a manta resiliente propriamente dita é colocada sobre a plataforma de fundação (Figura 36).



Figura 36 - Colocação de manta de balastro [8]



Em seguida, é colocado sobre a manta de balastro uma camada de geotêxtil (Figura 37), que terá como principal função a proteção da manta resiliente e contribuir, juntamente com a manta de balastro, para uma boa drenagem das águas, impedindo, deste modo, a passagem dos finos para o balastro.



Figura 37 - Colocação de geotêxtil sobre a manta de balastro [8]

A manta resiliente permite a circulação de veículos inerentes à obra. Após a aplicação da camada de geotêxtil, essa circulação está condicionada. Caso seja absolutamente necessário, é recomendável que as duas camadas sejam unidas através de agrafos, por exemplo (Figura 38) [35].



Figura 38 - Geotêxtil agrafado à manta de balastro [8]



4.4 Benefícios dos elementos elásticos numa via

A inclusão dos materiais elásticos na superestrutura da via férrea, apesar de um custo inicial mais elevado do que o normal para uma via balastrada, permitirá, a médio/longo prazo, compensar o investimento inicial através dos vários benefícios que estão inerentes à sua utilização.

No que diz respeito aos benefícios, estes são:

- Melhor qualidade da via;
- Redução da deterioração;
- Redução da espessura do balastro;
- Redução dos custos de manutenção: aumento do intervalo de tempo entre intervenções;
- Redução dos níveis de vibrações e ruído;
- Proteção da infraestrutura da via.

De modo a comprovar os benefícios inerentes aos materiais elásticos com proteção da via férrea, de seguida serão apresentados alguns casos de estudos realizados onde foram utilizados esses materiais.

De modo a combater o desgaste ondulatorio do carril, a Universidade de Innsbruck [36] indica que entre outros aspectos (velocidade praticada, raios do traçado e escalas), a rigidez vertical tem um papel importante nesse tipo de deterioração.

Para isso, realizou um estudo em que demonstra que a utilização de palmilhas de travessa pode minimizar esse tipo de problema que provoca na via férrea um aumento das cargas dinâmicas e consequente maior deterioração da via.

No referido estudo conclui-se que a utilização das palmilhas consegue diminuir a profundidade da ondulação ao longo do carril em mais de 50%, passando dos 0,15 a 0,18 mm registados em travessas sem palmilha, para os 0,075 a 0,10 mm com palmilha de travessa, como se pode verificar através da Figura 39.

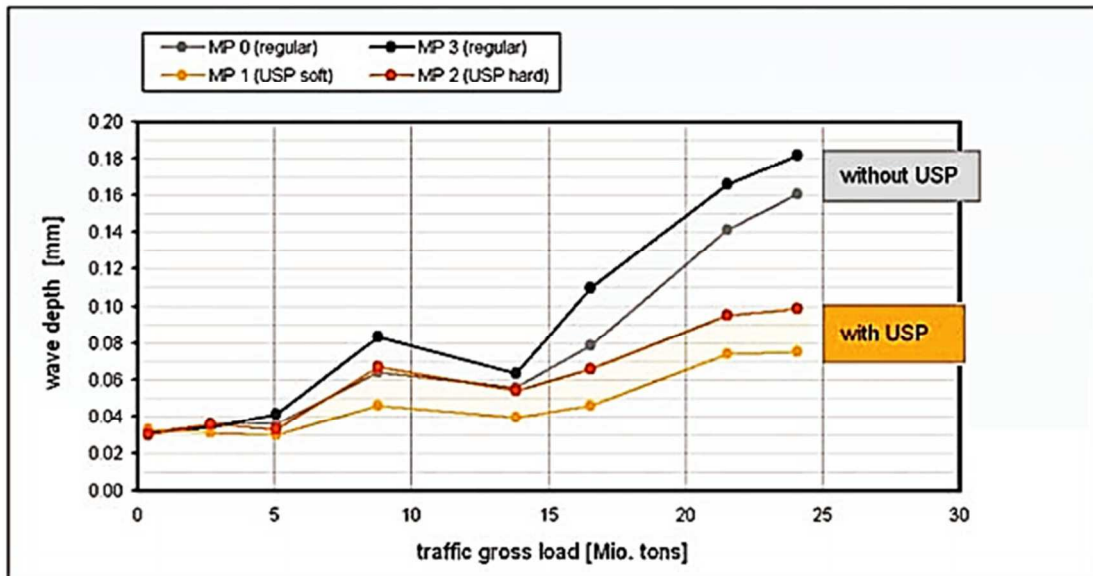


Figura 39 - Desgaste ondulatório, com e sem utilização de palmilhas de travessa [36]

No mesmo estudo conclui-se ainda que se verifica uma diminuição do desgaste das palmilhas de carril. E ainda que a longo prazo este tipo de material reduz significativamente as despesas de manutenção e aumenta os intervalos das suas intervenções.

Outro exemplo dos benefícios referentes à aplicação destes materiais com o objetivo de aumentar a qualidade da via, diz respeito à utilização de mantas de balastro em obras de arte (ponte, neste caso), contribuindo para a redução das tensões verticais provenientes do material circulante, que irão incidir sobre a superfície do balastro.

Segundo Paulo Teixeira, com a aplicação de uma manta de balastro com um $C = 0,04 \text{ N/mm}^3$ reduzem-se as tensões verticais em cerca de 40 % (Figura 40) [37].

Com a diminuição dessas tensões, os esforços que incidem sobre a estrutura serão naturalmente menores, o que contribui para o decréscimo significativo da degradação do balastro, aumentando os ciclos de manutenção do mesmo.

**Vertical stress on ballast surface (σ_b)**

Track on concrete bridge with 30cm of ballast	0.34 N/mm²
Track on concrete bridge with 30cm of ballast and elastic mats (with $C=0,04$ N/mm ³)	0.21 N/mm²

Figura 40 - Redução das tensões verticais com a aplicação de manta de balastro [37]

As vibrações são outros dos problemas afectos à linha férrea, e estão diretamente dependentes da elasticidade da via e o tipo de disposição e características apresentadas pelas diferentes camadas da estrutura.

