

Marcelo Salles Olinger

**FERROVIAS EM LAJE:  
O ESTADO DA ARTE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Santa Catarina como parte  
dos requisitos para a obtenção do título  
de Engenheiro Civil  
Orientador: Prof. Marcos Aurélio  
Noronha, Dr.

Florianópolis  
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Olinger, Marcelo Salles  
Ferrovias em laje : o estado da arte / Marcelo Salles  
Olinger ; orientador, Marcos Aurélio Noronha -  
Florianópolis, SC, 2014.  
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Ferrovias em laje. I. Noronha,  
Marcos Aurélio. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

MARCELO SALLES OLINGER

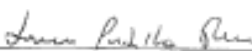
FERROVIAS EM LAJE: O ESTADO DA ARTE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado como  
requisito parcial para obtenção do título de  
ENGENHEIRO CIVIL

---

Prof. Lúcia Caetano Bastos - Coordenadora de TCC

Banca Examinadora:

  
PT Prof. Marcos Aurélio Noronha, Dr. - Orientador

  
Prof. Liseane Padilha Thives, Dr.

Eng. Thais dos Santos Ventura, Msc.

Eng. Tiago Barreto Tamagasko



## RESUMO

Existe uma demanda crescente no transporte ferroviário no mundo. Cada vez mais, buscam-se novas tecnologias para atingir maior eficiência neste modal, aumentando-se a capacidade de carga e a velocidade de serviço nas vias. Ainda, os períodos de serviço das estradas de ferro são cada vez mais longos havendo, portanto, menor tempo de tráfego interrompido para a manutenção das vias.

Neste cenário, a tecnologia de ferrovias em laje se apresenta como uma boa solução. O sistema de via em laje é uma técnica de construção de ferrovias que elimina o uso do lastro, utilizando-se no lugar, lajes de concreto ou concreto-asfáltico, que podem ser pré-fabricadas ou moldadas *in loco*. Este sistema vem sendo desenvolvido e usado amplamente no mundo desde os anos 1970, principalmente no Japão e na Europa, e tem demonstrado bom desempenho para vias de alta velocidade, assim como outras características competitivas em relação à via em lastro.

Este trabalho apresenta a tecnologia construtiva de ferrovias em laje. São analisados aspectos técnicos da subestrutura e da superestrutura, e é feita uma comparação entre alguns dos principais modelos existentes. Também é apresentado estudos comparativos entre a ferrovia em laje e a ferrovia em lastro, analisando eficiência, custo de construção e manutenção, e impacto ambiental.

**Palavras-chave:** Ferrovias em laje.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1-</b> Fluxograma do método.....	3
<b>Figura 3.1-</b> Perfis esquemáticos da via em lastro .....	5
<b>Figura 3.2 -</b> Sistema Shinkansen .....	8
<b>Figura 3.3 -</b> Rheda 2000 sobre solo.....	9
<b>Figura 3.4 -</b> Sistema Züblin.....	10
<b>Figura 3.5 -</b> Bögl .....	11
<b>Figura 3.6 -</b> Infundo .....	12
<b>Figura 3.7 -</b> BBERS MkII .....	13
<b>Figura 4.1 -</b> Sistema Rheda 2000 .....	16
<b>Figura 4.2 -</b> Dormentes do sistema Rheda 2000, antes de serem embutidas em concreto.....	17
<b>Figura 4.3 -</b> Sistema de laje pré-fabricada Bögl, na linha que liga Nuremberg e Ingolstadt, Alemanha.....	19
<b>Figura 4.4 -</b> Sistema de laje pré-fabricada proposto por Jang et al. ....	20
<b>Figura 4.5 -</b> Suspensão da placa pré-fabricada para execução da via em laje no sistema Bögl .....	21
<b>Figura 4.6 -</b> Tempo estimado de construção para 1km de via.....	22
<b>Figura 4.7 -</b> Irregularidades na via após 1 ano .....	22
<b>Figura 4.8 -</b> Modelo de via em laje Mk II .....	24
<b>Figura 4.9 -</b> Execução de via em laje de trilho embutido com concretagem in loco .....	26
<b>Figura 4.10 -</b> Execução de via em laje de trilho embutido com placas pré-fabricadas .....	27
<b>Figura 4.11 -</b> Execução de via em laje de trilho embutido com forma deslizante.....	27
<b>Figura 4.12 -</b> Recalque diferencial de uma ferrovia de lastro aproximando-se de uma ponte.....	31
<b>Figura 4.13 -</b> Trilho duplo em transição.....	32
<b>Figura 4.14 -</b> Transição na aproximação de pontes.....	33
<b>Figura 4.15 -</b> Colunas de rocha executadas no subleito .....	33
<b>Figura 4.16 -</b> Força de contato e deflexão vertical do trilho na transição .....	34
<b>Figura 4.17 -</b> Diagrama de deflexão do trilho para modelagem estática .....	35
<b>Figura 4.18 -</b> Diagrama de deflexão do trilho para modelagem dinâmica .....	35
<b>Figura 4.19 -</b> Trilhos extras na transição da linha Jeolla .....	36
<b>Figura 4.20 -</b> Corte longitudinal da transição na linha Jeolla.....	37

<b>Figura 4.21</b> - Preenchimento dos vãos das placas pré-fabricadas com concreto.....	37
<b>Figura 4.22</b> - Modelo de subleito para via em laje de alta velocidade .	41
<b>Figura 4.23</b> - Disposição dos sensores de pressão de terra no solo.....	42
<b>Figura 4.24</b> - Disposição dos medidores de deformação na superfície da laje.....	42
<b>Figura 4.25</b> - Forma da onda da força de excitação .....	43
<b>Figura 4.26</b> - Medição da pressão de terra dinâmica para a Célula 2-1	44
<b>Figura 4.27</b> - Relação entre a pressão de terra dinâmica e a força de excitação .....	44
<b>Figura 4.28</b> - Relação entre a tensão dinâmica e a frequência de excitação em 8 pontos da superfície da laje .....	45
<b>Figura 4.29</b> - Comparação entre valores de DLF para subleito .....	46
<b>Figura 4.30</b> - Comparação entre valores de DLF para laje .....	46
<b>Figura 5.1</b> - Comparativo entre via em lastro (à esquerda) e via em laje (à direita).....	47
<b>Figura 5.2</b> - Seção de via de trilho embutido “quadruple-headed” .....	51
<b>Figura 5.3</b> - Comparação do impacto de CO <sub>2</sub> entre modelos de via atuais .....	55
<b>Figura 5.4</b> - Comparação do impacto de CO <sub>2</sub> entre modelos de via atuais e futuros .....	56
<b>Figura 5.5</b> - Comparação do impacto de CO <sub>2</sub> considerando incerteza de $\pm 10\%$ no tempo de vida útil .....	58
<b>Figura 5.6</b> - Custos anuais €/m.....	59
<b>Figura 5.7</b> - Custo de vias em laje e vias em lastro em função do tempo .....	60
<b>Figura 5.8</b> - Gráfico do valor residual.....	61



**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 3.1</b> - Sistemas não-lastrados .....	14
<b>Tabela 4.1</b> - Limite de tolerância para manufatura dos elementos .....	24
<b>Tabela 4.2</b> - Limite de tolerância para o alinhamento da estrutura férrea .....	25
<b>Tabela 5.1</b> - Comparação das superestruturas .....	47
<b>Tabela 5.2</b> - Componentes das vias convencionais .....	52
<b>Tabela 5.3</b> - Componentes das vias futuras .....	53
<b>Tabela 5.4</b> - Emissões no processo e transporte .....	53
<b>Tabela 5.5</b> - Características de manutenção .....	54
<b>Tabela 5.6</b> - Características do fim de vida útil .....	54
<b>Tabela 5.7</b> - Características das vias de suporte discreto.....	55
<b>Tabela 5.8</b> - Impacto de CO <sub>2</sub> para modelos futuros.....	57



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	OBJETIVOS .....	2
2.	METÓDO .....	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1	TRILHOS .....	4
3.2	VIA EM LASTRO .....	4
3.3	VIA EM LAJE .....	7
4.	ASPECTOS TÉCNICOS DA VIA EM LAJE.....	15
4.1	VIA EM LAJE CONCRETADA <i>IN LOCO</i> .....	15
4.2	VIA EM LAJE PRÉ-FABRICADA.....	18
4.3	VIA EM LAJE DE TRILHO EMBUTIDO .....	23
4.4	SUBESTRUTURA .....	28
4.4.1	Rigidez à flexão da laje sobre o solo macio.....	29
4.4.2	EPS como material de sub-base na via .....	29
4.4.3	Túneis e pontes .....	30
4.5	TRANSIÇÕES .....	31
4.6	RESILIÊNCIA DA VIA .....	38
4.7	MANUTENÇÃO .....	38
4.8	VIBRAÇÃO E RUÍDO.....	38
4.9	CARGAS DINÂMICAS.....	40
5.	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE VIAS EM LASTRO E VIAS EM LAJE .....	47
5.1	VIA EM LASTRO .....	48
5.2	VIA EM LAJE .....	48
5.3	EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	50
5.4	ANÁLISE ECONÔMICA.....	59
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	62
7.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	64



## 1. INTRODUÇÃO

Existe uma demanda crescente no transporte ferroviário no mundo. Cada vez mais, buscam-se novas tecnologias para atingir maior eficiência neste modal, aumentando-se a capacidade de carga e a velocidade de serviço nas vias. Ainda, os períodos de serviço das estradas de ferro são cada vez mais longos havendo, portanto, menor tempo de tráfego interrompido para a manutenção das vias.

A tecnologia de utilização de via em lastro existe desde a concepção das primeiras ferrovias no século 19, e desde então este sistema vem sendo aplicado sem mudanças significativas em sua superestrutura. Apesar de ser uma tecnologia comprovada, existem algumas limitações no seu desempenho. Nesse contexto, o sistema de construção de vias em laje apresenta-se como boa alternativa para contornar estes problemas.

O sistema de via em laje é uma técnica de construção de ferrovias que elimina o uso do lastro, utilizando-se no lugar, lajes de concreto ou concreto-asfáltico, que podem ser pré-fabricadas ou moldadas *in loco*. Este sistema vem sendo desenvolvido e usado amplamente no mundo desde os anos 1970, principalmente no Japão e na Europa, e tem demonstrado bom desempenho para vias de alta velocidade, assim como outras características competitivas em relação à via em lastro.

No Brasil, existe uma enorme demanda reprimida nos setores de infraestrutura, inclusive no setor ferroviário. Devido ao fato de que muitas novas linhas ainda deverão ser construídas a partir do zero, é conveniente um estudo para que se considere o uso de tecnologias modernas e eficientes na construção dessas vias. Sendo o Brasil um país com a indústria do concreto forte, o uso de vias em laje é uma opção considerável.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar o sistema de ferrovia construída sobre laje de concreto. Serão estudadas algumas das principais técnicas utilizadas e suas formas de execução, a fim de avaliar alguns fatores, como:

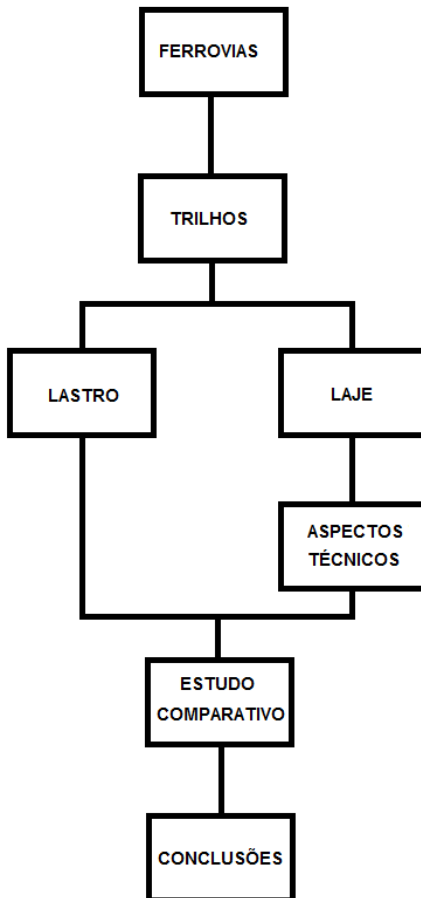
- aspectos técnicos;
- custos de investimento inicial;
- custos de manutenção;
- condições de aplicação;
- desempenho;
- viabilidade de implementação.

Será também apresentado um breve histórico do sistema e um comparativo entre este método e o principal método usado hoje no mundo, o trilho sobre lastro

## 2. METÓDO

Este trabalho apresenta primeiramente as ferrovias e como é feito o suporte dos trilhos. São mostrados dois sistemas principais: ferrovias em lastro e ferrovias em laje. Então, são estudados aspectos técnicos das ferrovias em laje. Após estudar a ferrovia em laje, é feito um estudo comparativo entre as ferrovias em lastro e as ferrovias em laje. A partir do estudos feitos e das análises comparativas, são feitas as considerações finais. O método está de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 2.1.

**Figura 2.1-** Fluxograma do método



**Fonte:** desenvolvido pelo autor

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 TRILHOS

Segundo o Esveld (2001), o trilho foi usado pela primeira vez como elemento de suporte e guia no século XVI, nas minas da Inglaterra. Na época, toda estrutura era feita de madeira. Mais tarde, em 1760, foi introduzido o uso de placas de ferro fundido sobre os trilhos de madeira, o que reduziu significativamente a resistência do rolamento na superfície e se popularizou rapidamente. Por volta de 1800 os primeiros trilhos de rolamento livre foram criados, com uma superestrutura que já contava com soquetes e dormentes de madeira.

#### 3.2 VIA EM LASTRO

A técnica de construção pouco mudou desde o princípio das estradas de ferro, segundo Esveld (2001). Importantes inovações surgiram após a 2ª Guerra Mundial, com o desenvolvimento de trilhos de solda contínua, uso de dormentes de concreto, perfis de trilho mais robustos, elementos de ligação inovadores, mecanização de manutenção, introdução de equipamentos de medição avançados e sistemas de gerência de manutenção.

