



ISEL



Alternativas à Utilização de Travessas de Madeira Creosotadas na Via-Férrea

INÊS AMARAL RIBEIRO PEREIRA DA SILVA
(Licenciada)

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

Orientadores:

Mestre, Especialista, Fernanda de Jesus Viana Lopes Rodrigues
Licenciado, Especialista, Armando do Carmo Martins

Júri:

Presidente: Licenciada, Especialista, Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes

Vogais:

Doutor, Henrique Manuel Borges Miranda
Licenciado, Especialista, Armando do Carmo Martins

dezembro de 2025

Alternativas à Utilização de Travessas de Madeira Creosotadas na Via-Férrea

INÊS AMARAL RIBEIRO PEREIRA DA SILVA
(Licenciada)

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

Orientadores:

Mestre, Especialista, Fernanda de Jesus Viana Lopes Rodrigues, ISEL - DEC
Licenciado, Especialista, Armando do Carmo Martins

Júri:

Presidente: Licenciada, Especialista, Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, ISEL - DEC

Vogais:

Doutor, Henrique Manuel Borges Miranda, ISEL - DEC
Licenciado, Especialista, Armando do Carmo Martins

dezembro de 2025

Agradecimentos

Em primeiro lugar à minha família, por acreditarem no meu sucesso e pelo incentivo em cada momento da minha vida. Em especial ao meu avô, a quem chamava a minha alma gémea e por quem tenho um amor incondicional.

Ao João, pela paciência, apoio e amor que me tem dado ao longo dos anos.

Aos meus amigos por todo o companheirismo e alegria que me trazem todos os dias.

Aos meus orientadores, Professora Fernanda Rodrigues e Professor Armando Martins, pelos conselhos, conhecimentos, confiança e motivação para realizar este trabalho.

Ao Eng.º Luís Mota, ao Eng.º Pedro Gaiato e à Eng.ª Andreia Grossinho, da IP, pela constante receptividade, orientação e apoio técnico prestados ao longo do desenvolvimento do caso de estudo.

Ao Ricardo Rodrigues, encarregado da Somafel, pela disponibilidade e pela clareza com que explicou os diversos procedimentos executados em obra.

Ao Eng.º Gaspar Acosta Ramírez e ao Eng.º Gaspar Acosta Flaqué, da ACosta Ingenieros, pela acessibilidade demonstrada e pela pronta resposta às diversas dúvidas relacionadas com as travessas sintéticas.

Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

A autora

Lisboa, 27 de dezembro de 2025

Alternativas à Utilização de Travessas de Madeira Creosotadas na Via-Férrea

Resumo

As travessas de madeira tratadas com creosoto, devido ao seu baixo custo, facilidade de instalação e desempenho satisfatório em serviço, foram, durante várias décadas, um dos elementos estruturais mais utilizados na via-férrea. Contudo, fruto de estudos realizados, constatou-se que o creosoto é uma substância com efeitos comprovadamente nocivos para a saúde humana e para o ambiente, pelo que a sua utilização tem vindo a ser fortemente restringida nomeadamente pela Comunidade Europeia que aprovou legislação nesse sentido.

Esta nova realidade, coloca ao setor ferroviário a necessidade de encontrar alternativas que assegurem o mesmo nível de desempenho estrutural, mas que sejam seguros ao nível da saúde, mas igualmente sustentáveis em termos ambientais.

Neste enquadramento, a presente dissertação centra-se no estudo das alternativas às travessas de madeira creosotadas, com ênfase nas soluções sintéticas, assumidas como produtos inovadores e ainda de carácter pioneiro no panorama ferroviário nacional. Com esse objetivo, procede-se a uma caracterização das diferentes tipologias de via-férrea (balastradas e não balastradas), analisando as suas condições de utilização, vantagens, desvantagens e limitações, sendo igualmente sistematizadas as principais opções atualmente disponíveis para substituição das travessas de madeira.

No documento é igualmente feita uma caracterização e análise de processos de fabrico, propriedades mecânicas e aspetos normativos associados às novas soluções de travessas, procurando avaliar a sua aplicabilidade em diferentes contextos ferroviários e reforçar o seu potencial enquanto solução tecnológica emergente.

Finalmente, no âmbito do caso de estudo é dada especial atenção à substituição das travessas de madeira atualmente instaladas na ponte de Alferrarede na Linha da Beira Baixa, envolvendo não só os aspetos inerentes à montagem, mas também o posterior desempenho em serviço, incluindo a definição de indicadores para um futuro plano de monitorização. Na fase inicial de produção do presente documento foi prevista a substituição de travessas na ponte da Várzea, igualmente na Linha da Beira Baixa, não tendo a mesma sido acompanhada, fruto da reprogramação da ação pela IP para 2026.

Palavras-chave: via-férrea, creosoto, travessas de madeira, travessas sintéticas, travessas compósitas, sustentabilidade.

Alternatives to the Use of Creosoted Wooden Railway Sleepers

Abstract

Creosote-treated wooden sleepers, due to their low cost, ease of installation, and satisfactory in-service performance, were used for several decades among the most widely used structural elements in railway tracks. However, as result of conducted studies, it has been established that creosote is a substance with proven harmful effects on human health and the environment, and its use has therefore been subject to strong restrictions, notably by the European Community, which has approved legislation to that effect.

This new reality imposes on the railway sector the need to find alternatives that ensure the same level of structural performance while being safe in terms of health and environmentally sustainable.

Within this framework, the present dissertation focuses on the study of alternatives to creosote-treated wooden sleepers, with an emphasis on synthetic solutions, regarded as innovative products that are still of a pioneering nature within the national railway context. To this end, the different types of railway track (ballasted and ballastless) are characterized by analyzing their conditions of use, advantages, disadvantages, and limitations, while also systematizing the main options currently available for replacing wooden sleepers.

The document also includes a characterization and analysis of manufacturing processes, mechanical properties, and regulatory aspects associated with these new sleeper solutions, seeking to assess their applicability in different railway contexts and to reinforce their potential as an emerging technological solution.

Finally, within the scope of the case study, special attention is given to the replacement of the wooden sleepers currently installed on the Alferrarede Bridge on the Beira Baixa Line, addressing not only aspects related to installation but also subsequent in-service performance, including the definition of indicators for a future monitoring plan. At the initial stage of preparation of this document, the replacement of sleepers on the Várzea Bridge, also on the Beira Baixa Line, had been planned; however, this intervention was not monitored due to the rescheduling of the works by IP to 2026.

Keywords: railway track, creosote, wooden sleepers, synthetic sleepers, composite sleepers, sustainability.

Lista de siglas e abreviaturas

AMV – Aparelho de Mudança de Via

ASL – *Asphalt Supportive Layer* (Camada de Mistura betuminosa)

BC – Barra Curta

BLS – Barra Longa Soldada

CAM – *Cement Asphalt Mortar* (Argamassa de cimento asfáltico)

CBL – Concrete bearing layer (Camada ligada com cimento)

CSL – Concrete Supportive Layer (Laje de betão)

ERS – Embedded Rail Structure (Sistema de carril embebido)

FFC – Feste Fahrbahn Crailsheim

FFU – Fibre-reinforced Foamed Urethane

FPL – Frost Protective Layer (Camada de proteção contra o gelo)

HBL – Hydraulically-Bonded Layer (Agregados tratados com ligante hidráulico)

HBS – Heavy Base Slab (Laje de base pesada)

HDPE – Polietileno de Alta Densidade

IP – Infraestruturas de Portugal

LCA - Análise de Ciclo de Vida

NO – Noroeste

SE – Sudeste

STA – Slab Track Austria

TBB – Travessa de Betão Bi-Bloco

TBM – Travessa de Betão Monobloco

Terminologia

Dada a especificidade das matérias abordadas no presente documento, em particular no âmbito da matéria ferroviária, entende-se como útil a apresentação de algumas terminologias utilizadas na Infraestruturas de Portugal (IP) e que são apresentadas na sua página eletrónica ([Terminologia | Infraestruturas de Portugal](#)).

Agulha - Aparelho de via constituído por carris, lanças e outras peças mecânicas, que se destina a assegurar a ligação tangencial de duas vias, permitindo a circulação dos comboios quer numa quer noutra via.

Aparelho de mudança de via (AMV) - Abreviadamente designado por AMV, é o dispositivo que se usa para fazer passar o material circulante, tangencialmente, de uma linha para outra, assegurando a continuidade da via para um determinado caminho. É constituído por grades (carris e peças especiais obtidas a partir de carris, maquinando-os ou por fundição, apoiados e solidarizados por travessas de comprimentos variáveis). Os AMV são identificados, para além do seu tipo, pelo valor da tangente do ângulo de abertura entre a via direta e a via desviada, a que corresponde também o ângulo da cróssima. É costume designar um AMV por Agulha.

Assentamento da via - Instalação da superestrutura da via (balastro, travessas e carris).

Eixo da via - Lugar geométrico dos pontos, no plano da via, equidistantes dos carris.

Escala da curva - Diferença de altura entre o carril da fila interior (fila baixa) e o da fila exterior (fila alta).

Material de via - Designação usada para os materiais e equipamentos do armamento de uma via-férrea.

Plataforma da via - Superfície de apoio da superestrutura de via que configura o espaço necessário à implantação dos diversos equipamentos indispensáveis ao funcionamento da circulação ferroviária. Corresponde ao limite superior da camada de sub-balastro, em linhas novas e renovadas e à plataforma de terraplenagem, em linhas existentes.

Plena via - Designação por que é conhecido o troço de via entre estações.

Ramo desviado - Elemento do ramo intermédio de um AMV (aparelho de mudança de via), constituído pelos carris da via desviada.

Resistência lateral da via - Resistência das travessas ao seu deslocamento lateral no seio do balastro. Deve ser tão grande quanto possível, para impedir que esforços térmicos nos carris ou esforços transmitidos pelos veículos possam provocar um deslocamento transversal da via. Esta resistência é aumentada, por exemplo, através da compactação do balastro, do alargamento da sua banqueteta e da instalação de chapas de ancoragem de travessas (resistência ao caminhamento).

Sabotagem da travessa - Corte a fazer na madeira para dar aos carris a necessária inclinação transversal.

Superestrutura da via - Na via tradicional, é constituída por carris, travessas, balastro, dispositivos de ligação e de fixação. Em troços de via experimentais, os carris apoiados em palmilhas, são fixados sobre dados que apoiam em laje de betão (simples ou armado), construída sobre a plataforma e dispensando o balastro e as travessas.

Tombo do carril - Ligeira inclinação do eixo vertical do carril, para o interior da via, a fim de garantir uma perfeita adaptação da face superior da cabeça (mesa de rolamento) ao aro dos rodados dos veículos, compensando a elasticidade da alma que, sob o efeito das cargas, se deforma. Em Portugal, esta inclinação é de 1:20, nas vias renovadas e de 1:15 nas vias clássicas não renovadas.

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Metodologia utilizada	3
1.3	Estrutura do Documento	3
2	A VIA-FÉRREA	5
2.1	Via balastrada	6
2.1.1	Subestrutura	7
2.1.2	Superestrutura	9
2.1.3	Vantagens e desvantagens da Via Balastrada	20
2.2	Via não balastrada	21
2.2.1	Sistemas com travessas apoiadas sobre laje ou mistura betuminosa	22
2.2.2	Sistemas com travessas embebidas em laje	25
2.2.3	Sistemas sem travessas, betonadas <i>in situ</i>	27
2.2.4	Sistemas sem travessas, pré-fabricadas	28
2.2.5	Carril embebido na laje	31
2.2.6	Vantagens e desvantagens da Via não Balastrada	34
2.3	Via Balastrada <i>versus</i> Via não Balastrada	35
3	ALTERNATIVAS ÀS TRAVESSAS DE MADEIRA CREOSOTADAS	37
3.1	Processo de creosotagem	37
3.2	Legislação relativa à utilização de Creosoto	39
3.3	Travessas Sintéticas	40
3.3.1	Com incorporação de elementos em plástico e/ou borracha	41
3.3.2	Com reforço de fibras	46
3.4	Travessas de Madeira <i>versus</i> Travessas Sintéticas	54
3.5	Outras soluções	55
4	CASO DE ESTUDO – PONTES DE ALFERRAREDE E DA VÁRZEA	57
4.1	Ponte de Alferrarede	57
4.1.1	Superestrutura de Via - Situação Inicial	58
4.1.2	Superestrutura de Via - Situação Final	60
4.2	Ponte da Várzea	73
4.2.1	Superestrutura de Via - Situação Inicial	74
4.2.2	Superestrutura de Via - Situação Final	76
4.3	Acompanhamento do Desempenho em Serviço	77
4.3.1	Indicadores	77
4.3.2	Plano de Monitorização	79
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	81
5.1	Conclusões	81
5.2	Recomendações (Trabalho futuro)	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

Índice de figuras

Figura 2.1 – Via-Férrea enquanto Sistema Guiado	5
Figura 2.2 – Via em Ponte Metálica (Ponte 25 de Abril).....	6
Figura 2.3 – Via em Dique (Estação de Zaragoza-Delicias).....	6
Figura 2.4 – Via em Túnel (Pragal).....	6
Figura 2.5 – Via betonada (Estação de Zaragoza-Delicias).....	6
Figura 2.6 – Via balastrada (Estação de Coima).....	6
Figura 2.7 – Esquema estrutural da via balastrada em perfil longitudinal.....	7
Figura 2.8 – Esquema estrutural da via balastrada em perfil transversal	7
Figura 2.9 – Secções no carril (Vignole e de Gola).....	9
Figura 2.10 – Características das travessas de madeira	12
Figura 2.11 – Travessa de betão monobloco	14
Figura 2.12 – Travessas de betão monobloco polivalentes	14
Figura 2.13 – Travessas de betão monobloco polivalentes (bitolas)	14
Figura 2.14 – Travessas de betão bi-bloco.....	15
Figura 2.15 – Travessa de betão bi-bloco, exemplo esquemático	15
Figura 2.16 – Fixação rígida	16
Figura 2.17 – Fixação Nabla	17
Figura 2.18 – Fixação Vossloh.....	17
Figura 2.19 – Fixação Pandrol	17
Figura 2.20 – Balastro para encastramento das travessas	19
Figura 2.21 – Diferentes soluções de via não balastrada.....	21
Figura 2.22 – Diversas conceções de via em laje	22
Figura 2.23 – Sistematização dos vários sistemas de via não balastrada	22
Figura 2.24 – Sistema ATD.....	23
Figura 2.25 – Sistema Getrac	23
Figura 2.26 – Sistema Stedef	24
Figura 2.27 – Sistema Sonnevile	24
Figura 2.28 – Sistema Rheda 2000	25
Figura 2.29 – Sistema Züblin	26
Figura 2.30 – Sistema Heitkamp.....	27
Figura 2.31 – Sistema FFC.....	28
Figura 2.32 – Sistema Shinkansen	28
Figura 2.33 – Sistema FF Bögl	29
Figura 2.34 – Sistema ÖBB-PORR.....	30
Figura 2.35 – Sistema Edilon, em carril de vignole e em carril de gola.....	31
Figura 2.36 – Elementos constituintes do sistema anti-ruído da Vossloh	32
Figura 2.37 – Sistema anti-ruído da Vossloh.....	32
Figura 2.38 – Sistema QTrack	33
Figura 2.39 – Sistema QTrack em carril de vignole e carril de gola	33
Figura 3.1 – Autoclave utilizada no processo de creosotagem	38
Figura 3.2 – Reservatórios utilizados no processo de creosotagem	38

Figura 3.3 – Sistema de controlo de processo de creosotagem atual	38
Figura 3.4 – Sistema de controlo de processo de creosotagem não automatizado.....	38
Figura 3.5 – Travessas Tie-Tek	42
Figura 3.6 – Travessas Axion	43
Figura 3.7 – Travessas IntegriCo.....	44
Figura 3.8 – Travessas KLP.....	45
Figura 3.9 – Travessas Sintéticas FFU (Tipo 2) da Sekisui	49
Figura 3.10 – Processo de fabrico das travessa FFU	49
Figura 3.11 – Produção de travessas FFU à medida	50
Figura 3.12 – Travessas FFU numa ponte na linha de alta velocidade de Shinkansen Tóquio-Osaka (270 km/h).....	50
Figura 3.13 – Método de reparação das Travessas FFU	51
Figura 3.14 – Travessa FFU aplicada em passagem de nível	52
Figura 3.15 – Travessas FFU, Austrália	52
Figura 3.16 – Travessas FFU Alemanha	52
Figura 3.17 – Travessas FFU, Rússia	52
Figura 3.18 – Travessas FFU, Estados Unidos	52
Figura 4.1 – Localização das pontes de Alferrarede e da Várzea.....	57
Figura 4.2 – Ponte de Alferrarede, vista inferior	57
Figura 4.3 – Ponte de Alferrarede, vista superior	57
Figura 4.4 – Diagrama Unifilar. Ponte de Alferrarede.....	58
Figura 4.5 – Ponte de Alferrarede.....	58
Figura 4.6 – Ponte de Alferrarede, distribuição das travessas	59
Figura 4.7 – Ponte de Alferrarede, Travessas degradadas.....	59
Figura 4.8 – Ponte de Alferrarede, Fixação das Travessas à estrutura	59
Figura 4.9 – Ponte de Alferrarede, manutenção / reabilitação da componente metálica.....	60
Figura 4.10 – Sistema de fixação da travessa à estrutura, em reta	60
Figura 4.11 – Armazenamento das Travessas FFU no Complexo Logístico do Entroncamento da IP	62
Figura 4.12 – Levantamento das travessas no local de armazenamento e seu deslocamento para o exterior	63
Figura 4.13 – Transporte das travessas entre o armazém e o camião-grua e sua colocação neste.....	63
Figura 4.14 – Travessas acomodadas no camião de transporte e sua chegada ao Estaleiro (Antiga estação das Mouriscas).....	63
Figura 4.15 – Cintagem e elevação das travessas.....	64
Figura 4.16 – Movimentação das travessas entre o camião e o cais coberto.....	64
Figura 4.17 – Numeração individual das travessas	65
Figura 4.18 – Plano de assentamento	65
Figura 4.19 – Marcação da mesa de assentamento	66
Figura 4.20 – Execução de cortes de referência	66
Figura 4.21 – Desbaste Manual e alisamento da superfície.....	66
Figura 4.22 – Corte das travessas para acomodar as cantoneiras metálicas.....	67
Figura 4.23 – Tupia elétrica montada sobre gabarito metálico.....	67

Figura 4.24 – Execução das furações para a ancoragem das cantoneiras	67
Figura 4.25 – Travessa sabotada para receber as cantoneiras metálicas	67
Figura 4.26 – Pormenor da sabotagem para as cantoneiras	67
Figura 4.27 – Aspeto final da travessa sabotada	68
Figura 4.28 – Local de transbordo do material para a via-férrea.....	68
Figura 4.29 – Transporte do material com recurso a dresina de tração manual.....	69
Figura 4.30 – Execução de trabalhos preparatórios	69
Figura 4.31 – Desaperto das cantoneiras nas travessas a substituir	70
Figura 4.32 – Desaperto das fixações nas travessas localizadas nos encontros	70
Figura 4.33 – Desaperto das fixações das travessas FFU colocadas na noite anterior	70
Figura 4.34 – Elevação do carril recorrendo a macacos hidráulicos ferroviários	70
Figura 4.35 – Remoção das travessas a substituir.....	70
Figura 4.36 – Instalação das novas travessas FFU	70
Figura 4.37 – Colocação das palmilhas sobre os chapins	71
Figura 4.38 – Retirada dos macacos hidráulicos na fila direita	71
Figura 4.39 – Alinhamento das travessas.....	71
Figura 4.40 – Aperto das cantoneiras	71
Figura 4.41 – Verificação e correção da bitola	71
Figura 4.42 – Execução das furações para os chapins	71
Figura 4.43 – Aperto dos chapins	71
Figura 4.44 – Montagem das fixações	71
Figura 4.45 – Travessas de FFU colocadas na noite de acompanhamento da obra (total de 11 travessas).....	72
Figura 4.46 – Ponte de Alferrarede Finalizada	72
Figura 4.47 – Ponte de Alferrarede, novas cantoneiras e fixações	73
Figura 4.48 – Ponte da Várzea, vista inferior.....	73
Figura 4.49 – Ponte da Várzea, vista superior.....	73
Figura 4.50 – Diagrama Unifilar. Ponte da Várzea	74
Figura 4.51 – Ponte da Várzea, sentido NE-SO	74
Figura 4.52 – Ponte da Várzea, Travessas já substituídas	74
Figura 4.53 – Ponte da Várzea, Travessas trapezoidais	75
Figura 4.54 – Ponte da Várzea, distribuição das travessas	75
Figura 4.55 – Ponte da Várzea, Travessas degradadas	75
Figura 4.56 – Ponte da Várzea, Fixação das Travessas à estrutura	76
Figura 4.57 – Ponte da Várzea, manutenção / reabilitação da componente metálica	76
Figura 4.58 – Sistema de fixação da travessa à estrutura, em curva.....	77

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Tipos de Carril e sua aplicação.....	10
Quadro 2.2 – Características dimensionais/peso das travessas de madeira.....	13
Quadro 2.3 – Vantagens e desvantagens das travessas de madeira e de betão.....	16
Quadro 2.4 – Fixações Vossloh.....	18
Quadro 2.5 – Fixações Pandrol.....	18
Quadro 2.6 – Vantagens e desvantagens dos sistemas ATD e Getrac.....	23
Quadro 2.7 – Vantagens e desvantagens dos sistemas Stedef e Sonnevile.....	24
Quadro 2.8 – Vantagens e desvantagens do sistema Rheda.....	26
Quadro 2.9 – Vantagens e desvantagens do sistema Züblin.....	26
Quadro 2.10 – Vantagens e desvantagens do sistema Heitkamp.....	27
Quadro 2.11 – Vantagens e desvantagens do sistema FFC.....	28
Quadro 2.12 – Vantagens e desvantagens do sistema Shinkansen.....	29
Quadro 2.13 – Vantagens e desvantagens do sistema FF Bögl.....	29
Quadro 2.14 – Vantagens e desvantagens do sistema ÖBB-PORR.....	30
Quadro 2.15 – Vantagens e desvantagens do sistema Edilon.....	31
Quadro 2.16 – Vantagens e desvantagens do sistema Vossloh.....	32
Quadro 2.17 – Vantagens e desvantagens do sistema QTrack.....	33
Quadro 2.18 – Análise comparativa entre via balastrada e via não balastrada.....	35
Quadro 3.1 – Tipos de Travessas sintéticas constituídas por plásticos.....	41
Quadro 3.2 – Parâmetros de Resistência das travessas Tie-Tek.....	43
Quadro 3.3 – Parâmetros de Resistência das travessas Axion.....	44
Quadro 3.4 – Parâmetro de resistência das travessas IntegiCo.....	44
Quadro 3.5 – Parâmetro de resistência das travessas KLP.....	46
Quadro 3.6 – Tipos de Travessas Sintéticas Tipo 1.....	47
Quadro 3.7 – Parâmetros de resistência das travessas Wood Core.....	48
Quadro 3.8 – Resultados dos estudos realizados pelo RTRI sobre travessas FFU.....	51
Quadro 3.9 – Tipos de Travessas Sintéticas Tipo 3.....	53
Quadro 3.10 – Parâmetros de resistência das travessas <i>Sandwich</i>	53
Quadro 3.11 – Parâmetros de resistência das travessas <i>Hybrid</i>	54
Quadro 3.12 – Comparação entre travessas de madeira e travessas sintéticas.....	55

1 INTRODUÇÃO

A via-férrea desempenha um papel crucial no desenvolvimento económico, social e ambiental das sociedades permitindo o transporte de pessoas de forma rápida e de mercadorias com elevadas capacidades de carga.

A sua infraestrutura de suporte pode ser diversa, sendo que maioritariamente esta se enquadra no âmbito das vias balastradas, nas quais os carris se encontram assentes sobre travessas e estas por sua vez encastradas no balastro, o qual de forma simplista se traduz num inerte britado, regra geral de natureza granítica.

Numa via balastrada, regra geral, as travessas utilizadas podem ser as seguintes:

- Travessas de betão (monobloco e bi-bloco);
- Travessas de madeira (pinho, madeira exótica, vulgarmente conhecida por azobé ou carvalho);
- Metálicas, sendo que estas não são utilizadas em Portugal.

Decorrente de estudos realizados terem concluído que os produtos utilizados para o tratamento das travessas de madeira de pinho (fungicidas) apresentam propriedades cancerígenas, foi emitida, pela Comissão Europeia, legislação (Diretiva 76/769/CEE) que irá conduzir à interdição de utilização de tais produtos fungicidas, sendo o mais utilizado o creosoto.

A interdição da utilização do creosoto levará a que as propriedades mecânicas das travessas fiquem fortemente debilitadas, uma vez que serão um alvo fácil das térmitas, provocando assim uma forte redução da vida útil das travessas.

Perante este problema, a que está associada uma necessária e rápida resposta, urge encontrar soluções alternativas, para a utilização de travessas não creosotadas, nas situações que as travessas clássicas, por exemplo em betão, tecnicamente não são possíveis.

Com a preocupação de assegurar soluções mais sustentáveis em termos ambientais, bem como constituir alternativas às travessas de madeira, matéria-prima cada vez mais escassa e mais cara, passaram igualmente a ser consideradas, embora com campos de aplicação mais restritos, as travessas sintéticas, obtidas a partir de fibra de vidro e as travessas sintéticas com incorporação de plástico reciclado podendo ainda incorporar fibras de vidro para efeitos do seu reforço estrutural.

Fruto da evolução tecnológica, constata-se que o mercado global das travessas sintéticas tem vindo a crescer rapidamente, traduzindo-se em inúmeras vantagens, incluindo uma elevada relação resistência / peso, excelente resistência à corrosão, humidade e insetos, além de não serem condutores térmicos ou elétricos.

Estes materiais podem ainda ser desenvolvidos de acordo com os requisitos específicos das travessas ferroviárias, nomeadamente no que se refere a dimensões, aspeto fundamental na aplicação em situações específicas.

Acredita-se assim que as travessas sintéticas podem ser uma alternativa viável às existentes, em particular às travessas de madeira, que embora com utilização decrescente ainda constituem uma necessidade em situações pontuais onde as travessas convencionais, por questões técnicas, não podem ser aplicadas. São disso exemplo a instalação em pontes metálicas, assentes sobre longarinas geralmente irregulares, bem como em túneis com *gabarit* insuficiente para a instalação dos componentes necessários à eletrificação da via.