De acordo com o estudo realizado por Gunthe Leykauf e Walter Stahl [38] a introdução da palmilha de carril com $C = 27$ kN/mm permite, através da análise da Figura 41, uma redução do nível de vibrações de 10 mm/s para 0,3 mm/s, para uma frequência de 125 Hz.

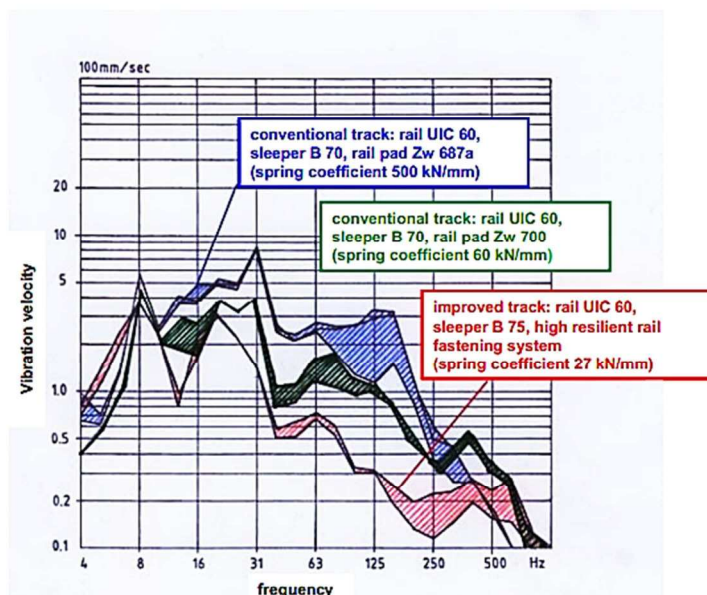


Figura 41 - Redução das vibrações com a introdução de palminha de carril e travessa [38]

Como foi mencionado no capítulo 4.1, os AMV contribuem para a degradação, nas suas imediações, da estrutura da linha férrea. Nos Caminhos de Ferro da Bélgica, procedeu-se à renovação de um troço de linha férrea onde existiam dois AMV (Figura 42) num elevado estado de degradação.

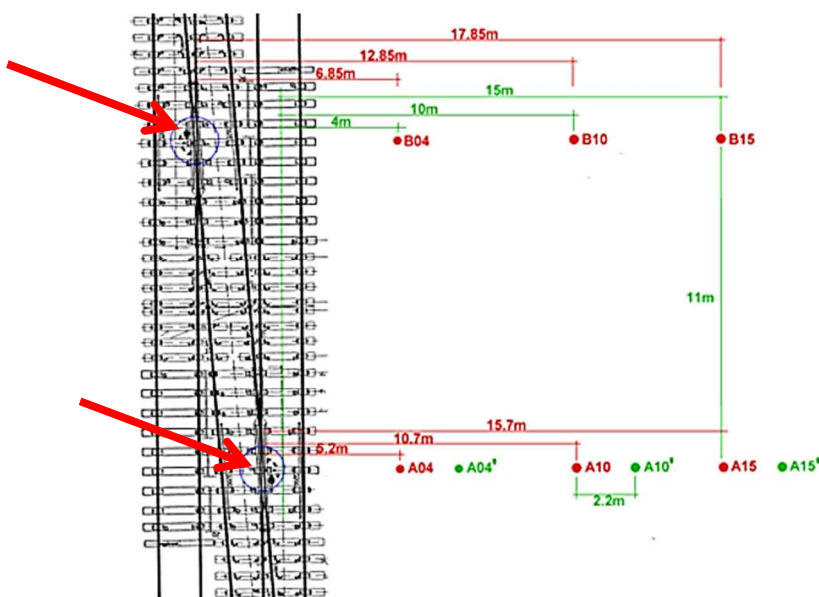


Figura 42 - Localização dos AMV [39]



Essa renovação foi realizada de duas formas distintas, de modo, a poder-se comparar os benefícios da utilização dos materiais elásticos. Para um dos AMV foram utilizadas palmilhas travessa com uma rigidez de 27 MN/m/m, enquanto que, no outro apenas se procedeu a uma normal renovação, mantendo as características iniciais do AMV [39].

Os resultados obtidos foram os seguintes:

No que diz respeito, às vibrações produzidas pela passagem do material circulante constata-se, que no AMV sem palmilha de travessa (Figura 43), a diferença entre as vibrações produzidas antes e após a renovação, apresenta oscilações mínimas.

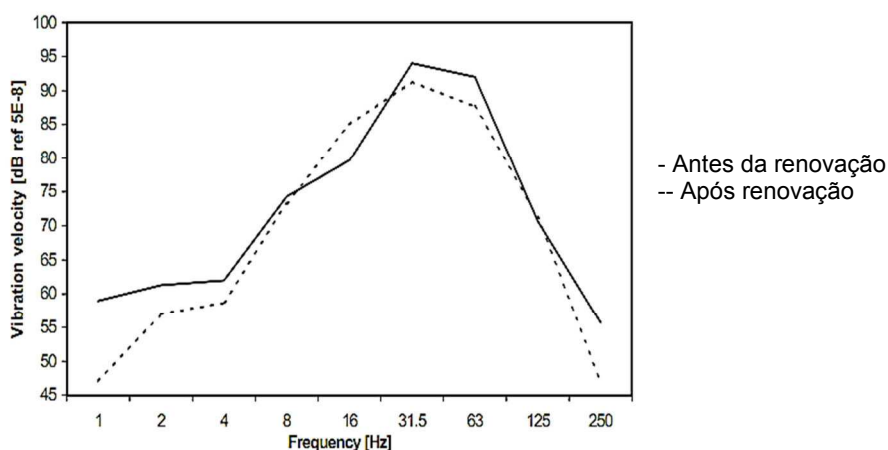


Figura 43 - Velocidade de vibração em AMV sem palmilha de travessa [39]

Já no que diz respeito, ao AMV reforçado com palmilha de travessa (Figura 44), as reduções de vibrações chegam a atingir os 15 dB.