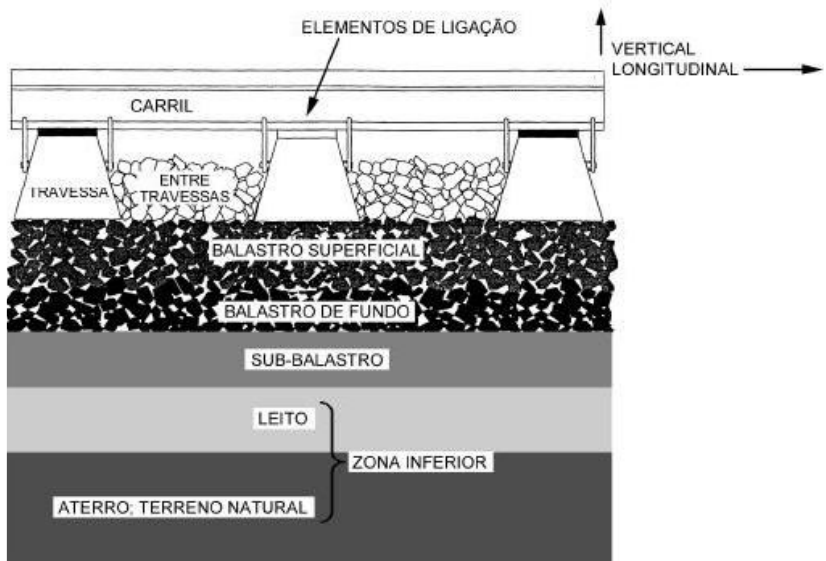
Bezin, citado por Michas (2012), afirma que a construção de ferrovias sobre lastro já é uma técnica de mais de 150 anos, ainda que haja recentes avanços na construção de vias sobre lastro como:

- uso de dormentes de concreto armado ou aço;
- otimização da geometria do trilho, que melhora as condições de contato roda-trilho, oferecendo maior capacidade de carga;
- elementos de ligação e placas de suporte otimizados, que provêm melhor atenuação das forças e ruídos no contato roda-trilho;
- máquinas compactadoras que fazem manutenção mais rápida e eficiente;
- melhor resiliência e resistência a recalque através do uso de “colchões” debaixo dos dormentes e geogrelhas e geotêxteis entre as diferentes camadas;
- uso de técnicas de “retrofit” geotécnico, melhorando a capacidade do subleito, minimizando a possibilidade de recalque.

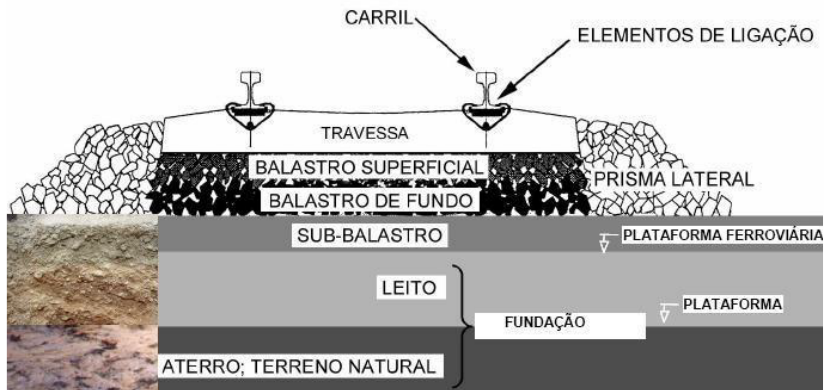
A Figura 3.1 mostra perfis esquemáticos da via e lastro.



**Figura 3.1-** Perfis esquemáticos da via em lastro



Perfil longitudinal da via em lastro



Perfil transversal da via em lastro

**Fonte:** Marques, 2013

Brina (1979) afirma: “O objetivo da conservação da via é manter o seu traçado em planta e perfil, sem defeitos que prejudiquem o tráfego, mantendo-se uma plataforma estável e bem drenada, um lastro limpo, um alinhamento e nivelamento perfeitos, com as curvas bem puxadas e com superelevação correta.”

Em resumo, o objetivo da conservação da via é (BRINA, 1979):

- Manter a linha em boas condições técnicas;
- Manter constante vigilância contra acidentes fortuitos.

Defeitos que aparecem em consequência do tráfego, divididos segundo o plano em que aparecem:

a) no plano horizontal:

- diferenças na bitola;
- afrouxamento da fixação;
- deslocamento transversal das tangentes;
- deslocamento das curvas (curva enganchada ou encasada);
- arrastamento dos trilhos;
- deslocamento dos dormentes.

b) no plano vertical:

- desnivelamento na plataforma;
- desnivelamento nos trilhos (laqueados, arriados, etc.);
- desnivelamento nas juntas dos trilhos (junta laqueada ou arriada);
- defeito na superelevação (falta ou excesso).

c) outros defeitos:

- desgaste ou fratura das talas de junção;
- desgaste dos parafusos das talas – perda da “rosca”;
- desgaste ou fratura dos trilhos;
- defeito nos AMV (aparelhos de mudança de via);
- colmatagem do lastro;
- afrouxamento dos parafusos das juntas;
- modificação na inclinação correta dos trilhos;
- alargamento dos furos do dormente (impossibilidade de nova “pregação” do trilho).

Defeitos originados ou agravados pelos agentes atmosféricos:

- crescimento de mato na faixa da linha;
- apodrecimento dos dormentes;
- defeitos de drenagem desnivelamento na plataforma e formação de “bolsas de lama”);
- entupimento ou destruição das valetas de escoamento.

Serviços mais comuns na conservação da via:

- limpeza da faixa (roçada e capinada);

- retificação da bitola;
- substituição dos dormente imprestáveis;
- reforço da fixação (pregação e repregação);
- puxamento das tangentes;
- puxamento das curvas;
- nivelamento da linha;
- nivelamento das juntas;
- construção de valetas de contorno nos cortes;
- construção de valetas de greide nos cortes e banquetas nos aterros;
- limpeza e recomposição do lastro;
- substituição dos trilhos gastos ou defeituosos;
- reparação das cercas de vedação da faixa;
- aceiro das cercas;
- reparação dos AMV;
- reparação, limpeza e pintura das obras de arte;
- limpeza dos bueiros, valas, valetas etc.;
- serviços de “ronda” da linha.

Conforme o estado de desgaste atingido pelos materiais da via permanente ou o aumento do tráfego de trens, não só quanto ao volume, mas também quanto ao peso por eixo dos vagões e locomotivas, cuja tendência é aumentá-los cada vez mais, poderá ser necessária uma renovação mais completa dos materiais da superestrutura da ferrovia, com substituição total dos trilhos por outros de maior peso, troca em maior quantidade dos dormentes e ainda a substituição total ou parcial do lastro.

### 3.3 VIA EM LAJE

A ferrovia sobre laje já existe desde 1899, quando a “Southern Railroad” nos Estados Unidos construiu uma laje de concreto sob uma via já existente para estabilizar uma seção de solo pobre. (BILOW; RANDICH, 2000)

O uso extensivo de via em laje no mundo foi a partir dos anos 70 (MICHAS, 2012).

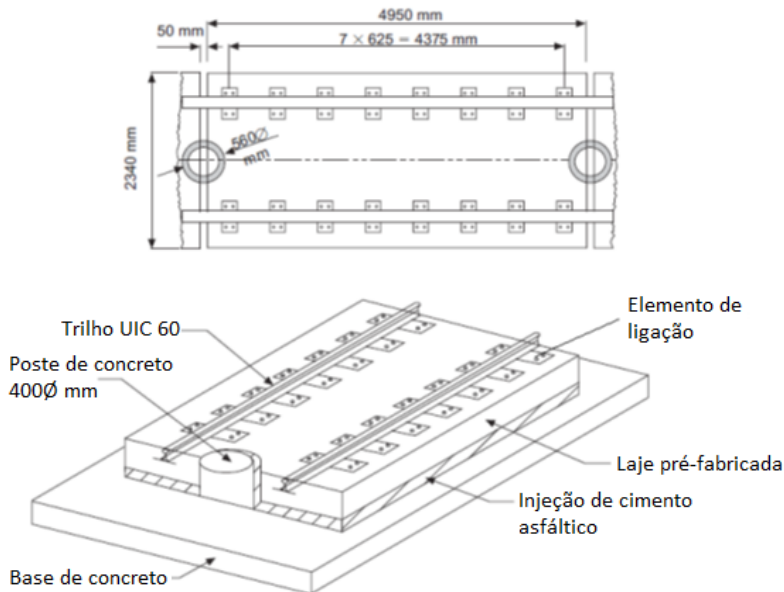
No Japão, devido a más experiências com o trilho sobre lastro em uma linha inaugurada em 1964 em Tóquio, iniciou-se o desenvolvimento no sistema de via sobre laje. (ESVELD, 2001)

A “Japanese National Railroad” já vem usando essa tecnologia desde os anos 70, na linha de Shinkansen. Inicialmente era usada principalmente em túneis e pontes, mas logo começou a ser aplicada

também sobre leitos de solo. O sistema usado hoje se chama “Reinforced Concrete Roadbed System” (RCRS), que vem sendo desenvolvido desde 1990 e já está em serviço desde 1997. O sistema consiste de lajes de concreto pré-fabricado de 4,93m de comprimento, 2,34m de largura, 20cm de altura (16cm em túneis) e pesam 5ton cada. (BILOW; RANDICH, 2000) Entre as placas, colocam-se pequenos postes, com 40cm de diâmetro e 20cm de altura, para evitar movimentos laterais e longitudinais (ESVELD, 2001 & BILOW; RANDICH, 2000). Os custos finais de execução comparado ao de via em lastro é em média 30% mais alto, e os custos de manutenção variam entre 18% e 33% dos custos para a via em lastro. Desta forma, a diferença entre os custos de construção se pagam entre 8 e 12 anos. (BILOW; RANDICH, 2000)

O sistema usado em Shinkansen (Figura 3.2) conta hoje com o total de 3044km de extensão e transporta de 10 a 15 milhões de toneladas de arqueação por ano.

**Figura 3.2** - Sistema Shinkansen



**Fonte:** Bastin, apud Michas, 2012

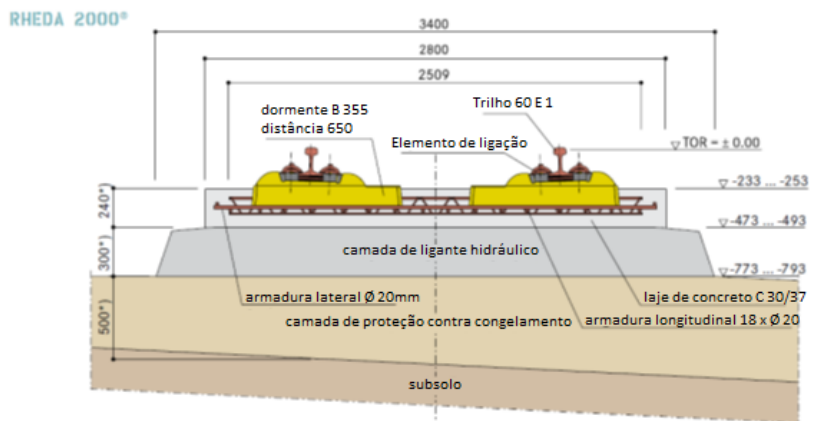
Na Itália, através de cooperação e transferência de tecnologia da “Japanese National Railway”, o sistema IPA foi desenvolvido e usado pela primeira vez em 1984. É muito similar ao japonês, a principal

diferença é que os postes para evitar movimentos laterais e longitudinais fazem parte da estrutura da laje de concreto pré-fabricado. Esse sistema possui 100km construído.

A Alemanha é um dos principais pioneiros da via em Laje no mundo. Conta hoje com os modelos de maiores extensões construídas, assim como maior número de modelos diferentes. (MICHAS, 2012) Entre esses modelos, se destacam principalmente Rheda, Züblin e Bögl.

O sistema Rheda (Figura 3.3), construído primeiramente em 1972, atualmente possui mais de 2200km construídos e é um dos mais usados no mundo. Além dos 400km na Alemanha, o sistema foi usado também em outros países, como Holanda, Taiwan, Espanha, China, Grécia e Inglaterra. (MICHAS, 2012) A técnica vem se desenvolvendo continuamente desde o seu surgimento, com os modelos Rheda Classic, Rheda Sengeberg, Rheda Berlin e o Rheda 2000®, que é o mais atual e desenvolvido. (MARQUES, 2013) O modelo Rheda 2000 utiliza dormentes duplos ligados por uma estrutura metálica, que são embutidos na laje de concreto monolítica. Os elementos de ligação são altamente elásticos, garantindo deflexão vertical para distribuição de cargas. (MICHAS, 2012)

**Figura 3.3** - Rheda 2000 sobre solo

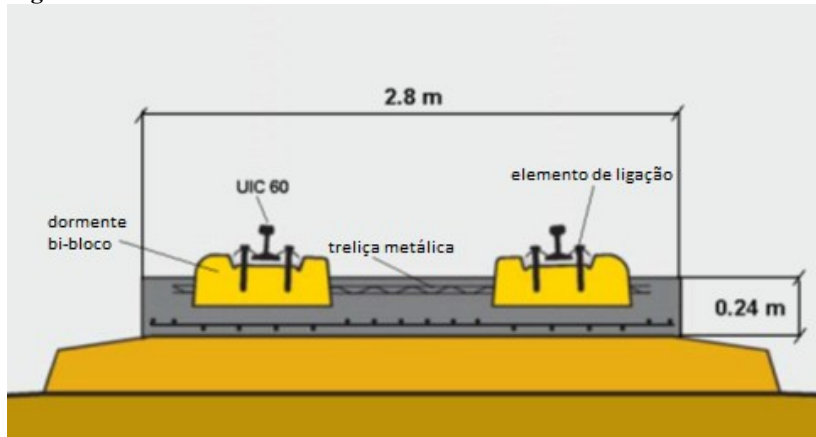


**Fonte:** Rail One, 2011

Em 1974 inicia-se o desenvolvimento do Züblin (Figura 3.4) muito semelhante ao Rheda com o objetivo de mecanização do processo

produtivo. (MARQUES, 2013) Os dormentes usados podem ser monobloco ou bi-bloco. (MICHAS, 2012) A armadura é posicionada abaixo da linha neutra, para dar rigidez à flexão. (ESVELD, 2001) Atualmente, 606km de ferrovia são construídos por este método.