O presente documento além de apresentar a caracterização dos diferentes tipos de via, em particular das vias balastradas e dos seus elementos constituintes, pretende contribuir para a implementação de soluções alternativas nos casos em que as soluções atuais são desvantajosas em termos económicos e ambientais, bem como dar resposta às imposições legislativas em vigor associadas à proibição de utilização de creosoto.

Apraz ainda registar que o caso prático apresentado (Instalação de travessas sintéticas nas pontes de Alferrarede e da Várzea, na Linha da Beira Baixa, para substituição das travessas atualmente instaladas), constitui uma situação pioneira neste domínio na Rede Ferroviária Nacional, sendo que a sua inclusão no presente documento só foi possível em resultado da valiosa colaboração existente entre a Infraestruturas de Portugal (IP) e o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). Importa, contudo, referir que a intervenção prevista para a Ponte da Várzea não chegou a ser implementada, tendo a mesma sido reprogramada pela IP para 2026.

1.1 Objetivos

Constitui objetivo do presente documento:

- A caracterização dos diferentes tipos de via-férrea, em particular das vias balastradas e não balastradas e dos seus elementos constituintes;
- A identificação / apresentação de soluções alternativas, para utilização em casos específicos, tendo em consideração dos diversos fatores envolvidos, nomeadamente as características estruturais e funcionais, a relação custo / benefício tanto em termos do investimento inicial como dos custos de manutenção ao longo da via útil destes elementos da superestrutura da via-férrea;
- Observação da instalação de travessas sintéticas em duas pontes na Linha da Beira Baixa (Alferrarede e Várzea), para substituição das travessas de madeira atualmente instaladas;

- Definição, com o apoio da IP, de alguns indicadores que possam constituir uma base credível para a avaliação do desempenho em serviço das travessas sintéticas agora instaladas;

1.2 Metodologia utilizada

A elaboração do presente TFM assentou na seguinte metodologia:

- Recolha bibliográfica e análise de informação ao nível da constituição da superestrutura de via;
- Recolha bibliográfica e análise de informação, junto de fabricantes e instaladores de travessas sintéticas;
- Reuniões técnicas com a IP para, numa fase inicial permitir a recolha de informação sobre soluções alternativas e posteriormente para o acompanhamento de trabalhos de campo (caraterização da situação atual e instalação de novas travessas nas pontes de Alferrarede e da Várzea) e ainda para a definição de indicadores que possam constituir uma base credível e funcional para a avaliação do desempenho em serviço das travessas sintéticas agora instaladas;
- Elaboração das conclusões e apresentação de propostas para trabalhos futuros neste domínio.

1.3 Estrutura do Documento

O presente documento contempla cinco capítulos, concretamente:

- Capítulo 1: Introdução
Apresenta-se a introdução, os objetivos, a metodologia seguida e a estrutura do documento.
- Capítulo 2: A Via-Férrea
Neste capítulo procede-se à apresentação dos dois principais tipos de via (balastrada e não balastrada), incluindo a identificação e função dos seus elementos constituintes. No final do capítulo, é ainda apresentada uma análise comparativa, identificando vantagens e desvantagens de cada um destes tipos de via.
- Capítulo 3: Alternativas à utilização de travessas de madeira creosotadas
Descrevem-se os diferentes tipos de soluções alternativas às travessas de madeira creosotadas, com especial foco nas travessas sintéticas, as quais foram divididas em dois grupos: com incorporação de elementos em plástico e/ou borracha e com reforço de fibras.

– Capítulo 4: Caso de Estudo – Pontes de Alferrarede e da Várzea

Neste capítulo, para cada ponte, procede-se à caracterização da situação existente e ainda à observação da instalação de travessas sintéticas para a substituição das atualmente ali instaladas.

Complementarmente definem-se um conjunto de indicadores para permitir o estabelecimento de um plano de monitorização para avaliar o comportamento da solução instalada ao longo do tempo.

– Capítulo 5: Conclusões e recomendações

Por fim, apresentam-se as conclusões e sugerem-se desenvolvimentos futuros no âmbito das alternativas à utilização de travessas de madeira, em especial as creosotadas.

2 A VIA-FÉRREA

No âmbito das Vias de Comunicação, a Via-Férrea é um sistema guiado, ou seja, os veículos são guiados pelo próprio caminho (Figura 2.1), sendo que uma das suas principais características se traduz numa elevada capacidade de carga, tanto ao nível do transporte de passageiros como de mercadorias, o que por sua vez conduz a relações de consumo de energia por passageiro ou tonelada transportada inferiores à generalidade dos restantes modos de transporte.



Figura 2.1 – Via-Férrea enquanto Sistema Guiado

A Via-Férrea caracteriza-se pelo conjunto de elementos que servem de suporte e guiamento aos veículos ferroviários e, apresenta duas partes distintas, a Subestrutura e a Superestrutura (Fernandes, 2011).

O comportamento da via-férrea está associado à interação entre os componentes que a constituem, em resposta às solicitações impostas pelo material circulante nas diversas condições ambientais. É essencial que cada componente cumpra a sua função, garantindo que o sistema é estável e resiliente, evitando deformações permanentes e desgastes prematuros dos seus elementos constituintes, cumprindo assim as exigências requeridas (Fortunato, 2005).

As soluções adotadas na via-férrea dita convencional, onde se excluem as redes de elétricos, metropolitanos de superfície e clássico, ascensores e sistemas de levitação magnética podem ser de diversos tipos, podendo as mesmas num primeiro nível ser classificadas em vias balastradas e vias não balastradas.

Regra geral, na plena via as linhas são maioritariamente em via balastrada, verificando-se, contudo, situações de via não balastrada nomeadamente em pontes metálicas (Figura 2.2), diques de inspeção (Figura 2.3), túneis (Figura 2.4) e ainda em estações de passageiros na zona das plataformas (Figura 2.5).



Figura 2.2 – Via em Ponte Metálica (Ponte 25 de Abril)



Figura 2.3 – Via em Dique (Estação de Zaragoza-Delicias)



Figura 2.4 – Via em Túnel (Pragal)



Figura 2.5 – Via betonada (Estação de Zaragoza-Delicias)

Embora em menor número, também existem redes em que as vias não balastradas assumem uma expressão significativa, sendo que estas podem ter como origem a escassez de material pétreo para a obtenção do balastro ou, em especial em linhas de alta velocidade, fruto da multiplicidade de variações de rigidez da plataforma, em resultado da existência de seções diferenciadas da plataforma ferroviária (aterro, escavação, túneis, viadutos...).

2.1 Via balastrada

A via balastrada (Figura 2.6) é uma solução estrutural que, pelas suas características, apresenta um bom comportamento dinâmico relativamente aos esforços provocados pelos veículos ferroviários (Fortunato, 2005).



Figura 2.6 – Via balastrada (Estação de Coima)

Na maioria dos casos, este tipo de via permite atingir e manter os requisitos de qualidade geométrica de forma mais económica, beneficiando do facto dos defeitos geométricos da via poderem ser corrigidos com maior facilidade, com equipamentos pesados de via (Fortunato, 2005).

Para melhor compreender a via balastrada, na Figura 2.7 e na Figura 2.8 ilustram-se os elementos que, por camadas a constituem. A subestrutura é constituída pelas camadas de apoio e pela fundação, e a superestrutura tem como seus constituintes os carris, as travessas equipadas com fixações (elementos de ligação) e o balastro.

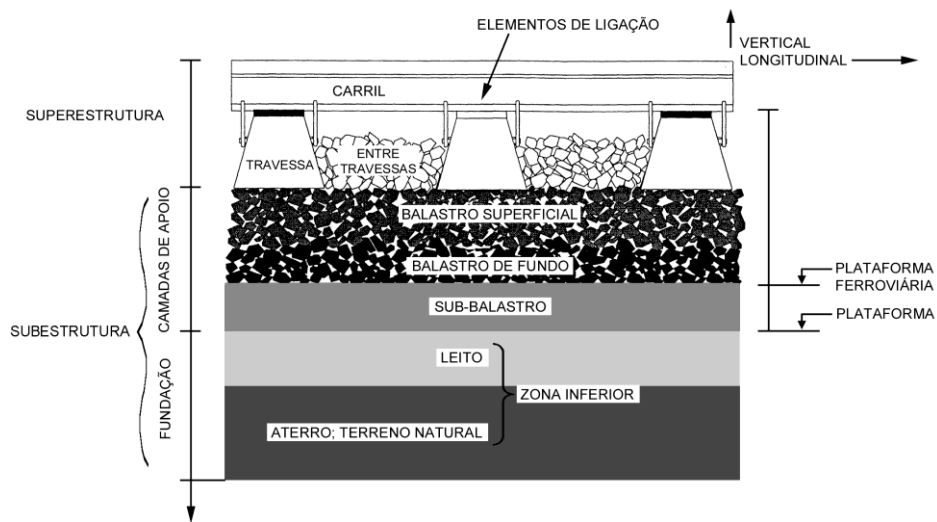


Figura 2.7 – Esquema estrutural da via balastrada em perfil longitudinal (Fortunato, 2005)

Pese o facto de alguns autores considerarem a camada de balastro (superficial e de fundo) na subestrutura, tal não é consensual, sendo maioritariamente considerado que o balastro, nas suas diferentes camadas, faz parte da superestrutura.

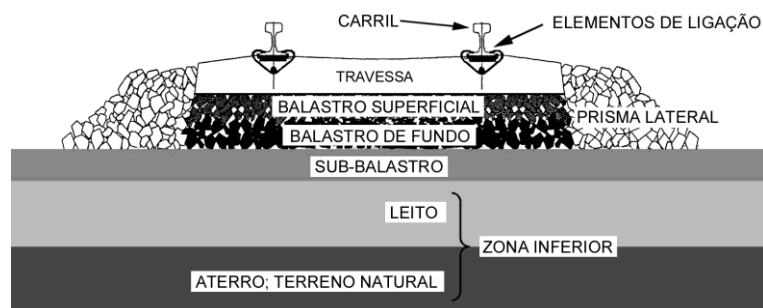


Figura 2.8 – Esquema estrutural da via balastrada em perfil transversal (Fortunato, 2005)

2.1.1 Subestrutura

Na subestrutura, a camada de sub-balastro estabelece a transição entre a camada de balastro e a fundação. Esta, apresenta como principais funções o aumento da capacidade resistente da plataforma e, conseqüentemente uma melhor distribuição dos esforços transmitidos pelas cargas rolantes. É, também, importante para a proteção

contra a ação do gelo e a evacuação das águas zenitais (água proveniente da chuva que atinge diretamente o solo ou a infraestrutura ferroviária) (Cabo, 2023).

O sub-balastro deverá ser pouco suscetível à deformação (elevado módulo de deformabilidade) e exibir baixa permeabilidade. Esta camada é geralmente composta por materiais selecionados, britados de granulometria extensa, contudo, quando se verifica escassez destes materiais pode ser necessário recorrer à utilização de camadas betuminosas para desempenharem a mesma função. Esta opção, embora permita obter módulos de deformabilidade elevados com espessuras inferiores e apresentar melhor proteção da fundação, em comparação com os materiais granulares convencionais, usualmente é a uma alternativa menos viável economicamente (Cabo, 2023).

No que diz respeito à camada de fundação, esta é composta pelos terrenos onde assenta o sub-balastro, estendendo-se em profundidade até ao ponto onde as solicitações do tráfego se fazem sentir de forma mais significativa. Segundo Li e Selig (1995), essa profundidade pode atingir sete a oito metros abaixo da base da travessa, contudo, usualmente a maior preocupação com as características do terreno estabelece-se na ordem de 1 a 2 metros abaixo da base da travessa (Fortunato, 2005).

A fundação desempenha um papel fundamental na qualidade e no desempenho da via quando está sujeita a cargas repetidas dos comboios, uma vez que contribui de forma significativa para a deformação reversível e permanente, medidas ao nível do carril, e influencia a degradação dos elementos da superestrutura e do balastro (Fortunato, 2005).

Regra geral, o dimensionamento da plataforma rege-se pela da ficha UIC 719R, 2ª edição de 01.01.94, designada por "*Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaires*". (Atualmente IRS 70719), sendo que em termos práticos, o referido dimensionamento está associado a diversas variáveis, sendo de destacar as seguintes:

- **Tipo de exploração ferroviária**, nomeadamente, o tipo de composições, a sua tonelage por eixo, a carga anual de circulação na linha e a velocidade máxima de circulação;
- **Características dos materiais de via utilizados**, nomeadamente o tipo de carril, o tipo e espessura de balastro, o tipo de travessas e fixações e o espaçamento utilizado para colocação das travessas;
- **Natureza, capacidade de carga, estado hídrico, permeabilidade e condições hidrológicas e hidrogeológicas dos solos** constituintes da plataforma, que suportam o assentamento da superestrutura de via.

Relativamente a esta matéria e em termos conclusivos é importante reter o seguinte:

- **A capacidade de suporte da plataforma** é determinante em termos das **necessidades decorrentes das cargas previstas e dos custos associados à manutenção de via**;
- Uma plataforma **com rigidez baixa, pouca capacidade de carga**, tem como consequência **trabalhos de manutenção e nivelamento da linha muito frequentes**;
- Por sua vez, uma plataforma **muito rígida pode acelerar o desgaste do balastro e a degradação do restante material da superestrutura**.

2.1.2 Superestrutura

Procede-se em seguida, embora não de forma exaustiva, à explicitação de cada um dos componentes da superestrutura, concretamente carris, travessas, fixações e balastro.

2.1.2.1 Carris

Os carris são responsáveis pelo guiamento dos rodados do material circulante e pela transmissão às travessas, das forças que lhe são impostas. Estes, devem apresentar uma superfície de rolamento lisa de modo que a circulação das composições se faça de forma cómoda e segura. Caso se verifiquem irregularidades, estas irão contribuir para as solicitações dinâmicas na via (Leite, 2017).

Em termos práticos, os carris não são mais do que vigas em aço, muito esbeltas e regra geral envolvendo 3 seções (cabeça, alma e patilha), conforme se ilustra na Figura 2.9.

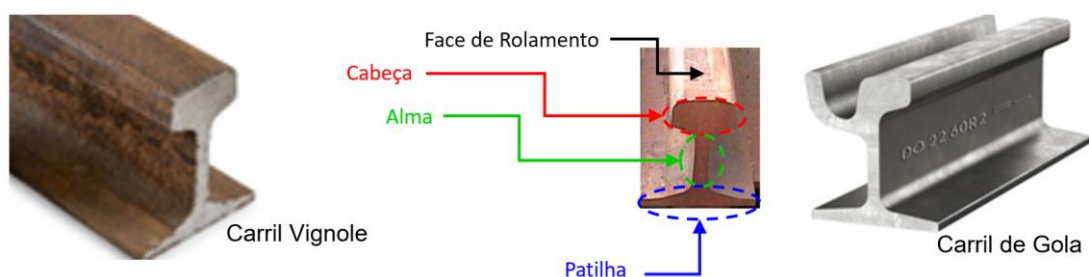


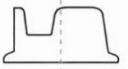




Figura 2.9 – Secções no carril (Vignole e de Gola)
(adaptado de: *Rail Sections · GB-Rail · UK Light Rail and Accessories Specialists*, sem data)

Existem diversos tipos de carris, sendo o mais usual o carril Vignole, utilizado em via convencional e em alguns tipos de via não balastrada. No Quadro 2.1, encontram-se representados alguns tipos (seções) de carril.

Quadro 2.1 – Tipos de Carril e sua aplicação
(adaptado de: Oliveira, 2012)

Tipo de carril	Designação	Aplicação
	Carril de Vignole	Normalmente em via convencional e em certos tipos de via não balastrada
	Carril de Construção	Linhas em indústria de construção automóvel e AMV
	Carril de Gola	Via destinada a carregamentos de menores dimensões e passagem de nível
	Carril Baixo	Via destinada a carregamentos de menores dimensões e passagem de nível
	Carril Baixo	Via não balastrada, apoio em laje
	Carril de Grua	Via sujeita a carregamentos muito elevados

Os carris necessitam de apresentar rigidez suficiente para funcionarem como vigas que transferem cargas concentradas das rodas para as travessas. Com o movimento do material circulante, as forças resultantes das cargas envolvidas estabelecem uma onda com um determinado comprimento ao carril, que se propaga com determinado deslocamento. Caso se verifique uma amplitude excessiva, produzem-se efeitos indesejados, como o aumento da resistência ao rolamento e o aumento da deterioração das travessas e do balastro (Fortunato, 2005).

Atualmente, é prática comum a construção de vias-férreas constituídas por carris soldados entre si, portanto sem juntas, designando-se por Barras Longas Soldadas (BLS). A construção de vias-férreas em Barra Curta (BC) está praticamente em desuso, sendo aplicadas em situações pontuais, nomeadamente em zonas do traçado com raios muito reduzidos.

Uma via em BLS, quando comparada com uma via em BC, apresenta diversas vantagens, em particular a menor deterioração dos componentes da via, traduzindo-se num menor número de operações de conservação, menor oscilação dos veículos e menor produção de vibrações e ruído, oferecendo, um melhor nível de conforto. Contudo, a via em BLS está sujeita a maiores esforços internos devido às variações de temperatura, tornando mais difícil a sua substituição e obrigando a um investimento inicial mais elevado (Fortunato, 2005).

2.1.2.2 Travessas

As travessas são os componentes estruturais colocados entre os carris e o balastro. As suas funções são bastante importantes, destacando-se:

- Receber as cargas provenientes dos carris e transmiti-las para a camada de balastro com tensões aceitáveis;
- Suportar o sistema de fixação dos carris;
- Contrariar os movimentos transversais, laterais e longitudinais dos carris;
- Garantir a distância entre as duas filas de carris (bitola).

Os parâmetros de maior relevância neste elemento estrutural são as dimensões, que influenciam a área de apoio disponível para reduzir as tensões transmitidas à camada de balastro e, o peso, que influencia a estabilidade longitudinal e transversal da via. É essencial referir também a importância do espaçamento entre travessas consecutivas, que normalmente é de 60 cm em linhas convencionais e linhas de alta velocidade (Fernandes, 2011).

Para uma melhor compreensão deste elemento da via balastrada, procede-se em seguida a uma análise mais detalhada das principais travessas de madeira e de betão utilizadas na via-férrea.

a) Travessas de Madeira

As travessas de madeira foram as primeiras a ser utilizadas nas vias-férreas, visto que são de fácil fabrico e manuseamento, bem como asseguram uma boa interação com o balastro, contudo, nem sempre garantem uma eficaz fixação do carril. O período de vida útil destes elementos é bastante variável, principalmente devido às características da madeira, no que se refere à sua densidade, dureza, capacidade de absorção e durabilidade (Leite, 2017).

Estas travessas, quando comparadas com as de betão apresentam algumas vantagens, no que se refere à maior flexibilidade, melhor distribuição de cargas e peso mais reduzido, que facilita o seu manuseamento e transporte para obra, bem como o seu menor custo (Carvalho, 2020).

De modo a assegurar a inclinação transversal necessária ao posicionamento dos carris (tombo), procede-se à sabotagem das travessas, que se traduz no corte de dois entalhes nas travessas, sendo os mesmos efetuados por meios manuais ou por meios mecânicos em fábrica. As mesas de sabotagem e os furos (perpendiculares às mesas de sabotagem) são realizadas de acordo com o tipo de carril e as fixações a utilizar. A furação terá de ser completa, atravessando toda a travessa, assegurando o escoamento

das águas. O afastamento entre os furos varia de acordo com o tipo de material e o tipo de fixações (Ferreira, 2010).

Na Figura 2.10, ilustram-se algumas das características das travessas de madeira.

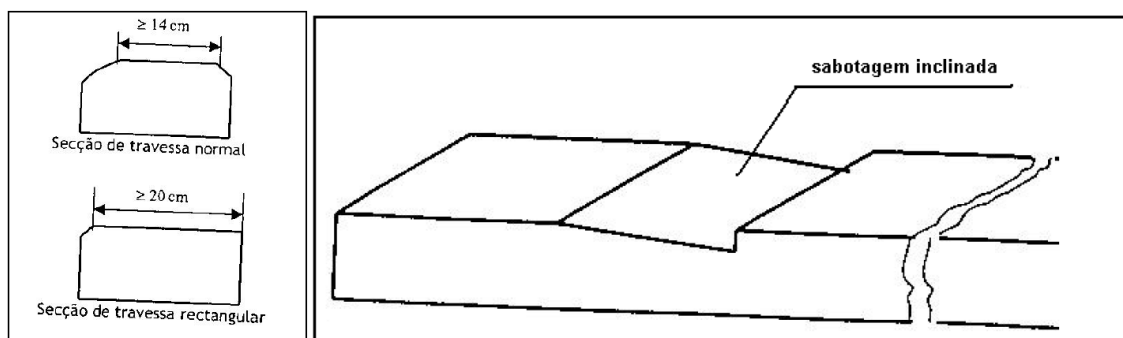


Figura 2.10 – Características das travessas de madeira (Ferreira, 2010)

As travessas de madeira, embora continuem presentes em grande parte das vias-férreas portuguesas, estão em desuso devido aos problemas que apresentam durante a sua vida útil. Em seguida identificam-se os principais problemas que lhe estão associados, segundo Mourão (2017):

- Combustão: são um alvo fácil à propagação de incêndios. Mesmo com os tratamentos a que são sujeitas estes não permitem a total proteção contra a propagação do fogo;
- Degradação por microrganismos: a extensa exposição aos agentes climatéricos degrada não só a travessa como o tratamento a que a mesma foi sujeita contra estes microrganismos;
- Degradação da capacidade de fixação: a resistência da madeira vai sendo degradada devido às solicitações a que está sujeita. As fixações são um dos primeiros elementos a ceder;
- Destruição total ou parcial da travessa: pode ocorrer numa emergência, devido a um descarrilamento ou a uma queda de carga do material circulante.

Regra geral, as travessas mais utilizadas na via-férrea são as travessas de madeira de Pinho (*Pinus pinaster Ait.*) na plena via, e Carvalho e Azobé (*Lophira alata Banks ex. Gaernt.f.*) nos Aparelhos de Mudança de Via (AMV) ou em pontes metálicas.

A norma “NP EN 13145:2001 – Aplicações ferroviárias. Via. Travessas de madeira vulgares e especiais para aparelhos de mudança de via (AMV)”, define os requisitos de qualidade, a origem, as condições de fabrico, as formas, as dimensões e as tolerâncias das travessas, abrangendo também aspetos relacionados com a durabilidade e o tratamento preservador das travessas vulgares e especiais de madeira utilizadas nas vias-férreas.

No Quadro 2.2, apresentam-se as principais características dimensionais/peso das travessas de madeira.

Quadro 2.2 – Características dimensionais/peso das travessas de madeira.
(adaptado de: Ferreira, 2010)

Tipo	Gama	Qualidade	Traçado	Comprimento (m)	Dimensões	
					Largura (m)	Altura (m)
Via corrente	Via larga			2,60 ou 2,80	0,26	0,13
	Via estreita			1,85	0,24	0,12
Aparelho de via	Via larga	Pinho		Variável de 0,20 em 0,20 desde 2,80 a 5,20	0,26	0,14
		Azobé		Variável de 0,20 em 0,20 desde 2,80 a 5,20	0,26	0,16
Ponte	Via larga	Pinho	Em recta	2,60 ou 2,80	0,26 ou 0,30	0,14
			Em curva	2,60 ou 2,80	0,26 ou 0,30	Variável
	Via estreita		Em curva	1,80	0,28	Variável

b) Travessas de Betão

As travessas de betão têm como maior particularidade a seu favor, o facto de atingirem um período de vida útil que ronda os 50 anos. São elementos bastante resistentes, e, devido ao seu elevado peso volumétrico apresentam uma elevada resistência ao deslocamento lateral, pelo que resistem melhor ao aparecimento de defeitos de alinhamento, permitindo a circulação de cargas por eixo mais elevadas (Valente, 2014).

As travessas de betão apresentam dois tipos distintos, as Travessas de Betão Monobloco (TBM), pré ou pós-esforçadas e as Travessas de Betão Bi-bloco (TBB), que são constituídas por dois blocos de betão armado ligados entre si por uma cantoneira metálica.

As TBM (Figura 2.11) têm um peso próprio significativamente mais elevado quando comparadas com as TBB, o que lhes proporciona maior estabilidade e resistência à via, permitindo que sejam aplicadas velocidades superiores e transporte de cargas de mercadorias mais elevadas. Este tipo de travessa é constituído por aço de elevada resistência e betão com uma grande quantidade de cimento e inertes de dimensões mais reduzidas (Leite, 2017).

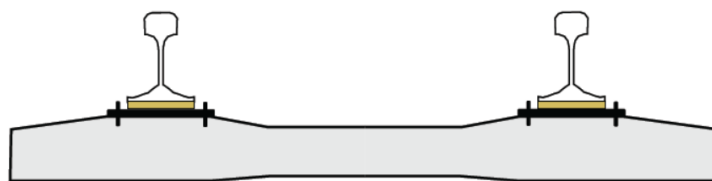


Figura 2.11 – Travessa de betão monobloco (Vale, 2010)

Durante largo período, verificou-se um grande problema com estas travessas, provocado pelo momento fletor negativo verificado a meio vão, originando fendilhamento deste elemento estrutural (Leite, 2017). De modo a resolver a presente questão, desenvolveu-se a TBM que é utilizada aos dias de hoje, mais esbelta a meio vão, onde anteriormente se verificava o momento fletor negativo. Ainda assim, são necessários cuidados especiais na sua manipulação e aplicação na via, nomeadamente o posicionamento da travessa na prumada da mesa de assentamento do carril sobre dois cordões de balastro.

Uma característica interessante das TBM é a existência de travessas polivalentes (Figura 2.12 e Figura 2.13) que permitem a fixação do carril segundo a bitola ibérica (1668mm) ou a bitola europeia (1435mm).



Figura 2.12 – Travessas de betão monobloco polivalentes



Figura 2.13 – Travessas de betão monobloco polivalentes (bitolas)

As principais vantagens do uso das TBM quando comparadas com as TBB são as seguintes:

- Maior área de encastramento na camada de balastro;
- Maior estabilidade, permitindo maiores velocidades e cargas;
- Melhor manutenção da bitola;
- Diminuição das operações de manutenção.

As TBB (Figura 2.14 e Figura 2.15), são usualmente utilizadas em zonas de traçado sinuoso e onde o solo não apresenta compacidade capaz de suportar o peso excessivo das TBM (Leite, 2017). São analogamente utilizadas em zonas instáveis, com

dificuldade de manutenção, nomeadamente ao nível do seu nivelamento (Carvalho, 2020).