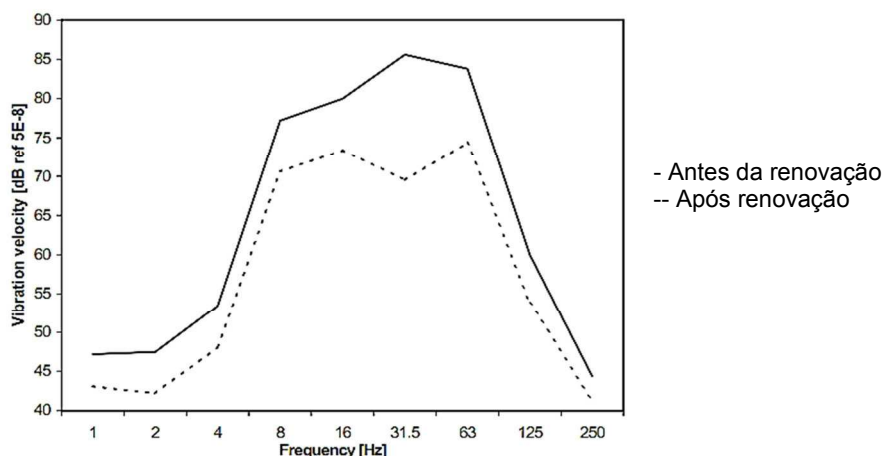


Figura 44 - Velocidade de vibração em AMV com palmilha de travessa [39]



Em relação à deformação vertical do carril, a introdução das palmilhas de travessa permitiu uma redução significativa da rigidez da via (16 MN/m/m para 10 MN/m/m) reduzindo a deformação do carril. Neste caso concreto, possibilitou um aumento da velocidade praticada, de 90 Km/h para os 120Km/h [39].

Após a análise dos exemplos, anteriormente descritos, pode-se concluir que a utilização dos materiais elásticos é uma mais valia para a via férrea, traduzindo melhoramentos nos mais variados níveis da superestrutura, desde o desgaste ondulatorio à diminuição das vibrações, contribuindo assim, para uma menor degradação da via aumentando o ciclo de vida da mesma.

4.5 Seleção dos elementos de proteção da via

A escolha do tipo de elemento de proteção que se irá aplicar na via férrea depende de vários fatores que têm de ser muito bem ponderados e adequados ao tipo de aplicação pretendida.

É importante notar que a combinação dos dois últimos sistemas descritos em 4.3 (palmilha de travessa e manta de balastro) influencia a flexibilidade global da via e o seu comportamento dinâmico podendo comprometer, a estabilidade do balastro de forma imprevisível, o que torna a sua utilização conjunta nada recomendável [26].

Só o será em casos especiais de grandes variações de rigidezes ou em vias situadas nas imediações de edifícios habitacionais. Além disso, a utilização combinada dos dois sistemas, não se traduz directamente na soma das vantagens que cada um dos sistemas oferece.

É possível a utilização dos três tipos de proteção (palmilha de carril, palmilha de travessa e manta de balastro) em simultâneo, nos três níveis de proteção da superestrutura, por exemplo, em zonas de transição da plena via para obras de arte, visto ser nestes locais que existe a maior variação de rigidez.

Notem-se, então, os principais critérios para a seleção dos materiais elásticos:



Características de performance: valores da rigidez estática e dinâmica;

A rigidez apresentada pelos diversos tipos de soluções para protecção de via tem grande influência no seu comportamento e contribui de maneiras distintas para a performance do material durante a sua vida útil.

Um estudo realizado por Stephen Witt, em que são testadas duas palmilhas de travessa, revela isso mesmo. De referir, que o estudo em causa simula o material para uma zona de transição entre aterro (pouco rígido) e uma obra de arte (rígido), sendo este o caso mais desfavorável, no que a zonas de transição diz respeito.

De acordo com esse estudo, foram consideradas duas palmilhas com 3000 kN/mm e 50 kN/mm de rigidez vertical e a sua performance foi a seguinte (Figura 45, Figura 46 e

Figura 47) [18]:

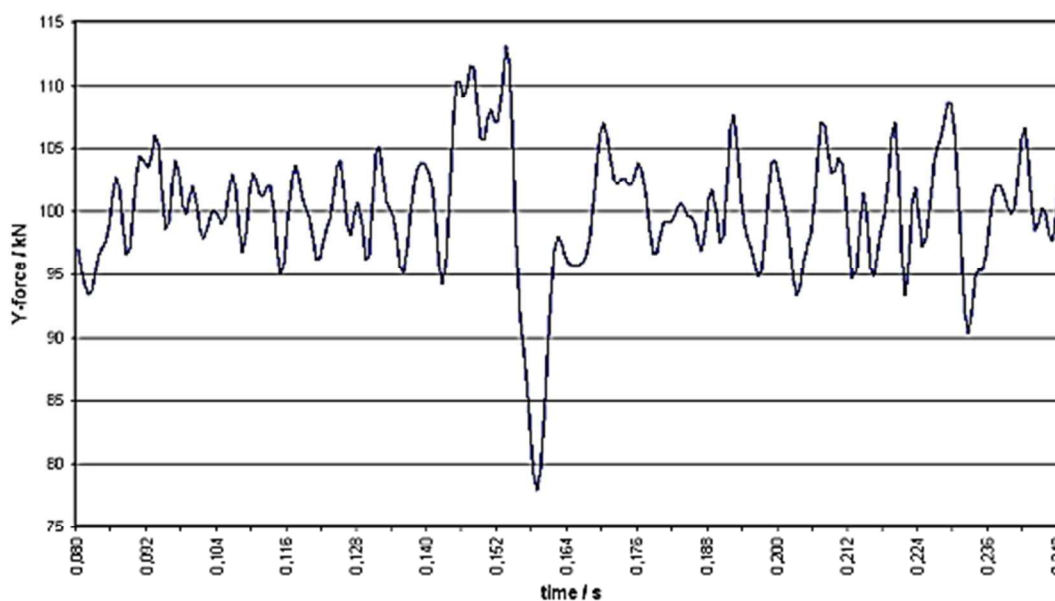


Figura 45 - Tensão de contacto rodados/carril sem palmilha [18]