**Figura 3.4** - Sistema Züblin



**Fonte:** ZÜBLIN, apud Michas, 2012

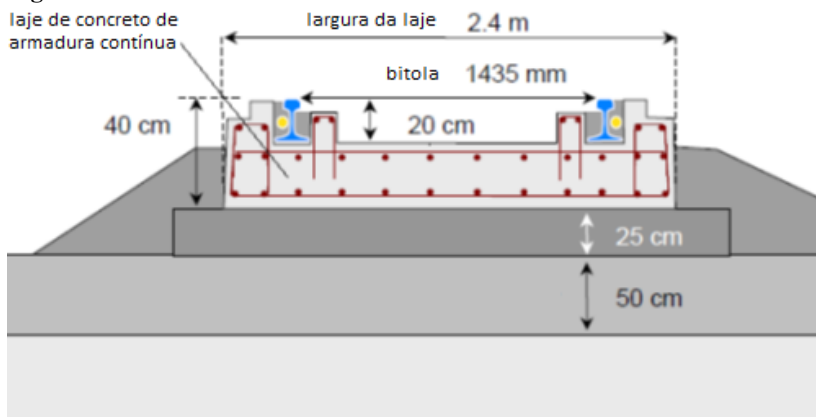
Em 1977, o sistema Bögl (Figura 3.5) foi construído em uma extensão de 430m e recebeu tráfego com velocidades de 160km/h. (MARQUES, 2013) O objetivo era construir uma via de grande durabilidade, livre de manutenção, destinado especialmente ao tráfego de alta velocidade. O conceito do sistema é baseia-se em lajes pré-fabricadas, muito semelhante ao sistema de Shinkansen. (ESVELD, 2001) As principais vantagens desse sistema são o excelente controle de qualidade (por ser produzido em fábrica), facilidade de instalação, a facilidade de troca de peças avariadas e a possibilidade de utilização imediatamente após a instalação. Apesar de os custos poderem aumentar muito dependendo da distância entre a fábrica e o local de execução, hoje é o sistema de via em laje mais usado no mundo, com 4391km de extensão construídos. (MICHAS, 2012)

**Figura 3.5 - Bögl**



**Fonte:** Kalamatas, apud MICHAS, 2012

O “Embedded Rail System” (ERS) é usado desde 1976 na Holanda, onde um projeto piloto foi construído em uma linha de tráfego pesado, com velocidades até 160km/h. (ESVELD, 2001) O sistema chamado de Edilon, usa “Corkelast” (mistura de cortiça com poliuretano), que oferece suporte contínuo para os trilhos instalados em valas no concreto. (BILOW; RANDICH, 2000) A experiência com o ERS foi positiva, e em 1999 outro piloto foi executado em um trecho de 3km, também na Holanda. (ESVELD, 2001) Hoje os sistemas ERS desenvolvidos na Holanda, que além do Edilon inclui Infundo (Figura 3.6) e Deck Track, possuem mais de 200km construídos, dos quais mais de 100km foram executados no metrô de Madri. (BILOW; RANDICH, 2000 & MICHAS, 2012)

**Figura 3.6 - Infundo**

**Fonte:** Esveld, apud MICHAS, 2012

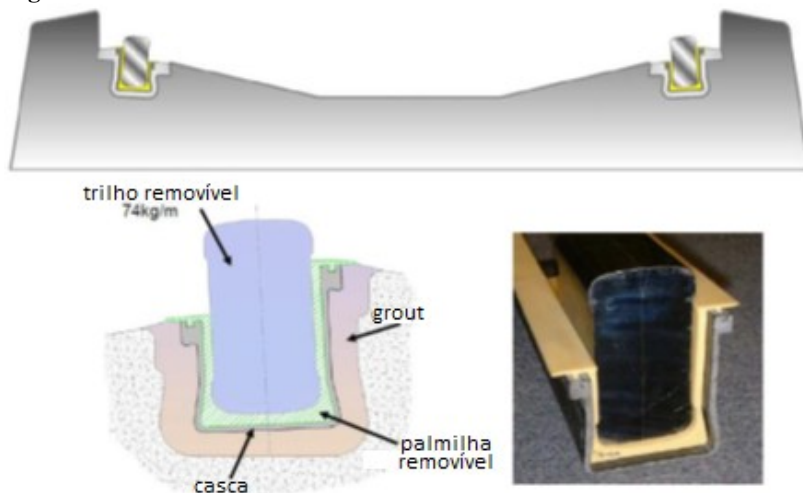
Outro sistema de ERS é o “Balfour Beatty Embedded Rail System” (BBERS), desenvolvido no fim dos anos 90 com o objetivo de criar um sistema de trilho embutido de longa durabilidade e baixa manutenção. A versão MkI desse sistema foi desenvolvida no início dos anos 2000, instalada na Espanha em 2002 e no Reino Unido em 2003. A versão MkII (Figura 3.7) já foi desenvolvida e aplicada em protótipos. (INNOTRACK, 2008)

Em Long Island, Estados Unidos, 2km de via em laje foi construído no fim dos anos 1970 em um trecho de 2km. “Continuously Reinforced Concrete” (CRC) é um método de concreto continuamente armado construído sobre seções de aterro, com trilho continuamente soldado e elementos de ligação de fixação direta.

Em 1984, em British Columbia no Canadá, um trecho de aproximadamente 283m foi construído pela “Canadian Pacific Railway” usando um sistema desenvolvido no Reino Unido em 1969 chamado PACT-TRACK. O objetivo era investigar e simular o uso do sistema para a sua aplicação em uma seção de cerca de 15,8km no Túnel McDonald. Como os testes foram bem-sucedidos, a via em laje foi executada no trecho do túnel. O tráfego na linha é de 60MTA/ano e as dimensões da laje de concreto são de 22,9cm de altura e 2,43m de largura. (BILOW; RANDICH, 2000)



**Figura 3.7 - BBERS MkII**



**Fonte:** Innotrack, 2008

O ÖBB-Porr é um sistema desenvolvido na Áustria. Foi construído pela primeira vez em 1989, numa via teste de 450m. O sistema consiste de vigas de 5,16m x 2,4m x 0,16 a 0,24m, com um sistema de fixação resiliente de dois níveis. Hoje se encontra principalmente em pontes e túneis, em uma extensão total de 124km. (MICHAS, 2012)

O Eurotúnel, inaugurado em 1994, conta com 100km de via dupla de via em laje. O sistema utilizado é o “Low Vibration Track” (LVT), desenvolvido pela Sonneville International Corporation (Suíça). (BILOW; RANDICH, 2000 ; MICHAS, 2012) Este é um dos mais antigos e mais usados no mundo, com o total de 1031km construídos. O sistema consiste no uso de dormentes de concreto duplas, colocadas sobre uma placa resiliente envolvida por uma fôrma de borracha, o que garante grande flexibilidade e boa proteção contra ruídos e vibrações. A técnica de construção é a topo/base, onde primeiramente os dormentes e trilhos são instalados e regulados geometricamente, e em seguida o concreto é lançado para preencher os espaços. (MICHAS, 2012)

O sistema Stedef desenvolvido na França é semelhante ao LVT. Sua extensão construída é 334km, a maior parte na Europa.

Michas (2012), distingue os principais tipos de sistemas não-lastrados de acordo com a Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** - Sistemas não-lastrados

<b>Sistemas não-lastrados</b>					
<b>Suporte discreto</b>				<b>Suporte contínuo</b>	
<b>Com dormentes ou blocos inseridos em concreto</b>	<b>Dormentes sobre leito de concreto asfáltico</b>	<b>Lajes de concreto pré-fabricadas</b>	<b>Modelos monolíticos</b>	<b>Estrutura de trilho embutido (ERS)</b>	<b>Trilho fixado e de suporte contínuo</b>
Rheda	ATD	Shinkansen	Lawn Track (Rasengleis)	Deck Track	Cocon Track
Rheda-Berlin	BTD	Bögl	FFC	INFUNDO-Edilon	ERL
Rheda 2000	SATO	ÖBB-Porr	Hochtief	BBERS	Vanguard
Züblin	FFYS	IPA	BES		KES
Stedef	GETRAC		BTE-BWG/HILTI		SFF
Sonneville-LVT	WALTER		PACT		Saargummi
Heitkamp					
SBV					
WALO					

**Fonte:** Michas, 2012

## 4. ASPECTOS TÉCNICOS DA VIA EM LAJE

### 4.1 VIA EM LAJE CONCRETADA *IN LOCO*

O sistema Rheda (Figura 4.1) está em desenvolvimento contínuo desde a sua primeira aplicação em 1970. (ESVELD, 2001)

O sistema Rheda é muito flexível, permitindo mudanças nos modelos e melhoramentos para atender às demandas de cada projeto. Ainda, pode ser encontrado em túneis, pontes e também em estruturas sobre solo. (MICHAS, 2012). Sua superestrutura requer uma fundação livre de recalque, pois suas barras da armadura são posicionadas no centro da laje, com a função principal de regular fissuração e transmitir forças laterais, e não com o propósito de enrijecer a laje (ESVELD, 2001).

Michas (2012) cita características gerais do sistema Rheda:

- dormentes de concreto revestidas;
- dormentes têm 2,6m de largura (com exceção do modelo Rheda Berlin, que é mais curto);
- o posicionamento na via é feito através de ajustes laterais e verticais;
- o sistema Rheda se apoia sobre uma camada de ligante hidráulico de 30cm e uma camada de proteção contra congelamento de aproximadamente 50cm;
- a qualidade mínima para o concreto da laje é C30;
- as alturas dos sistemas Rheda variam entre 830mm e 961mm (do topo do trilho ao topo da camada à prova de congelamento).

O sistema Rheda 2000 é o mais atual. A estrutura básica do sistema consiste em:

- dormentes bi-bloco modificados, fixados por uma armadura de viga não tencionada;
- os dormentes são embutidos numa laje de concreto monolítica;
- elementos de ligação de alta elasticidade são usados, garantindo a deflexão especificada para o trilho, para distribuição de carga e viagem suave;

Os principais objetivos do sistema Rheda são (ESVELD, 2001):

- arquitetura do sistema uniforme;
- melhoramento da qualidade da estrutura monolítica;
- otimização do desenho;
- técnicas integradas para instalação da via em laje.

**Figura 4.1** - Sistema Rheda 2000

**Fonte:** Rail One, 2011

Rail One (2011) ainda afirma:

- ótima adaptabilidade a todos os tipos de subestruturas e modelos executados, por meio de aplicação de concreto moldado *in loco* para a camada de suporte da via;
- procedimentos de instalação flexíveis, de alta performance baseados em passos simples de se reproduzir, tanto para processos manuais como para automáticos.

A instalação do sistema Rheda 2000 em solo começa com a execução de um leito de concreto usando-se forma deslizante. No caso de obras-de-arte, o concreto geralmente é lançado.

A aplicação de dormentes bi-bloco leves simplifica significativamente o seu uso no local de construção e permitem a instalação mecanizada dos painéis pré-fabricados da via. O processo de instalação dos dormentes pode ser executado da forma convencional. A fundação de concreto permite que veículos de construção carregados usem os trilhos sem dificuldades antes que sejam precisamente fixados no lugar. Assim, é possível que a via seja estendida através da colocação de um dormente por vez, ou por painéis pré-fabricados.

A armadura da laje passa por dentro da armadura treliçada dos dormentes (Figura 4.2), e é posicionada ao mesmo tempo em que a via é estendida (ESVELD, 2001).

**Figura 4.2** - Dormentes do sistema Rheda 2000, antes de serem embutidas em concreto



**Fonte:** Terfloth, 2004

O trilho é instalado e são feitos os alinhamentos verticais e horizontais. O alinhamento vertical é feito através de pinos fixados nas extremidades dos dormentes e o alinhamento horizontal é feito através de barras espaçadoras (RAIL ONE, 2011).

Após o trilho estar precisamente alinhado e fixado, o concreto é lançado. Especificações rigorosas são necessárias para a qualidade do concreto e a execução. Para evitar bicheiras embaixo dos dormentes, o concreto é lançado continuamente e adensado com o uso de vibrador. Pós-

tratamento e compactação do concreto garantem a alta qualidade da estrutura e otimizam a aderência com os dormentes.

Seguindo-se o ciclo de instalação, é possível alcançar-se a produtividade de 500m por dia (ESVELD, 2001).

## 4.2 VIA EM LAJE PRÉ-FABRICADA

Segundo Jang et al. (2008), as vias em laje moldadas *in loco* são as mais usadas no mundo, mas apresentam algumas limitações:

- Não é fácil de garantir a qualidade da laje de concreto;
- a velocidade de instalação é comprometida, devido ao tempo de cura do concreto;
- em secções subterrâneas ou em túneis, durante a concretagem, a fumaça liberada pelo escapamento dos caminhões betoneira causam danos à saúde dos operários.

Nestes aspectos, a laje pré-fabricada é preferível. Em países como Alemanha, China, Itália, Espanha e Japão as vias de laje pré-fabricada são muito usadas.

Os pré-requisitos para vias em laje pré-fabricada são:

- atender às especificações da via, quanto a velocidade e carga;
- segurança;
- operacionalidade;
- eficiência de instalação;
- manutenção;
- eficiência econômica.

Nas camadas subjacentes, a estrutura básica da laje pré-fabricada é quase a mesma da laje moldada *in loco*, exceto pela existência de uma camada de *grout* entre a laje pré-fabricada e a camada base.

Na instalação da laje pré-fabricada, os painéis da laje são posicionados sobre a base, o trilho é fixado na laje por meio dos elementos de ligação, e todo o sistema laje-trilho-ligação é ajustado. Em seguida, o *grout* é despejado embaixo da laje e os ajustes finais são feitos. Para maior eficiência e velocidade de instalação, é exigido um *grout* que possa ser despejado com rapidez e precisão, e que alcance rapidamente resistência e estabilidade volumétrica. Quando ajustes no alinhamento são necessários em serviço, ajustes de pequena escala podem ser feitos pelos elementos de ligação, e ajustes de grande escala, que excedam o limite dos elementos de ligação, podem ser feitos através de uma injeção adicional de *grout* embaixo das lajes. Além disso, existe a possibilidade de reposição de placas danificadas, o que melhora a manutenção em relação ao concreto moldado *in loco*.

A Figura 4.3 mostra o sistema de laje pré-fabricada Bögl.

**Figura 4.3** - Sistema de laje pré-fabricada Bögl, na linha que liga Nuremberg e Ingolstadt, Alemanha



**Fonte:** Max Bögl, 2012

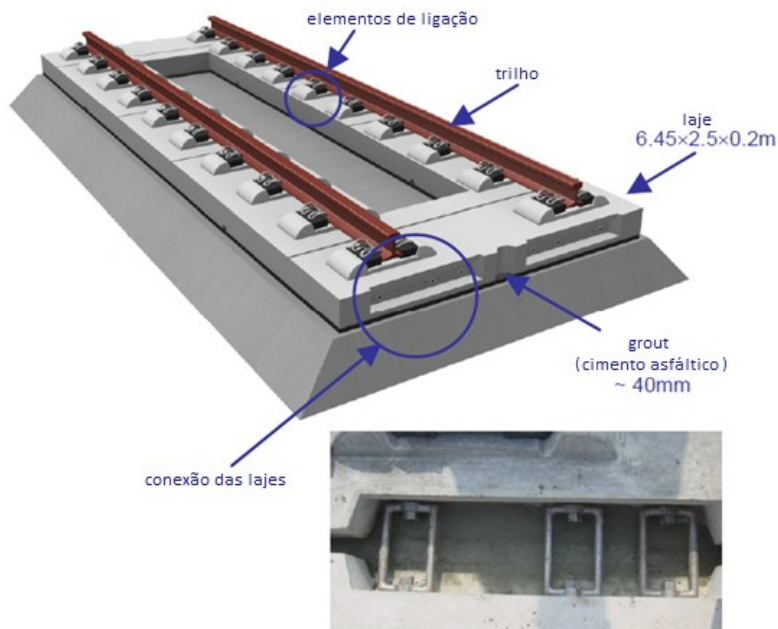
O estudo de Jang et al. (2008) desenvolveu um sistemas de via em laje de concreto pré-fabricado para linhas de alta velocidade, considerando a carga por eixo de 250kN, e velocidade máxima do trem de 350km/h.