Figura 2.14 – Travessas de betão bi-bloco

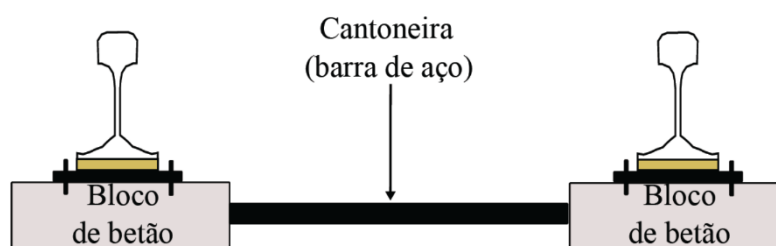


Figura 2.15 – Travessa de betão bi-bloco, exemplo esquemático (Vale, 2010)

As travessas de betão são amplamente utilizadas devido à sua grande durabilidade, resistência a cargas pesadas, ao fogo e à ação de agentes climáticos, além de exigirem pouca manutenção e terem boa estabilidade dimensional. Contudo, apresentam peso elevado, são difíceis de reciclar, podem sofrer fissuras com o tempo e têm custos iniciais mais altos. Já as travessas de madeira, apesar de serem mais económicas, leves e fáceis de manusear e instalar, oferecem flexibilidade estrutural e menor impacto ambiental (quando provenientes de fontes sustentáveis). Porém, têm menor vida útil, necessitam de tratamentos químicos regulares, são vulneráveis a pragas e humidade, podem deformar-se ou apodrecer, e requerem substituições mais frequentes.

De modo a melhor compreender e sumarizar as principais vantagens e desvantagens das travessas referidas no presente capítulo, estas resumem-se no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Vantagens e desvantagens das travessas de madeira e de betão

Tipo de Travessa	Vantagens	Desvantagens
Betão	<ul style="list-style-type: none"> – Elevada durabilidade – Resistência ao fogo – Suporta grandes cargas – Baixa manutenção – Não sofre ataque de pragas – Estabilidade dimensional 	<ul style="list-style-type: none"> – Peso elevado – Custo inicial mais alto – Difícil instalação e transporte – Risco de fissuras – Menos recicláveis – Maior impacto ambiental na produção
Madeira	<ul style="list-style-type: none"> – Leves e fáceis de manusear – Instalação rápida – Menor custo inicial – Flexibilidade estrutural – Recurso renovável (quando sustentável) – Menor impacto ambiental na produção 	<ul style="list-style-type: none"> – Menor durabilidade – Vulneráveis a fungos, insetos e apodrecimento – Necessitam tratamentos químicos – Deformações com humidade – Requerem substituições frequentes – Inflamáveis

2.1.2.3 Fixações

O sistema de fixação é o conjunto de elementos que garantem a fixação entre o carril e as travessas. As suas principais funções, passam por garantir a transmissão eficaz das forças aplicadas sobre os carris às travessas, bem como assegurar que a bitola da via e a inclinação se mantêm dentro do exigido (Esveld, 2001).

As fixações dividem-se em dois grandes grupos: as fixações rígidas e as elásticas. As primeiras estão em desuso e apresentam as seguintes condicionantes:

- Apenas são aplicáveis em travessas de madeira;
- Não apresentam elementos elásticos na sua constituição;
- Não garantem o aperto permanente do carril;
- Permitem o deslocamento longitudinal não controlado, do carril;
- O aperto é feito com o cuidado de não romper as fibras de madeira;
- O isolamento elétrico entre as duas filas é assegurado pela madeira.

Na Figura 2.16, apresenta-se um exemplo de uma fixação rígida.



Figura 2.16 – Fixação rígida

As fixações elásticas, hoje aplicadas em todas as linhas renovadas da Rede Ferroviária Nacional, apresentam as seguintes características:

- Aplicáveis em travessas de madeira com chapim e travessas de betão;
- Incluem na sua constituição grampos / garras elásticos e palmilhas de elastómero ou plástico;
- Garantem o aperto permanente do carril;
- Não permitem o deslocamento longitudinal do carril;
- Permitem o aperto controlado;
- Garantem o isolamento elétrico entre filas de carril através de elementos em madeira ou elementos isolantes da fixação no caso do betão.

As fixações elásticas, regra geral, estão associadas a designações de natureza comercial relativas aos seus fabricantes, sendo que na Rede Ferroviária Nacional as mais usuais são Nabla (Figura 2.17), Vossloh (Figura 2.18) e Pandrol (Figura 2.19).



Figura 2.17 – Fixação Nabla
(Pandrol, s.d.)

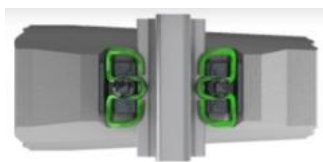


Figura 2.18 – Fixação
Vossloh
(Vossloh, s.d.)



















Figura 2.19 – Fixação
Pandrol
(Pandrol, s.d.)

De entre as fixações vulgarmente conhecidas e indicadas nas figuras acima, existem outros sistemas de fixações, sendo estes adaptados às variadas necessidades de cada via-férrea, função de vários fatores, nomeadamente a velocidade máxima praticada, o tipo de via, o tipo de material circulante que irá circular (comboios convencionais, de mercadorias, ou alta velocidade, entre outros), a carga máxima por eixo e o traçado.





No Quadro 2.4 e no Quadro 2.5, exemplificam-se alguns tipos de fixação, bem como as suas especificações técnicas mais importantes.

As especificações técnicas destes elementos baseiam-se na norma “EN 13481 - Aplicações ferroviárias – Via – Requisitos de desempenho para sistemas de fixação”.

Quadro 2.4 – Fixações Vossloh
(Vossloh, 2022)

Vossloh							
Comboios Convencionais							
Tipo de via	Via não balastrada			Via balastrada			
Sistema	300	DFF 200	DFF 300 (moldura de aço)	W 14	W 21	W 30	KS 24
							
Carga por eixo	≤ 26 ton			≤ 26 ton			
Velocidade Máxima	≤ 250 km/h			≤ 250 km/h		≤ 300 km/h	≤ 250 km/h
Raio das curvas	≥ 150 m		≥ 400 m	≥ 150 m		≥ 400 m	≥ 150 m
Comboios de Mercadorias							
Tipo de via	Via não balastrada			Via balastrada			
Sistema	300	DFF 30 H	W 14	W 30	W 40		
							
Carga por eixo	≤ 35 ton	≤ 72 ton	≤ 35 ton				
Velocidade Máxima	≤ 160 km/h	≤ 80 km/h	≤ 160 km/h				
Raio das curvas	≥ 300 m			≥ 400 m		≥ 150 m	
Comboios de Alta Velocidade							
Tipo de via	Via não balastrada			Via balastrada			
Sistema	300	DFF 300		W 14		W 40	
							
Carga por eixo	≤ 26 ton			≤ 26 ton			
Velocidade Máxima	≤ 250 km/h			≤ 250 km/h			
Raio das curvas	≥ 400 m			≥ 400 m			

Quadro 2.5 – Fixações Pandrol
(Pandrol, sem data)

Pandrol				
Tipo de Via	Via não balastrada		Via balastrada	
Sistema	Nabla Tram	e-SRS	SKL	SD
				
Carga por eixo	≤ 130 kN	≤ 260 kN	≤ 260 kN - C e AL; ≤ 350 kN - M	≤ 260 kN
Material Circulante	Convencional	Convencional (C), Alta velocidade (LAV)	Convencional (C), Alta velocidade (LAV) e Mercadorias (M)	Convencional (C), Alta velocidade (LAV)
Raio das curvas	≥ 40 m	≥ 150 m - C ≥ 400 m - LAV	≥ 150 m - C e M ≥ 400 m - LAV	≥ 150 m - C ≥ 400 m - LAV

2.1.2.4 Balastro

O balastro (Figura 2.20) é o elemento estrutural da via-férrea que garante a estabilidade vertical e horizontal dos elementos que constituem o armamento da via, as travessas equipadas com fixações e o carril.



Figura 2.20 – Balastro para encastramento das travessas

Esta camada apresenta normalmente uma espessura entre o 20 a 40 cm sob a face inferior das travessas e é constituída por material granular grosseiro (40-60 mm), cuja interação entre as partículas lhe confere uma elevada resistência à compressão, não apresentando resistência ao corte. A resistência desta camada, à compressão, é bastante mais elevada do que à resistência lateral, pois esta última apenas depende do atrito entre as partículas. O balastro permite o encastramento parcial das travessas, promovendo estabilidade ao armamento de via (Paixão & Fortunato, 2009).

A camada de balastro apresenta diversas funções, nomeadamente (Fortunato, 2005):

- Servir de encastramento às travessas;
- Resistir às ações verticais, laterais e longitudinais aplicadas às travessas, com o objetivo de manter a via no alinhamento correto;
- Promover a absorção de vibrações;
- Permitir o escoamento de material poluente proveniente do material circulante;
- Facilitar as operações de conservação relacionadas com o nivelamento e o alinhamento da via, devido à possibilidade de arranjo das partículas de balastro;
- Permitir o escoamento das águas da chuva que caem na via;
- Evitar o aparecimento de vegetação;
- Minimizar os efeitos das ações climáticas (chuva e gelo) sobre as camadas subjacentes;
- Reduzir a tensão transmitida pelas travessas às camadas subjacentes e fazer essa transferência da forma mais uniforme possível.

A camada de balastro é determinante para a estabilidade da via, que é assegurada pelo atrito entre as partículas de balastro e as superfícies de contacto das travessas, bem como pelo atrito desenvolvido pelo imbricamento entre as partículas que formam o balastro (Fernandes, 2011).

O comportamento desta camada deve-se às suas características mecânicas (resistência e deformabilidade) e hidráulicas (permeabilidade) que devem, tanto quanto

possível, manter-se inalteradas ao longo do tempo. Estas características dependem, principalmente da espessura da camada, da sua compactação e das características das partículas (forma, dureza, dimensões, entre outras) (Fernandes, 2011).

Em Portugal, a aplicação e as especificações técnicas do balastro da via-férrea são regulamentadas pela norma “NP EN 13450:2005 – Agregados para balastro de via-férrea”. Esta norma europeia, define os requisitos de qualidade para os agregados britados que compõem o balastro. O objetivo é assegurar que o material utilizado na construção e manutenção das linhas ferroviárias tenha a resistência, a granulometria e as propriedades de drenagem necessárias para garantir a estabilidade e a segurança da via. Complementarmente, as especificações da IP definem as características dos materiais, a granulometria, a resistência, a espessura da camada de balastro, e outros aspetos técnicos para garantir a segurança e a estabilidade da via. A IP também tem instruções técnicas internas, como a “GR.IT.GEO.008-V00: Blocos Técnicos – Enquadramento, características técnicas e execução”, que aborda o enquadramento e a execução de blocos técnicos, onde o balastro é um componente essencial.

Em resumo, enquanto a norma “NP EN 13450: Agregados para balastro de via-férrea” define as propriedades do material em si, as especificações e regulamentos da Infraestruturas de Portugal detalham a sua correta aplicação e manutenção na rede ferroviária nacional.

2.1.3 Vantagens e desvantagens da Via Balastrada

A via balastrada, o modelo mais tradicional e amplamente utilizado em ferrovias, consiste numa camada de pedras britadas (balastro) sobre a qual assentam as travessas e os carris. A sua popularidade deve-se a um conjunto de vantagens que a tornam uma solução eficaz e, em muitos casos, economicamente viável.

No entanto, apresenta também desvantagens que justificam o uso de alternativas, como a via em laje. Em seguida apresentam-se as suas vantagens e desvantagens.

Vantagens

- Boa capacidade de drenagem, reduzindo problemas de acumulação de água;
- Facilidade de manutenção e correção geométrica, através de operações regulares;
- Custo inicial de construção inferior face à via em laje;
- Boa absorção de vibrações e ruídos, devido à granulometria do balastro;
- Flexibilidade estrutural, permitindo adaptações em diferentes contextos de tráfego.

Desvantagens

- Necessidade frequente de manutenção, dado que o balastro se degrada com a passagem do material circulante;
- Produção de pó e desgaste das partículas, que pode reduzir a eficiência da drenagem;
- Menor estabilidade a longo prazo comparada com a via em laje;
- Vida útil mais curta, especialmente em linhas de alta velocidade;
- Perda de material por movimentação das partículas, exigindo reposições periódicas.

2.2 Via não balastrada

A via não balastrada, consiste na modalidade em que o balastro (material pétreo granular) na via é substituído por uma camada em laje de betão armado ou por uma camada de mistura betuminosa (Figura 2.21). O primeiro caso caracteriza-se pelos carris estarem apoiados em travessas pregadas ou embebidas numa laje de betão armado, denominadas tipicamente por via em laje. No segundo caso, as soluções consistem em travessas de betão armado apoiadas diretamente sobre uma camada betuminosa (Fernandes, 2011).

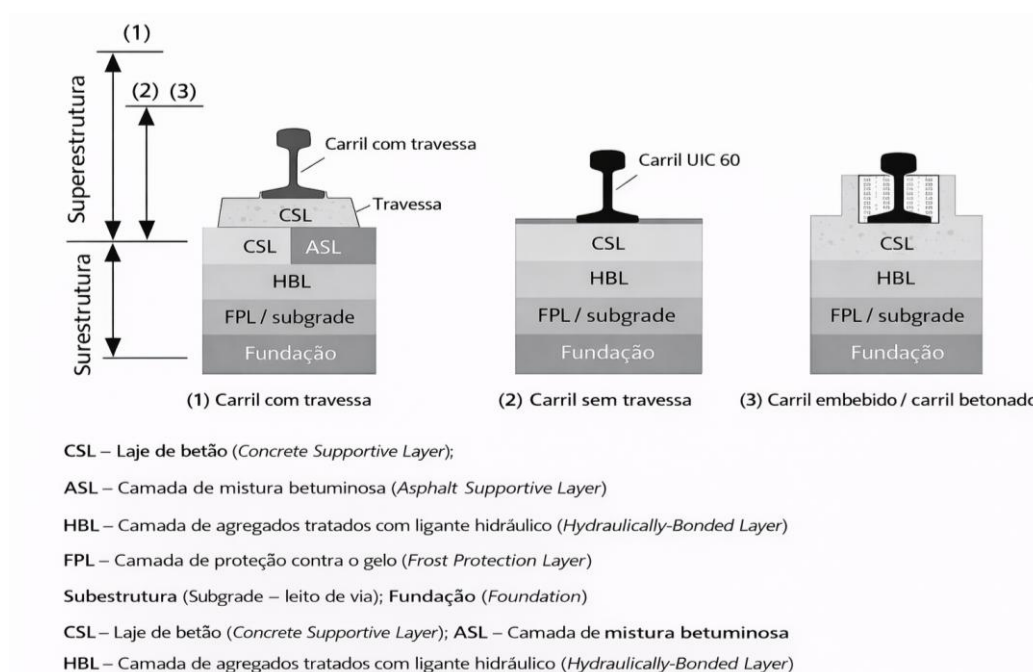


Figura 2.21 – Diferentes soluções de via não balastrada (adaptado de: Paixão & Fortunato, 2009)

No que se refere à solução de via em laje ou em placa, a mesma apresenta diversas conceções estruturais, resultando numa multiplicidade de possibilidades de disposição e integração dos elementos, tendo em conta as condicionantes impostas na via.

Na Figura 2.22, apresentam-se seis tipos diferentes de possíveis soluções de via não balastrada (Paixão & Fortunato, 2009).

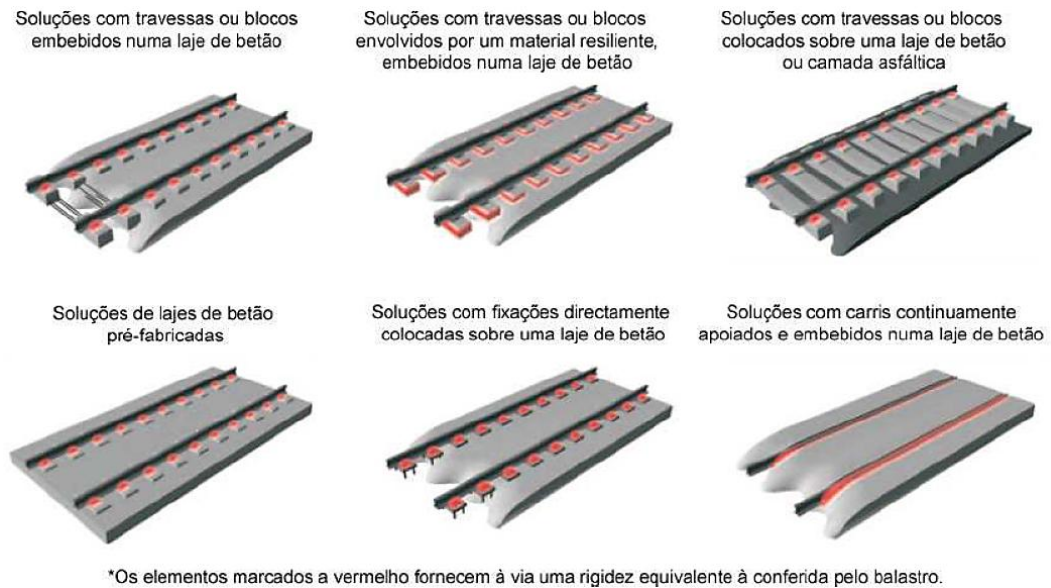


Figura 2.22 – Diversas conceções de via em laje (Paixão & Fortunato, 2009)

Na Figura 2.23, apresenta-se um esquema com algumas das possíveis soluções de via não balastrada.

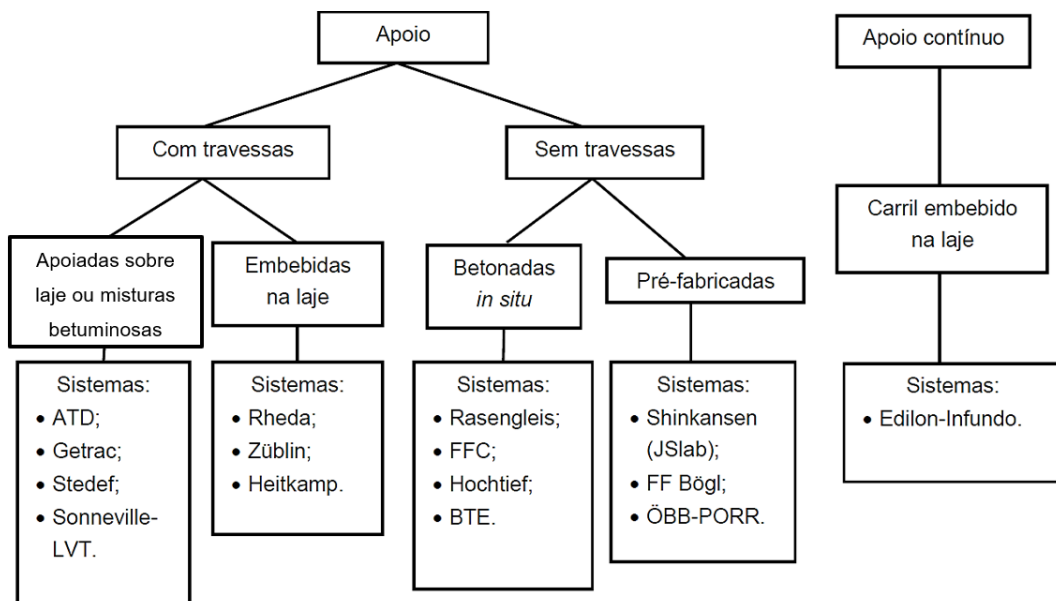


Figura 2.23 – Sistematização dos vários sistemas de via não balastrada (adaptado de: Fernandes, 2018)

2.2.1 Sistemas com travessas apoiadas sobre laje ou mistura betuminosa

Perante este sistema, são utilizadas as travessas para garantir a definição da bitola, bem como o tombo do carril (Matias, 2014).

O principal benefício deste sistema é a facilidade de substituição das travessas em caso de necessidade, bem como a possibilidade de colocação de material dispersor de ruído

(balastro ou material betuminoso na camada superior). A maior desvantagem deste sistema são os problemas de infiltração (Ižvolt & Šmaló, 2014).

2.2.1.1 Sistemas *ATD* e *Getrac* (Alemanha 2003)

Nestes sistemas (Figura 2.24 e Figura 2.25), a superestrutura de via é assente sobre camadas betuminosas. A principal diferença entre ambas é que no sistema *ATD*, as travessas aplicadas são travessas de betão bi-bloco, enquanto no sistema *Getrac* são de betão monobloco.

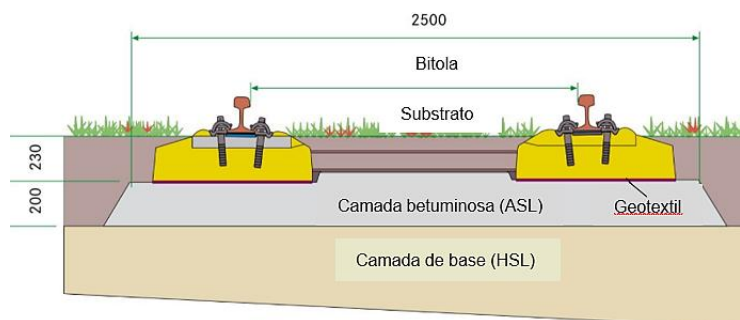


Figura 2.24 – Sistema *ATD*
(adaptado de: Yumpu.com, sem data)

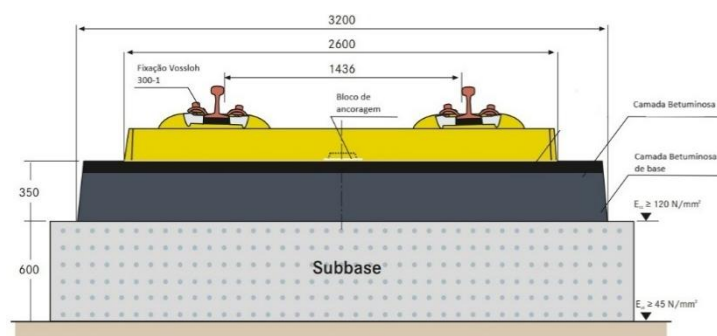


Figura 2.25 – Sistema *Getrac*
(Rail One, 2012)

No Quadro 2.6, apresentam-se as vantagens e desvantagens de ambos os sistemas referidos anteriormente.

Quadro 2.6 – Vantagens e desvantagens dos sistemas *ATD* e *Getrac*
(adaptado de: Matias, 2014)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
ATD	<ul style="list-style-type: none"> – Suspensão do tráfego por períodos curtos devido à rápida reparação/ construção – Alinhamento concretizado por equipamento convencional de vias balastradas – Pavimentação da ASL é efetuada por equipamento convencional utilizado na rodovia – Vida útil de 60 anos 	<ul style="list-style-type: none"> – Dificuldade na obtenção de um alinhamento preciso
Getrac	<ul style="list-style-type: none"> – Altura de via reduzida – Simples reparação em caso de acidente ou dano da via – Limpo e reciclável – Bom comportamento acústico 	<ul style="list-style-type: none"> – Caso ocorram mudanças de geometria vertical superiores a 20 mm devido a assentamentos é necessário substituir a travessa

2.2.1.2 Sistemas Stedef e Sonneville-LVT

Ambos os sistemas apresentam um princípio construtivo idêntico, pois detêm palmilhas amortecedoras de ruído e vibrações sob as travessas. Este princípio, garante um bom comportamento vibro-acústico, sendo esta uma das suas principais vantagens. Estes sistemas diferem na tipologia das travessas (Stedef (Figura 2.26) – bibloco, Sonneville-LVT – monobloco) e na colocação das palmilhas (a Stedef possui palmilhas laterais para além das que estão sob a travessa) (Matias, 2014).

Na execução do sistema Sonneville (Figura 2.27), a betonagem é repartida em duas fases. Na primeira aplica-se uma laje em betão (CSL) e a segunda é reforçada com fibras de propileno (Michas, 2012).

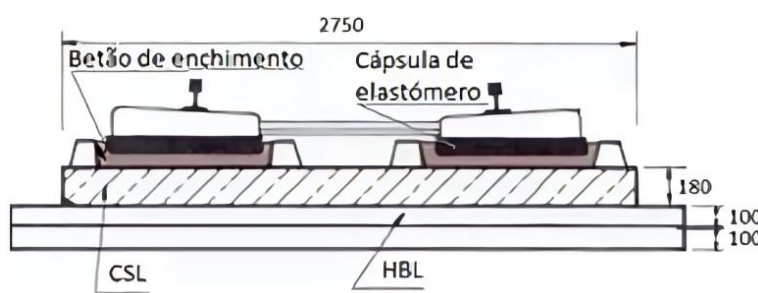


Figura 2.26 – Sistema Stedef (Matias, 2014)

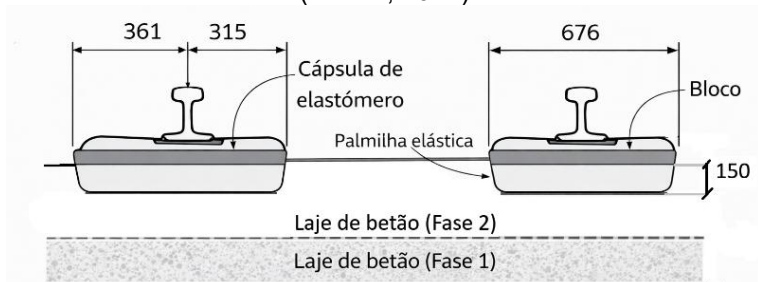


Figura 2.27 – Sistema Sonneville (Matias, 2014)

No Quadro 2.7, apresentam-se as vantagens e desvantagens de ambos os sistemas referidos anteriormente.