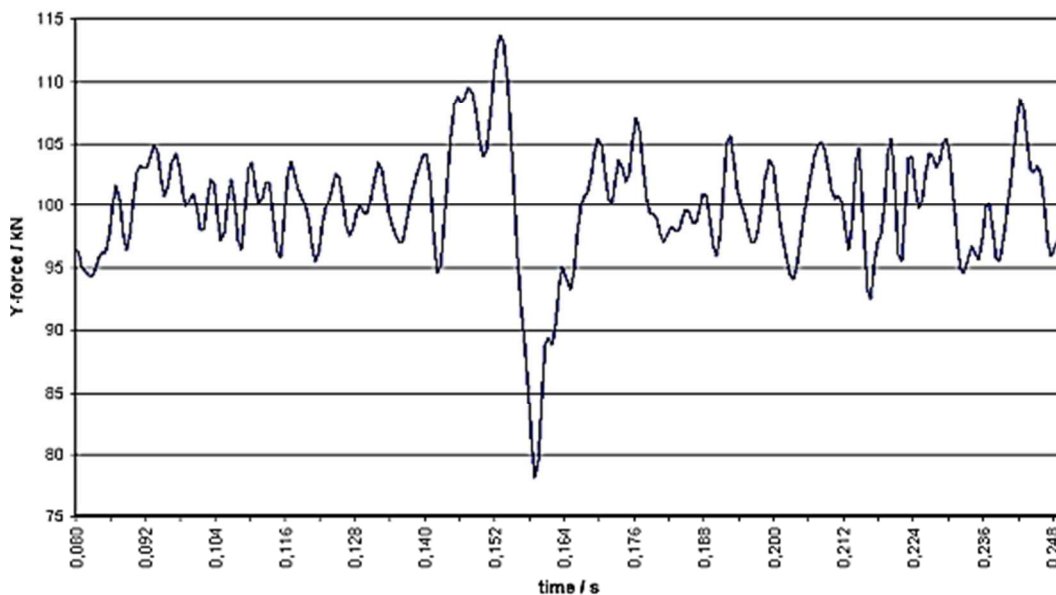


Figura 46 - Tensão de contacto rodados/carril com palmilha de 3000 kN/mm [18]

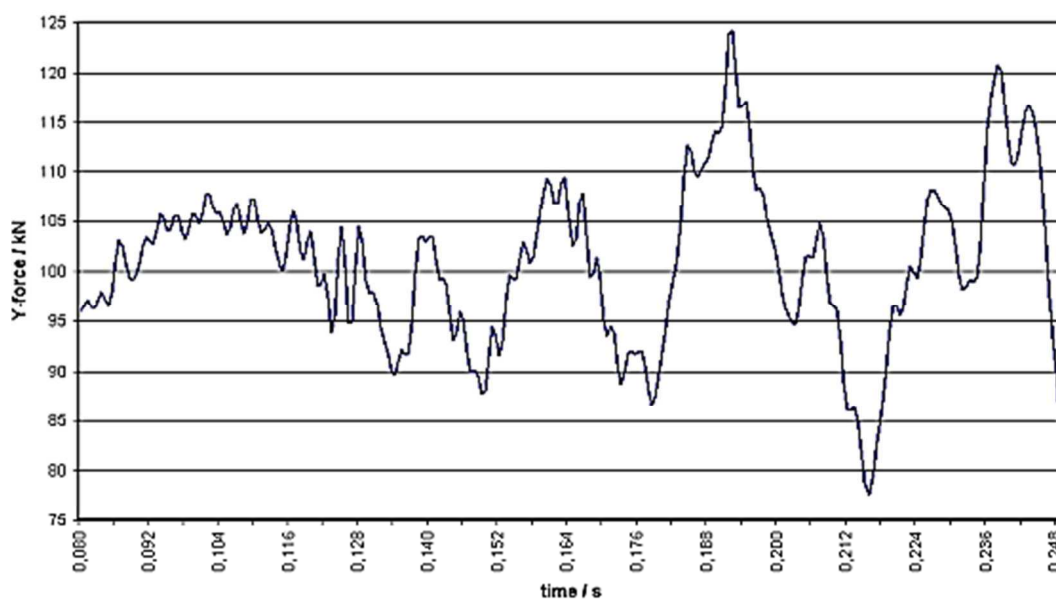


Figura 47 - Tensão de contacto rodados/carril com palmilha 50 kN/mm [18]

Após, a análise destas figuras, verifica-se que para uma palmilha com elevada rigidez vertical, para este caso, com $C_{Balastro} = 20 \text{ kN/mm}$, a tensão de contato é quase idêntica quando comparada com a alternativa sem palmilha.



No que diz respeito à solução com palmilha pouco rígida, apresenta poucas variações antes de iniciar a transição, mas após entrar na obra de arte apresenta variações significativas.

Conclui-se assim, que uma solução de palmilha de travessas com rigidez intermédia seria a mais adequada para esta situação.

Facilidade de instalação em renovação de via ou via nova:

Em relação a uma nova via, qualquer um das soluções apresentadas em 4.3 são exequíveis sem problemas de maior. Já no que diz respeito à renovação de via, a manta de balastro apresenta maiores problemas em relação às outras duas soluções, visto ser preciso intervir em vários componentes da estrutura da via férrea para a execução. Para as palmilhas de carril e de travessa, apenas é preciso intervir ao nível do carril e da travessa, respetivamente.

Avaliação económica das soluções:

Este tipo de soluções apresenta, normalmente um custo inicial elevado quando comparado com soluções em que não se utilizam estes materiais resilientes (o que hoje em dia é raro o caso onde isso se verifica) custo esse que irá ser ressarcido ao longo da vida útil da via.

Com base [31], apresenta-se em seguida os ganhos (em €) obtidos na construção de uma via em que se utilizam, palmilhas de travessa com as seguintes características:

Quadro 6 - Características da via em estudo [31]

Comprimento	700 km de via balastrada
Tipo de via	Alta velocidade
Cargas por eixo	32 T

No Quadro 7, representam-se os custos totais inerentes à execução de um via férrea com e sem a utilização de palmilhas de travessa. Desde logo, pode-se constatar que o investimento inicial para a execução das palmilhas representa apenas 10% do custo total da via [31].