O foco principal foi a eficiência de instalação e manutenção, enquanto outros aspectos foram observados.

A laje é “frame-shaped”, com dimensões de 6,45m(c)x2,4m(l)x0,2m(t) (Figura 4.4). As peças são protendidas na direção longitudinal e têm a resistência de 40MPa. A camada intermediária entre a laje e a camada de base é preenchida com um *grout* especial (argamassa composta por emulsão cimento-asfáltica), que tem a

resistência semelhante à da base (10~15MPa). Essa emulsão cimento-asfáltica garante estabilidade volumétrica por causa de sua expansão relativamente alta (1~3%) e sua resistência a flexão relativamente alta em relação à argamassa tradicional. O elemento de ligação usado no protótipo foi Vossloh 300, mas qualquer sistema de ligação pode ser usado, desde que atenda às especificações de rigidez ( $22,5 \pm 2,5 \text{ kN/mm}$ ), ajuste lateral ( $\pm 10 \text{ mm}$ ), ajuste vertical (+26,-4mm) e os requisitos especificados pelo padrão europeu.

**Figura 4.4** - Sistema de laje pré-fabricada proposto por Jang et al.



**Fonte:** Jang et al. (2008)

A característica mais importante da laje é conectar as placas através de conectores de aço localizados no fim do painel. Isso faz com que a camada de laje comporte-se como uma laje de armação contínua. O conceito do modelo é similar ao Bögl, mas a forma dos painéis é diferente. O uso de “frame-shape” não só torna a estrutura leve, como requer menor



volume de concreto e de *grout*. Isso o torna mais atrativo em eficiência econômica e o torna mais fácil de manusear e instalar. Ainda, a protensão longitudinal previne o surgimento de fissuração transversal devido à contração causada pelas quedas de temperatura. Por ter seus painéis conectados por toda extensão da via, o modelo estrutural da laje sobre a sub-base é calculado a partir do método para lajes de concreto com armação contínua.

Como a instalação foi em pequena escala, não houve um alto nível de mecanização. Portanto, a eficiência na construção não é alta o suficiente, especialmente no posicionamento da base de concreto, posicionamento das placas e no lançamento do *grout*. Essas questões podem ser melhoradas com o uso de equipamentos como forma deslizante, equipamentos de suspensão (Figura 4.5) para manusear e transportar as placas e uma máquina lançadora para o *grout*.

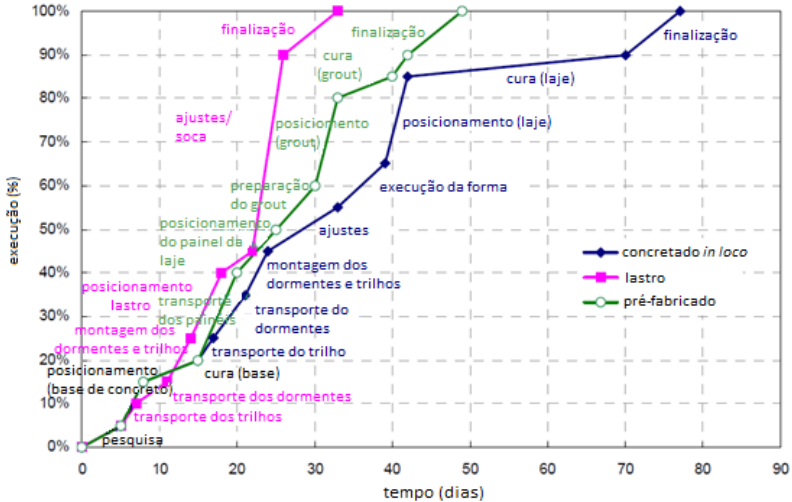
**Figura 4.5** - Suspensão da placa pré-fabricada para execução da via em laje no sistema Bögl



Fonte: MAX BÖGL, 2010

A Figura 4.6 mostra o tempo estimado de construção para 1km de via, comparando pré-fabricado, concretado *in loco*, e a ferrovia em lastro convencional. A figura mostra que as vias em lajes pré-fabricadas podem cortar o tempo de construção e despesas em mão de obra.

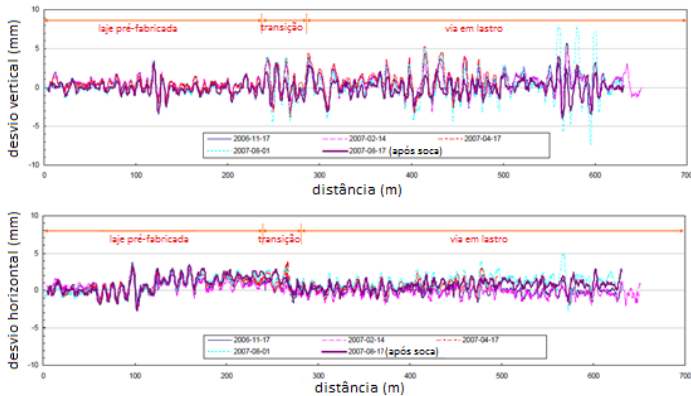
**Figura 4.6 - Tempo estimado de construção para 1km de via**



Fonte: Jang et al., 2008

A Figura 4.7 apresenta as irregularidades na via após 1 ano de instalação.

**Figura 4.7 - Irregularidades na via após 1 ano**



Fonte: Jang et al., 2008

### 4.3 VIA EM LAJE DE TRILHO EMBUTIDO

Segundo Esveld (2001), a via de trilho embutido é composta por trilhos de suporte elástico contínuo, feito por meio de um composto como cortiça ou poliuretano. A fixação do trilho é feita envolvendo-se toda o perfil do trilho pelo composto elástico, menos o boleto. Esse conceito pode ser usado desde em veículos leves sobre trilhos (VLT), até em vias de alta velocidade.

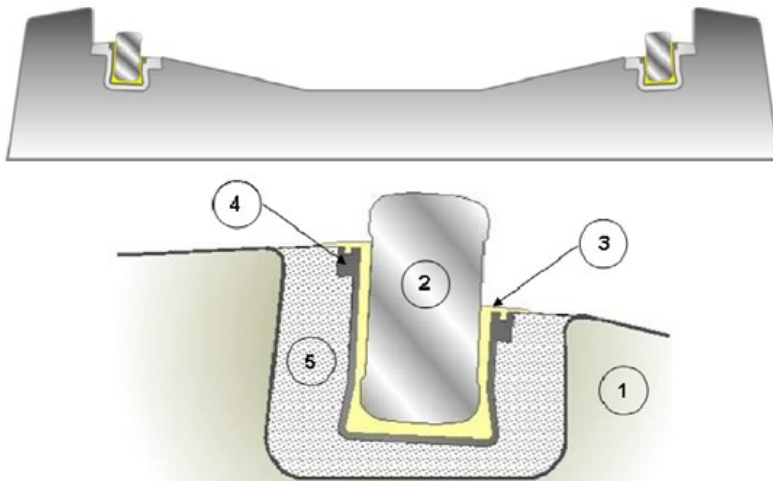
O método de fixação do trilho segue os seguintes princípios:

- suporte contínuo do trilho sobre uma tira elástica;
- orientação do trilho por fixação elástica em uma vala;
- alinhamento topo-base do trilho;
- o perfil do trilho é fixado por um composto elástico;
- otimização dos compostos elásticos, das dimensões da vala e das tiras para elasticidades específicas.

As vantagens do trilho de suporte elástico contínuo são a ausência de forças dinâmicas ligadas a flexão secundária entre suportes do trilho, redução do ruído, aumento da vida útil dos trilhos e redução na manutenção. A altura da seção da via pode ser reduzida para cruzamentos de estradas, portanto o trilho embutido proporciona uma superfície sem obstáculos para cruzamentos de tráfego.

O modelo de via em laje com trilho embutido MkII da Beatty Balfour, apresentado na Figura 4.8, é composto por 5 elementos chave: laje de concreto (1), trilho (2), palmilha (3), casca (4) e *grout* (5) (INNTRACK,2008).

Cada componente foi otimizado para sua facilitação, agilização, e economia na manufatura e performance. O sistema também foi estudado como um todo para analisar como os componentes se comportam em contato uns com os outros. Com isso, é providenciado alta performance, um sistema simples e econômico, e rápida instalação.

**Figura 4.8** - Modelo de via em laje Mk II

1. laje de concreto
2. trilho
3. palmilha
4. casca
5. grout

**Fonte:** Innotrack, 2008

A **Tabela 4.1** e a mostram os limites de tolerância para a manufatura dos elementos do sistema e para a infraestrutura férrea no Reino Unido.

**Tabela 4.1** - Limite de tolerância para manufatura dos elementos

Componente	Tolerância	
	Transversal	Longitudinal
Casca	$\pm 0,25$ mm	$\pm 0,4$ mm/m
Palmilha	$\pm 0,25$ mm	-
Trilho	$\pm 0,3$ mm	Nivelamento vertical $\pm 0,5$ mm/m Nivelamento horizontal $\pm 0,8$ mm/1,5m

**Fonte:** Innotrack, 2008

**Tabela 4.2** - Limite de tolerância para o alinhamento da estrutura férrea

Parâmetro	Velocidade		
	65-95 mph	100-125 mph	>125 mph
Alinhamento vertical (topo)	+ 0,-30 mm	+ 0,-30 mm	+ 0,-30 mm
Alinhamento horizontal (linha)	± 15 mm	± 10 mm	± 10 mm
Nivelamento transversal (superelevação)	± 5 mm	± 3 mm	± 2 mm
Torção (taxa p/ cada 3 m)	7 mm	6 mm	6mm
Bitola (linha plana)	1435-1441 mm	1435-1441 mm	1435-1441 mm

**Fonte:** Innotrack, 2008

A laje de concreto incorpora os entalhes necessários para permitir que o sistema de trilhos seja embutido na estrutura após a sua construção. A constituição e resistência da laje é projetada para se adequar de melhor maneira às especificações do projeto.

A casca é um composto de plástico reforçado com fibras. Sua função principal é formar um entalhe de dimensionamentos precisos, para garantir o funcionamento correto dos suportes de elastômero dos trilhos. A casca é apoiada na sua posição final por meio do despejo de *grout* cimentício. O *grout* geralmente é especificado para ter uma resistência aos 28 dias aproximadamente 30% maior que a do concreto em volta.

A palmilha do trilho tem forma de “U” e é feita de poliuretano. Esse elastômero resiliente dá suporte à base e aos lados do trilho, prevenindo excessiva deflexão lateral ou torção. A elasticidade do suporte vertical distribui o ponto de carga da roda uniformemente ao longo da laje de suporte, com redução dos picos de concentração de tensão, comparado ao suporte discreto. O desenho da palmilha também possui uma vedação que previne o ingresso de umidade no sistema. A palmilha dá suporte ao trilho através de sua resiliência, tanto horizontalmente quanto verticalmente.

A resistência da palmilha é definida por sua:

- espessura;
- temperatura;
- densidade;
- período de fadiga.

E isso afeta as seguintes características:

- conforto no rolamento;
- propagação de corrugação no trilho;
- restrição longitudinal do trilho;
- desgaste do trilho;
- corrosão do trilho;
- levantamento vertical do trilho.

O trilho embutido foi desenvolvido seguindo os seguintes princípios de instalação:

- Uso de processos e equipamentos padrões da engenharia civil,
- minimizar o trabalho requerido no local;
- minimizar o trabalho total realizado;
- usar processos, tecnologia e maquinaria comprovados;
- maximizar a flexibilidade na construção.

A execução dessa via pode ser através de concretagem *in loco* com concreto bobeado (Figura 4.9), do uso de lajes pré-fabricadas (Figura 4.10), ou formas deslizantes (Figura 4.11). Isso maximiza as oportunidades de processos de construção, que são limitados por tempo, espaço, tráfego e recursos para construção e renovação de vias.

**Figura 4.9** - Execução de via em laje de trilho embutido com concretagem *in loco*



**Fonte:** Innotrack, 2008

**Figura 4.10** - Execução de via em laje de trilho embutido com placas pré-fabricadas



Fonte: Innotrack, 2008

**Figura 4.11** - Execução de via em laje de trilho embutido com forma deslizante



Fonte: Innotrack, 2008

#### 4.4 SUBESTRUTURA

As exigências quanto à subestrutura são muito rígidas para a via em laje. Ajustes na geometria da via após a construção são limitados, portanto qualquer recalque deve ser evitado.

Para atender as exigências quanto à rigidez, o solo deve ser compactado e melhorado com o uso de cimento ou cal. Na Alemanha ainda se aplica uma camada abaixo, que protege contra congelamento. No topo é aplicada uma camada de suporte que pode ser asfalto ou concreto, dependendo do sistema.

Nos aterros de base, extensa pesquisa geotécnica é necessária quanto às condições do solo e os comportamentos quanto à deformação. (ESVELD, 2001)

Michas (2012) apresenta os requisitos para subestrutura:

- a) A subestrutura da via em laje deve ser assegurada a uma profundidade de 2,5m abaixo da placa de apoio através de tratamentos especiais no solo;
- b) Uma camada protetora contra congelamento de pelo menos 70cm de espessura deve ser aplicada;
- c) No caso de aterros, a camada de suporte mais baixa não deve ter menos de 1,80m de espessura;
- d) No caso de solos moles coesivos ou orgânicos a solução mais segura é trocá-los a uma profundidade de pelo menos 4m do topo da via;
- e) O lastro em vias em laje é substituído por uma camada de suporte de concreto ou asfalto;
- f) Os ajustes na elevação da via em laje variam de +26 a -4mm. No caso de erros de construção é permitido correções de +6 a -4mm. Os outros 20mm devem ser mantidos para ajustes necessários devido à possibilidade de recalques futuros;
- g) Deslocamentos laterais podem ser compensados numa faixa de +-5mm. Para erros de construção ajustes de apenas +-1mm são aceitáveis;
- h) O nível do lençol freático deve estar pelo menos 1,5m abaixo da cabeça do trilho;
- i) Para avaliações geotécnicas, sondagens no solo a cada 50m;
- j) O módulo de elasticidade na superfície do topo da subestrutura, tirado do ensaio dinâmico de pressão na placa, deve ser de 60N/m<sup>2</sup> em novas vias e 45N/m<sup>2</sup> em vias existentes.



#### **4.4.1 Rigidez à flexão da laje sobre o solo macio**

Segundo Esveld (2001), maior parte dos sistemas de via em laje aplicados têm o princípio baseado em uma laje de rigidez à flexão relativamente baixa sobre uma subestrutura rígida. A adaptabilidade da via em laje a recalques diferenciais na subestrutura é relativamente pequena, por tanto é necessário melhoramento no solo, que leva tempo e é caro.

Aspectos importantes que devem ser levados em conta ao se executar via em laje sobre solo macio são a fadiga da armadura, a deflexão vertical e o nível de tensão no solo. Em geral, armadura é colocada na linha neutra da laje para gerar fendas de contração em espaçamento padrão. Contudo, a colocação da armadura um pouco abaixo da linha neutra pode melhorar a rigidez à flexão e suportar em longo prazo as tensões geradas por contração e pelos esforços dinâmicos gerados pelo tráfego.