Quadro 2.7 – Vantagens e desvantagens dos sistemas Stedef e Sonneville (adaptado de: Matias, 2014)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Stedef	<ul style="list-style-type: none"> – Bom comportamento vibratório – Elasticidade longitudinal e transversal conferida por palmilhas laterais – Limitação das solicitações verticais na plataforma devido à sua conceção – Montagem e reparação dos constituintes do armamento da via simples – Movimento quase vertical da travessa o que se traduz numa melhor repartição de esforços 	<ul style="list-style-type: none"> – Homologação pela SNCF (Sociedade Nacional dos Caminhos de Ferro Franceses) para 270 km/h, mas a velocidade de circulação está limitada a 230 km/h de modo a não provocar defeitos de comprimento de onda superiores a 30/ 50 m (15 m a 230 km/h) o que poderá provocar fenómenos de ressonância à passagem de comboios – Infiltração de água na cápsula comprometendo o comportamento devido aos ciclos gelo/ degelo

Sistema	Vantagens	Desvantagens
		<ul style="list-style-type: none"> – Devido à ausência de armadura que liga os blocos à laje, é suscetível às solicitações longitudinais – Intransitabilidade
Sonneville	<ul style="list-style-type: none"> – Bom desempenho vibratório – Nível de elasticidade adicional – Facilidade de reparação e substituição do armamento da via incluindo os blocos e sistema elástico 	<ul style="list-style-type: none"> – Infiltração de água na cápsula de elastômero provoca a sua degradação prematura

2.2.2 Sistemas com travessas embebidas em laje

No sistema de travessas embebidas, estas são betonadas no local, de modo a garantir a bitola e o tombo, contudo, não são substituíveis por serem percorridas por uma armadura. As travessas têm como objetivo elevar o armamento da via, que após a regulação da geometria são betonadas juntamente com a laje de betão.

Assim, qualquer necessidade de alteração de geometria apenas é possível recorrendo à regulação do sistema de fixação, sendo este limitado, caso haja necessidade de alterar a geometria, traduzindo-se num custo elevado (Matias, 2014).

2.2.2.1 Sistema Rheda (1972, Alemanha)

Este sistema monolítico e sem balastro (Figura 2.28) é utilizado para plena via, especialmente em linhas de alta velocidade. As principais características da laje de betão de suporte incluem a ausência de uma calha e a utilização de uma travessa de bi-bloco modificada com uma treliça de reforço.

Devido à estrutura monolítica da camada de suporte da via e à baixa altura total da estrutura, este sistema é bastante adequado para aplicação em túneis e pontes (RHEDA 2000®, 2011).

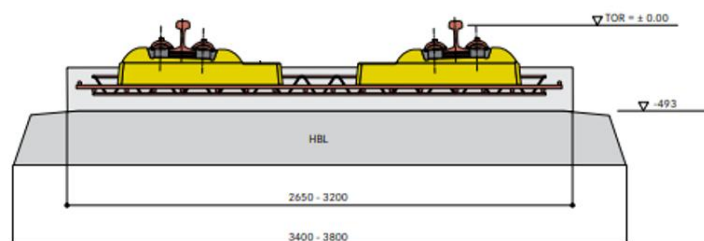


Figura 2.28 – Sistema Rheda 2000 (Rail One, 2011)

No Quadro 2.8, apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema Rheda.

Quadro 2.8 – Vantagens e desvantagens do sistema Rheda
(adaptado de: Matias, 2014)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Rheda	<ul style="list-style-type: none"> – Construção rápida – Eficaz transmissão de esforços devido à disposição da armadura treliçada – Correção da geometria vertical até 120 mm – Alinhamento simples do carril 	<ul style="list-style-type: none"> – A armadura longitudinal passa entre a armadura treliçada o que requer mão-de-obra manual (não é mecanizável) – Reparação e mudança de travessas exige a demolição do troço envolvente (Suspensão de tráfego durante várias horas) – Mau desempenho acústico

2.2.2.2 Sistema Züblin (Finais da década de 70, Alemanha)

O sistema Züblin, é bastante semelhante ao Rheda. As travessas são encaixadas sobre a laje de betão fresco por meios de vibração, através de equipamento especializado que usa o perfil de cofragem como carril, simplificando a sua locomoção e garantindo rapidez de execução. O reposicionamento da armadura longitudinal na base da laje melhora o seu comportamento à flexão (Matias, 2014).

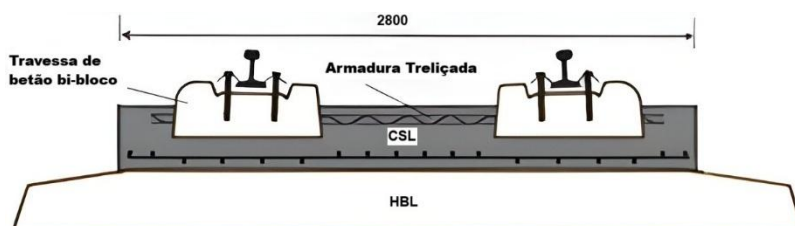


Figura 2.29 – Sistema Züblin
(Matias, 2014)

No Quadro 2.9 apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema Züblin.

Quadro 2.9 – Vantagens e desvantagens do sistema Züblin
(adaptado de: Matias, 2014)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Züblin	<ul style="list-style-type: none"> – Nível de rendimento muito alto com possibilidade de grande grau de mecanização – Capacidade de ajustamento até 50 mm do carril – Possível reparação em travessas isoladas – Custos aproximados aos de uma via convencional – Espaço entre travessas (65 cm) para colocar equipamento de redução de ruído 	<ul style="list-style-type: none"> – Equipamento especializado – Problemas de vibração para travessas – Muito ruidoso

2.2.2.3 Sistema Heitkamp (Troços de teste em 1996, Alemanha)

O sistema Heitkamp (Figura 2.30), apresenta um processo de construção análogo ao Rheda, diferenciando-se pela introdução de uma camada de balastro e ligante hidráulico sobre a laje de betão (Matias, 2014).

A introdução desta nova camada permite que as máquinas de construção ferroviárias correntes façam alterações no alinhamento do carril (Michas, 2012). Este sistema é principalmente pensado para ser aplicado em linhas de transporte de passageiros em áreas urbanas (Matias, 2014).

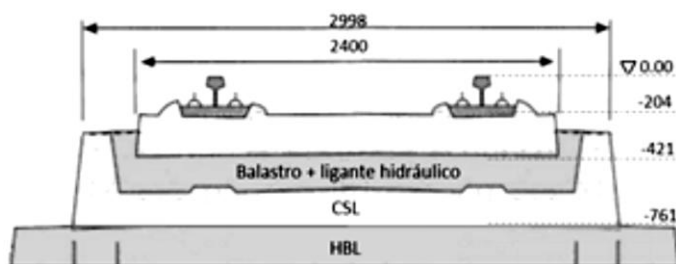


Figura 2.30 – Sistema Heitkamp (Matias, 2014)

No Quadro 2.10, apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema Heitkamp.

Quadro 2.10 – Vantagens e desvantagens do sistema Heitkamp (adaptado de: Matias, 2014)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Heitkamp	<ul style="list-style-type: none"> – O alinhamento pode ser realizado por métodos e equipamento convencionais devido à camada de balastro – O alinhamento permanece constante, mesmo após vários anos sobre vários ciclos de carga/descarga – Bom desempenho acústico 	<ul style="list-style-type: none"> – Custo elevado

2.2.3 Sistemas sem travessas, betonadas *in situ*

Este tipo de via não balastrada de fixação direta recorre à betonagem da laje de betão *in situ*, implicando que a bitola e o tombo sejam garantidos durante a construção (Matias, 2014).

2.2.3.1 Sistema FFC (Feste Fahrbahn Crailsheim)

O sistema FFC é um sistema de fixação direta numa laje monolítica. A fixação das placas de ancoragem é concretizada em blocos, onde posteriormente serão colocados na laje de betão através de vibração.

Alternativamente, os blocos podem ser inseridos na laje de betão em negativos realizados previamente, sendo betonados de seguida (Matias, 2014).

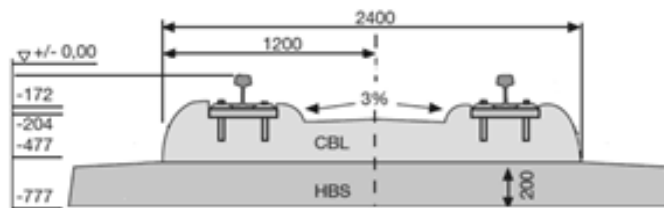


Figura 2.31 – Sistema FFC
(Matias, 2014)

No Quadro 2.11, apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema FFC.

Quadro 2.11 – Vantagens e desvantagens do sistema FFC
(adaptado de: Matias, 2014)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
FFC	– Processo automatizado com recurso a pavimentadora devido à ausência de travessas	– Ajustamento requer equipamento especial automático de georreferenciação para obter uma precisão considerável da qualidade geométrica da via

2.2.4 Sistemas sem travessas, pré-fabricadas

Em sistemas que recorrem a lajes pré-fabricadas e sem utilização de travessas, a via é constituída por lajes de betão armado ou pré-esforçado que mantêm o tombo e a bitola constantes e seguros (Michas, 2012).

2.2.4.1 Sistema Shinkansen (JSIab – 1972, Japão)

Este sistema consiste na execução de uma subcamada estabilizada com ligante hidráulico onde são assentes as placas pré-fabricadas com 4.95m x 2.34m e cerca de 19 cm de espessura, sendo esta reduzida para 16 cm em túneis. Os esforços horizontais são absorvidos por uma cavilha cilíndrica entre placas. Sobre a subcamada estabilizada por ligante hidráulico, é executada uma camada de cimento asfáltico (CAM – *Cement Asphalt Mortar*) de 50 mm, para melhorar o comportamento vibratório, onde por sua vez são assentes as placas pré-fabricadas (Matias, 2014).

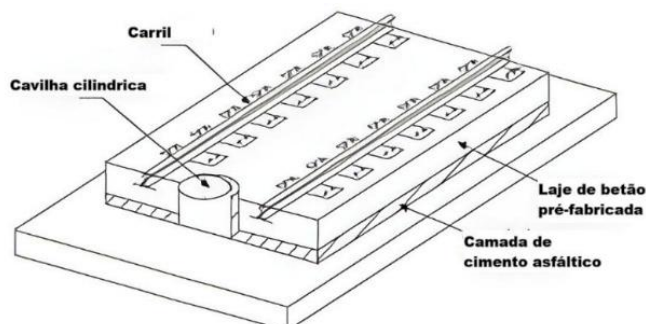


Figura 2.32 – Sistema Shinkansen
(Matias, 2014)

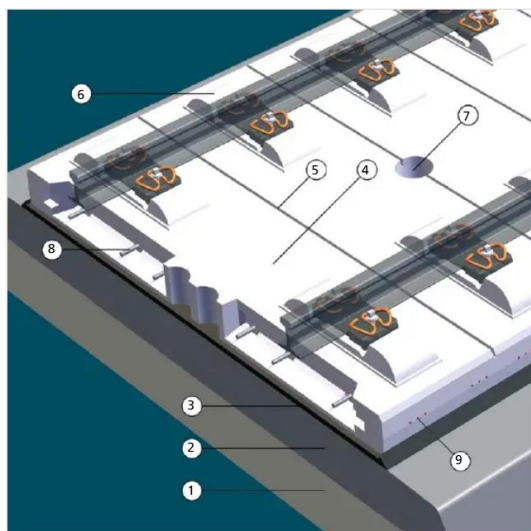
No Quadro 2.12, apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema Shinkansen.

Quadro 2.12 – Vantagens e desvantagens do sistema Shinkansen
(adaptado de: Matias, 2014)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Shinkansen	<ul style="list-style-type: none"> – Sistema bastante utilizado e otimizado aliado à experiência japonesa neste tipo de via com mais de 30 anos – Custos iniciais superiores em 30% à via balastrada – Possibilidade de circulação sem limitações após a montagem 	<ul style="list-style-type: none"> – Difícil manuseamento e propriedades mecânicas do CAM variáveis, estimulando a investigação e melhoria deste componente da via

2.2.4.2 Sistema FF Bögl (1977, Alemanha)

O sistema FF Bögl (Figura 2.33) consiste na aplicação de placas pré-fabricadas de betão pré-esforçado lateralmente e com armadura ordinária disposta longitudinalmente com dimensões de 6.45 m x 2.55 m com uma espessura de 200 mm. Em consonância com o sistema Shinkansen, o intervalo entre as placas e a camada de ligante hidráulico é preenchido com CAM. Após ajustamento e colocação das placas, as armaduras longitudinais são ligadas através de ligações aparafusada. Posteriormente através de orifícios no topo das placas é injetada uma argamassa de ligação (Matias, 2014).



- 1 – Camada de coroamento
- 2 – Camada de ligante hidráulico
- 3 – Argamassa de cimento asfáltico (CAM)
- 4 – Laje de betão
- 5 – Junta de ligação
- 6 – Apoio do carril
- 7- Orifício para injeção do CAM
- 8 – Armadura longitudinal
- 9 - Armadura longitudinal pré-esforçada

Figura 2.33 – Sistema FF Bögl
(Bögl,2012)

No Quadro 2.13, apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema FF Bögl.

Quadro 2.13 – Vantagens e desvantagens do sistema FF Bögl
(adaptado de: Matias, 2014)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
FF Bögl	<ul style="list-style-type: none"> – Alta qualidade geométrica durante a vida útil do sistema devido à ligação aparafusada entre placas – Ritmo de execução alto – Montagem automatizada 	<ul style="list-style-type: none"> – Exigências topográficas e geométricas elevadas – Suscetível a assentamentos da plataforma

2.2.4.3 Sistema ÖBB-PORR (1989, Áustria)

O sistema ÖBB-PORR (Figura 2.34) ou, também denominado Slab Track Áustria é uma tecnologia que consiste num sistema de via em laje modular e adaptável. Proporciona uma grande precisão de via com manutenção mínima e é de construção simples, devido à pré-fabricação em condições controladas de fábrica. O trabalho no local de construção é mínimo durante a fase de instalação. Este sistema é constituído por uma laje pré-fabricada de 5,2 m x 2,4 m, com suporte elástico, construída sobre uma base sólida ou com pouca deformação, como, por exemplo, um túnel, ponte, uma camada de base ligada hidraulicamente ou um sistema de massa-mola (pesado) (PORR, sem data).

A parte inferior da laje pré-fabricada não-tensionada, bem como as aberturas cónicas, são revestidas com uma camada elástica que confere ao sistema uma elasticidade de dupla camada, reduzindo as vibrações ou o ruído transmitido pela estrutura e garantindo o seu desacoplamento do suporte estrutural. A camada elástica integrada permite uma reparação rápida e fácil, caso seja necessário. Entre as lajes integra-se uma junta de, no mínimo, 40 mm que separa dois painéis para compensar quaisquer deformações causadas por influências ambientais, como fluência, retração e movimentos causados pela temperatura. A junta também permite espaço para componentes de drenagem ou para a passagem de cabos (PORR, sem data).

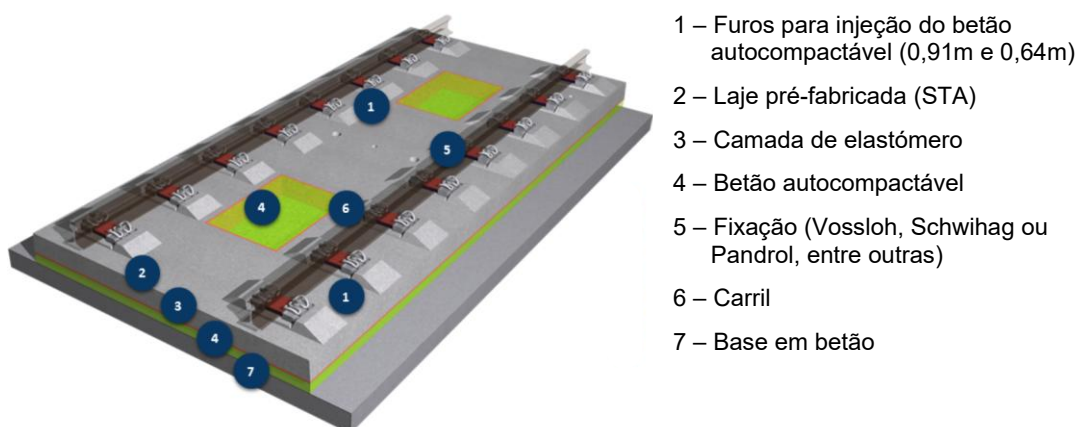


Figura 2.34 – Sistema ÖBB-PORR (PORR, sem data)

No Quadro 2.14, apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema ÖBB-PORR.

Quadro 2.14 – Vantagens e desvantagens do sistema ÖBB-PORR (adaptado de: Matias, 2014)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
ÖBB-PORR	– Melhorias significativas do comportamento vibratório e acústico devido ao elastómero utilizado	– Infiltração de água entre a base e as faces das aberturas de injeção com degradação precoce do elastómero

2.2.5 Carril embebido na laje

Esta categoria de via caracteriza-se por um suporte contínuo do carril ao longo de todo o seu comprimento, deste modo, dispensa a utilização de travessas e fixações. A bitola e o tombo são obtidos através de entalhes na laje de betão.

O carril embebido (ERS – *Embedded Rail Structure*) é um carril ininterruptamente apoiado em regime elástico dentro de uma ranhura talhada na laje de betão, para, posteriormente, ser envolvido por uma resina, usualmente de poliuretano ou até mesmo cortiça. A largura do entalhe é limitada para reduzir a quantidade de resina e limitar a rigidez transversal (Matias, 2014).

2.2.5.1 Sistema Edilon-Infundo (1976, Holanda)

No sistema Edilon o carril é fixado elasticamente num canal de betão ou aço através do elastómero de dois componentes e apoiado por uma barra de carril. Após o endurecimento, elastómero permanece ligeiramente elástico, mas muito resistente, criando assim uma ligação ao carril estável e durável. O elastómero utilizado neste sistema proporciona uma transferência uniforme de forças do carril para o ambiente de suporte. O sistema lida com as forças e tensões causadas pelo tráfego ferroviário e rodoviário e por influências físicas, como as mudanças de temperatura (Matias, 2014).



Figura 2.35 – Sistema Edilon, em carril de vignole e em carril de gola (Edilon Sedra, sem data)

No Quadro 2.15, apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema Edilon.

Quadro 2.15 – Vantagens e desvantagens do sistema Edilon (adaptado de: Matias, 2014)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Edilon-Infundo	<ul style="list-style-type: none">– Transitabilidade (muito vantajoso em viadutos/pontes e túneis)– Poupança de tempo em montagem na ausência de sistemas de fixação– Eliminação de esforços de fadiga no carril– Absorção de vibrações e ruído– Custos de manutenção muito reduzidos	<ul style="list-style-type: none">– Reparação em caso de acidente bastante onerosa– Alinhamento muito pormenorizado e com pouca flexibilidade pós-montagem

2.2.5.2 Sistema de redução de ruído em vias embebidas (Vossloh)

Este sistema (Figura 2.36 e Figura 2.37) utiliza elementos de enchimento e consiste numa solução de isolamento desenvolvida especificamente para vias embebidas em laje, mais utilizada em ambientes urbanos, como os utilizados em comboios, elétricos e metro.



Figura 2.36 – Elementos constituintes do sistema anti-ruído da Vossloh (Vossloh, 2016)



Figura 2.37 – Sistema anti-ruído da Vossloh (Vossloh, 2016)

A sua principal função é selar a via para evitar a fuga de corrente e reduzir as vibrações e o ruído gerados pela circulação dos veículos, melhorando assim o conforto para os passageiros. O sistema é composto por três elementos principais (Vossloh, 2019):

- Elemento externo e interno: Peças feitas de borracha de pneus, adesivo de poliuretano e água. Estes elementos são instalados em ambos os lados do carril, adaptando-se à estrutura da via;
- Palmilha: Este componente envolve a base do carril, garantindo um isolamento de vibrações adicional.

Este sistema é especialmente útil em vias de laje embebidas em misturas betuminosas, calçada, ou em zonas verdes, uma vez que o isolamento é crucial nestes ambientes.

No Quadro 2.16, apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema Vossloh.

Quadro 2.16 – Vantagens e desvantagens do sistema Vossloh (Vossloh, 2019)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Anti-Ruído Vossloh	<ul style="list-style-type: none">– Isolamento acústico– Isolamento elétrico– Proteção da via– Integração paisagística	<ul style="list-style-type: none">– Custo inicial elevado– Manutenção especializada– Complexidade de instalação– Sensibilidade a fatores ambientais (infiltração de água)

2.2.5.3 Sistema QTrack da Pandrol

O Pandrol QTrack é um sistema de via embebida sem balastro (*embedded ballastless track*). Trata-se de um sistema que combina suporte estrutural contínuo, atenuação de vibrações e isolamento elétrico contra correntes dispersas, distinguindo-se pelo seu reduzido impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida (Pandrol, 2025b, 2025a).

O QTrack consiste num sistema de fixação contínua, em que o carril é encapsulado em perfis de borracha de alta qualidade, ligados por resinas, cuja geometria e rigidez são ajustadas a cada projeto. Essa conceção permite a sua aplicação tanto em carris vignole como em carris de gola, abrangendo uma ampla gama de utilizações: linhas de metro, linhas suburbanas, vias industriais, portuárias, linhas de alta velocidade e *heavy haul* (Pandrol, 2025b).

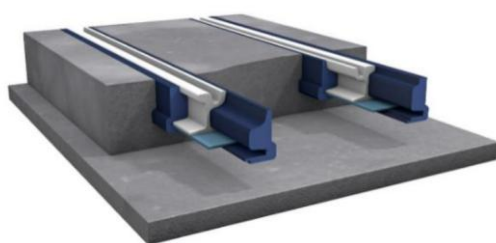


Figura 2.38 – Sistema QTrack (Pandrol, 2025a)

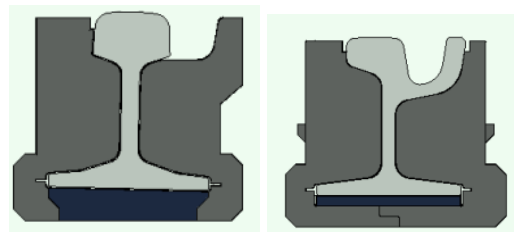


Figura 2.39 – Sistema QTrack em carril de vignole e carril de gola (Pandrol, 2025b)

No Quadro 2.17, apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema QTrack.

Quadro 2.17 – Vantagens e desvantagens do sistema QTrack (Pandrol, 2025b)

Sistema	Vantagens	Desvantagens
QTrack	<ul style="list-style-type: none"> – Produzido com mais de 90% de materiais reciclados e totalmente reciclável, contribuindo para a economia circular – Baixa pegada de carbono – Método top-down, rápido e eficiente: até 144 metros lineares/dia/equipa – Sistema livre de manutenção e durabilidade equivalente à vida útil da via – Suporte vertical, lateral e longitudinal contínuo ao carril, evitando deformações e ondulações – Sistema ajustável em rigidez, permitindo atenuação de vibrações e ruído segundo as exigências do projeto – Proteção contra correntes dispersas através da opção QT ELEC (níveis L, M e H) 	<ul style="list-style-type: none"> – Custo inicial elevado – Requer auditorias e certificações externas para validação da EPD, o que implica custos adicionais para projetos – equipas especializadas e formação específica – Necessidade de adaptação de peças personalizadas (ex.: agulhas e cruzamentos), o que pode aumentar prazos de fabrico

2.2.6 Vantagens e desvantagens da Via não Balastrada

Em termos gerais, a via não balastrada afirma-se como uma alternativa de elevado desempenho face à via tradicional em balastro, sobretudo em contextos de alta velocidade, tráfego intenso e locais onde a manutenção é de difícil execução.

A diversidade de soluções existentes, com ou sem travessas, em laje contínua, pré-fabricadas ou com carril embebido, reflete a evolução tecnológica e a adaptação desta tipologia às diferentes necessidades de exploração ferroviária.

Como todas as soluções, esta tem diversas vantagens e desvantagens, nomeadamente:

Vantagens

- Estabilidade geométrica elevada: menor necessidade de nivelamentos e ajustes, já que não há assentamento do balastro;
- Redução da manutenção: custos de manutenção ao longo do ciclo de vida são muito menores comparados com os da via balastrada;
- Maior durabilidade: vida útil da laje de betão pode ultrapassar 50 anos, enquanto o balastro degrada-se mais rapidamente;
- Comportamento adequado para alta velocidade: maior rigidez garante segurança e conforto a velocidades superiores a 250 km/h;
- Menor altura da superestrutura: útil em túneis e viadutos, permitindo otimizar espaço e reduzir volumes de escavação;
- Resistência a condições ambientais adversas: menos suscetível à erosão, ao gelo ou ao transporte de finos pela chuva;
- Redução do ruído e vibrações (quando associada a soluções com camadas elásticas e sistemas de fixação adequados).

Desvantagens

- Custo inicial elevado: construção bastante mais cara que a via balastrada;
- Maior complexidade construtiva: exige elevada precisão na execução da laje e na colocação dos apoios/fixações;
- Dificuldade nas reparações: em caso de assentamentos diferenciais ou danos estruturais, as intervenções são complexas e dispendiosas;
- Menor flexibilidade: alterações futuras de traçado ou aparelhos de via são mais difíceis de executar;
- Maior rigidez estrutural: pode transmitir mais vibrações para a infraestrutura (embora mitigado com camadas elásticas);

- Dependência de elevada qualidade de projeto e execução: pequenos erros iniciais têm custos muito elevados para corrigir.

2.3 Via Balastrada *versus* Via não Balastrada

A preferência entre via balastrada e via não balastrada representa uma das decisões mais relevantes no dimensionamento e exploração da infraestrutura ferroviária, pois cada solução apresenta características técnicas, económicas e operacionais distintas. Enquanto a via balastrada constitui a opção tradicional, amplamente utilizada pela sua simplicidade construtiva e menor custo inicial, a via não balastrada surge como uma alternativa moderna, associada a elevados investimentos, mas também a maior durabilidade e estabilidade geométrica.

Assim, a análise comparativa entre ambas, apresentada no Quadro 2.18, permite identificar os contextos em que cada tipologia oferece melhor desempenho, seja em linhas convencionais de tráfego misto ou em linhas de alta velocidade, túneis e viadutos, onde as exigências de manutenção e fiabilidade se tornam determinantes.