Quadro 7 - Custos iniciais para a execução de uma via férrea [31]

	Comprimento da via	Custo inicial por km	Custo total de construção
Via sem palmilha de travessa	700 Km	500.000 €	350.000.000 € (balastro, sub-balastro, fixações, travessas e carril)
Custo de execução somente das palmilhas de travessa	700 Km	50.010 €	35.007.000 €

No Quadro 8, estão representados custo relativos à manutenção relativamente à via férrea do Quadro 7. Pode-se assim, concluir com a análise do quadro que independente do maior custo inicial que a utilização das palmilhas acrescenta ao custo inicial da obra, os custos relativos à manutenção descem para metade.

Isso traduz-se numa poupança de custos na ordem dos 11.083.333 € anuais (Quadro 8), Podendo deste modo, o agente ferroviário recuperar o investimento inicial em pouco mais de 3 anos, conforme demonstra a seguinte expressão [31].

$$\text{Tempo de retorno} = \frac{35.007.000 \text{ €}}{11.083.333 \text{ €/ano}} = 3,16 \text{ anos}$$



Quadro 8 - Custos de manutenção [31]

	Porcentagem relativa ao custo inicial da via	Custo de execução da via	Custo da manutenção anual (€)	Custo da manutenção anual por km
Custos de manutenção sem palmilha de travessa	5%	350.000.000 €	17.500.000 €	25.000 €
Custos de manutenção com palmilha de travessa	2,5%	352.000.000 €	8.750.000 €	12.500 €
Depreciação anual sem palmilha de travessa	1/25	350.000.000 €	14.000.000 €	20.000 €
Depreciação anual com palmilha de travessa	1/30	350.000.000 €	11.666.667 €	16.667 €
Ganhos anuais nos custos de manutenção	-	-	8.750.000 €	12.500 €
Diferença de depreciação	-	-	2.333.333 €	3.333 €
Total de ganhos anuais	-	-	11.083.333 €	15.833 €



Assim sendo, em síntese, os critérios para a seleção dos materiais elásticos estão apresentados no quadro seguinte:

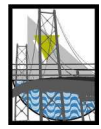
Quadro 9 - Critérios de utilização dos materiais elásticos [30]

Nível de intervenção	Palmilha de carril	Palmilha de travessa	Manta de Balastro
Execução em via nova	✓	✓	✓
Execução em via existente/renovação	✓ Normal substituição de palmilha	✓ Normal substituição de travessa	× Elevado número de operações
Custos	✓	≈	×
Eficiência relativamente a ruído e vibrações	× Até 5dB	✓ Até 15 dB	✓ Até 20 dB
Qualidade da via e manutenção	≈	✓	×

Legenda: ✓ - Favorável;

× - Desfavorável;

≈ - Irrelevante.





5. MANUTENÇÃO E RENOVAÇÃO DA VIA FÉRREA NA PERSPETIVA RAMS E LCC

Num mundo cada vez mais global e modernizado, a mobilidade de pessoas e bens tem verificado um aumento progressivo, mesmo com a economia a andar em sentido contrário a esta evolução.

Os caminhos de ferro apresentam um papel preponderante para que essa mobilidade seja possível, devido ao rácio qualidade/custo dos serviços prestados, apesar do leque de opções existentes ao dispor dos utilizadores, como os transportes rodoviário e aéreo como principais concorrentes.

De forma a conseguir competir com esses outros meios de transporte, as entidades reguladoras e as operadoras ferroviárias tiveram de arranjar soluções para tentar recuperar parte substancial dos utilizadores que perderam no final do século XX, com a crise que se verificou no setor.

Para cumprir este objetivo de forma eficaz, foi necessário passar a estudar as várias fases do ciclo de vida de uma via, tais como, o projeto, a execução, a operação e a manutenção/renovação.

Note-se que, uma vez que a infraestrutura esteja instalada, é muito difícil modificar o projeto inicial pois tal normalmente acarreta elevados custos. Por conseguinte, o desempenho da infraestrutura depende, em grande parte, da manutenção e do tipo de renovações realizadas durante o seu ciclo de vida.

Assim sendo, na fase de projeto passou-se a considerar não só o custo inicial da via, mas também aspetos como RAMS (Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança) e LCC (Life-Cycle Cost).

Com o aumento das necessidades de infraestrutura nomeadamente, em termos de carga por eixo, e velocidade, a infraestrutura está mais propícia ao aparecimento de anomalias, que por sua vez requerem mais manutenção. Sob pena de, em caso extremo de colocar em causa a segurança, ao mesmo tempo, a disponibilidade da infraestrutura para executar os trabalhos de manutenção necessários diminuiu, devido ao elevado tráfego praticado nas linhas.



Uma abordagem LCC em combinação com a análise RAMS fornecerá uma forma de melhorar a estratégia de manutenção, considerando não só as necessidades orçamentais de curto prazo, mas também os custos a longo prazo, tendo sempre em conta as incertezas associadas às análises LCC e RAMS, a fim de apoiar o processo de tomada de decisão conjugando todos esses fatores [40].

Desde o início da era industrial, os técnicos esforçaram-se no sentido de desenvolver equipamentos para os sistemas de transportes o mais confiáveis e duráveis possíveis. Nesse tempo, os desenvolvimentos alcançados no processo de conceção dos mesmos sistemas ocorreram principalmente devido a um processo de tentativa e erro. Mas apesar de todas as melhorias alcançadas desde então, ainda é impossível afirmar que qualquer atividade desenvolvida pelo homem será realizada de forma impecável estando livre de qualquer risco ou fracasso [41].

Surge então, a necessidade de em plena fase de projeto começar-se desde logo por avaliar potenciais erros ou anomalias que a estrutura ferroviária poderá vir a apresentar, devido principalmente ao aumento da sua complexidade, e a prazos cada vez mais diminutos para entrega da mesma, conjugado com o aumento considerável dos custos praticados para a sua execução. Torna-se, assim, impensável continuar com a solução primitiva do processo de tentativa e erro descrito anteriormente, levando ao aparecimento de novos processos mais inovadores, em que a análise RAMS e LCC se incluem.

Apresenta-se uma breve explicação do modo de funcionamento dos processos RAMS e LCC.