Lajes com grande rigidez à flexão conseguem suportar maior momento fletor, o que distribui a carga do tráfego por uma maior distância na via, diminuindo as tensões no solo.

#### **4.4.2 EPS como material de sub-base na via**

A construção de estruturas de via em laje relativamente pesadas em solos macios requer um melhoramento da capacidade de suporte. Normalmente se substitui a parte de solo pobre por areia ou se aplica solo melhorado. Mesmo com aplicação de sobrecarga temporária, recalques relativamente grandes acabam por ocorrer na fase inicial da vida da estrutura.

O uso de materiais ultraleves, como o Poliestireno Expandido (EPS) pode gerar um equilíbrio no peso total da estrutura, que gera menores tensões nas camas subjacentes e reduz as chances de recalques diferenciais. O uso do EPS como sub-base para uma linha de bonde em Roterdã confirma a limitação dos recalques. Devido ao baixo valor do módulo de Young do EPS, a laje de concreto é necessária para se obter rigidez e resistência suficientes. (ESVELD, 2001)

### 4.4.3 Túneis e pontes

O uso de via em laje é usado principalmente em túneis e pontes. Entretanto, algumas questões devem ser observadas.

A maior parte das vias em laje é construída em túneis, onde o solo é resistente e estável. A aplicação de via em laje em túneis é muito eficiente em termos de construção, durabilidade, resistência e economia. A via em laje pode ser construída diretamente na base do túnel e a espessura da laje pode ser reduzida em muitos casos, em comparação a aplicação em solos. (MICHAS, 2012) No entanto, segundo Esveld (2001), algumas formações geológicas podem comprometer a execução em túneis, como chances de chances de recalque, deslizamentos de terra ou surgimento de nascentes d'água.

Em pontes, certos comportamentos mecânicos devem ser considerados (ESVELD, 2001):

- e estrutura da ponte é descontínua;
- mudanças de temperatura implicam em movimentos longitudinais;
- as cargas de tráfego causam curvaturas nos vãos e torcem os suportes nas extremidades.

A superestrutura da via deve portanto ser capaz de lidar com esses movimentos.

## 4.5 TRANSIÇÕES

Pontos de transição são áreas onde a rigidez da via muda devido a propriedades elásticas diferentes entre estruturas dissimilares da via. Transições podem afetar a suavidade e a segurança da viagem, além de causar danos à superestrutura da via (Talampekos, apud MICHAS, 2012). A Figura 4.12 mostra uma área de transição avariada.

**Figura 4.12** - Recalque diferencial de uma ferrovia de lastro aproximando-se de uma ponte



**Fonte:** Read & Li, apud MICHAS, 2012

As transições podem ser entre diferentes superestruturas (lastro, laje) ou subestruturas (aterro, ponte, túnel). (ESVELD, 2001) Segundo Talampekos, citado por Michas (2012), transições também são encontradas entre aterro e bueiros e entre áreas com e sem armadura em um sistema de via em laje.

Esveld (2001) apresenta medidas que podem ser tomadas para suavizar as diferenças nas propriedades elásticas entre vias em lastro e vias em laje. As principais diferenças são quanto à rigidez, flexibilidade e recalques. A conexão pode ser feita diversas maneiras:

- diminuição gradual da elasticidade dos elementos de ligação (rigidez);

- colocação de dois trilhos extras por uma distância de 20m, como mostrado na Figura 4.13 (flexibilidade);

- estabilização do lastro através de aglutinantes químicos (recalque);
- uso de leito de concreto no lugar de sublastro por pelo menos 10m (recalque e flexibilidade);
- uso de uma âncora armada no fim da via em laje em combinação com uma laje horizontal como amortecedor no começo da via em lastro (recalque).

**Figura 4.13** - Trilho duplo em transição

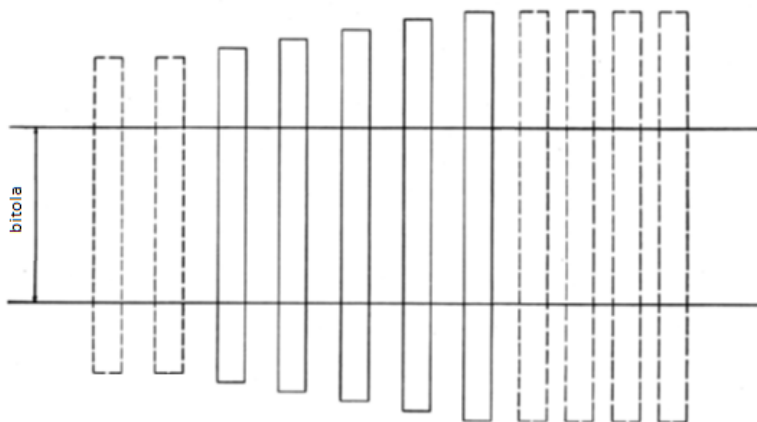


**Fonte:** Michas, 2012

Outras soluções mostradas por Read & Li (apud MICHAS, 2012) são:

- Instalação de uma série de dormentes que vão alongando no lado de lastro da transição (Figura 4.14);
- uso de colunas de pedra, concreto, areia e madeira é uma forma eficiente de estabilizar e fortalecer subleitos fracos em transições (Figura 4.15)

**Figura 4.14** - Transição na aproximação de pontes



**Fonte:** Read & Li, apud MICHAS, 2012

**Figura 4.15** - Colunas de rocha executadas no subleito



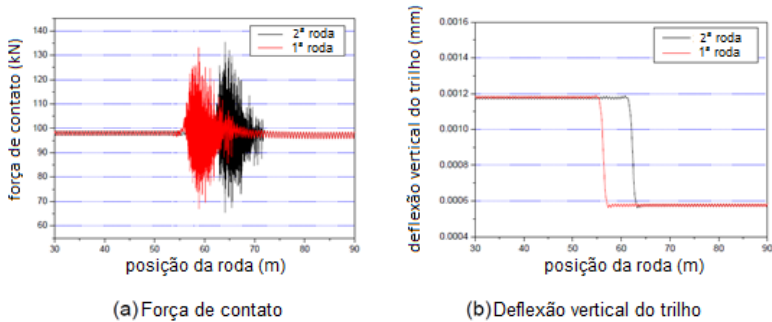
**Fonte:** Read & Li, apud MICHAS, 2012

Um estudo foi feito na Coreia do Sul, em 2006, por Kang, et al. (2008). Foi construído uma via de teste na linha Jeolla. São 650m de via, sendo que a seção de via em laje corresponde a 236m de laje pré-fabricada, e a transição se estende por 36m.

O estudo foi feito através de modelagem matemática. A análise dinâmica foi feita com e sem as melhoras de performance na transição da via, para avaliação do comportamento dinâmico.

Para o caso sem melhoras de performance, as forças de contato e a deflexão vertical mudam bruscamente na transição entre via em laje e via em lastro. Os impactos dinâmicos nas rodas e trilhos podem aumentar as irregularidades da via. A Figura 4.16 apresenta os resultados da análise sem considerar melhoras na performance.

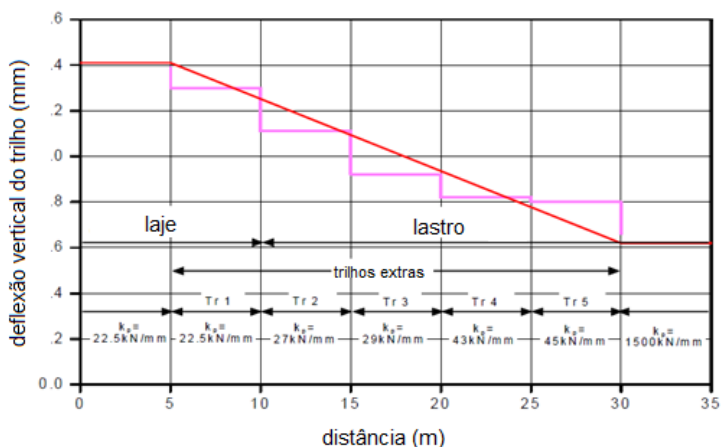
**Figura 4.16** - Força de contato e deflexão vertical do trilho na transição



**Fonte:** Kang et al., 2008

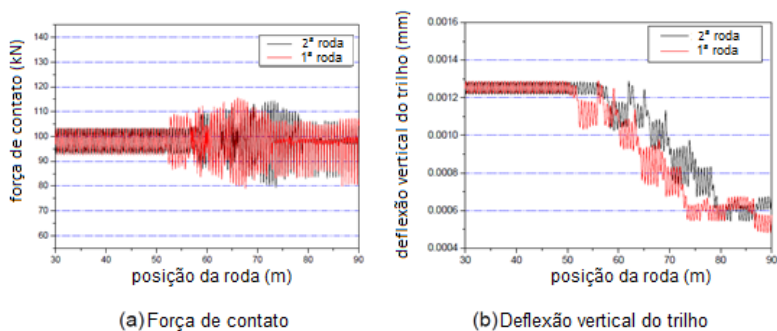
Para reduzir os impactos dinâmicos, foi considerado o uso de trilhos extra e a transição na rigidez dos elementos de ligação. A Figura 4.17 apresenta o diagrama de deflexão do trilho para modelagem estática. A Figura 4.18 mostra o resultado da análise dinâmica para transição considerando trilhos extra e a transição na rigidez dos elementos de ligação.

**Figura 4.17** - Diagrama de deflexão do trilho para modelagem estática



Fonte: Kang et al., 2008

**Figura 4.18** - Diagrama de deflexão do trilho para modelagem dinâmica



Fonte: Kang et al., 2008

Na via de teste foram aplicadas as seguintes melhorias para a transição:

- instalação de trilhos extras (Figura 4.19);
- transição da rigidez da via;
- alongamento das camadas de ligante hidráulico e contra congelamento;
- reforço da camada contra congelamento com o uso de geotêxtil;

- ligação entre as lajes de concreto e a base de concreto armado para prevenir que as placas levantem.

**Figura 4.19** - Trilhos extras na transição da linha Jeolla



**Fonte:** Kang et al., 2008

Os trilhos extras auxiliam uma transição suave entre a via em laje e a via em lastro. Esses trilhos foram combinados com a seção de laje pré-fabricada por 5,2m, e então estendidos em direção à via em lastro. Dormentes de transição foram usados para fixar os trilhos extras.

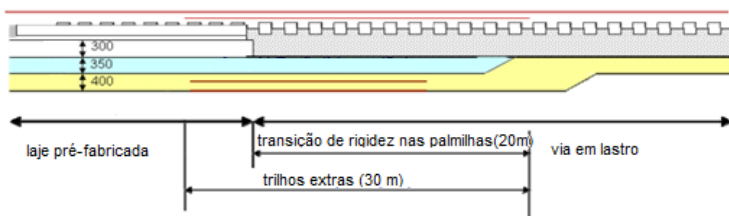
Para uma mudança gradual no módulo da via, foram instalados palmilhas que, em 5 etapas, variam sua rigidez entre 22,5kN/mm e 50kN/mm, gradualmente.

As camadas da subestrutura foram alongadas para prevenir recalque do subsolo. A capacidade de suporte do solo foi melhorada com o uso do geotêxtil.



A Figura 4.20 mostra um esquema do corte longitudinal da via.

**Figura 4.20** - Corte longitudinal da transição na linha Jeolla



**Fonte:** Kang et al., 2008

A ligação entre as placas pré-fabricadas e a base de concreto armada é feita com uso de barras de aço, assim como a ligação entre a base de concreto e a camada de ligante hidráulico. Ainda, os vãos das placas pré-fabricadas são preenchidos com concreto (Figura 4.21).

Após a construção, houve passagem de trens na via e não foi apresentado qualquer comportamento anormal na transição.

**Figura 4.21** - Preenchimento dos vãos das placas pré-fabricadas com concreto



**Fonte:** Kang et al., 2008

## 4.6 RESILIÊNCIA DA VIA

Em vias convencionais o lastro providencia aproximadamente metade da resiliência necessária para absorver as forças dinâmicas, a outra metade é absorvida pelas camadas subjacentes. A rigidez da estrutura da via pode ser da ordem de 100kN/mm por dormente, o que deflete aproximadamente 1mm sob uma carga de 20ton/eixo. Uma palmilha é inserida entre o trilho e o dormente para filtrar vibrações de alta frequência.

Na via em laje, a palmilha elástica e a placa base, que pode ou não existir, substituem o lastro quanto à distribuição de cargas e as funções de amortecimento. Portanto, a importância dos desses amortecedores elásticos é fundamental, pois são eles os únicos componentes da via com propriedades amortecedoras. (ESVELD,2001)

## 4.7 MANUTENÇÃO

As vias em lajes já construídas confirmam a baixa necessidade de manutenção. Entretanto, devido à existência recente e limitada, pouco se sabe para que sejam desenvolvidas regras empíricas em relação ao processo deterioração das vias em laje.

No caso do sistema Rheda, a manutenção é em geral restrita à troca das palmilhas sintéticas. Outra medida de manutenção é o esmerilhamento dos trilhos.

Falhas perto das soldas e juntas dos trilhos desenvolvem-se consideravelmente mais devagar em relação à via em lastro. Isso se deve às menores forças dinâmicas, que dificilmente provocam deterioração progressiva nos suportes dos trilhos. O custo de manutenção na via Rheda é aproximadamente 10% do custo da via em lastro. (ESVELD,2001)

## 4.8 VIBRAÇÃO E RUÍDO

Vibração é uma forma de transmissão de energia, uma onda mecânica que viaja através de um meio físico. O som é um caso particular de vibração, uma onda que viaja através do ar com frequências dentro da gama de audição sensível (FERNÁNDEZ, et. al, 2013).

Vibrações transmitidas através da via para o solo podem afetar fundações de construções vizinhas e incomodar habitantes, não só pela vibração em si, mas como fonte de ruído estrutural. Ainda, a vibração na via pode aumentar o desgaste em elementos de ligação e dormentes.

Fatores como rigidez da palmilha, suporte do dormente e a manutenção da via têm grande influência na vibração dos dormentes, como também na durabilidade em longo prazo.

Em Shinkansen, no Japão, várias medidas são tomadas para aliviar ruídos. Os ruídos têm diferentes origens, como (MORITOH; ZENDA; NAGAKURA, 1995):

- rolagem na via;
- vibração na estrutura de pontes de aço e concreto;
- pantógrafo (dispositivo montado no topo da locomotiva, que a alimenta com corrente elétrica recolhida da catenária);
- aerodinâmica;
- barulho do motor.

O ruído de rolagem nas vias em laje é por volta de 5dB maior do que nas vias em lastro. Isso é principalmente devido à diferença das características refletoras da superfície das vias. Portanto, se as vias em laje forem feitas com a superfície suficientemente absorviva, o ruído de rolagem pode ser reduzido em pelo menos 5dB, se igualando à via em lastro.