Quadro 2.18 – Análise comparativa entre via balastrada e via não balastrada

Crítério	Via Balastrada	Via não Balastrada
Custo inicial	– Mais baixo; solução mais económica na construção	– Muito elevado (2 a 3 vezes mais cara que a balastrada)
Custos de manutenção	– Elevados: necessidade de socaria, reposição e limpeza do balastro	– Muito reduzidos: manutenção mínima ao longo do ciclo de vida
Vida útil	– ~25–30 anos antes de grandes renovações	– >50 anos, podendo ultrapassar 60 anos
Estabilidade geométrica	– Menor: o balastro desloca-se com o tráfego, exigindo nivelamentos frequentes	– Elevada: geometria praticamente estável durante décadas
Flexibilidade e adaptabilidade	– Alta: fácil substituição de aparelhos de via, travessas ou correções de traçado	– Baixa: mudanças são difíceis e dispendiosas
Conforto de circulação	– Bom em velocidades moderadas; a flexibilidade do balastro absorve parte das cargas	– Muito bom em alta velocidade (≥ 250 km/h), desde que incorporadas camadas elásticas para conforto
Velocidade máxima recomendada	– Adequada até ~250 km/h	– Adequada para >250 km/h
Comportamento em túneis / pontes	– Menos favorável: altura total maior, gera maiores esforços dinâmicos em pontes	– Muito favorável: reduz altura da superestrutura e vibrações transmitidas
Ruído e vibrações	– Balastro atenua naturalmente parte das vibrações	– Maior rigidez transmite vibrações; necessita de soluções elásticas adicionais
Execução inicial	– Mais simples, tolera pequenas imperfeições de obra	– Exige grande precisão na execução da laje e fixações
Reparações	– Fáceis e relativamente baratas	– Difíceis, complexas e muito caras

Critério	Via Balastrada	Via não Balastrada
Áreas típicas de aplicação	– Linhas convencionais, tráfego misto, redes regionais	– Alta velocidade, túneis, viadutos, áreas urbanas (metro)

Resumidamente, a via balastrada continua a ser a solução mais adequada para linhas convencionais e de tráfego misto, graças à sua flexibilidade, simplicidade e custos iniciais reduzidos, ainda que à custa de maiores necessidades de manutenção.

Já a via não balastrada, apesar do investimento inicial elevado e da menor adaptabilidade, destaca-se pela durabilidade, estabilidade geométrica e desempenho superior em alta velocidade, túneis e viadutos, revelando-se a opção preferencial em contextos onde a fiabilidade a longo prazo e a minimização da manutenção assumem prioridade.

3 ALTERNATIVAS ÀS TRAVESSAS DE MADEIRA CREOSOTADAS

A creosotagem corresponde a um tratamento de natureza química que envolve as travessas de madeira, por forma a assegurar-lhes uma maior durabilidade perante a agressividade das térmitas (insetos que se alimentam da madeira).

Até um passado relativamente recente, este tipo de tratamento era consensual, conforme se pode observar em documentos escritos sobre o assunto, como é o caso do que se cita em seguida “(...) *há mais de 150 anos que o creosote é utilizado no tratamento de madeiras que estão em contacto direto com o solo. Devido ao seu bom resultado este produto tem sido utilizado como principal na proteção da madeira para uso exterior.*” (Silva, 2010).

Porém, em resultado de estudos entretanto realizados, conclui-se que estes produtos envolvem riscos cancerígenos, pelo que a sua utilização foi objeto de regulamentação conforme descrito no ponto 3.2 do presente documento.

3.1 Processo de creosotagem

No dia 2 de julho de 2025, foi possível visitar o centro logístico da IP sito no Entroncamento, e observar as instalações e sequência das operações do processo de creosotagem, que passa por diversas etapas, nomeadamente:

- Preparação e seleção da madeira: a travessa não poderá ter muitos nós e requer um teor de humidade de cerca de 20 a 25%;
- As travessas são carregadas no cilindro da autoclave (Figura 3.1) sobre vagões ou trilhos móveis e o cilindro é vedado hermeticamente;
- Na autoclave, aplica-se vácuo, de modo a extrair parte da humidade ainda presente da madeira, melhorando a penetração do creosoto;
- Injeção do creosoto, a uma temperatura superior a 70º para não cristalizar;
- Aplicação de pressurização na autoclave por várias horas, forçando o creosoto a impregnar na estrutura celular da madeira;
- Drenagem do creosoto excedente, voltando este para os tanques de armazenamento e vácuo final, de modo a recolher o excesso de óleo na superfície da travessa;
- Fim do Processo: as travessas são retiradas da autoclave e armazenadas num local que permita o seu arrefecimento e secagem. A secagem tem uma duração de 4 meses no verão e de 6 meses no inverno.



Figura 3.1 – Autoclave utilizada no processo de creosotagem

Na Figura 3.2 podem ser observados os reservatórios necessários para o processo de creosotagem, nomeadamente o reservatório principal, de recuperação e de aquecimento.



Figura 3.2 – Reservatórios utilizados no processo de creosotagem

Atualmente, este processo é controlado por meios informáticos, tornando-o bastante automatizado (Figura 3.3). Anteriormente era gerido por um sistema que exigia a presença constante de um técnico para o desenvolvimento do mesmo (Figura 3.4).

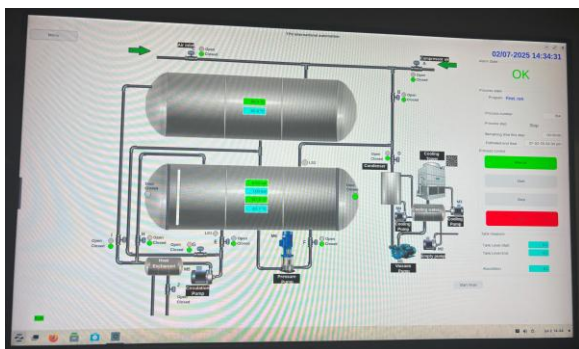


Figura 3.3 – Sistema de controlo de processo de creosotagem atual

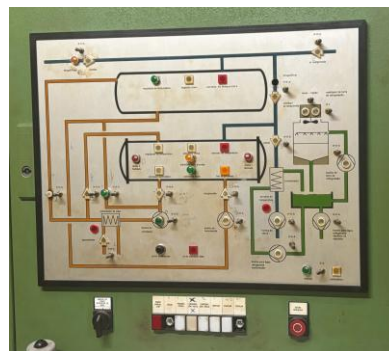


Figura 3.4 – Sistema de controlo de processo de creosotagem não automatizado

3.2 Legislação relativa à utilização de Creosoto

Dados os riscos que este produto apresenta para a saúde, nomeadamente de natureza cancerígena, o mesmo foi classificado como um biocida, fazendo com que a sua utilização tenha sido objeto de restrições, conforme preconizado na diretiva 98/8/CE do Parlamento Europeu.

A utilização de creosoto já tinha uma utilização limitada pela Diretiva 76/769/CEE no que se refere à comercialização e uso, devido à sua toxicidade. Logo, a sua utilização passou a ser limitada ao tratamento de madeiras em instalações industriais ou por profissionais, não podendo ser vendidas ao público em geral, sendo o seu manuseamento efetuado de acordo com a ficha de dados de segurança (Silva, 2010).

Além destas limitações ao uso, impostas pela Diretiva 76/769/CEE, o anexo 1 alterado pela diretiva 2001/90/CE impôs limitações a alguns constituintes do creosoto a ser usado em instalações industriais. Os produtos atualmente comercializados já cumprem esses limites (Silva, 2010).

A nível europeu, o enquadramento legal é definido principalmente pelo Regulamento REACH (Regulamento (CE) n.º 1907/2006) e pelo Regulamento relativo a Produtos Biocidas – BPR (Regulamento (UE) n.º 528/2012). Nestes decretos, o creosoto é identificado como substância perigosa, estando a sua comercialização e utilização por consumidores proibida em toda a União Europeia. A sua utilização profissional encontra-se limitada a aplicações específicas, nomeadamente travessas ferroviárias e postes de eletricidade ou telecomunicações, e, apenas nos Estados Membros que notifiquem e justifiquem essa exceção junto da Comissão Europeia (Regulamento (UE) n.º 528/2012 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 22 de maio de 2012, relativo à disponibilização no mercado e à utilização de produtos biocidas Texto relevante para efeitos do EEE, 2012).

Em Portugal, estas diretivas foram antecedidas pela transposição da Diretiva 2001/90/CE, através do Decreto-Lei n.º 121/2002, que já proibiu a comercialização de madeira tratada com creosoto ao público em geral e restringiu a sua utilização a contextos industriais e profissionais controlados. O creosoto só pode ser utilizado em travessas ferroviárias novas ou em manutenção, estando absolutamente proibida a sua aplicação em usos secundários, como vedações, mobiliário urbano ou madeira para queima.

Na Rede Ferroviária Nacional nas linhas de bitola 1668 mm, a aplicação de travessas de madeira creosotada subsistem em pequenos troços em plena via, onde se incluem as instaladas em pontes e pontões metálicos e nos respetivos encontros e, também, em algumas linhas de resguardo nas estações.

Na Linha do Vouga, única linha em bitola métrica em exploração, estão aplicadas travessas de madeira creosotada.

Decorrente das restrições/proibições de utilização de creosoto, a que acrescem igualmente dificuldades na obtenção da matéria-prima com origem na madeira é imperativo encontrar soluções alternativas, em particular para as situações específicas (pontes, pontões e túneis) onde, por questões de compatibilidade e/ou geometria não é possível instalar as travessas convencionais de betão (TBM e TBB).

Assim, como hipóteses alternativas à utilização de travessas de madeira creosotadas, deve ser equacionado o recurso às usualmente denominadas travessas sintéticas (travessas que incorporam elementos de plástico e/ou borracha e/ou fibra de vidro) e ainda outras soluções que poderão passar por redefinição geométrica de travessas convencionais de betão ou ainda por soluções de via não balastrada.

3.3 Travessas Sintéticas

As travessas sintéticas conseguem replicar o comportamento das travessas de madeira. Desta forma, acautelam que as características da via se mantêm praticamente inalteradas, o que assegura que poderá haver um impacto pouco significativo no material circulante e na subestrutura.

Ao longo dos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidas várias tecnologias de travessas sintéticas, como potencial alternativa às travessas de madeira. Ao contrário das travessas de aço e de betão, as travessas sintéticas podem ser projetadas para reproduzir o comportamento da madeira (um requisito essencial para a manutenção de vias-férreas com travessas de madeira), sendo praticamente isentas de manutenção e mais apeteceíveis do ponto de vista de sustentabilidade (Ferdous, et al., 2015).

As travessas sintéticas são especialmente constituídas por polietileno de alta densidade reciclado (HDPE). De modo a melhorar as características do material usa-se HDPE misturado com outros tipos de materiais, destacando-se: HDPE reforçado com fibras de vidro, HDPE misturado com borracha modificada e reforçado com fibras de vidro, HDPE reforçado com polímeros e HDPE combinado com produtos minerais (Lampo et al., 2001).

A nomenclatura das travessas em estudo não é consensual entre os diversos autores que analisaram esta matéria, pelo que no presente documento a sua divisão assenta na seguinte segmentação:

- Com incorporação de elementos em plástico e/ou borracha;
- Com reforço de fibras.

3.3.1 Com incorporação de elementos em plástico e/ou borracha

Este tipo de travessas sintéticas contemplam a utilização de plásticos reciclados (sacos de plástico, pneus de veículos inutilizados, copos plásticos de café descartáveis, garrafas, embalagens de detergente, etc.). O comportamento estrutural das travessas é particularmente determinado pelo polímero. A utilização destas travessas apresenta diversas vantagens como a facilidade de perfuração e corte, boa durabilidade, aproveitamento de resíduos, preço razoável e elevada resistência ao desgaste. No entanto, padecem de baixa resistência e rigidez, flexibilidade de *design* limitada, sensibilidade à temperatura e à fluência, além de reduzida resistência ao fogo (Ferdous, et al., 2015).

No Quadro 3.1 apresenta-se características de algumas das travessas que contemplam a incorporação de plásticos.

Quadro 3.1 – Tipos de Travessas sintéticas constituídas por plásticos
(adaptado de: Ferdous, et al., 2015)

Nome	Materiais constituintes	Aplicações	Imagens Ilustrativas
Tie-Tek	85% plástico reciclado	Plena Via e Pontes	
Axion	100% plástico reciclado	Plena Via e Pontes	
IntegriCo	Materiais plásticos 100% reciclados destinados a aterros sanitários	Turístico, mineral e Industrial	
I-Plas	100% plástico reciclado doméstico e industrial	Substituição de travessas de madeira	
Tufflex	Mistura de polipropileno reciclado e polietileno	Troços subterrâneos e bitola estreita	
KLP	100% materiais plásticos reciclados	Plena Via e Pontes	
MPW	Polímeros, mistura de plásticos e fibra de vidro reciclada	Substituição de travessas de madeira	

Em seguida, para cada um dos tipos de travessas identificados anteriormente procede-se à sua caracterização.

3.3.1.1 Tie-Tek

As travessas tipo Tie-Tek, Figura 3.5, contêm incorporados plásticos provenientes de garrafas e sacos de plástico reciclados, pneus e desperdícios de fibra de vidro. São constituídas por 85% de materiais reciclados que, quando combinados com enchimentos minerais criam travessas duráveis, autoextingíveis e resistentes a condições ambientais diversas. A sua durabilidade esperada é de 40 anos (Jabu et al., 2024).



Figura 3.5 – Travessas Tie-Tek
(Patil Group - Composite Sleepers, sem data)

O processo de fabrico destas travessas consiste na replicação dos seguintes procedimentos: (*Our Process – EFG TieTek*, sem data):

1. Seleção de matérias-primas

Selecionar as matérias-primas (aproximadamente 2 milhões de garrafas de plástico, 8 milhões de sacos de plástico, 10.000 pneus de veículos descartados) de acordo com a fórmula patenteada e comprovada da TieTek (Nota: Não foi possível obter informação relativa ao número de travessas que resultam destas quantidades);

2. Mistura

Misturar as matérias-primas através da fusão e composição, com testes contínuos de qualidade;

3. Moldagem e arrefecimento

Moldar e arrefecer as travessas, garantindo um tamanho consistente e sem curvaturas indesejadas, torções ou desvios da forma retangular;

4. Texturização

Texturizar para melhores condições de aderência ao balastro e resistência lateral;

5. Controlo de Qualidade Final

Realizar um processo não invasivo para testar cada travessa com equipamento de raio-X e de flexão.

No Quadro 3.2, apresentam-se os parâmetros de resistência das travessas do tipo Tie-Tek.

Quadro 3.2 – Parâmetros de Resistência das travessas Tie-Tek
(adaptado de: Louie, 2013)

Propriedades da travessa	Parâmetros de Resistência
Densidade (kg/m ³)	1153
Módulo de Elasticidade (MPa)	> 1724
Resistência à Flexão (MPa)	>18.60
Módulo de Elasticidade à Compressão (MPa)	269.00
Resistência ao esmagamento (MPa)	16.50
Resistência ao Arrancamento do Parafuso (kN)	35.60
Dilatação Térmica, (cm/cm/°C)	1.35x10 ⁻⁴
Impedância Elétrica (wet), (Ω)	500x10 ⁶
Inflamabilidade	205.00

Este tipo de travessas apresenta melhorias quando comparado com as travessas de madeira devido à sua boa resistência a insetos e fungos e a baixa condutividade elétrica.

3.3.1.2 Axion

As travessas nomeadas Axion (Figura 3.6) são compostas a partir de 100% de materiais reciclados, nomeadamente copos de café, sacos de plástico, pacotes de leite, embalagens de detergente, e resíduos de plásticos industriais (Jabu et al., 2024).

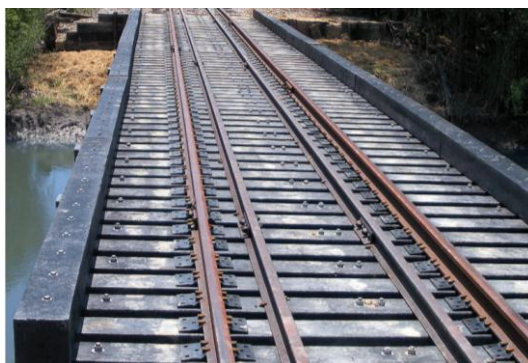


Figura 3.6 – Travessas Axion
(Axion, sem data)

Estas travessas, produzidas desde 1994, têm apresentado várias utilizações, como em AMV, passagens de nível, pontes e na plena via, em situações de tráfego de mercadorias ou de passageiros. A sua vida útil é de 50 anos (Jabu et al., 2024).

No Quadro 3.3 podem ser observados os parâmetros de resistência da travessa em estudo.

Quadro 3.3 – Parâmetros de Resistência das travessas Axion
(adaptado de: Yu, 2010)

Propriedades da travessa	Parâmetros de Resistência
Densidade (kg/m ³)	849-897
Módulo de Elasticidade (MPa)	1724
Resistência à Flexão (MPa)	20.60
Módulo de Elasticidade à Compressão (MPa)	176.50
Resistência ao esmagamento (MPa)	20.60
Resistência de Arrancamento do Parafuso (kN)	31.60
Dilatação Térmica (cm/cm/°C)	0.74X10 ⁻⁴

3.3.1.3 IntegriCo

As travessas IntegriCo (Figura 3.7) são compostas a 100% por plásticos reciclados com destino a aterro sanitário. As travessas são produzidas consoante a aplicação necessária, nomeadamente para tráfego urbano, industrial ou urbano (Ferdous, et al., 2015).

Os seus principais benefícios são a boa resistência à humidade e insetos, o seu bom comportamento aos ensaios de corte em placa e a vida útil de 50 anos (Ferdous, et al., 2015).



Figura 3.7 – Travessas IntegriCo
(IntegriCo Composites Chooses Louisiana for Its Booming Plastic Railroa, sem data)

No Quadro 3.4, observam-se os parâmetros de resistência das travessas IntegriCo.

Quadro 3.4 – Parâmetro de resistência das travessas IntegriCo
(adaptado de: Ferdous, et al., 2015)

Propriedades da travessa	Parâmetros de Resistência
Densidade (kg/m ³)	1121
Módulo de Elasticidade (MPa)	1655
Resistência à Flexão (MPa)	18,6
Módulo de Elasticidade à Compressão (MPa)	262
Resistência ao esmagamento (MPa)	15,9
Força de Arrancamento do Parafuso (kN)	73,4
Dilatação Térmica (cm/cm/°C)	1,26X10 ⁻⁴

3.3.1.4 I-Plas

As travessas I-Plas, compostas 100% por materiais reciclados, nomeadamente resíduos domésticos e industriais, incluem sacos de plástico, garrafas de bebidas e para-choques de automóveis antigos. O seu principal objetivo é substituir as travessas de madeira por um produto mais ecológico (Ferdous, et al., 2015).

Estas travessas abrangem alguns benefícios, tais como: o bom desempenho relativamente à degradação, torção, podridão, resistência ao fogo, reduzido custo de manutenção e sobretudo vida útil de 30 anos (Ferdous, et al., 2015).

3.3.1.5 Tufflex

Em 2004, foram criadas travessas a partir de uma mistura de polipropileno e polietileno (materiais 100% reciclados). Estas foram inicialmente utilizadas numa linha de metropolitano e numa via-férrea de bitola estreita, localizada numa plantação de cana-de-açúcar (Ferdous, et al., 2015).

A grande vantagem destas travessas é a sua durabilidade, especialmente em ambientes subterrâneos como minas. Neste tipo de ambientes, onde a humidade, a água e as flutuações de pH são um desafio para os materiais tradicionais, as travessas da Tufflex Plastic demonstraram melhores resultados quando comparadas com as travessas de madeira e betão (Ferdous, et al., 2015).

Recentemente, a Tufflex Plastic instalou as suas travessas nas minas da AngloGold Ashanti e Gold Fields em África, e o seu desempenho no terreno está agora a ser avaliado (Ferdous, et al., 2015).

3.3.1.6 KLP

As travessas KLP (Figura 3.8), produzidas 100% por materiais reciclados, destinam-se a ser implementadas na plena via, AMV e pontes (Ferdous, et al., 2015).



Figura 3.8 – Travessas KLP
(Lankhorst, sem data)

A quantidade de material a utilizar para a produção destas travessas foi otimizado, usando 35% menos plástico para produzir as travessas de plena via em comparação

com os modelos sólidos e retangulares. Esta inovação não só diminui os custos de produção, como também os de transporte (Ferdous, et al., 2015).

As travessas KLP oferecem algumas vantagens, nomeadamente uma longa vida útil (50 anos), são duráveis e fáceis de instalar, sustentáveis e aparentam ter uma boa resistência lateral (Ferdous, et al., 2015).

Lançadas em 2006, e aplicadas em mais de 20 AMV nos Países Baixos e na Alemanha, recentemente instalou-se, em França, um troço de 1 km de via-férrea com estas travessas, para testar o seu desempenho em condições reais (Ferdous, et al., 2015).

No Quadro 3.5, observam-se os parâmetros de resistência das travessas KLP.

Quadro 3.5 – Parâmetro de resistência das travessas KLP
(adaptado de: Siahkouhi et al., 2021)

Propriedades da travessa	Parâmetros de Resistência
Densidade (kg/m ³)	870
Módulo de Elasticidade (MPa)	800
Coefficiente de Poisson	0.4

3.3.1.7 MPW (Mixed Plastic Waste)

As travessas MPW são produzidas desde 2008, inseridas no projeto *Railwaste*, na Alemanha. Estas travessas são fabricadas a partir de uma mistura de plásticos reciclados, resíduos de fibra de vidro e agentes auxiliares, usando um processo de extrusão com uma matriz de polímero termoplástico (Ferdous, et al., 2015).

É esperado que as travessas ofereçam vantagens como melhor resistência às condições climáticas (quando comparadas com as travessas de madeira), menor consumo de matérias-primas e melhor propriedades em termos de acústica (Ferdous, et al., 2015).

No entanto, foram detetados muitos vazios, o que, por um lado, pode ser benéfico para a redução de peso, mas, por outro, é prejudicial do ponto de vista estrutural (Ferdous, et al., 2015).

3.3.2 Com reforço de fibras

Segundo Ferdous, et al.(2015) estão estudados três tipos de travessas sintéticas (consideradas neste estudo como travessas sintéticas com reforço de fibras), do tipo um, dois e três, que serão abordadas seguidamente.

3.3.2.1 Com reforço curto ou sem reforço de fibras (Tipo 1)



As travessas constituídas por plástico reciclado (sacos de plástico, pneus de veículos inutilizados, copos de café descartáveis, pacotes de leite, embalagens de detergente,

etc.) ou betume com cargas (areia, gravilha, vidro reciclado ou fibras curtas de vidro < 20 mm) enquadram-se na categoria de travessas Tipo 1. O comportamento estrutural destas travessas é particularmente determinado pelo polímero. Embora esta tecnologia inclua fibras curtas de vidro para aumentar a rigidez e/ou resistência à fissuração, estas fibras não têm um efeito significativo no reforço estrutural necessário para aplicações ferroviárias de alta exigência (Ferdous, et al., 2015).

A elevada procura por materiais alternativos para travessas conduziu algumas empresas de manutenção ferroviária a adotar e testar o uso destes materiais. As travessas do Tipo 1 apresentam várias vantagens, como facilidade de perfuração e corte, boa durabilidade, aproveitamento de resíduos, preço razoável e elevada resistência ao desgaste. No entanto, padecem de baixa resistência e rigidez, flexibilidade de *design* limitada, sensibilidade à temperatura e à fluência, além de reduzida resistência ao fogo (Ferdous, et al., 2015).

As travessas mais conhecidas nesta categoria apresentam-se no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Tipos de Travessas Sintéticas Tipo 1
(adaptado de: Ferdous, et al., 2015)

Nome	Materiais constituintes	Aplicações	Imagens Ilustrativas
<i>Natural Rubber</i>	Borracha natural	Via em bitola estreita	
<i>Wood Core</i>	Plástico reforçado com viga de madeira	Substituição de travessas de madeira	

a) *Natural Rubber*

Em 2005 um grupo de investigadores da Tailândia decidiu fabricar travessas ferroviárias com borracha natural, inspirado pelas misturas betuminosas com adição de borracha natural (Ferdous, et al., 2015).

As propriedades mecânicas da borracha natural são melhoradas através de um processo de ebonite (consiste no processo de transformação de borracha natural num material mais duro, nomeado ebonite ou borracha dura («Propriedades da Ebonite», sem data)), que aumentou a densidade das ligações cruzadas do material. Com isto, obtém-se um módulo de compressão e uma dureza superiores aos dos compósitos TieTek, baseados em borracha de sucata/pneus, que serviram como referência para a sua pesquisa (Ferdous, et al., 2015).

b) *Wood Core*

A travessa *Wood Core*, produzida desde 2011, é uma travessa de plástico com um núcleo de madeira. O seu conceito baseia-se numa mistura plástica de polietileno que a protege contra-ataques de insetos, humidade e degradação por raios UV. A travessa tem um reforço retangular e, no seu interior, um núcleo de madeira que suporta a carga (Jabu et al., 2024).

Deste modo, caracteriza-se como sendo uma travessa de madeira laminada com materiais plásticos para evitar o ataque de térmitas e a absorção excessiva de água (Jabu et al., 2024).

No Quadro 3.7, apresentam-se os seus parâmetros de resistência.

Quadro 3.7 – Parâmetros de resistência das travessas *Wood Core*
(adaptado de: Kumar Das et al., 2018)

Propriedades da travessa	Parâmetros de Resistência
Densidade (kg/m ³)	993
Módulo de Elasticidade (MPa)	1517
Resistência à Flexão (MPa)	17.20
Módulo de Elasticidade à Compressão (MPa)	241
Resistência ao esmagamento (MPa)	15.20
Dilatação Térmica (cm/cm/°C)	0.2X10 ⁻⁴

3.3.2.2 Com reforço de fibras longas na direção longitudinal (Tipo 2)

As travessas de Tipo 2 (Figura 3.9) são reforçadas com fibras contínuas longas de vidro na direção longitudinal e sem reforço ou com fibras muito curtas distribuídas aleatoriamente na direção transversal. A resistência e a rigidez na direção longitudinal são fundamentalmente determinadas pelas fibras longas de vidro, enquanto a direção transversal é dominada pelo polímero (Ferdous, et al., 2015).

Estas travessas são particularmente adequadas para vias-férreas com balastro, onde os esforços nas travessas são predominantemente de flexão. No entanto, são menos indicadas para aplicações em pontes (por exemplo, travessas de tabuleiro), onde estão sujeitas a elevados níveis de esforços combinados de flexão e corte (Ferdous, et al., 2015).

Os principais benefícios desta categoria incluem facilidade de perfuração e corte, boa durabilidade, elevada resistência à flexão e um módulo de elasticidade elevado. No entanto, a baixa resistência ao corte e o baixo módulo de corte, a flexibilidade de *design* limitada, a resistência marginal ao fogo e o preço elevado são alguns dos desafios associados a este tipo de travessa (Ferdous, et al., 2015).