RAMS é geralmente entendida como um conjunto de atividades que abrange vários domínios, que estão em última análise ligados ao estudo de erros de conceção, manutenção e disponibilidade da via. Apesar de muitas vezes esses valores teóricos não serem os mais indicados para ser usados em campo, a RAMS contribui, ainda assim, para melhorar alguns aspetos, tais como [41]:

- Fornecer indicadores de quanto resistente e confiável um projeto ferroviário poderá ser;
- Identificar que partes do sistema são suscetíveis de ter os maiores impactos em caso de anomalias, que tipos de anomalias são expectáveis e quais os riscos que representam para os utilizadores;



- Permitir um planeamento adequado das operações de manutenção e renovação da via, tendo em conta o custo-benefício das mesmas;
- Avaliar o risco de acidentes e potenciais perigos inerentes à via, ajudando a melhorar os níveis de segurança.

De forma a fundamentar melhor o conceito RAMS, recorreu-se à norma EN 50126 de 1999 que define cada um dos elementos como [42]:

- **Fiabilidade:** a probabilidade de um dado elemento executar a sua função sob dadas condições e dentro de um determinado intervalo de tempo;
- **Disponibilidade:** a capacidade de um elemento de executar uma função requerida, em certas condições, em um dado instante de tempo ou durante um dado intervalo de tempo, assumindo que os recursos externos necessários são fornecidos;
- **Manutibilidade:** a probabilidade de uma ação de manutenção, de um elemento em determinadas condições de utilização, poder ser realizada dentro de um intervalo de tempo indicado, sendo executada sob as condições estabelecidas e utilizando procedimentos e recursos estabelecidos;
- **Segurança:** o estado de liberdade do sistema de risco inaceitável de dano.

Assim sendo, para que a sua análise seja satisfatória é necessário proceder a um estudo que abranja todos os sistemas que compõem uma estrutura ferroviária, que neste caso são, a via propriamente dita, o sistema de alimentação da via (catenária) e os sistemas de comunicação e sinalização.

Estes sistemas combinados, devido aos mais diversos fatores internos e externos, têm um contributo na degradação da infraestrutura. Logo, esses fatores têm de ser todos considerados para que a análise seja correta e fiável, tornando este processo um pouco complexo e, por vezes, difícil de realizar [41].

Fiabilidade

Este elemento está subdividido em três categorias, como se pode ver através do Quadro 10, que abrange: a anomalia mais significativa, a que os agentes ferroviários deverão dar



particular atenção, visto interferir com o normal funcionamento da via, até à anomalia menos importante, que apesar de existir, não impede o normal funcionamento da via, o qual pode ser feito com as devidas ressalvas.

Quadro 10 - Categorias das anomalias [41]

CATEGORIA DAS ANOMALIAS	DEFINIÇÃO
Significativa	<ul style="list-style-type: none">• Impede a circulação das composições ou provoca um atraso do serviço maior que o tempo especificado e/ou gera um custo maior do que um determinado nível.
Principal	<ul style="list-style-type: none">• Deve ser retificada para que a estrutura volte a atingir o seu desempenho especificado.• Não causa um atraso ou um custo maior que o limite mínimo especificado para uma anomalia significativa.
Menor	<ul style="list-style-type: none">• Não impede que a estrutura atinja o seu desempenho especificado.• Não reúne os critérios de anomalias significativas ou principais.

Dado que a fiabilidade é definida como a probabilidade de uma sistema ou componente funcionar em condições ideais, durante um determinado período de tempo, ela é medida em função do tempo, normalmente em milhões de toneladas brutas. E os fatores que apresentam grande influência no seu resultado são: o tempo de utilização dos desses componentes, e o ambiente circundante aos mesmos (temperaturas, precipitação, etc.).

Disponibilidade

A disponibilidade de uma estrutura férrea está diretamente dependente da fiabilidade da mesma e da qualidade da manutenção realizada durante o ciclo de vida dessa mesma via.

A disponibilidade de uma via, é normalmente medida de três formas:



- Disponibilidade inerente - é uma qualidade que a via alcança, quando opera de modo satisfatório em qualquer intervalo de tempo, sempre que é solicitada, não tendo em conta a manutenção preventiva;
- Disponibilidade satisfatória - neste ponto já são considerados tanto a manutenção preventiva, bem como a manutenção corretiva. E a via opera de modo satisfatório em qualquer intervalo de tempo;
- Disponibilidade operacional - está preparada para responder, sabendo-se, que a resposta à manutenção não é instantânea. Opera de forma realista.

Manutibilidade

A manutibilidade é uma ferramenta do projeto de concepção de uma via férrea, que deve ser considerada na fase inicial do mesmo. Definindo e caracterizando as fases de manutenção durante o ciclo de vida da via.

Segurança

A segurança está relacionada com a perigosidade e gravidade dos acontecimentos possíveis numa via férrea tendo como ponto de partida a origem desses acontecimentos. Pode ser muitas vezes considerada um subconjunto da fiabilidade.

Pode ser classificada, no que diz respeito à perigosidade, como:

- Frequente;
- Provável;
- Ocasional;
- Remota;
- Improvável
- Pouco improvável.



E no que diz respeito à gravidade, como:

- Catastrófica;
- Crítica;
- Marginal;
- Insignificante.

No que diz respeito, ao LCC (Life-Cycle Cost) é um método económico inovador em que, são considerados os custos da construção, manutenção, renovação e os custos de operação da via, permitindo ajudar a suportar as decisões tomadas pelos agentes ferroviários na busca sistemática de respostas a perguntas do tipo [5]:

- Qual a capacidade de manutibilidade e fiabilidade da via?;
- Que percentagem de custos é originada pelo aumento de tráfego e das respectivas cargas?;
- Como conjugar os trabalhos de manutenção, sem interferir com a capacidade da via;
- Que quantidade de manutenção preventiva será necessária?;
- Que riscos de construção e manutenção têm de ser salvaguardados?.

Porque, como já foi dito anteriormente, a via férrea exige elevados investimentos financeiros e os componentes são dimensionados com uma expectativa de um longo ciclo de vida. Assim sendo, este tipo de processo, poderá representar um valioso contributo para apoiar futuras tomadas de decisões.