Quando os vagões correm nos trilhos, o movimento de vibração dos trilhos é transmitido para as estruturas de suporte, como as vias e as estruturas de concreto. As frequências dos ruídos em estruturas geralmente são menores do que as dos ruídos de rolagem. O nível de pressão sonora do ruído da estrutura é o mesmo para vias em laje e em lastro. Para frequências menores que 1000Hz, os dois tipos de via se comportam como uma mola de mesma maneira. Para vias em lastro, uma grande atenuação no ruído da estrutura é alcançada ao se colocar colchões de borracha, com 30mm de espessura, entre o lastro e a superfície da estrutura. Como resultado, o ruído da estrutura pode ser negligenciado comparado a outros ruídos. Para vias em laje, o mesmo método não é eficaz. Contudo, após aplicar métodos para a suavização dos trilhos, os ruídos da estrutura reduzem e podem ser negligenciados.

A principal fonte de ruídos em Shinkansen é da aerodinâmica dos vagões.

## 4.9 CARGAS DINÂMICAS

Segundo Rengpeng et al. (2013), a determinação da carga dinâmica na ferrovia é de extrema importância no projeto da superestrutura e subleito. O “Dynamic load magnification factor” (DLF) é a razão entre a máxima carga dinâmica aplicada na via e a máxima carga estática. Na China, o DLF é 3,0 para a velocidade do trem de 300km/h, e 2,5 para a velocidade de 250km/h. Nos padrões da *German Railway*, para a velocidade de 300km/h, o DLF é entre 1,7 e 2,1 para a laje, e entre 1,24 e 1,5 para o subleito. Os fatores que definem o DLF na Alemanha são: o coeficiente da curva de carga, o coeficiente de estado da via, o coeficiente de velocidade de operação e o coeficiente estatístico de segurança. Os valores de DLF variam de país para país.

Os fatores que influenciam a determinação do DLF para uma ferrovia de alta velocidade incluem o tipo de veículo, a velocidade do trem, o tipo do trilho, e fatores ambientais. Portanto, é difícil de se determinar com precisão o DLF por meio de análise teórica. Cargas de trem podem ser medidas em tempo real, *in loco*, para medir a resposta dinâmica do subleito.

Um modelo em escala real do subleito para alta velocidade proposto para a linha Shanghai-Nanjing Intercity foi construído. A tensão dinâmica da laje e a pressão dinâmica do solo do subleito foram medidas por um teste de excitação utilizando um eixo de uma roda. A relação entre o DLF e a frequência de excitação foi apresentada.

O modelo foi construído em um grande tanque de solo com as dimensões de 15m X 5m X 6m, na Universidade de Zhejiang (Figura 4.22). O modelo consiste em solo de fundação, subleito, camada suporte de concreto, argamassa cimento asfáltica, laje, elementos de ligação, trilhos. A laje utilizada é a CRTS I, e tem suas peças pré-fabricadas com as dimensões de 4,962m X 2,4m X 0,19m. O solo de fundação foi retirado da bancada do Rio Qiatang em Hangzou, China, que representa o solo encontrado na ferrovia Shanghai-Nanjing.

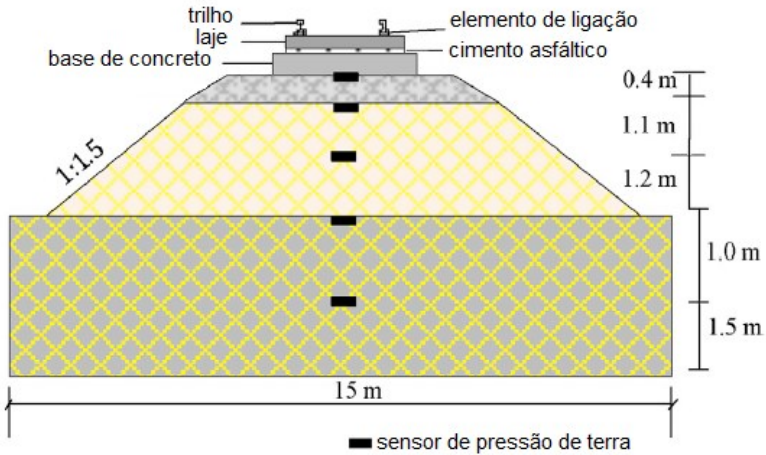
**Figura 4.22** - Modelo de subleito para via em laje de alta velocidade



**Fonte:** Rempeng et al., 2013

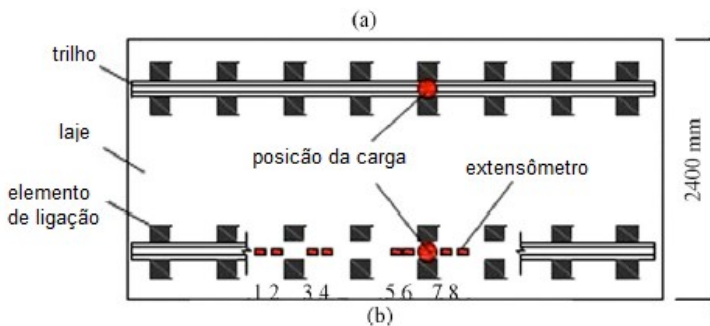
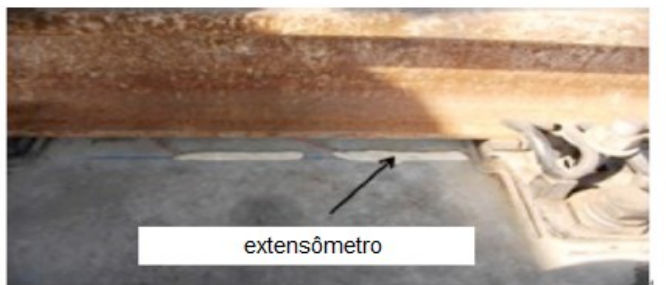
Sensores de pressão de terra foram instalados em diferentes profundidades do subleito (Figura 4.23). A disposição dos medidores de deformação na superfície da laje é apresentada na Figura 4.24. Antes da instalação, a superfície da laje foi limpa e polida. Colas de proteção e a prova d'água foram aplicadas após a instalação.

**Figura 4.23** - Disposição dos sensores de pressão de terra no solo



Fonte: Renpeng et al., 2013

**Figura 4.24** - Disposição dos medidores de deformação na superfície da laje

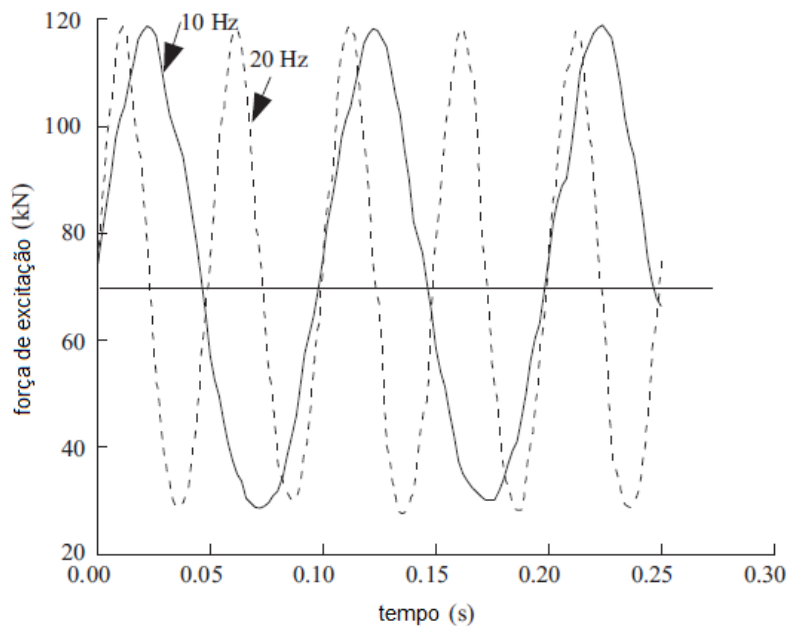


Fonte: Renpeng et al., 2013

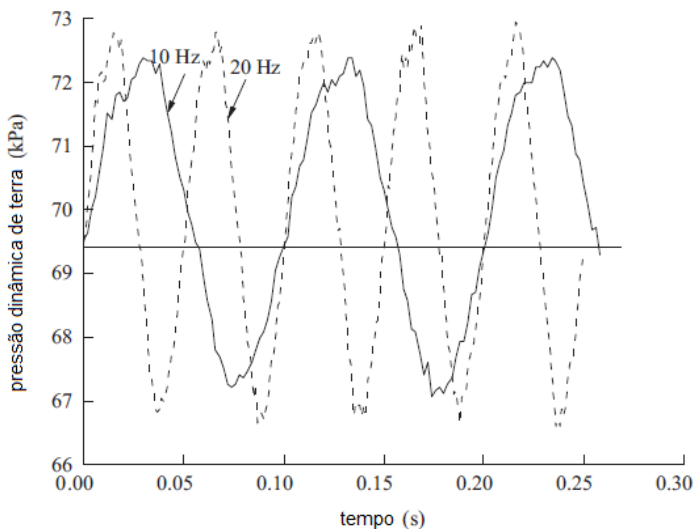
A máxima força de excitação aplicada nos trilhos foi 200kN, e a frequência máxima foi 30Hz. A tensão dinâmica no subleito gerada pela carga móvel é como uma onda senoidal cíclica, do ponto de vista teórico. Testes dinâmicos com diferentes frequências de excitação foram executados para determinar a relação entre a frequência de excitação e o DLF.

A pressão de terra dinâmica do subleito foi monitorada durante o teste. A Figura 4.25 apresenta a forma da onda da força de excitação. A pressão de terra dinâmica da Célula 2-1, 2,7m abaixo da superfície do subleito, é a apresentada na Figura 4.26. A variação da pressão de terra dinâmica do subleito em relação à força de excitação é apresentada na

Figura 4.27, para diferentes profundidades. Geralmente, a pressão de terra dinâmica aumenta quando a frequência de excitação aumenta, mas o aumento é relativamente menor quando a frequência de excitação é mais baixa. Quando a frequência de excitação alcança 16Hz, a pressão de terra dinâmica cresce rapidamente para um pico, que corresponde à frequência de ressonância do modelo.

**Figura 4.25** - Forma da onda da força de excitação

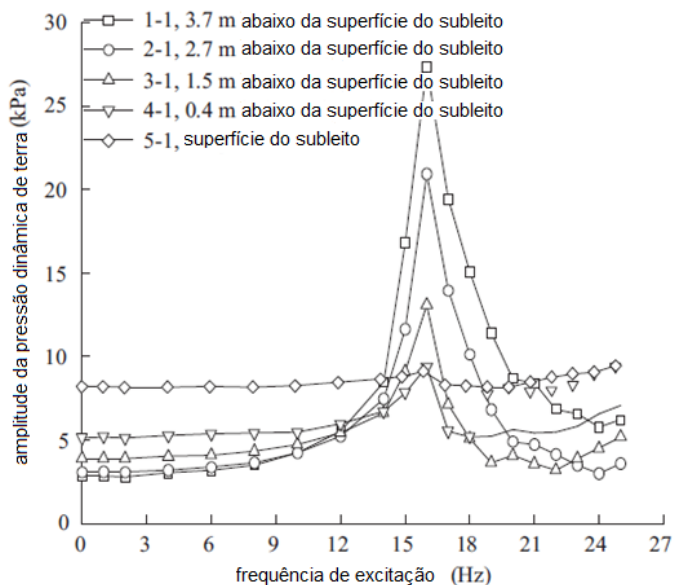
Fonte: Renpeng et al., 2013

**Figura 4.26** - Medição da pressão de terra dinâmica para a Célula 2-1



Fonte: Renpeng et al., 2013

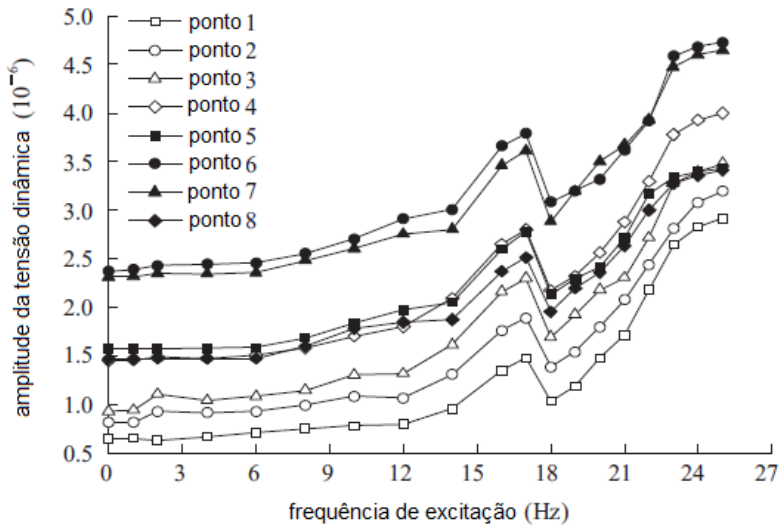
Figura 4.27 - Relação entre a pressão de terra dinâmica e a força de excitação



Fonte: Renpeng et al., 2013

A Figura 4.28 apresenta a relação entre a tensão dinâmica e a frequência de excitação em 8 pontos da superfície da laje.

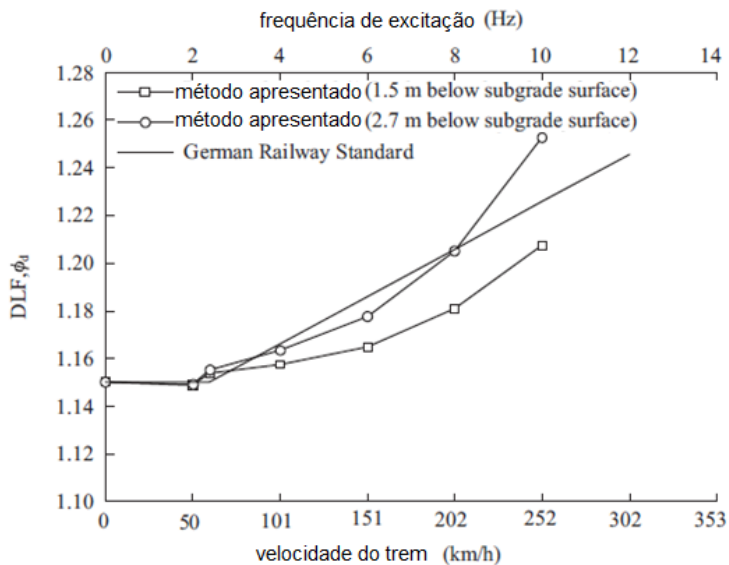
**Figura 4.28** - Relação entre a tensão dinâmica e a frequência de excitação em 8 pontos da superfície da laje



**Fonte:** Rengpeng et al., 2013

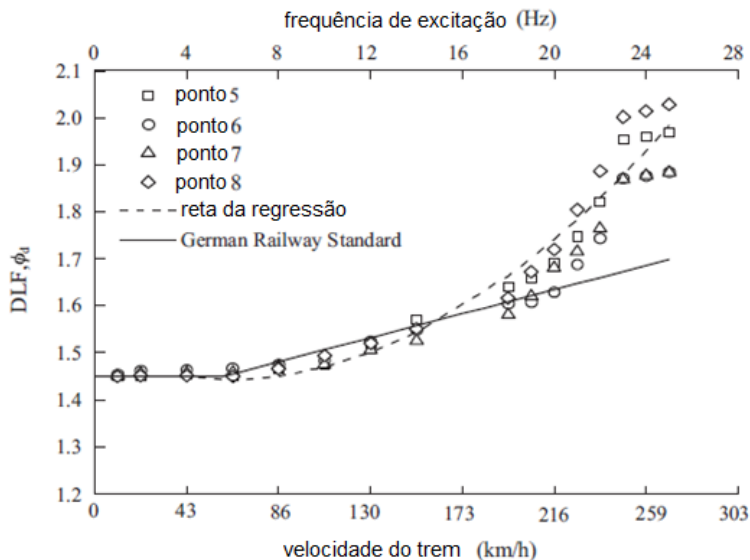
A Figura 4.29 e a Figura 4.30 apresentam uma comparação entre os valores de DLF obtidos no estudo e os calculados pelo método determinado pelo padrão da German Railway, para subleito e laje.