Nos anos de 1970, os japoneses identificaram o grande problema das travessas de madeira, nomeadamente a sua pouca durabilidade, devido à exposição à água e aos esforços provenientes da superestrutura. Resultando em 1978, na criação de travessas com características semelhantes às da madeira, mas pouco afetadas pelas condições atmosféricas a que são expostas e melhor durabilidade (Koller, 2024).

A travessa *Fibre-reinforced Foamed Urethane* (FFU) enquadra-se na presente categoria e apresenta como principais particularidades: peso reduzido, boa resistência à absorção de água, ao calor e à corrosão, facilidade de perfuração e uma vida útil prevista superior a 50 anos. O material FFU tem vindo a ser aplicado na indústria ferroviária como travessas para vias normais, travessas de tabuleiro para pontes e apoios de AMV (Aparelhos de Mudança de Via), com uma ampla gama de alturas, variando entre 100 mm e 450 mm.



Figura 3.9 – Travessas Sintéticas FFU (Tipo 2) da Sekisui

Estas travessas são produzidas através do processo de pultrusão, como descrito na Figura 3.10.

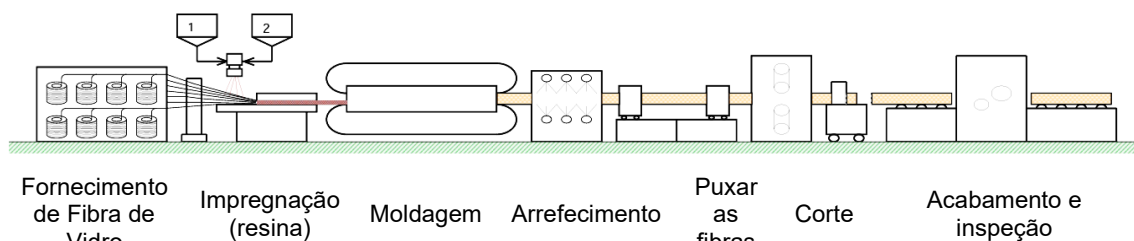


Figura 3.10 – Processo de fabrico das travessa FFU (adaptado de: SEKISUI, 2020)

Neste processo, o material base da travessa é criado através da extração dos componentes individuais da matéria-prima com recurso a uma caixa de moldagem.

As fibras de vidro contínuas com superfície otimizada são extraídas com precisão para dentro da caixa de moldagem. Adiciona-se um composto especial de poliuretano durante o processo de moldagem, que satura completamente as fibras de vidro muito densas, sem deixar poros. A temperatura, controlada com precisão, e a velocidade de moldagem, supervisionada, levam à produção de um material de alta qualidade e durabilidade. O filamento FFU final é extraído de forma contínua na outra extremidade do canal de invólucro e monitorizado enquanto arrefece. De seguida, é cortado no

comprimento necessário e verificado de novo para aferir a sua qualidade (SEKISUI, 2020).

Esta tecnologia permite a produção de travessas com geometrias variadas, desde placas de base com alguns milímetros de altura até elementos com 16 m de comprimento, 70 cm de largura e 35 cm de altura, de modo a garantir uma elevada precisão dimensional (Koller, 2024).

É possível produzir travessas com dimensões e formatos específicos para cada projeto (Figura 3.11), incluindo para zonas de curva, ranhuras fresadas para apoios, furos e outros elementos construtivos, todos executados em fábrica segundo as especificações do cliente. Cada travessa é identificada com a numeração prevista no projeto, marcada com o período de fabrico e expedida para o local de instalação (Koller, 2024).

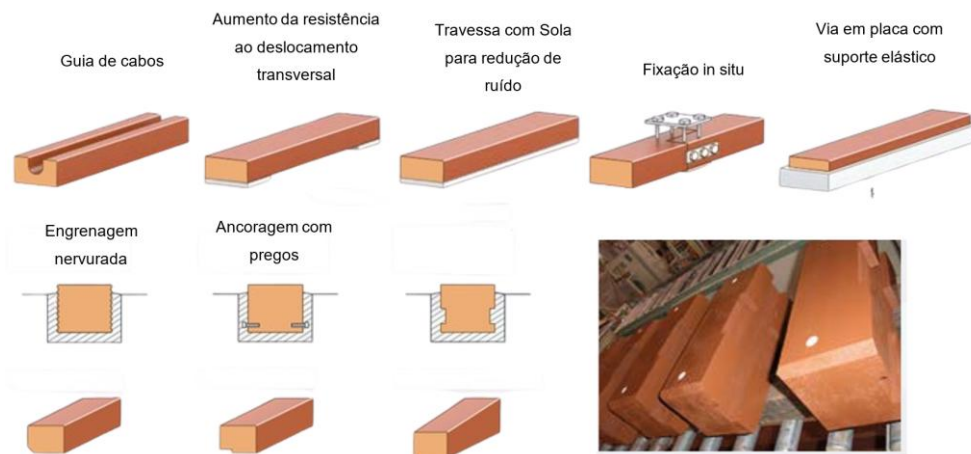


Figura 3.11 – Produção de travessas FFU à medida (adaptado de: SEKISUI, 2020)

As travessas de FFU (Figura 3.12) foram aplicadas pela primeira vez em 1980, em dois projetos experimentais para os caminhos-de-ferro do Japão: uma ponte com via exposta e um túnel com travessas bi-bloco em via de laje.

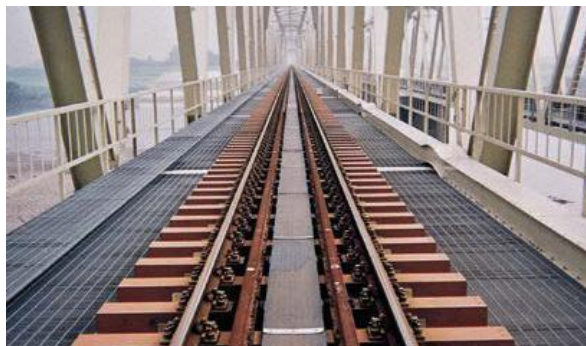


Figura 3.12 – Travessas FFU numa ponte na linha de alta velocidade de Shinkansen Tóquio-Osaka (270 km/h) (Koller, 2024)

O Instituto Técnico de Investigação Ferroviária do Japão (RTRI), testou as travessas antes da sua instalação, em 1980, bem como após 5, 10, 15 e 30 anos. Estes testes,

nomeadamente aos 30 anos, determinaram que as travessas de FFU podem ser usadas por mais 20 anos, perfazendo assim a sua durabilidade de 50 anos.

No Quadro 3.8, apresentam-se os valores de resistência do material, tendo em consideração os seus valores de rutura.

Quadro 3.8 – Resultados dos estudos realizados pelo RTRI sobre travessas FFU (adaptado de: SEKISUI, 2020)

Valores testados	Uni.	Valor como equivalente a Densidade de 740 kg/m ³ após 10, 15, 30 anos de uso e novo				Requisito JIS (Novo)	Requisito ISO 12856-1 Tipo A (Novo)
		30 anos	15 anos	10 anos	Novo		
Resistência à flexão	N/mm ²	116.6	131.4	114.6	142	≥ 70	≥ 60
Módulo de Elasticidade (E-Modulus)	N/mm ²	8414	8788	8044	8100	≥ 6 000	≥ 6 000
Resistência à compressão longitudinal	N/mm ²	60.3	63.2	75.7	58	≥ 40	≥ 40
Tensão de rutura em CA	kV	≥ 25	≥ 25	≥ 25	≥ 25	≥ 20	≥ 20
Resistência de isolamento	MΩ	8,2 × 10 ⁵	1,4 × 10 ⁶	1,1 × 10 ⁶	1,6 × 10 ⁷	≥ 1 × 10 ⁴	≥ 1 × 10 ⁴

As travessas de madeira sintética FFU apresentam a vantagem de poderem ser reparadas em caso de dano localizado, prolongando significativamente a sua vida útil. O processo de reparação (Figura 3.13) pode ser realizado de duas formas principais: através da aplicação de resina de poliéster de dois componentes, reforçada com fibras de vidro, que permite uma cura rápida em cerca de 30 minutos, ou pela utilização de um taco de madeira sintética FFU combinado com resina sintética, solução que garante uma reparação mais robusta, embora com um tempo de cura superior (aproximadamente 4 horas). Estes métodos asseguram a recuperação da capacidade mecânica da travessa e a correta fixação dos elementos de via (SEKISUI, 2020).



Figura 3.13 – Método de reparação das Travessas FFU (SEKISUI, 2020)

As travessas FFU também podem ser aplicadas em passagens de nível, incluindo rodoviárias, como se exemplifica na Figura 3.14.



Figura 3.14 – Travessa FFU aplicada em passagem de nível (Sekisui, 2020a)

Este tipo de travessas têm vindo a ser aplicadas em vários países, com diferentes condições atmosféricas, nomeadamente no Japão, Austrália (Figura 3.15), Alemanha (Figura 3.16), Rússia (Figura 3.17), Estados Unidos da América (Figura 3.18), entre outras.

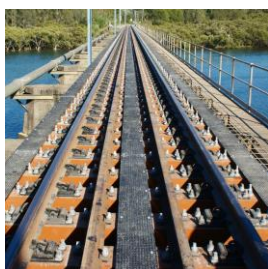


Figura 3.15 – Travessas FFU, Austrália (Sekisui, 2020a)



Figura 3.16 – Travessas FFU Alemanha (Sekisui, 2020a)



Figura 3.17 – Travessas FFU, Rússia (Sekisui, 2020a)



Figura 3.18 – Travessas FFU, Estados Unidos (Sekisui, 2020a)

3.3.2.3 Com reforço de fibras nas direções longitudinal e transversal (Tipo 3)

As travessas de Tipo 3 têm fibras de reforço longas na direção longitudinal e transversal, o que se traduz num comportamento à flexão e ao corte dominados pelas fibras. O comportamento estrutural destas travessas pode ser adaptado através da regulação do reforço das fibras em cada direção, de acordo com os requisitos específicos de desempenho (Ferdous, et al., 2015).

Por vezes, a desvantagem do comportamento não dúctil das travessas em polímero reforçado com fibra de vidro pode ser ultrapassada através da inclusão de algumas barras de reforço em aço. A ductilidade é uma característica particularmente relevante quando as travessas são instaladas em pontes (Ferdous, et al., 2015).



As principais vantagens destas travessas são a elevada flexibilidade de design, boa resistência à flexão e ao corte, facilidade de perfuração e boa resistência ao fogo. No

entanto, o processo de produção das tecnologias de travessas sintéticas desta categoria é relativamente lento, aumentando assim o custo de fabrico (Ferdous, et al., 2015).

As travessas de polímero tipo sanduíche e as travessas híbridas, nas quais as fibras são orientadas nas duas direções para resistir tanto às tensões de flexão como às forças de corte, enquadram-se nesta categoria.

No Quadro 3.9, apresentam-se ambas as travessas bem como os materiais que as constituem.

Quadro 3.9 – Tipos de Travessas Sintéticas Tipo 3
(adaptado de: Ferdous, Manalo, Van Erp, et al., 2015)

Nome	Materiais constituintes	Aplicações	Imagens Ilustrativas
<i>Sandwich</i>	Compósito sanduíche laminado com cola	Plena Via, AMV e Pontes	
<i>Hybrid</i>	Compósito pultrudido preenchido com betão geopolimérico	Plena Via, AMV e Pontes	

a) *Sandwich*

O desenvolvimento das travessas tipo *sandwich* teve como objetivo a substituição das travessas de madeira tradicionais em AMV. Estas travessas apresentam propriedades mecânicas bastante superiores às travessas de madeira existentes em AMV (Ferdous, et al., 2015).

A sua melhoria mais relevante é a resistência ao arrancamento do parafuso, um problema bastante comum nas travessas de madeira tradicional que compromete todo o seu comportamento.

No Quadro 3.10 apresentam-se os parâmetros de resistência das travessas do tipo *Sandwich*.

Quadro 3.10 – Parâmetros de resistência das travessas *Sandwich*
(adaptado de: Manalo & Aravinthan, 2012)

Propriedades da travessa	Parâmetros de Resistência
Densidade (kg/m ³)	5190
Resistência à Flexão (MPa)	103
Força de Arrancamento do Parafuso (kN)	63.80

b) *Hybrid*

As travessas de betão geopolimérico podem considerar-se uma alternativa ecológica relativamente às travessas convencionais, uma vez que este tipo de betão utiliza a cinza volante (subproduto industrial), de modo a minorar os resíduos em aterros sanitários (*Geopolymer Concrete* | *Springerprofessional.De*, sem data).

As travessas *Hybrid* produzidas pelo principal fornecedor de travessas de betão na Austrália, desde 2002. O fabricante fornece travessas de betão pré-esforçado de geopolímero para as principais linhas ferroviárias (Gourley & Johnson, 2005).

No Quadro 3.11 apresentam-se os parâmetros de resistência das travessas do tipo *Hybrid*.

Quadro 3.11 – Parâmetros de resistência das travessas *Hybrid*
(adaptado de: Jabu et al., 2024)

Propriedades da travessa	Parâmetros de Resistência
Resistência à Tração (MPa)	24
Resistência à Flexão (MPa)	22
Resistência à compressão (MPa)	171

3.4 Travessas de Madeira versus Travessas Sintéticas

A análise das diferentes soluções de travessas evidencia contrastes significativos entre as travessas de madeira creosotadas e as travessas sintéticas desenvolvidas nas últimas décadas.

As travessas de madeira apresentam-se como a solução tradicional, com vantagens associadas à elasticidade natural, ao manuseamento e instalação, bem como pelo baixo custo inicial. No entanto, possuem uma vida útil limitada (20–30 anos), devido à fácil degradação por agentes biológicos e consequente necessidade de tratamentos químicos com creosoto, cujo uso tem vindo a ser restringido por legislação ambiental devido ao seu impacto tóxico.

Em contraste, as travessas sintéticas, tanto as fabricadas com plásticos reciclados e/ou borrachas, como as reforçados com fibras (curtas, longas ou multidirecionais), oferecem maior durabilidade (40–50 anos ou mais), resistência a condições ambientais adversas e possibilidade de integração de soluções funcionais (reforços estruturais, guias de cabos, elementos para redução de ruído e vibração, suporte elástico em via em placa, entre outros). Além disso, estas alternativas permitem reciclagem de materiais e reduzem a dependência de madeira de alta densidade, alinhando-se com princípios de sustentabilidade e economia circular.

No entanto, as travessas sintéticas apresentam também desvantagens, nomeadamente o custo inicial superior e a necessidade de processos industriais especializados para

fabrico e reparação. Ainda assim, o seu menor custo de manutenção e a maior vida útil resultam numa vantagem económica em termos de custo do ciclo de vida quando comparadas com as de madeira.

No Quadro 3.12 apresenta-se comparação sucinta entre ambas as soluções estudadas no presente capítulo.

Quadro 3.12 – Comparação entre travessas de madeira e travessas sintéticas

Critério	Travessas de Madeira Creosotadas	Travessas Sintéticas (plástico/borracha/fibras)
Durabilidade	– 20–30 anos, dependendo do clima e do tráfego.	– 40–50 anos ou mais, com elevada resistência ambiental.
Resistência biológica	– Vulneráveis a fungos, insetos e humidade, mesmo com tratamento.	– Imunes a agentes biológicos, não degradam em contacto com água.
Tratamento químico	– Necessitam de creosoto (restrições legais devido à toxicidade).	– Não requerem produtos tóxicos; muitas vezes incorporam materiais reciclados.
Elasticidade natural	– Boa elasticidade, adequada para linhas secundárias.	– Elasticidade ajustável em fabrico (ex.: reforços, elastómeros).
Desempenho técnico adicional	– Limitado às propriedades naturais da madeira.	– Permitem integração de guias de cabos, reforços, redução de ruído, sistemas de fixação especiais.
Manutenção	– Substituições frequentes; reparações simples, mas recorrentes.	– Pouca necessidade de manutenção; reparações localizadas com resinas/tacos FFU.
Custo inicial	– Inferior, sendo uma solução de menor investimento imediato.	– Superior, devido a materiais e processos industriais avançados.
Custo do ciclo de vida	– Mais elevado, pela necessidade de substituições periódicas.	– Mais baixo a longo prazo, graças à durabilidade e baixa manutenção.
Sustentabilidade	– Impacto ambiental elevado: consumo de madeira densa e uso de creosoto tóxico.	– Mais sustentável: uso de reciclados, 100% recicláveis em alguns casos, alinhadas com economia circular.
Aplicações típicas	– Linhas secundárias, zonas rurais, projetos de baixo investimento.	– Linhas principais, zonas urbanas, vias de alta velocidade, ambientes agressivos.

Em síntese, enquanto as travessas de madeira continuam a ser competitivas em linhas secundárias ou projetos de baixo investimento, as travessas sintéticas assumem-se progressivamente como a solução mais robusta, sustentável e economicamente vantajosa a longo prazo para linhas principais e ambientes de elevada exigência técnica.

3.5 Outras soluções

Existem diversas soluções possíveis no que respeita à utilização de travessas, cuja escolha deve atender às condicionantes estruturais e funcionais da infraestrutura ferroviária. Entre estas soluções encontram-se as travessas de betão com altura reduzida e reforço de aço, que apresentam vantagens ao nível da resistência e da durabilidade.

Contudo este tipo de travessas, embora com uma altura reduzida têm um campo de aplicação limitado tornando-as inadequadas para pontes metálicas dada a impossibilidade de materialização da interface betão/estrutura, ficando limitadas a zonas de via balastrada, como por exemplo: túneis e plataformas de passageiros.

As vias não balastradas constituem uma alternativa tecnicamente vantajosa, sobretudo em linhas de alta velocidade, túneis e viadutos, devido à sua elevada estabilidade geométrica e à reduzida necessidade de manutenção ao longo do ciclo de vida. Todavia, importa salientar que a sua implementação em determinadas situações pode ser problemática. Um exemplo específico verifica-se em pontes metálicas, onde não seja possível a substituição do tabuleiro por um novo para via não balastrada.

4 CASO DE ESTUDO – PONTES DE ALFERRAREDE E DA VÁRZEA

Atualmente, a IP tem em curso ações de substituição de travessas de madeira em pontes metálicas por travessas sintéticas.

No âmbito dessa substituição, foi prevista para o final do terceiro trimestre de 2025, a intervenção de substituição em duas pontes na Linha da Beira Baixa, concretamente a ponte de Alferrarede (Pk 7+731) e a ponte da Várzea (Pk 21+119).



Figura 4.1 – Localização das pontes de Alferrarede e da Várzea (Google Earth, 2025)

Por se tratar de uma instalação protótipo, considerou-se de todo o interesse que o caso de estudo apresentado se centrasse nestas duas obras de arte, caracterizando a situação atual, bem como a situação futura, mas acima de tudo contemplando a definição de um conjunto de indicadores para efeitos de monitorização do desempenho em serviço das soluções implementadas o que permitirá a realização de ajustamentos em intervenções futuras.

Por razões internas da IP, a calendarização da intervenção prevista para as duas pontes sofreu uma dilatação temporal, tendo a primeira ocorrido já no quarto trimestre de 2025 e a segunda foi reprogramada para 2026, em data a definir posteriormente.

4.1 Ponte de Alferrarede

A ponte de Alferrarede, localiza-se num troço em via única ao Pk 7+731 da Linha da Beira Baixa e considera um vão único com uma extensão de aproximadamente 22 metros (Figura 4.2 e Figura 4.3).



Figura 4.2 – Ponte de Alferrarede, vista inferior



Figura 4.3 – Ponte de Alferrarede, vista superior

Trata-se de uma ponte metálica numa estrutura treliçada, com encontros em cofre e alvenaria de pedra, sob a qual se localiza uma linha de água (Ribeira de Alferrarede).

Esta obra de arte, em termos planimétricos localiza-se em alinhamento reto, enquanto em termos altimétricos, a mesma se localiza em trainel com uma inclinação de 0,000‰ (patamar), conforme se pode observar na Figura 4.4, podendo neste local as composições ferroviárias circular à velocidade máxima de 100 Km/h.

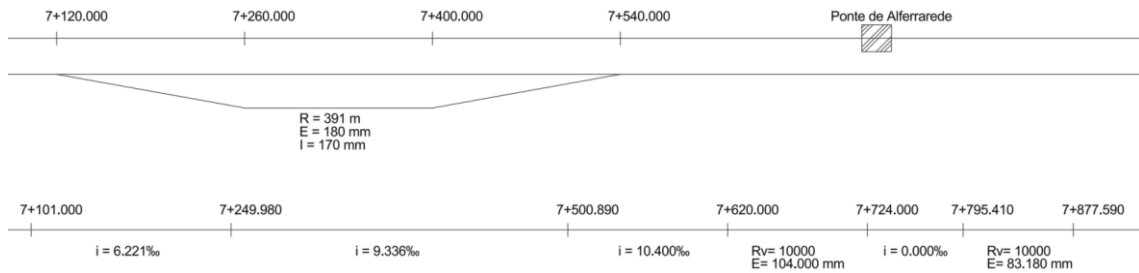


Figura 4.4 – Diagrama Unifilar. Ponte de Alferrarede

4.1.1 Superestrutura de Via - Situação Inicial

Conforme é possível observar na Figura 4.5, na ponte de Alferrarede a via é não balastrada, sendo o armamento da via constituído por travessas de madeira de pinho equipadas com fixações Nabla com chapim. Esta seção pontual da linha está enquadrada por via balastrada normal constituída por travessas de betão bi-bloco e fixações PRX assentes sobre camada de balastro.

No total esta obra de arte considera a necessidade de instalação de 54 travessas, contemplando em cada um dos encontros 5 travessas, o que conduz a 44 travessas sobre a estrutura metálica.

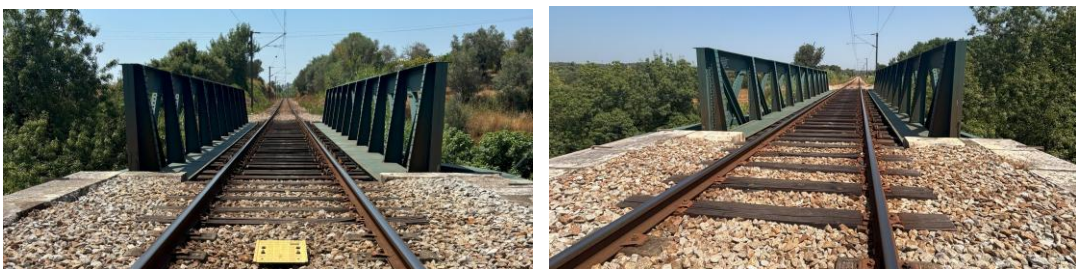


Figura 4.5 – Ponte de Alferrarede

A distribuição das travessas ao longo da obra de arte não é uniforme, situação que é corrente neste tipo de estrutura, uma vez que a posição destas é sempre conjugada com os elementos metálicos em presença (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Ponte de Alferrarede, distribuição das travessas

Conforme se pode observar na Figura 4.7, as travessas de madeira instaladas nesta ponte apresentam um grau de degradação considerável, razão que leva, por questões de segurança à necessidade de proceder à sua substituição a curto prazo.



Figura 4.7 – Ponte de Alferrarede, Travessas degradadas

As travessas são fixadas à estrutura (Figura 4.8) mediante o recurso a:

- Cantoneiras metálicas em “U” para acomodar cada travessa (A);
- Ganchos metálicos e correspondentes parafusos, anilhas e porcas (B);
- Cantoneiras metálicas para ligação entre os topos dos ganchos (C).

A colocação das placas metálicas de travamento, conduz à necessidade de realização da chamada sabotagem das travessas.

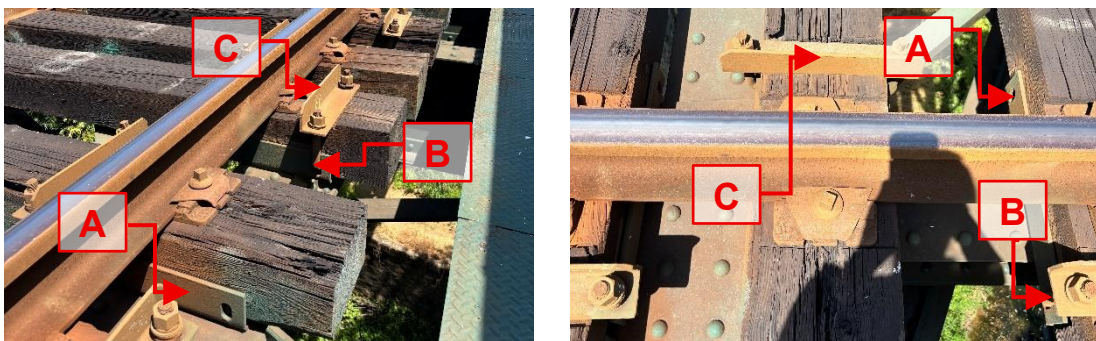


Figura 4.8 – Ponte de Alferrarede, Fixação das Travessas à estrutura

No que concerne à manutenção / reabilitação da componente metálica, esta obra de arte foi intervencionada em julho de 2018 (decapagem e pintura), conforme se pode observar na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Ponte de Alferrarede, manutenção / reabilitação da componente metálica

4.1.2 Superestrutura de Via - Situação Final

Após a intervenção prevista, esta obra de arte ficará equipada com o seguinte armamento de via:

- Travessas de madeira sintéticas – FFU;
- Fixações Vossloh;
- Carril 54E1, a transformar em BLS.

Complementarmente os atuais sistemas de fixação das travessas à estrutura metálica foram substituídos de acordo com as novas diretrizes da IP para amarração das travessas em pontes metálicas, neste caso em reta, ou seja, sem escala prática (Figura 4.10).

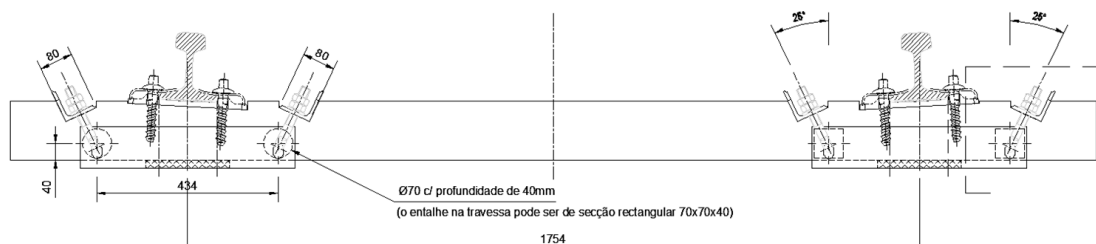


Figura 4.10 – Sistema de fixação da travessa à estrutura, em reta

A intervenção de substituição das travessas de madeira instaladas na obra de arte, por travessas sintéticas FFU, decorreu no mês de outubro de 2025. Para este tipo de intervenção é usual a metodologia que se apresenta em seguida.