Este método é constituído pelos seguintes passos:

- Recolher os dados referentes aos custos de todos os elementos considerados na estrutura;
- Realizar a análise LCC para vários cenários operacionais;
- Análise que tente identificar cenários condições óptimas de operação;

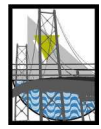


- Identificar fatores de custo;
- Quantificar as diferenças de desempenho do produto, a disponibilidade ou qualquer restrição que pode afetar a aplicabilidade de qualquer cenário considerado;
- Classificar e resumir resultados do modelo LCC;
- Analisar a robustez do modelo, realizando uma análise de sensibilidade;
- Revisão do modelo LCC saídas em função dos objetivos definidos no plano de análise.

Após as etapas descritas, todo esse processo deverá ser documentado através de um relatório que possibilite a consulta por parte dos agentes ferroviários e outras partes interessadas. Em casos particulares, com grandes obras, é recomendável que seja feita uma revisão independente do processo, para confirmar a exatidão e a integridade dos resultados.

Verifica-se assim que, em geral, este tipo de conceitos ainda não são considerados, no que à elaboração de projetos diz respeito. O que não deveria acontecer, visto que, tanto o RAMS como o LCC podem contribuir decisivamente não só para apoiar a gestão das infraestruturas existentes, mas também para apoiar decisões de investimento futuras em novas vias de alta velocidade.

Assim sendo, apesar de se considerar estes conceitos importantes e indispensáveis para o futuro dos caminhos de ferro, reconhece-se que deverão ser realizadas futuras investigações em torno destes elementos, para a sua melhor precessão.





6. CONCLUSÕES

A inovações tecnológicas que têm vindo a ser implementadas ao nível dos caminhos de ferro têm, obrigatoriamente, de ser encaradas pelos diversos agentes ferroviários como parte da solução e não como o problema, para que o desenvolvimento do setor seja possível e, desta forma, os caminhos de ferro recuperem a importância perdida no final do século XX.

A vertente económica das inovações tecnológicas tem sido, o principal entrave para que esse desenvolvimento passe do papel para a realidade. As entidades reguladoras têm vindo a alertar para a necessidade de reduzir drasticamente os custos globais do transporte ferroviário, mais propriamente, os custos que dizem respeito aos trabalhos de manutenção e renovação da via.

Para isso, têm sido desenvolvidos mecanismos que permitem olhar para a linha férrea, não só para a fase de projeto, execução e operação, mas principalmente para as fases de manutenção e renovação da mesma, sendo as análises RAMS e LCC partes fundamentais do processo.

No presente documento pretendeu-se compreender melhor estas duas novas vertentes do setor ferroviário, concluindo-se que este tipo de análise ainda é pouco considerada no desenvolvimento de um projeto ferroviário.

A utilização de materiais elásticos para a proteção da linha férrea, apesar de ainda estar no início do seu desenvolvimento, é um passo importante para que o crescimento do setor seja uma realidade.

Ultimamente, em alguns locais, tem-se verificado uma modificação na escolha de soluções de superestrutura de via para as novas linhas de alta velocidade. Atualmente, pode-se comprovar, também, que a aplicação deste tipo de materiais em túneis e viaduto, é a elegida em prejuízo da solução balastrada tradicional, devido às variações de rigidez presentes nesses locais.

Independentemente dos elevados custos iniciais que este tipo de tecnologia acarreta, em comparação com a via balastrada tradicional, existem benefícios a favor deste tipo de solução, designadamente:



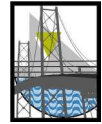
- Atenuação do ruído provocado pelas vibrações, verificando-se em alguns casos uma redução de 15dB;
- Aumento da área de contato travessa/balastro, de 3% a 4% para 30%, permitindo uma melhor distribuição das cargas;
- Redução, até 50%, das deformações do desgaste ondulatório do carril;
- Redução, até 40% das tensões verticais provenientes do material circulante para a estrutura;
- Redução significativa da camada de balastro.

Posto isto, todos estes fatores conjugados permitem concluir que, em comparação com a via balastrada tradicional, a aplicação dos materiais elásticos contribui para a diminuição da degradação da via férrea, garantindo menores ciclos de manutenção para a estrutura a médio/longo prazo, reduzindo os custos inerentes ao mesmos.

Para desenvolvimentos de estudos futuros, seria ideal construir troços experimentais¹, sujeitos a diferentes exigências, designadamente em termos de frequências e de cargas por eixo e posteriormente proceder a uma eficiente monitorização para permitir a análise de comportamento dos diferentes componentes, tanto ao nível dos materiais do armamento de via (carril, travessas fixações), materiais de proteção bem como das camadas de fundação (terreno natural, laje de betão,...).

Importa igualmente aferir, com rigor, quais as variáveis que condicionam as características elásticas dos elementos de proteção e com isso internalizar a relação custo benefício no âmbito do projeto inicial e da manutenção do mesmo.

¹ Em alternativa, ou em complemento, poderá recorrer-se a modelos computacionais.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] REFER - Diretório da Rede 2013. 30/12/2011.
- [2] Porto, T. - Sebenta PTR 2501 - Ferrovias. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Transportes. 2004.
- [3] Sequeira da Cruz, A. - Apontamentos de Caminhos de Ferro. ISEL. 2011.
- [4] Fontul, S. - Apontamentos de Infraestruturas Ferroviárias e Portuárias. FCT - UNL. 2010.
- [5] Esveld, C. Modern Railway Track, 2ª Edição, MRT - Productions. 2001.
- [6] Infrastructure Commission - Civil Engineering Support Group. Feasibility study «ballastless track». UIC - Union Internationale des Chemins de Fer. 2002.
- [7] Fortunato, E. - Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga. Tese de Doutoramento, FEUP, Porto. 2005.
- [8] Martins, A. - Febritas. Fotos. 2012.
- [9] Quante, F. - Innovative Track Systems - Technical Construction, ProM@in, Karlsruhe. 2001.
- [10] Fortunato, E. - Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga. Tese de Doutoramento, FEUP, Porto. 2005.
- [11] Zoeteman A.; Esveld, C. - Evaluating track structures: life cycle cost analysis as a structured approach. World Congress on Railway Research, Tokyo. 1999.
- [12] Teixeira, P. - State-of-the-Art on the Use of Bituminous Subballast on European High-Speed Rail Lines. 2009.
- [13] López Pita, A.; Teixeira, P. F.; Robusté, F. - Nuevas tendencias en el proyecto de infraestructuras ferroviarias: La utilización de materiales bituminosos como subbalasto. X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia, 13 a 15 Setembro de 2006.
- [14] Norma ISO 1382- Rubber Vocabulary. 1996.
- [15] Leykauf, G., Stahl, W. - Test and experiences with sleeper pads. 2004.