**Figura 4.29** - Comparação entre valores de DLF para subleito



Fonte: Rengpeng et al., 2013

**Figura 4.30** - Comparação entre valores de DLF para laje



Fonte: Rengpeng et al., 2013

## 5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE VIAS EM LASTRO E VIAS EM LAJE

A Tabela 5.1 apresenta algumas das principais semelhanças e diferenças entre as superestruturas da via em lastro e da via em laje, ambas mostradas na Figura 5.1:

**Tabela 5.1** - Comparação das superestruturas

VIA EM LASTRO	VIA EM LAJE
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trilhos</li> <li>• Elementos de ligação</li> <li>• Suporte do trilho pelos dormentes</li> <li>• Lastro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trilhos</li> <li>• Elementos de ligação</li> <li>• Suporte do trilho:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Discreto com dormentes ou pontos de suporte</li> <li>- Suporte contínuo</li> </ul> </li> <li>• Camada de suporte de concreto ou asfalto</li> </ul>

Fonte: Michas, 2012

**Figura 5.1** - Comparativo entre via em lastro (à esquerda) e via em laje (à direita)



Fonte: Esveld, 2001

## 5.1 VIA EM LASTRO

Em geral, o problema do lastro é a sua deterioração em longo prazo, devido às cargas suportadas. Segundo Esveld (2001), o material granular compactado eventualmente se desloca, sofre erosão, se rompe, causando irregularidades na geometria dos elementos constituintes e entupindo o leito da via de lastro, que causa problemas de drenagem. Devido a tais fatores, a necessidade de manutenção regular é necessária para manter os trilhos adequadamente alinhados.

Nas superestruturas em lastro a menor estabilidade longitudinal e lateral faz com que os dormentes, que apoiam os trilhos a cada 60-80cm, possam sofrer deslocamentos que alteram a geometria da via. Na via em laje, os trilhos são apoiados e fixados no leito, direta ou indiretamente.

As desvantagens da via em lastro em relação à via em laje são:

- a tendência da via de “flutuar” na direção longitudinal e lateral depois de um período de tempo;
- a aceleração lateral para compensar as curvas é limitada devido à resistência lateral do lastro;
- a pulverização dos grãos do lastro gera partículas que danificam o trilho e as rodas;
- a permeabilidade reduz devido à contaminação, erosão do lastro e entrada de partículas finas do leito;
- estrutura relativamente pesada e alta, exigindo pontes e viadutos mais fortes.

A taxa de deterioração da via é fortemente relacionada à qualidade dos componentes e a forma como são dispostos durante a execução, da geometria da via, da homogeneidade das camadas subjacentes e a capacidade de suporte do sublastro.

Em pontes e túneis ainda há a necessidade de elasticidade adicional, com a colocação de colchões sob o lastro e uso de elementos de ligação com maior elasticidade.

## 5.2 VIA EM LAJE

Em comparação às vias em lastro, Michas (2012) mostra que as vias em laje em geral têm como vantagem redução na necessidade de manutenção, combinada com maior operacionalidade, além de melhor estabilidade da via. As vantagens que podem ser encontradas com o uso da via em laje são:

- trabalhos de manutenção como compactação, limpeza do lastro, e alinhamento da via são desnecessários. Os custos em manutenção são entre 20-30% dos custos das vias em lastro.

- menores gastos com impedimento do tráfego;
- maior vida útil, por volta de 50-60 anos (via em lastro é de 30-40 anos), e possibilidade de reposição quase total após o fim da vida útil;
- posicionamento mais eficaz da linha, devido à possibilidade de curvas mais estreitas;
- maior segurança contra forças laterais e acomodação de maiores cargas nos eixos;
- freios por corrente de Foucault podem ser usados a qualquer momento;
- veículos de emergência e brigada de incêndio podem locomover-se facilmente sobre via em laje em túneis;
- custo para controle de vegetação é excluído ou muito reduzido;
- quase máxima disponibilidade para tráfego normal, pois os trabalhos de manutenção são escassos e podem ser feitos durante a noite;
- não há força de arrasto do lastro com a passagem de trens de alta velocidade;
- possibilidade de correções verticais de até 26mm e horizontais de até 5mm para compensar pequenas deformações;
- peso e altura da estrutura reduzidos;
- melhor distribuição de cargas para as camadas subjacentes;
- menor desgaste nos eixos dos veículos devido à melhor geometria da via;
- possibilidade de maiores forças de frenagem.

Outras razões para o uso da via em laje pode ser a falta de disponibilidade de material granular para o lastro, providenciar acessibilidade para veículos rodoviários, diminuir os ruídos por vibrações e prevenir a emissão de poeira do lastro para o meio.

Desvantagens da via em laje em relação à via em lastro:

- maior custo de construção;
- maior reflexão de ruído aéreo. Medidas de proteção extra devem ser tomadas, o que aumenta consideravelmente os custos (MICHAS, 2012);
- maiores alterações no posicionamento e superelevação da via são possíveis através de grande quantidade de trabalho;
- menor adaptabilidade a deslocamentos da camada de aterro;

- no caso de descarrilamento, reparo demanda muito mais tempo e trabalho;
- transições entre via em lastro e via em laje necessitam de atenção especial;
- a vida útil da via em laje é de 50-60 anos. Contudo ajustes e reparos após a construção não podem ser feitos facilmente. Isso significa que a qualidade na construção deve ser conferida e reassegurada cuidadosamente, pois qualquer comprometimento na qualidade ou permanece por toda a vida útil da via, ou exige medidas de alto custo para serem resolvidas;
- não há muitas possibilidades de se aplicar inovações ou atualizações futuras após a construção;
- reparos são caros e fecham a via por longos períodos devido à cura e endurecimento do concreto;
- a camada protetora contra congelamento deve ser aplicada em qualquer caso e é mais grossa em relação à do lastro.
- o custo de reconstrução da via em laje não é considerado;
- em muitos casos, novos mecanismos são necessários para produção e reparo.

A execução da via em laje requer diversas medidas em relação à preparação da fundação. As camadas subjacentes devem ser homogêneas e capazes de suportar as cargas impostas sem assentamentos significativos.

### 5.3 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

O Departamento de Transportes do Reino Unido em 2007 indicou que as emissões de CO<sub>2</sub> pelo transporte férreo correspondem a menos de 1% do total emitido pelo Reino Unido. Porém, é previsto um crescimento de demanda na área de 30% nos próximos 10 anos (MILFORD ; ALLWOOD, 2009).

O método usado no modelo considera a construção, manutenção e disposição de todos os principais componentes da infraestrutura viária no Reino Unido. A unidade usada é kg de emissão de CO<sub>2</sub> por metro da ferrovia, por ano (kg CO<sub>2</sub>/m ano).

Material, manufatura, transporte, uso e disposição são considerados nos três principais estágios da via: construção, manutenção e fim da vida útil. A combinação dos componentes e características da via, cargas de tráfego, regimes de manutenção e atividades ao fim da vida

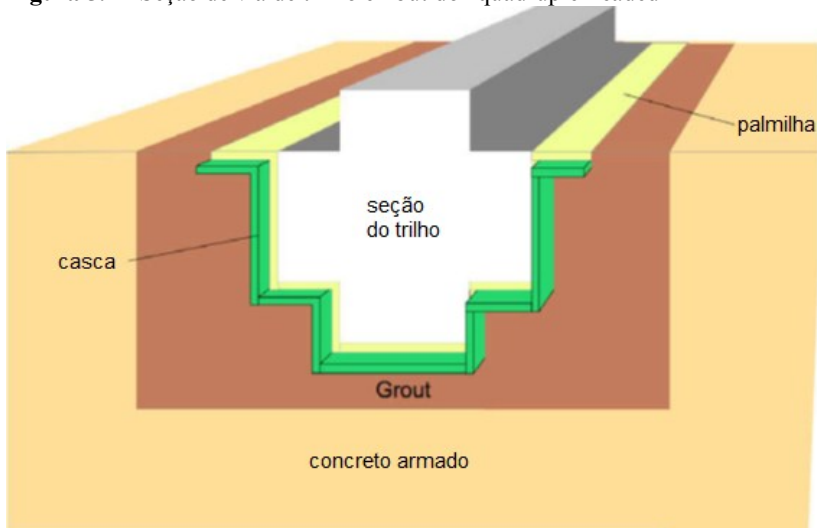
útil são definidas e as emissões de CO<sub>2</sub> resultantes são estabelecidas a partir de uma tabela de fatores de emissão.

O modelo de via em laje usado no estudo foi o de via em laje de trilho embutido da Beatty Balfour (BB). O fator de “carbono incorporado” para a seção do trilho foi considerado 95% do fator usado na seção de trilho convencional devido à redução de energia necessária para formar a seção transversal.

É considerada a via de trilho embutido “double-headed”, invertendo-se a seção do trilho, o que dobraria a vida útil, e não traria custos adicionais à manutenção.

Também é analisada a via de trilho embutido “quadruple-headed” (Figura 5.2), que se diferencia da seção de trilho tradicional no intuito de aumentar a vida útil através de maior número de interfaces roda-trilho. Dobra-se o número de cabeças do trilho, mas não é dobrada a área da seção transversal, o que diminui a quantidade de material necessária e consequentemente a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida.

**Figura 5.2** - Seção de via de trilho embutido “quadruple-headed”



**Fonte:** Milford ; Allwood, 2009

Para o impacto de CO<sub>2</sub> na construção, cada componente da via teve sua massa (kg), fator de carbono incorporado (kg CO<sub>2</sub>/ kg) e vida útil levados em conta. As massas para cada componente foram levantadas a partir dos dados das companhias fornecedoras e da literatura. As emissões de CO<sub>2</sub> associadas a cada componente foram calculadas multiplicando a



massa de cada material constituinte pelo fator de carbono incorporado. Os fatores de carbono incorporado foram estabelecidos pelo estudo de Hammond e Jones (2008). Milford e Allwood (2009) consideram as vidas úteis para cada elemento das vias convencionais baseados no estudo de Serco (2006), e nas vias da Beatty Balfour a partir de estimativas. A Tabela 5.2 apresenta um resumo dos dados levantados para as vias convencionais, e Tabela 5.3 apresenta um resumo dos dados levantados para as vias futuras.

**Tabela 5.2 - Componentes das vias convencionais**

Componente	Massa (kg)		Fator de carbono incorporado (kg CO <sub>2</sub> / kg)	Vida útil (anos)
Seção do trilho	60,2	Por metro	1,38-2,78	13-38
Dormente de concreto	275-308	Por unidade	0,277-0,283	24-45
Dormente de madeira dura	70	Por unidade	0,47	16-36
Dormente de madeira macia	60,2	Por unidade	0,45	10-36
Dormente de aço	68,2-74,5	Por unidade	1,77	17-40
Elementos de ligação	1-1,65	Por unidade	1,71	Mesmo que os dormentes
Placa base	17,0-19,5	Por unidade	1,91	Mesmo que os dormentes
Lastro	900-1680	Por metro	0,005	10-52
Fixadores	0,02	Por unidade	1,71-1,77	Mesmo que os dormentes
Eclissas	15,1	Por unidade	3,19	Mesmo que a seção do trilho
Separador geotêxtil	10	Por metro	0,005	Mesmo que o lastro
Manta para areia	600	Por metro	3,00	Mesmo que o lastro

**Fonte:** Milford ; Allwood, 2009

**Tabela 5.3** - Componentes das vias futuras

Componente	Massa (kg/m)	Fator de carbono incorporado (kg CO <sub>2</sub> /kg)	Vida útil (anos)
Seção do trilho	74,0	2,64	22-49
Seção do trilho	74,0	2,64	44-98
Seção do trilho	60,1	2,78	34-76
Seção do trilho	112	2,64	88-198
Palmilha do trilho embutido	1,02	3	22-49
Casca do trilho embutido	2,75	8,1	Mesmo da laje de concreto
Laje de concreto	1580	0,332	82,5-103,5
<i>Grout</i>	86	0,136	Mesmo da laje de concreto
Base de concreto	1200	0,095	Mesmo da laje de concreto

**Fonte:** Milford ; Allwood, 2009

Ainda foram levados em conta processos como corte, solda, assentamento e tensionamento do trilho. O transporte na construção foi considerado como sendo por trilhos, e os fatores emissão foram usados a partir do Department for Environment, Food and Rural Affairs (2008) (Tabela 5.4).

**Tabela 5.4** - Emissões no processo e transporte

Emissões	Valores
Trilhos	0,76 CO <sub>2</sub> /m
Lastro	28,01 CO <sub>2</sub> /m
Veículos	0,91 CO <sub>2</sub> /veículo km
Carga no trilho	0,02 CO <sub>2</sub> /tonelada km

**Fonte:** Milford ; Allwood, 2009

As emissões na manutenção foram calculadas a partir das seguintes atividades principais: esmerilhamento do trilho, soca, alinhamento e nivelamento. Essas atividades têm a frequência regular, determinadas de acordo com a carga de tráfego. Os índices de CO<sub>2</sub> foram estimados a partir do consumo de combustível das máquinas utilizadas para realizar essas atividades (Tabela 5.5).