1. Identificação da necessidade da intervenção;
2. Escolha da solução a materializar;
3. Aquisição das travessas e elementos de fixação do carril às travessas e destas à estrutura;
4. Seleção da Entidade Executante (Empreiteiro);
5. Receção das travessas e elementos de fixação;
6. Transporte das travessas e elementos de fixação para o estaleiro;
7. Preparação das travessas, incluindo a realização de sabotagem e furações;
8. Transporte das travessas para o local de aplicação;
9. Instalação das travessas;
10. Verificação / Validação do Trabalho realizado;

11. Recolha dos produtos sobrantes e seu transporte para as instalações do Dono de Obra, ou para depósito devidamente licenciado;
12. Acompanhamento do desempenho em serviço (Monitorização).

Embora alguns dos itens não tenham tido o acompanhamento da autora do presente documento (1, 2, 3 e 4), procede-se em seguida ao seu detalhe.

4.1.2.1 Identificação da necessidade da intervenção

A necessidade de intervenção decorre das observações realizadas no âmbito da filosofia de manutenção estabelecida pela IP, em que a estrutura para além de ser sujeita a inspeções realizadas no tempo, são igualmente estabelecidos cenários de evolução das patologias que vão sendo identificadas.

Em resultado da evolução expectável é feita a programação da intervenção.

4.1.2.2 Escolha da solução a materializar

A solução a materializar pode passar pela substituição apenas dos elementos danificados por outros de cariz geométrico idêntico, ou, caso se pretenda aumentar o desempenho do troço de via em questão, pela implementação de novos elementos (por exemplo novos sistemas de amarração das travessas à estrutura) ou com cariz geométrico diferente (por exemplo alteração dos valores da escala em situações de traçado em curva).

Para permitir a instalação da nova solução podem ser ainda considerados dois cenários:

- Realização da intervenção com os meios internos das equipas de manutenção;
- Encomenda de projeto a uma outra entidade.

No caso em apreço, a substituição foi realizada ao abrigo do contrato de manutenção da entidade responsável pela manutenção deste troço da rede e devidamente acompanhado por elementos do corpo técnico da IP (Manutenção, Logística e Engenharia).

4.1.2.3 Aquisição das travessas e elementos de fixação do carril às travessas e destas à estrutura

Após definição da solução a implementar, é necessário, através da área do Departamento de Compras e Logística (DCL) da IP, proceder à encomenda / aquisição das travessas e dos restantes componentes que lhe estão associados.

4.1.2.4 Seleção da Entidade Executante (Empreiteiro)

Neste domínio também poderão ser consideradas diferentes soluções, que poderão passar pela abertura de concurso, ou pela adjudicação à entidade a quem foi consignada a manutenção do troço de via em questão, como foi o caso da situação estudada.

4.1.2.5 Receção das travessas e elementos de fixação

As travessas e elementos de ligação (se adquiridos, caso não existam em armazém) são rececionados nas instalações do Centro Logístico da IP no Entroncamento, sendo verificado se os produtos recebidos estão em conformidade com o Caderno de Encargos inerente à encomenda realizada no âmbito do processo de aquisição (ponto 4.1.2.3).

No âmbito desta ação, as travessas FFU, objeto da encomenda associada à intervenção pretendida para a ponte de Alferrarede, foram armazenadas em local que garante que não são introduzidos esforços complementares nas travessas, nomeadamente numa superfície regularizada e colocando de barrotes entre as camadas das travessas como se ilustra na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Armazenamento das Travessas FFU no Complexo Logístico do Entroncamento da IP

4.1.2.6 Transporte das travessas e elementos de fixação para o estaleiro

A movimentação das travessas entre o Complexo Logístico do Entroncamento e o estaleiro da Entidade Executante, neste caso localizado na antiga estação ferroviária das Mouriscas, carece de cuidados especiais, tendo em vista assegurar:

- A não danificação de travessas, nomeadamente em resultado de quedas ou embates destas contra elementos rígidos (paredes, portas, etc);
- A não introdução de esforços que induzam alterações estruturais nestas.

Nas ações de movimentação, realizadas no dia 13 de outubro de 2025, foram utilizados os seguintes meios (Figura 4.12 e Figura 4.13):

- Empilhador sobre pneus, dotado de garfos metálicos dianteiros para a realização das ações de carga para o meio de transporte;
- Camião grua, para o transporte entre o Complexo Logístico e o estaleiro e posterior descarga neste.



Figura 4.12 – Levantamento das travessas no local de armazenamento e seu deslocamento para o exterior



Figura 4.13 – Transporte das travessas entre o armazém e o camião-grua e sua colocação neste

Após a colocação da totalidade das travessas no camião, devidamente acondicionadas procedeu-se ao seu transporte entre o Complexo Logístico e a antiga estação das Mouriscas (Figura 4.14), onde se procedeu à sua descarga, (no dia 14 de outubro) com recurso à grua com que o mesmo está equipado.



Figura 4.14 – Travessas acomodadas no camião de transporte e sua chegada ao Estaleiro (Antiga estação das Mouriscas)

Tendo em conta as características do local, a descarga das travessas no estaleiro não foi realizada com recurso a um empilhador, mas sim utilizando a grua instalada no camião.

A ação de descarga foi igualmente executada com os devidos cuidados para assegurar a integridade das travessas conforme já mencionado no início do presente subcapítulo.

Assim, devidamente supervisionado, foi necessário proceder à cintagem das travessas, a que se seguiu a sua elevação (Figura 4.15) e posterior movimentação para o cais coberto da antiga estação, local onde foram depositadas (Figura 4.16) para posteriormente serem preparadas.



Figura 4.15 – Cintagem e elevação das travessas



Figura 4.16 – Movimentação das travessas entre o camião e o cais coberto

No âmbito da movimentação das travessas é recomendável que, no futuro, no caso do recurso a grua instalada no camião (ou fixa), a cintagem contemple pelo menos dois pontos de aplicação por forma a reduzir os esforços verticais nas travessas durante a movimentação.

4.1.2.7 Preparação das travessas

Após a colocação das travessas no estaleiro, as mesmas carecem de manipulação tendo em vista a sua preparação para posteriormente serem instaladas, tendo em conta não só a existência de melhores condições de execução no estaleiro, mas essencialmente por se tratar de uma intervenção numa linha em exploração, com a preocupação de minimizar os tempos de interdições de via.

a) Numeração das Travessas

A primeira ação a realizar consiste na numeração individual das travessas, sendo que a numeração é previamente definida tendo em conta a sua posterior disponibilização espacial ao longo da obra de arte.

No caso de se tratar de uma intervenção de substituição, salvo raras exceções, será adotada a numeração das travessas a substituir assegurando assim, o mais possível a

manutenção das características próprias associadas ao local de instalação de cada travessa.

Convém lembrar que numa estrutura metálica as características do local de instalação de cada travessa podem variar em função da própria estrutura, o que leva a que cada travessa possa ter alturas diferentes, uma vez que a referida altura (que pode ser inclusive diferente para as duas filas do carril) é obtida em função da cota da rasante projetada, da cota da zona de assentamento (obtida por levantamento topográfico a clássico, da altura do carril e elementos de suporte ao mesmo e ainda das palmilhas a colocar sobre estas).

Esta ação compreende não só a numeração individual de cada travessa (Figura 4.17), mas igualmente a verificação das suas alturas e da sua compatibilização com o plano de assentamento realizado pelo projetista ou pelo órgão de manutenção da IP (Figura 4.18).



Figura 4.17 – Numeração individual das travessas

Número	Cota da rasante	Cota da zona de assentamento	Cota da base do carril	Cota da face superior da travessa
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000
21	0,000	0,000	0,000	0,000
22	0,000	0,000	0,000	0,000
23	0,000	0,000	0,000	0,000
24	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,000	0,000	0,000	0,000
26	0,000	0,000	0,000	0,000
27	0,000	0,000	0,000	0,000
28	0,000	0,000	0,000	0,000
29	0,000	0,000	0,000	0,000
30	0,000	0,000	0,000	0,000
31	0,000	0,000	0,000	0,000
32	0,000	0,000	0,000	0,000
33	0,000	0,000	0,000	0,000
34	0,000	0,000	0,000	0,000
35	0,000	0,000	0,000	0,000
36	0,000	0,000	0,000	0,000
37	0,000	0,000	0,000	0,000
38	0,000	0,000	0,000	0,000
39	0,000	0,000	0,000	0,000
40	0,000	0,000	0,000	0,000
41	0,000	0,000	0,000	0,000
42	0,000	0,000	0,000	0,000
43	0,000	0,000	0,000	0,000
44	0,000	0,000	0,000	0,000
45	0,000	0,000	0,000	0,000
46	0,000	0,000	0,000	0,000
47	0,000	0,000	0,000	0,000
48	0,000	0,000	0,000	0,000
49	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,000	0,000	0,000	0,000

Figura 4.18 – Plano de assentamento

b) Sabotagem das travessas

A sabotagem nas travessas consiste na execução de entalhes e que podem ser classificados em 3 níveis:

- 1) Para a obtenção do tombo (inclinação dos carris para o interior da via e que no caso português se traduz na relação 1:20);
- 2) Para permitir a colocação de elementos que permitam a amarração da travessa à estrutura (cantoneiras metálicas);
- 3) Para permitir vencer irregularidades da estrutura metálica na face inferior da travessa.

No caso em apreço o nível 1 não foi aplicado em resultado da utilização de chapins metálicos para a instalação do carril, sendo que o referido tombo é conseguido através da geometria do próprio chapim.

Na fase inicial das ações de sabotagem é necessário proceder à definição da mesa de assentamento, a qual é feita com recurso a um gabarito de marcação próprio conforme se pode observar na Figura 4.19.



Figura 4.19 – Marcação da mesa de assentamento

Após a marcação da mesa de assentamento, procede-se à determinação da cota de rebaixo em relação à face de apoio do carril. Esta operação inicia-se com a execução de pequenos cortes de referência na travessa, efetuados com o auxílio de uma serra de disco (Figura 4.20), permitindo definir com precisão a profundidade a remover. Seguidamente, procede-se ao desbaste manual da superfície com recurso a uma goiva de madeira, a que se seguiu o alisamento da superfície de assentamento, com recurso a uma lixa elétrica (Figura 4.21), garantindo uma superfície regular, limpa e com o acabamento adequado.



Figura 4.20 – Execução de cortes de referência

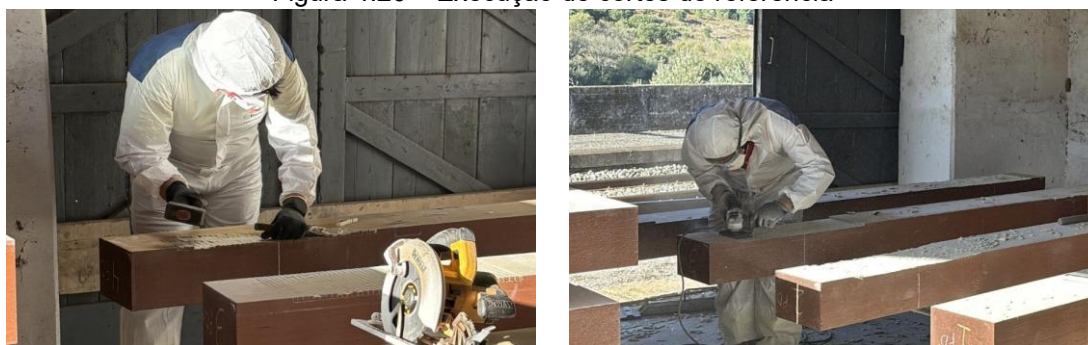


Figura 4.21 – Desbaste Manual e alisamento da superfície

Realizada a preparação da mesa de assentamento, procede-se em seguida à execução dos entalhes para acomodar as cantoneiras metálicas que irão garantir a fixação entre

a travessa e a estrutura metálica (Figura 4.22), conforme estabelecido no desenho de pormenor já apresentado na Figura 4.10. Este corte é executado com recurso a uma tupia elétrica, montada num gabarito metálico (Figura 4.23) que assegura a precisão do corte e a uniformidade da profundidade em todas as peças.



Figura 4.22 – Corte das travessas para acomodar as cantoneiras metálicas



Figura 4.23 – Tupia elétrica montada sobre gabarito metálico

No seguimento da execução dos entalhes para as cantoneiras metálicas, 4 por travessa, procede-se à execução das furações para a ancoragem das citas cantoneiras. Esta ação traduz-se na realização de um corte circular na lateral da travessa utilizando um berbequim elétrico com broca de madeira adequada ao diâmetro especificado projetado (Figura 4.24), o que permite o aspeto final apresentado na Figura 4.25 e na Figura 4.26.



Figura 4.24 – Execução das furações para a ancoragem das cantoneiras



Figura 4.25 – Travessa sabotada para receber as cantoneiras metálicas



Figura 4.26 – Pormenor da sabotagem para as cantoneiras

A preparação das travessas em estaleiro termina com a colocação da base para suporte do carril (chapim metálico), associado ao sistema de fixação Vossloh SKL 12, sendo que para tal é necessário:

- Proceder à marcação dos pontos de furação, de acordo com o definido em projeto, assegurando o correto posicionamento do sistema de fixação;

- Executar a perfuração da travessa com recurso a um berbequim elétrico, utilizando brocas adequadas ao diâmetro e profundidade dos parafusos;
- Instalar as buchas metálicas, que são introduzidas nos orifícios anteriormente executados;
- Colocar os chapins na mesa de assentamento da travessa, devidamente alinhados com o eixo do carril.

Com o culminar desta ação, as travessas estão prontas para ser transportadas para o local de aplicação, sendo o aspeto final da travessa o apresentado na Figura 4.27.



Figura 4.27 – Aspeto final da travessa sabotada

4.1.2.8 Transporte das travessas para o local de aplicação

O transporte das travessas entre o estaleiro e o local de aplicação foi realizado igualmente com o camião-grua e com a mesma metodologia, ou seja cintagem, elevação e colocação sobre o camião.

Dada a inexistência de acesso rodoviário até ao local exato do ponto de aplicação, entrada na ponte, as travessas foram colocadas num ponto intermédio (Quinta da Papagaia) (Figura 4.28), junto à via e a partir deste local deslocadas por meios ferroviários até à ponte em questão.

Os materiais complementares (fixações, cantoneiras, ganchos, porcas, parafusos, etc.) e algumas ferramentas foram transportados por carrinha de caixa aberta igualmente até à proximidade da via e a partir deste ponto transportados por veículos ferroviários ligeiros, dresinas de tração manual (Figura 4.29).



Figura 4.28 – Local de transbordo do material para a via-férrea
(Fonte: Google Earth, 2025)



Figura 4.29 – Transporte do material com recurso a dresina de tração manual

4.1.2.9 Instalação das travessas

A substituição das travessas ocorreu durante os períodos de interdição disponíveis (entre as 23h e as 06h), tendo sido iniciada no dia 23 e terminado no dia 30 de outubro de 2025.

Na ponte de Alferrarede, antes da substituição propriamente dita foi necessário realizar um conjunto de trabalhos preparatórios e procedimentos de segurança, concretamente a instalação de iluminação adequada e a instalação de sistemas para impedir a queda de trabalhadores em altura com recurso a um arnês de segurança e correspondentes pontos de ancoragem (Figura 4.30).



Figura 4.30 – Execução de trabalhos preparatórios

Após a realização dos trabalhos preparatórios iniciou-se a substituição das travessas, seguindo a metodologia apresentada em seguida aplicada no dia da observação em que já tinham sido instaladas algumas travessas na noite anterior.

- Desaperto das cantoneiras e das fixações travessa/carril das travessas de madeira a substituir (Figura 4.31);
- Desaperto das fixações travessa/carril das travessas de madeira localizadas nos encontros da obra de arte (Figura 4.32);
- Desaperto das travessas FFU colocadas na noite anterior (Figura 4.33), de modo a permitir levantar o carril para proceder à substituição das travessas. Para realizar esta tarefa recorreu-se a uma chave própria, garantindo o binário de aperto adequado e a uma chave de impacto motorizada para via-férrea

destinada ao aperto e desaperto controlado das fixações entre o carril e as travessas.

- Elevação do carril, recorrendo a macacos hidráulicos ferroviários (Figura 4.34);

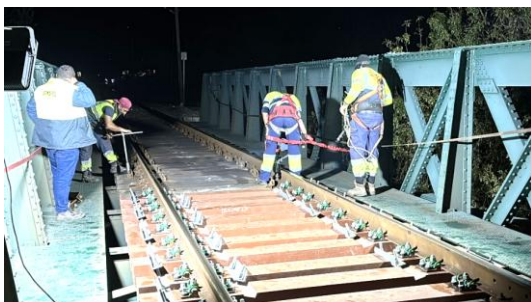


Figura 4.31 – Desaperto das cantoneiras nas travessas a substituir

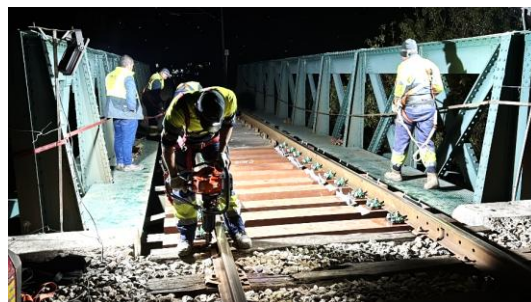


Figura 4.32 – Desaperto das fixações nas travessas localizadas nos encontros



Figura 4.33 – Desaperto das fixações das travessas FFU colocadas na noite anterior

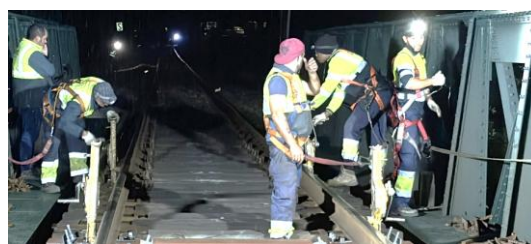


Figura 4.34 – Elevação do carril recorrendo a macacos hidráulicos ferroviários

- Remoção das travessas de madeira a substituir (Figura 4.35);
- Instalação das novas travessas FFU (Figura 4.36);
- Colocação de palmilhas metálicas sobre os chapins (Figura 4.37) para permitir o deslocamento longitudinal do carril em resultado das variações dimensionais induzidas pela dilatação térmica do próprio carril e da estrutura da ponte. Nas travessas onde tal se revelou necessário, as palmilhas contemplavam a espessura definida em projeto, garantindo assim a cota correta do carril em cada ponto, conforme indicado no plano de assentamento previamente elaborado;
- Retirada dos macacos hidráulicos em ambas as filas do carril (Figura 4.38);



Figura 4.35 – Remoção das travessas a substituir



Figura 4.36 – Instalação das novas travessas FFU

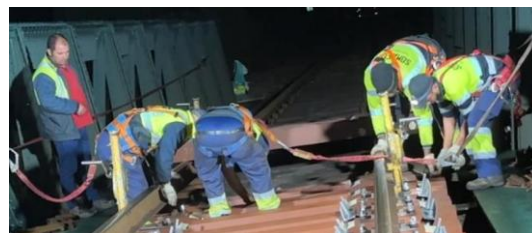




Figura 4.37 – Colocação das palmilhas sobre os chapins



Figura 4.38 – Retirada dos macacos hidráulicos na fila direita

- Recolocação do carril, alinhamento das travessas com recurso a um malho de borracha (Figura 4.39);
- Aperto das cantoneiras metálicas para consolidar a amarração das travessas à estrutura (Figura 4.40);
- Verificação e correção da bitola (Figura 4.41);
- Execução das furações para colocação dos parafusos (tirafundos) para ligação dos chapins às travessas (Figura 4.42);
- Instalação e aperto dos chapins (Figura 4.43).

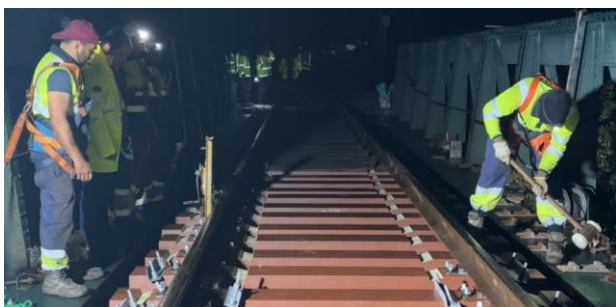


Figura 4.39 – Alinhamento das travessas

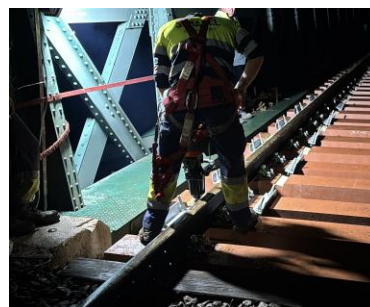


Figura 4.40 – Aperto das cantoneiras

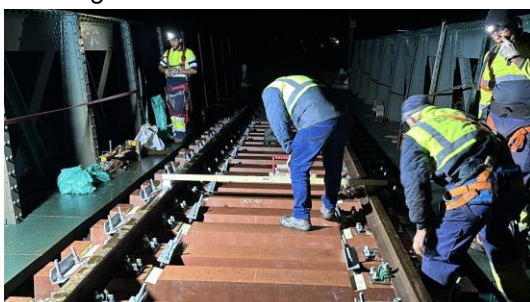


Figura 4.41 – Verificação e correção da bitola

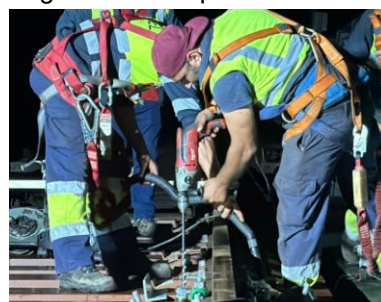


Figura 4.42 – Execução das furações para os chapins



Figura 4.43 – Aperto dos chapins

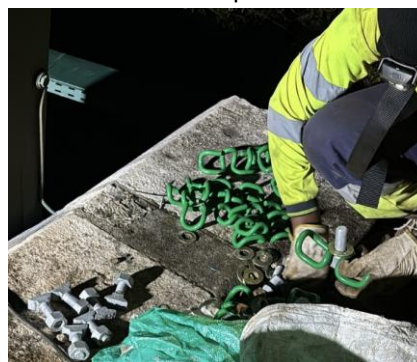


Figura 4.44 – Montagem das fixações

4.1.2.10 Verificação / Validação do Trabalho realizado

O trabalho realizado foi devidamente acompanhado tanto por parte do encarregado da entidade executante (Somafel) como por parte de técnicos da IP.

No dia de acompanhamento da intervenção de substituição das travessas na ponte de Alferrarede foram substituídas 11 travessas (Figura 4.45), quantidade que face ao período de intervenção disponível e à complexidade da operação, onde se inclui a necessidade de atuação sobre travessas instaladas em noites anteriores, se considera bastante satisfatória.

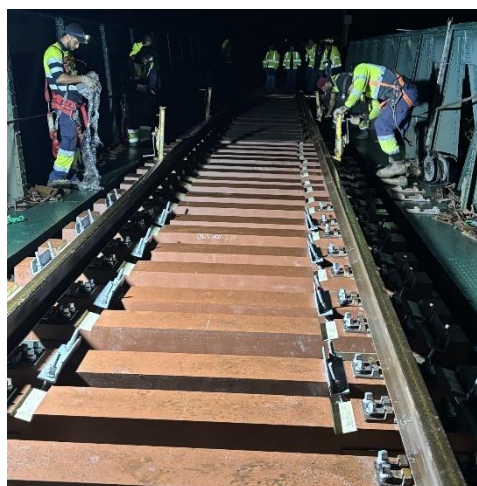


Figura 4.45 –Travessas de FFU colocadas na noite de acompanhamento da obra (total de 11 travessas)

Com a conclusão dos trabalhos de substituição das travessas na Ponte de Alferrarede, a via ficou devidamente ajustada e alinhada, garantindo as condições geométricas e estruturais previstas em projeto. Todos os elementos foram inspecionados e considerados conformes, ficando a superestrutura de via pronta para a sua entrada em serviço.

Na Figura 4.46 e na Figura 4.47 é possível observar o resultado da intervenção já com a linha em exploração normal.



Figura 4.46 – Ponte de Alferrarede Finalizada



Figura 4.47 – Ponte de Alferrarede, novas cantoneiras e fixações

4.1.2.11 Recolha dos produtos sobrantes e seu transporte para as instalações do Dono de Obra ou para depósito devidamente licenciado

No final de cada período de intervenção procedeu-se à recolha das ferramentas/equipamentos bem como à remoção dos produtos sobrantes a depósito devidamente licenciado.

4.1.2.12 Acompanhamento do desempenho em serviço (Monitorização)

Esta matéria ser abordada no ponto 4.3 deste documento.

4.2 Ponte da Várzea

A ponte da Várzea localiza-se igualmente na Linha da Beira Baixa, em via única, ao PK 21+119.000 e apresenta uma extensão de 16.380m.

Tal como a ponte de Alferrarede, esta obra de arte é igualmente uma ponte metálica, com encontros em cofre e em alvenaria de pedra, sob a qual se localiza um atravessamento rodoviário (Figura 4.48 e Figura 4.49) e sob este um atravessamento hidráulico.



Figura 4.48 – Ponte da Várzea, vista inferior



Figura 4.49 – Ponte da Várzea, vista superior

A ponte de Várzea, encontra-se numa curva de raio 305.000m (Figura 4.50) e escala de 165 mm, em perfil longitudinal insere-se num trainel com inclinação 0.000‰ e com uma extensão de 33.620m. A velocidade de circulação nesta ponte é de 85 km/h.