- [16] Thompson, D. - Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means. Elsevier. 2009.
- [17] Santos, F. - Infra-estruturas Ferroviárias Rumo à Alta Velocidade. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. 2011.
- [18] Witt, S. - The Influence of Under Sleeper Pads on Railway Track Dynamics, Dissertação, Linkoping University Institute of Technology. 2008.
- [19] Nóbrega, S. - Comportamento dinâmico de atravessamentos inferiores pré-fabricados em vias de alta velocidade. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto. 2010.
- [20] Afonso, M. A. F. - Balastro Contaminado das Ferrovias Suas Repercussões, Soluções de Reabilitação e Destino Final. Tese de Mestrado, IST. Outubro 2011.
- [21] Teixeira, P. - Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez. Tese de Doutoramento, Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Novembro 2003.
- [22] Hanson, C. E., Towers, D. A., Meister, L. D. - Transit noise and vibration impact assessment. Relatório. 2006.
- [23] Martins, P. - Desgaste Ondulatório em Caminhos de Ferro. Dissertação de Mestrado, ISEL. 2010.
- [24] Zakeri, J., Rezvani, F. H. - Failures of Railway Concrete Sleepers During Service Life. Artigo, International Journal of Construction Engineering and Management. 2012.
- [25] Seara, I., Gomes Correia, A. - Zonas de transição de vias-férreas. A importância de uma solução geoestrutural. Estudo, Universidade do Minho. Relatório.
- [26] UIC - Union Internationale des Chemins de Fer - Leaflet 719 - 1R: "Recommendations for the use of Under Ballast Mats - UMB". 2011.
- [27] Vickres, R. A. - Cost-Effective Maintenance of Railway Track. Livro. 1992.
- [28] CDM - Elastic Elements in Track Infrastructure Innovative Track Systems. Catálogo. 2011



- [29] UIC - Union Internationale des Chemins de Fer - Leaflet 713 - 1R: "Recommendations for the use of Under Sleeper Pads - USP". 2008.
- [30] CDM - USP - Under sleepers pads. Catálogo. 2012.
- [31] CDM - Techinal note on the Advantages of USPs and Case Study. Relatório. 2011.
- [32] Getzner - Sleeper Pads for Ballasted Track. Catálogo. 2009.
- [33] Getzner - Mass-Spring System. Catálogo. 2010.
- [34] CDM - Under Ballast Mats. Catálogo. 2011.
- [35] CDM - Especificações Técnicas Manta Resiliente de Balastro Superfície Contínua Tipo Bam-C. 2009.
- [36] Getzner - Under Sleeper Pads: improving track quality while reducing operational costs. European railway review. 2008.
- [37] Teixeira, P. - Dimensionamento da sub-estrutura e super-estrutura ferroviária de alta velocidade. Curso de especialização em alta velocidade ferroviária - 2º Edição, Bloco I: Tecnologia de Via para Alta Velocidade: Via sobre Balastro & Via não Balastrada. Apresentação. 2010.
- [38] Leykauf, G., Stahl, W. - Tests and experiences with sleep pads. Artigo - El-Eisenbahningenieur (55). 2004.
- [39] Carels, P., Ophalffens, K., Beelen, H., Mys, J., Schillemans, L. - On the effects of high resilient undersleeper mats in turn-outs built in main line ballasted track, on ballast degradation, track stability and ground borne noise levels. Relatório, 8º International Workshop on Railway Noise, Buxton, Reino Unido. 2004
- [40] Patra, A. P. - Maintenance Decision Support Models for Railway Infrastructure using RAMS & LCC Analyses. Outubro de 2009.
- [41] Simões, G. - RAMS analysis of railway track infrastructure (Reliability, Availability, Maintainability, Safety). Dissertação de Mestrado, IST. 2008.
- [42] EN 50126 - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) for Railway Applications, European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Brussels, Belgium. 1999.



WEBGRAFIA:

- A. <<http://fortalezaemfotos.blogspot.pt/2011/12/o-relogio-da-se-cronica-de-joao.html>>
(Último acesso: 06/10/2012).
- B. <<http://www.cp.pt/cp/displayPage.do?vnextoid=5c54079ffa057010VgnVCM1000007b01a8c0RCRD>>. (Último acesso: 21/05/2012).
- C. <<http://www.cp.pt/cp/displayPage.do?vnextoid=70ecab3226ea4010VgnVCM1000007b01a8c0RCRD>>. (Último acesso: 12/04/2012).
- D. <<http://www.refer.pt/MenuPrincipal/REFER/GestaodaRede/MapadaRede.aspx>>
(Último acesso: 25/10/2012).
- E. <<http://www.compositology.com/wp-content/uploads/2011/07/axionties.jpg>> (Último acesso: 11/11/2012).
- F. <<http://www.flickr.com/photos/talvesmiranda/5024398149/in/set-72157623468580061>>
> (Último acesso: 15/09/2012).
- G. <<http://www.flickr.com/photos/talvesmiranda/5756137212/>> (Último acesso: 15/09/2012).
- H. <http://cpr.org/Museum/Rail_Wear_Johnson/index.html> (Último acesso 10/11/2012)
- I. <<http://www.google.pt/imgres?hl=pt-PT&sa=X&tbo=d&biw=1024&bih=681&tbm=isch&tbnid=QFKP80iMs2w1QM:&imgrefurl=http://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-5307/&docid=IJCiRodoIDCQjM&imgurl=http://www.dlr.de/rm/en/Porta>> (Último acesso 5/11/2012)