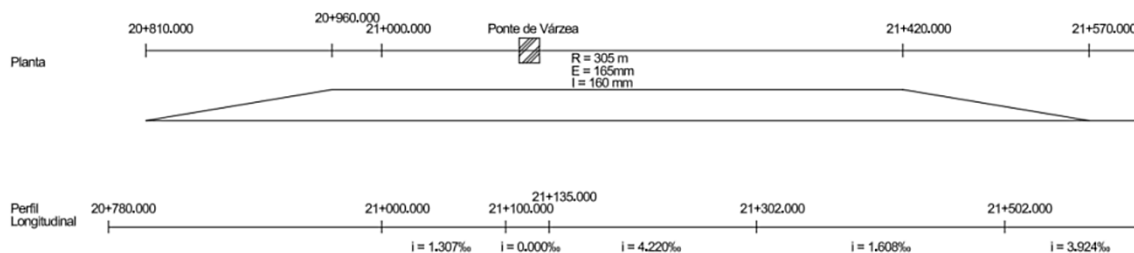


Figura 4.50 – Diagrama Unifilar. Ponte da Várzea

4.2.1 Superestrutura de Via - Situação Inicial

Conforme se pode observar na Figura 4.51 na ponte da Várzea, tal como na ponte de Alferrarede a via também não é balastrada, sendo o armamento da via constituído por travessas de madeira de pinho equipadas com fixações Nabla com chapim. Esta seção pontual da linha está igualmente enquadrada por via balastrada normal constituída por travessas de betão bi-bloco e fixações PRX, assentes sobre camada de balastro.

No total esta obra de arte considera a necessidade de 39 travessas, contemplando em cada um dos encontros 5 travessas, o que conduz a 29 travessas sobre a estrutura metálica.



Figura 4.51 – Ponte da Várzea, sentido NE-SO

Decorrente do mau estado das travessas, esta obra de arte já foi objeto de uma intervenção parcial, traduzida na substituição de algumas travessas, conforme se pode observar na Figura 4.52. No âmbito da intervenção realizada as fixações instaladas são do tipo Vossloh.

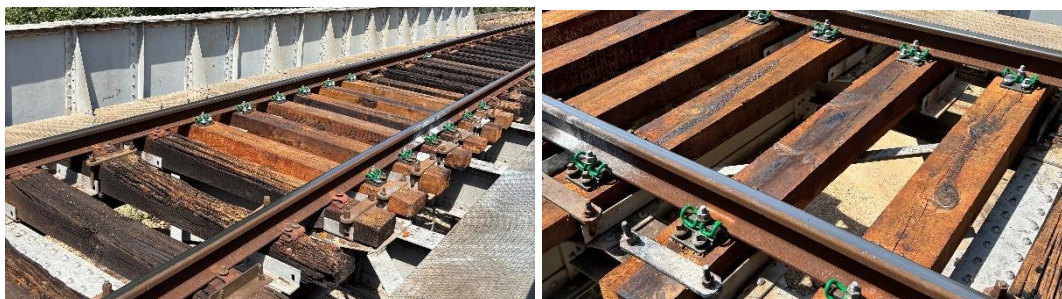


Figura 4.52 – Ponte da Várzea, Travessas já substituídas

Conforme já mencionado, esta obra de arte localiza-se numa curva com raio em planta de 305 metros, o que para permitir a passagem de composições à Velocidade Máxima de 100 km/h, obriga à introdução de escala, o que leva a que as travessas instaladas e

a instalar sejam trapezoidais (260x26x30x16 [mm]), conforme se pode observar na Figura 4.53.



Figura 4.53 – Ponte da Várzea, Travessas trapezoidais

Também nesta estrutura a distribuição das travessas ao longo da obra de arte não é uniforme, situação que é corrente neste tipo de estrutura, uma vez que a posição destas é sempre conjugada com os elementos metálicos em presença (Figura 4.54).



Figura 4.54 – Ponte da Várzea, distribuição das travessas

Conforme se pode observar na Figura 4.55, as travessas de madeira instaladas nesta ponte e que ainda não foram substituídas, apresentam uma degradação acentuada, razão que leva igualmente, por questões de segurança, à necessidade de proceder à sua substituição a curto prazo.



Figura 4.55 – Ponte da Várzea, Travessas degradadas

Nesta obra de arte as travessas são fixadas à estrutura (Figura 4.56) mediante o recurso a:

- Cantoneiras metálicas em “U” ou em “L” (Esquadros) para acomodar cada travessa (A);
- Ganchos metálicos e correspondentes parafusos, anilhas e porcas (B);
- Cantoneiras metálicas para ligação entre os topos dos ganchos (C).

A colocação das placas metálicas de travamento, conduz à necessidade de realização da chamada sabotagem das travessas.

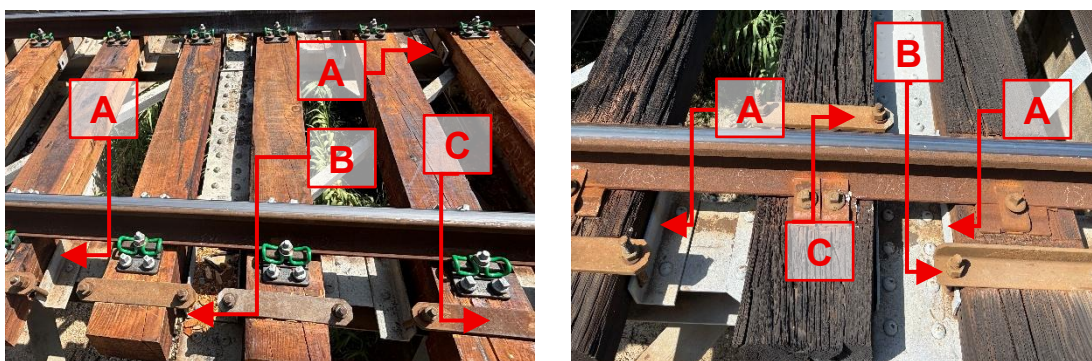


Figura 4.56 – Ponte da Várzea, Fixação das Travessas à estrutura

Relativamente à manutenção/reabilitação da componente metálica, esta obra de arte foi intervencionada em agosto de 2000 (decapagem e pintura), conforme se pode observar na Figura 4.57.

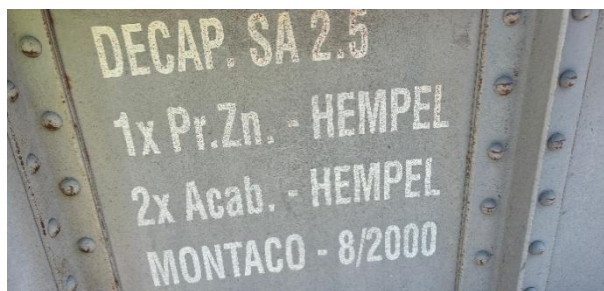


Figura 4.57 – Ponte da Várzea, manutenção / reabilitação da componente metálica

4.2.2 Superestrutura de Via - Situação Final

Tal como para a ponte de Alferrarede, também nesta obra de arte, após a intervenção prevista, esta obra de arte ficará equipada com o seguinte armamento de Via:

- Travessas de madeira sintéticas – FFU;
- Fixações Vossloh;
- Carril 54E1, a transformar em BLS.

Complementarmente, também os atuais sistemas de fixação das travessas à estrutura metálica serão substituídos de acordo com as novas diretrizes da IP para amarração

das travessas em pontes metálicas, neste caso em curva, ou seja, com escala (Figura 4.58).

No decorrer da elaboração do presente documento, não foi possível acompanhar a intervenção inicialmente prevista uma vez que a IP foi obrigada a proceder à sua reprogramação, sendo que à data a mesma apenas está prevista para o início de 2026.

Apesar desta alteração, considera-se que a metodologia apresentada para a ponte de Alferrarede apresentada no ponto 4.1.2, bem como a sequência operacional, tanto ao nível do estaleiro como do terreno será mantida, constituindo apenas exceção a introdução de travessas trapezoidais decorrentes do facto de a Ponte da Várzea se localizar numa curva com escala, obrigando a ajustamentos, nomeadamente no que se refere ao sistema de fixação das travessas à estrutura (Figura 4.58).

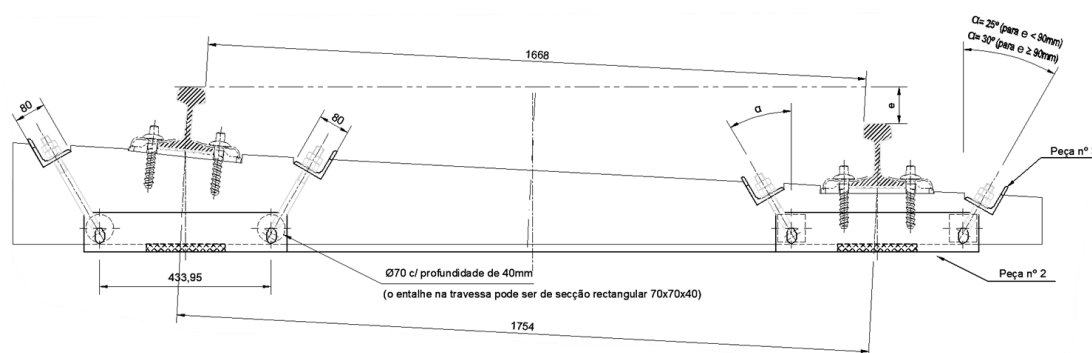


Figura 4.58 – Sistema de fixação da travessa à estrutura, em curva

4.3 Acompanhamento do Desempenho em Serviço

A substituição das travessas de madeira, por travessas FFU, a que o caso de estudo está associado, irá constituir uma situação pioneira na Rede Ferroviária Nacional, pelo que esta nova solução deve ser devidamente observada ao longo do tempo para permitir retirar conclusões do seu desempenho em serviço.

A evolução observada no desempenho em serviço desta solução, poderá permitir otimizar novas instalações e ser alargada a outras pontes e eventualmente túneis, não sendo igualmente de excluir cenários que passem pela adoção de medidas corretivas para instalações futuras.

Para isso, devem ser estabelecidos um conjunto de indicadores aos quais deverá estar associado um plano de monitorização devidamente escalonado no tempo.

4.3.1 Indicadores

Nesta fase, como indicadores possíveis apresentam-se os seguintes:

a) Observações no terreno

1. Geometria da Via;
2. Bitola;
3. Desgaste do Carril;
4. Flechas das Fixações;
5. Fissuras;
6. Evolução nas zonas dos entalhes (corte de fibras);
7. Aperto das fixações;
8. Aperto dos ganchos / cantoneiras nas amarrações das travessas à estrutura;
9. Raios ultravioletas.

Para as observações mencionadas torna-se necessário constituir equipas devidamente munidas com equipamentos e materiais adequados para o efeito, nomeadamente:

1. Régua de Escalas e de bitolas;
2. Fita métrica;
3. Chave dinamométrica, com alcance até pelo menos 300 N.m;
4. Medidor de flechas em fixação Vossloh;
5. Gabarito de flechas para fixação Vossloh;
6. Tinta Fixolid para a marcação das travessas;
7. Cunha graduada, para medição da espessura das fissuras nas travessas;
8. Máquinas fotográficas de alta resolução.

b) Ensaios laboratoriais

Por escolha aleatória, num espaço temporal predefinido no plano de monitorização, deverão ser retiradas de cada uma das obras de arte em observação, 3 travessas, as quais deverão ser sujeitas a ensaios de arrancamento de buchas, a realizar pelo LNEC ou por outro laboratório credenciado que seja aceite pela IP.

Estas travessas serão submetidas a controlo dimensional, nomeadamente dos valores que podem influenciar a bitola e à verificação do grau de fendilhação, que não pode colocar em causa as características funcionais durante um mínimo de pelo menos 50 anos.

Complementarmente é desejável que sejam ainda feitos ensaios relativamente aos seguintes parâmetros: Resistência à flexão, Módulo de Elasticidade (*E-Modulus*), Resistência à compressão longitudinal e Resistência de isolamento.

4.3.2 Plano de Monitorização

Para registo e análise da evolução da avaliação de desempenho destas travessas, deve ser criado um núcleo técnico de observação, devendo este ser responsável pela criação de uma base de dados com os parâmetros definidos, proceder ao seu registo e fazer a devida análise de evolução ao longo do tempo.

Os planos de Monitorização que venham a ser definidos deverão passar pelo controlo de todos os indicadores, considerando-se nesta fase, uma periodicidade mensal de registos, o que ao fim de 2 anos se traduzirá em 24 observações, valor que se entende poder constituir uma boa base para tratamento estatístico dos dados recolhidos.

Em todas as observações deverá ser produzido um relatório com os indicadores que tenham sido definidos e feita não só a análise de cada observação, mas igualmente a que resulta das observações anteriores não só em termos analíticos, mas igualmente gráficos para efeitos de identificação das tendências expectáveis.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo analisar as alternativas à utilização de travessas de madeira creosotadas na via-férrea, cuja aplicação se encontra progressivamente limitada devido às restrições legais e ambientais associadas ao uso de creosoto. Neste enquadramento, procedeu-se a uma análise comparativa entre via balastrada e via não balastrada, e estudaram-se em detalhe as soluções de travessas sintéticas, com especial enfoque no seu potencial enquanto substitutas das soluções tradicionais que envolvem travessas de madeira.

A análise da via balastrada confirmou a sua predominância na rede ferroviária, justificada pela simplicidade construtiva, menores custos iniciais e facilidade de substituição de componentes. Contudo, a necessidade recorrente de manutenção e a menor estabilidade geométrica limitam a sua eficiência em termos de durabilidade e desempenho a longo prazo.

Por outro lado, a via não balastrada demonstrou ser tecnicamente vantajosa, assegurando maior estabilidade, menor necessidade de manutenção e melhor comportamento em contextos de tráfego intenso, alta velocidade, túneis e áreas urbanas. Ainda assim, os custos de construção elevados e as dificuldades associadas à sua implementação em obras de arte existentes, como pontes em exploração, constituem entraves à sua aplicação generalizada.

No que respeita às travessas, verificou-se que as alternativas às soluções creosotadas apresentam um potencial significativo. As travessas sintéticas destacam-se pela sua durabilidade, resistência a agentes químicos, possibilidade de incorporação de materiais reciclados em alinhamento com os objetivos ambientais e de sustentabilidade. Estas características tornam-nas soluções promissoras para o futuro do setor ferroviário, embora subsistam limitações relacionadas com o custo inicial, a adaptação a contextos específicos, como pontes metálicas e a ausência de regulamentação técnica consolidada que enquadre a sua aplicação de forma uniforme.

O caso de estudo desenvolvido envolvendo apenas a ponte de Alferrarede, dado não ter sido possível, por restrições por parte da IP acompanhar a intervenção na ponte de Várzea (reprogramada para 2026) permitiu ainda assim a verificação da possibilidade de implementação de soluções alternativas às travessas de madeira creosotadas, caso que para já se afigura como uma boa solução.

Foi igualmente possível constatar que a escolha das travessas alternativas não pode ser dissociada de uma avaliação global que inclua aspetos técnicos, económicos,

ambientais e de exploração, reforçando a necessidade de análises individualizadas em cada projeto.

Em síntese, conclui-se que as travessas sintéticas constituem uma solução tecnicamente viável e ambientalmente mais sustentável para substituir as travessas de madeira creosotadas, representando um passo importante na modernização da via-férrea. A sua aplicação, contudo, deve ser cuidadosamente avaliada em função das características específicas de cada infraestrutura e das exigências operacionais da rede ferroviária.

5.2 Recomendações (Trabalho futuro)

Não obstante os avanços registados, a investigação nesta área encontra-se ainda em desenvolvimento, sendo recomendável o aprofundamento de diversas linhas de trabalho futuro.

Em primeiro lugar, destaca-se a necessidade da realização de ensaios de durabilidade e monitorização em contexto real, de forma a validar as observações de campo complementados com ensaios laboratoriais para avaliar melhor o comportamento das travessas sintéticas ao longo do tempo e fazer projeções desse comportamento em termos futuros (evolução de tendências).

Adicionalmente, a implementação de metodologias de análise de ciclo de vida (LCA) permitirá comparar de forma objetiva os impactos económicos e ambientais das diferentes alternativas, proporcionando uma base mais sólida para decisões estratégicas no setor ferroviário.

Outra linha de investigação promissora consiste no desenvolvimento de novos materiais híbridos, que combinem polímeros, compósitos e fibras recicladas de modo a potenciar propriedades mecânicas, reduzir custos de produção e promover soluções alinhadas com os princípios da economia circular.

Por fim, assume-se como essencial o desenvolvimento de normas e recomendações técnicas específicas para a utilização de travessas sintéticas, de forma a uniformizar critérios de projeto, instalação e manutenção, facilitando a sua aceitação e adoção generalizada no setor.

Para concluir, a presente dissertação deve ser entendida como um contributo inicial para a transição de soluções tradicionais para alternativas mais inovadoras e sustentáveis. A continuidade da investigação e da experimentação prática permitirá consolidar a aplicação das travessas sintéticas, promovendo uma infraestrutura ferroviária mais durável, segura, eficiente e ambientalmente sustentável.

Referências bibliográficas

- Axion. (sem data). *Axion Greening Tomorrow's Infrastructure*.
- Cabo, A. A. S. (2023). *Tratamento de plataformas em vias ferroviárias*. [Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. Repositório científico da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/152273>
- Carvalho, A. F. C. (2020). *Manutenção da qualidade das infraestruturas ferroviárias com reutilização de travessas*. [Tese de mestrado, Universidade de Coimbra]. Repositório científico da Universidade de Coimbra. <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/89571>
- Edilon Sedra. (sem data). Embedded Rail System. *Edilon*(Sedra). Obtido 25 de agosto de 2025, de <https://www.edilonsedra.com/system/embedded-rail-system/>
- Esveld, C. (com Technische Universiteit Delft). (2001). *Modern railway track* (2. ed). MRT-Productions.
- Ferdous, W., Manalo, A., & Aravinthan, T. (2015). *Composite railway sleepers: new developments and opportunities*.
- Ferdous, W., Manalo, A., Van Erp, G., Aravinthan, T., Kaewunruen, S., & Remennikov, A. (2015). Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects. *Composite Structures*, 134, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.058>
- Fernandes, H. (2018). *Contributo para o estudo de vias-férreas não balastradas*. [Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico]. Repositório científico do Instituto Superior Técnico. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/mec/dissertacao/1691203502343155>
- Fernandes, J. A. da S. (2011). *Modelação do comportamento mecânico de vias-férreas*. [Tese de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.]. Repositório científico da Universidade Nova de Lisboa. <https://run.unl.pt/handle/10362/7075>
- Ferreira, J. N. A. D. C. (2010). *Intervenções de construção, renovação e manutenção na via-férrea*. [Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. Repositório científico da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/60178>
- FFB - Feste Fahrbahn Bögl—E—30.08.12 | PDF | Home & Garden | Computers. (sem data). Scribd. Obtido 24 de agosto de 2025, de <https://www.scribd.com/doc/135546576/FFB-Feste-Fahrbahn-Bogel-e-30-08-12>
- Fortunato, E. M. C. (2005). *Renovação de plataformas ferroviárias estudos relativos à capacidade de carga*. [Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. Repositório científico da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/11441>
- Geopolymer Concrete | *springerprofessional.de*. (sem data). Obtido 13 de agosto de 2025, de <https://www.springerprofessional.de/geopolymer-concrete/50715036>
- Gourley, T., & Johnson, G. (2005). Developments in geopolymer precast concrete. *Proceedings of the World Congress Geopolymer*, 139–143.
- IntegriCo Composites chooses Louisiana for its booming plastic railroa. (sem data). Obtido 25 de agosto de 2025, de <https://www.plasticstoday.com/business/integrigo-composites-chooses-louisiana-for-its-booming-plastic-railroad-tie-business>

- Ižvolt, L., & Šmaló, M. (2014). Historical Development and Applications of Unconventional Structure of Railway Superstructure of the Railway Infrastructure of the Slovak Republic. *Civil and Environmental Engineering*, 10. <https://doi.org/10.2478/cee-2014-0010>
- Jabu, M. A., Aa, A., & Nz, N. (2024). A Review of Composites Sleepers Used in the Railway Structure. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 72(12), 360–366. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I12P130>
- Koller, G. (2024). 44 Years of FFU Synthetic Railway Sleeper. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 9(3), 43–51. <https://doi.org/10.11648/j.ajmie.20240903.11>
- Kumar Das, S., Singh, T., Gupta, A. K., Kumar, A., Singh, A. K., & Kumar, A. (2018). Composite railway sleeper. *Invertis Journal of Renewable Energy*, 197–201.
- Lampo, R., Nosker, T., Gillespie, B., & Schriks, R. (2001). *Performance and Safety Issues Regarding the Use of Plastic Composite Crossties*.
- Lankhorst. (sem data). *KLP® Railway Solutions | Plastic railway sleepers*. Obtido 25 de agosto de 2025, de <https://www.lankhorst-ep.com/en/www.lankhorst-ep.com/en/rail>
- Leite, M. R. S. V. D. (2017). *Especificações Técnicas da Via-Férrea*. [Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto]. Repositório científico do Instituto Superior de Engenharia do Porto. <https://recipp.ipp.pt/entities/publication/5f1822ea-55df-4fdd-8fd9-7c9ac2ea1385>
- Louie, M. L. (2013). *Sustainable Solutions for Railroad Trackwork*. 338–346. <https://doi.org/10.1061/9780784413210.030>
- Manalo, A., & Aravinthan, T. (2012). Behavior of Full-Scale Railway Turnout Sleepers from Glue-Laminated Fiber Composite Sandwich Structures. *Journal of Composites for Construction*, 16, 724–736. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000307](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000307)
- Matias, S. (2014). *Modelação numérica e dimensionamento de vias-férreas em laje de betão. Comparação com vias balastradas*. [Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico]. Repositório científico do Instituto Superior Técnico.
- Michas, G. (2012). *Slab track systems for high-speed railways*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Slab-track-systems-for-high-speed-railways.-Michas/69f8d0e5d9c8572bad83cfdfae1eb2f00262b20d>
- Mourão, J. M. P. (2017). *Gestão e Manutenção da Infraestrutura Ferroviária, os vários tipos de ações de manutenção*. [Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa]. Repositório científico do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. <https://repositorio.ipl.pt/entities/publication/b6a315f0-0a9a-41a7-82f3-7669bcb8c8d9>
- Oliveira, A. F. F. P. de. (2012). *Via Balastrada versus Via não Balastrada*. [Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa]. Repositório científico do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. <https://repositorio.ipl.pt/entities/publication/b6a315f0-0a9a-41a7-82f3-7669bcb8c8d9>
- Our Process – EFG TieTek. (sem data). Obtido 12 de agosto de 2025, de <https://efgtietek.com/process/>
- Paixão, A., & Fortunato, E. M. C. (2009). *Novas soluções superestrutura de via para alta velocidade ferroviária*. (2009.^a ed., p. 162).
- Pandrol. (sem data). *E-Clip SRS*. Obtido 2 de fevereiro de 2025, de <https://www.pandrol.com/pt-br/product/e-clip-srs/>

- Pandrol. (2025a). *EPD Summary Report – Pandrol QTrack*.
<https://www.pandrol.com/wp-content/uploads/2023/04/EPD-Summaries-Qtrack-1.pdf>
- Pandrol. (2025b). *QTrack® Product Information Sheet. Documento técnico*.
<https://www.pandrol.com/wp-content/uploads/2020/10/QTrack-Product-Information-Sheet-EN.pdf>
- Patil Group—Composite Sleepers*. (sem data). Obtido 12 de agosto de 2025, de <https://patilgroup.com/compositesleepers.html>
- PORR. (sem data). *Our technology—Slabtrackaustria.com*. Obtido 24 de agosto de 2025, de <https://slabtrackaustria.com/our-technology/>
- Propriedades da Ebonite. (sem data). *Ciência e Tecnologia da Borracha*. Obtido 13 de agosto de 2025, de <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/ebonites/propriedades-da-ebonite/>
- Rail One. (2011). *Rheda 2000® ballastless track system*.
- Rail One. (2012). *GETRAC® ballastless track system*.
- Rail Sections · GB-Rail · UK Light Rail and Accessories Specialists*. (sem data). Obtido 29 de agosto de 2025, de <https://gb-rail.co.uk/rail-sections>
- Regulamento (UE) n. ° 528/2012 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 22 de maio de 2012 , relativo à disponibilização no mercado e à utilização de produtos biocidas Texto relevante para efeitos do EEE, 167 OJ L (2012). <http://data.europa.eu/eli/reg/2012/528/oj/por>
- RHEDA 2000®*. (2011). Rail One. <https://www.railone.com/products-solutions/long-distance-and-freight-transport/ballastless-track-systems/rheda-2000r>
- Sekisui. (2020a). *Dormentes Sintéticos FFU*.
- Sekisui. (2020b). *Sekisui, 1980 – 2020 Ffu Synthetic Railway Sleeper Technology*.
- Siahkouhi, M., Li, X., Markine, V., & Jing, G. (2021). An experimental and numerical study on the mechanical behavior of Kunststoff Lankhorst Product (KLP) sleepers. *Scientia Iranica*, 28(5), 2568–2581.
<https://doi.org/10.24200/sci.2021.57165.5096>
- Silva, A. (2010). *Análise da viabilidade de utilização, em Caminhos de Ferro, de travessas de madeira obtidas a partir de lamelados de madeira, em alternativa às travessas de madeira tradicionais*. [Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa]. Repositório científico do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. <https://repositorio.ipl.pt/entities/publication/f9804ad6-29ca-429b-bdf1-aabfdb2eb7ec>
- Vossloh. (2016). *Vossloh Chamber filling elements*.
https://media.vossloh.com/media/download/vossloh_fastening_systems/Vossloh_Chamber_filling_elements_EN.pdf
- Vossloh. (2019). *Vossloh System WTram*.
https://media.vossloh.com/media/download/vossloh_fastening_systems/Vossloh_System_WTram_EN.pdf
- Vossloh. (2022a). *Vossloh Conventional Rail*.
https://media.vossloh.com/media/download/vossloh_fastening_systems/Vossloh_Conventional_Rail_EN.pdf
- Vossloh. (2022b). *Vossloh Heavy Haul*.
https://media.vossloh.com/media/download/vossloh_fastening_systems/Vossloh_Heavy_Haul_EN.pdf

- Vossloh. (2022c). *Vossloh High Speed*.
https://media.vossloh.com/media/download/vossloh_fastening_systems/Vossloh_High_Speed_EN.pdf
- Yu, E. (2010). *Modeling Strategic Relationships for Process Reengineering, Social Modeling for Requirements Engineering* (Vol. 11).
<https://direct.mit.edu/books/edited-volume/3344/chapter/109187/Modeling-Strategic-Relationships-for-Process>
- Yumpu.com. (sem data). *ATD-G and Rheda city green the green*. Yumpu.Com. Obtido 23 de agosto de 2025, de <https://www.yumpu.com/en/document/read/4377456/atd-g-and-rheda-city-green-the-green-railone-gmbh>