**Tabela 5.5** - Características de manutenção

Atividade	Intensidade de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /m)	Intervalo (anos)	Frequência (EMGT)
Soca	0,153	0,375-2,25	22,5
<i>stoneblowing</i>	0,418	-	
Esmerilho	1,0	0,938-5,63	45

**Fonte:** Milford ; Allwood, 2009

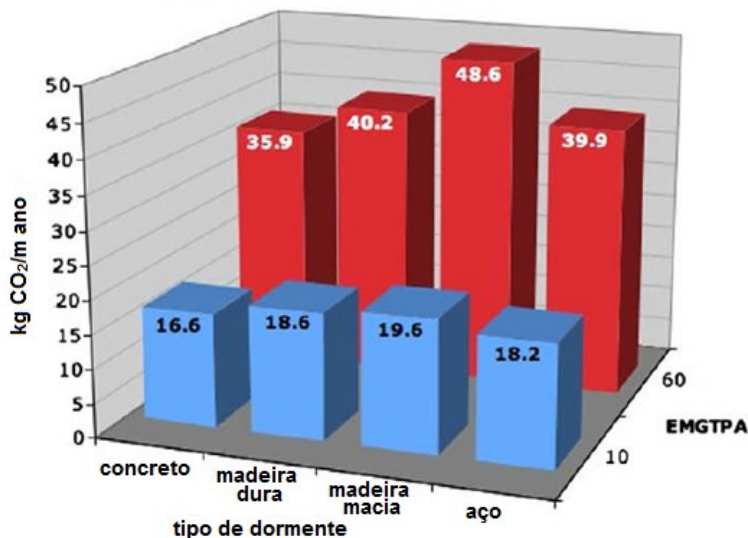
Para a maioria dos componentes da via podem ser considerados duas opções de destino ao final da vida útil: reciclagem e aterro sanitário. Alguns componentes também podem ser incinerados, gerando ou não energia. Reciclagem e aterramento, com exceção dos dormentes de madeira, não geram emissão de gases. O transporte dos componentes no fim da vida útil pode ser estimado igual ao do considerado na construção (Tabela 5.6).

**Tabela 5.6** - Características do fim de vida útil

Característica da emissão	Valor
Aterro da madeira	0,31 kg CO <sub>2</sub> /kg
Incineração da madeira (sem geração de energia)	0 kg CO <sub>2</sub> /kg
Incineração da madeira (com geração de energia)	- 0,56 kg CO <sub>2</sub> /kg
Incineração do polímero (sem geração de energia)	2,88 kg CO <sub>2</sub> /kg
Incineração do polímero (com geração de energia)	1,86 kg CO <sub>2</sub> /kg
Desmantelamento da via	2,45 kg CO <sub>2</sub> /kg
Transporte ao fim da vida útil (% das emissões do transporte na construção)	50%

**Fonte:** Milford ; Allwood, 2009

A análise de emissão foi separada entre os modelos atuais (Figura 5.3) e futuros. Entre os modelos atuais, foi considerada a ferrovia em lastro, dividida entre os tipos de dormentes usados: aço, concreto, madeira dura e madeira macia. Entre os modelos futuros, foram consideradas a via em laje de trilho embutido da Beatty Balfour, a via de trilho embutido “double-headed”, a via de trilho embutido “quadruple-headed” e a via em lastro “double-headed”. Para cada modelo, a análise foi feita considerando-se duas diferentes cargas de tráfego: 10 EMGTPA e 60 EMGTPA.

**Figura 5.3** - Comparação do impacto de CO<sub>2</sub> entre modelos de via atuais

**Fonte:** Milford ; Allwood, 2009

A Tabela 5.7 apresenta as características adotadas para as vias de suporte discreto.

**Tabela 5.7** - Características das vias de suporte discreto

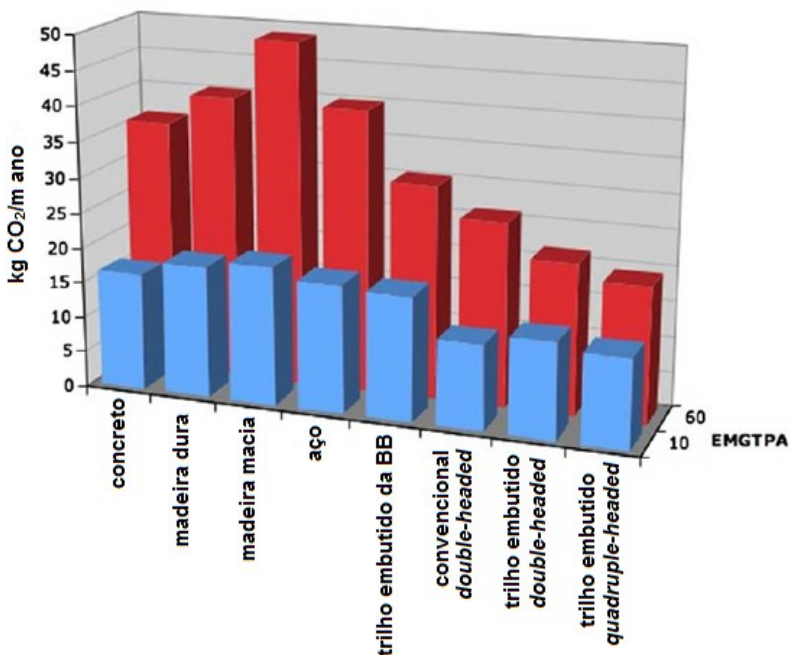
Característica	Valor
Espaçamento do dormente	0,7m
Elementos de ligação por dormente	4
Pacas base por dormente	2
Fixadores por dormente	4
Com juntas ou solda contínua	Solda contínua
Trilhos por via	2

**Fonte:** Milford ; Allwood, 2009

Todos os modelos futuros considerados têm menor impacto de CO<sub>2</sub> para ambas as cargas consideradas, com exceção da via em laje de trilho embutido da Beatty Balfour, que em baixo tráfego apresenta um impacto maior do que o modelo convencional com dormentes de concreto (Figura 5.4 e

Tabela 5.8). O modelo convencional “double-headed” tem menores emissões com menor carga de tráfego. As emissões durante os processos e manutenção são menores para as vias em laje, mas as altas emissões associadas à construção da laje de concreto não trazem grandes benefícios quando consideradas baixas cargas de tráfego. Os impactos causados pelos outros modelos futuros são menores do que o da via em laje de trilho embutido da Beatty Balfour porque aumentam a vida útil do trilho, diminuindo as emissões associadas. Para os modelos de trilho embutido “double-headed” e “quadruple-headed” essa diminuição já é suficiente para compensar as emissões associadas à construção da laje de concreto.

Figura 5.4 - Comparação do impacto de CO<sub>2</sub> entre modelos de via atuais e futuros



Fonte: Milford ; Allwood, 2009

**Tabela 5.8** - Impacto de CO<sub>2</sub> para modelos futuros

Cenário	10 EMGTPA (kg CO <sub>2</sub> /m ano)	60 EMGTPA (kg CO <sub>2</sub> /m ano)
Trilho embutido da BB	17,6	30,2
Trilho embutido <i>double-headed</i>	13,6	21,4
Trilho convencional <i>double-headed</i>	12,2	26,0
Trilho embutido <i>quadruple-headed</i>	12,7	19,2

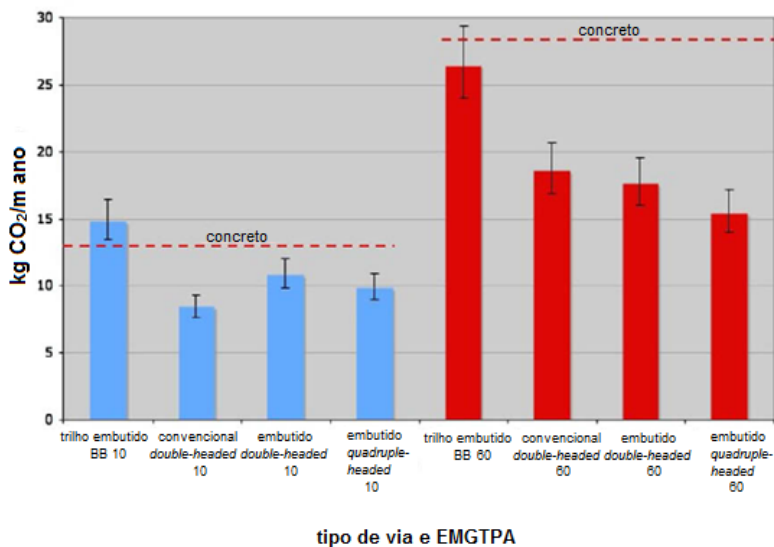
**Fonte:** Milford ; Allwood, 2009

Para altas cargas de tráfego, as vias de trilho embutido “double-headed” e “quadruple-headed” tem um impacto significativamente menor do que a via convencional “double-headed”. Apesar de o modelo da via em laje de trilho embutido da Beatty Balfour ser o de maior impacto entre os modelos futuros, tem um impacto menor do que qualquer um dos modelos atuais ao considerar-se altas cargas de tráfego.

A diferença entre os modelos atuais e os futuros é maior para altas cargas de tráfego. O benefício de construir o modelo convencional “double-headed” é estender a vida útil do trilho. Os benefícios das vias em laje provêm da maior vida útil de todos os componentes e dos menores requisitos de manutenção. Ambos são mais significativos para altas cargas de tráfego.

Um dos fatores chave para a redução na emissão de CO<sub>2</sub> é o tempo de vida útil dos componentes da via. No entanto, como os modelos futuros ainda são muito recentes ou apenas teóricos, existe uma incerteza no tempo de vida útil dos componentes usados no modelo. A Figura 5.5 apresenta uma análise do efeito da incerteza para os modelos futuros. Para simplificar, somente emissões relacionadas com os materiais de construção foram consideradas, visto que são as mais relevantes na emissão total. As barras de erros ilustram uma incerteza de  $\pm 10\%$  nos valores da vida útil. A análise sugere que, mesmo com 10% a menos na estimativa da vida útil, todos os modelos futuros, menos o da via em laje de trilho embutido da Beatty Balfour, ainda causariam menos impacto de CO<sub>2</sub> do que o modelo convencional com dormentes de concreto para altas cargas de tráfego.

**Figura 5.5** - Comparação do impacto de CO<sub>2</sub> considerando incerteza de  $\pm 10\%$  no tempo de vida útil



**Fonte:** Milford ; Allwood, 2009

Maximizar a vida útil dos componentes diminui o impacto total de CO<sub>2</sub> da via. Combinar componentes que têm vida útil semelhantes pode prevenir a remoção de componentes funcionais antes do fim da vida útil, ou a diminuição de disponibilidade por ter que substituir componentes individuais em diferentes ocasiões.

Existem três opções principais para reduzir o impacto de CO<sub>2</sub> da via: estender a vida útil, diminuir da carga de tráfego, usar diferentes modelos de via.

O Reino Unido tem aproximadamente 33.500 km de ferrovias e a manutenção e reposição dessas vias gera emissões entre 430 e 934 mil toneladas de CO<sub>2</sub> por ano. Se a via de trilho embutido “double-headed” fosse usada para substituir todas as vias existentes, a emissão anual reduziria até 40%.

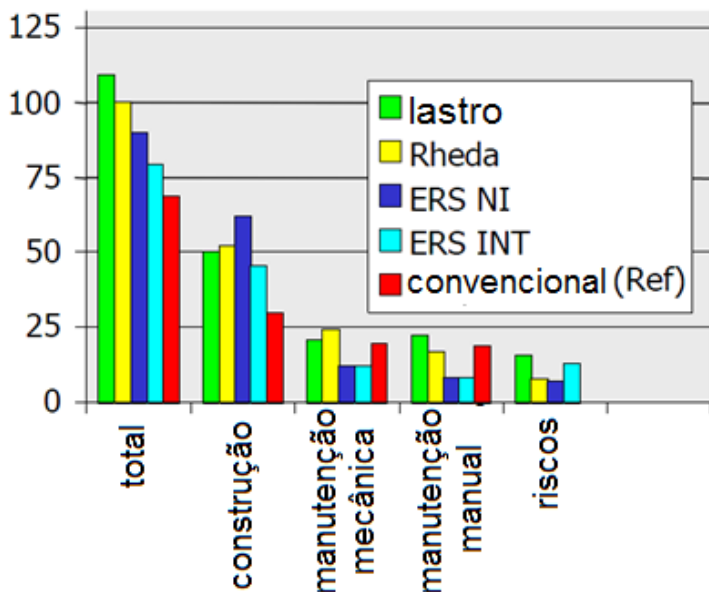
## 5.4 ANÁLISE ECONÔMICA

Os custos para implementação da via em laje são significativamente mais altos, porém as vantagens econômicas podem ser percebidas em longo prazo. Um estudo de Esveld (1999) avalia os custos anuais de construção de manutenção de diferentes sistemas de via. São eles: Rheda, ERS integrado à subestrutura de concreto, ERS não integrado à subestrutura de concreto e Lastro para alta velocidade.

Os custos estimados para construção e manutenção desses modelos de via são apresentados em Euros por metro e são apresentados na Figura 5.6:

**Figura 5.6** - Custos anuais €/m

Modelo:	Construção:	Custo Anual:
ERS, NI (Não integrado)	€ 1,200	€ 90
ERS, INT (Integrado)	€ 910	€ 80
Rheda	€ 1,270	€ 100
Via em lastro	€ 1,000	€ 110

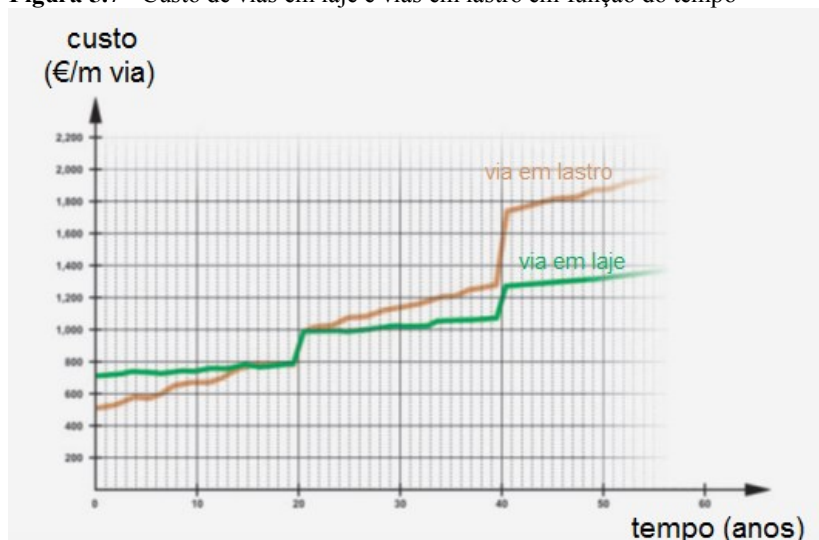


Fonte: Esveld, 1999



Estudos de Schilder e Diederich (2007) apresentam um comparativo entre o custo por metro de vias em laje e vias em lastro, também comprovando que os maiores investimentos iniciais em vias em laje pode ser economicamente vantajoso ao longo das décadas. Considerando uma vida útil de 50-60 anos, as vantagens ficam ainda mais evidentes, como apresentado na Figura 5.7.

**Figura 5.7** - Custo de vias em laje e vias em lastro em função do tempo

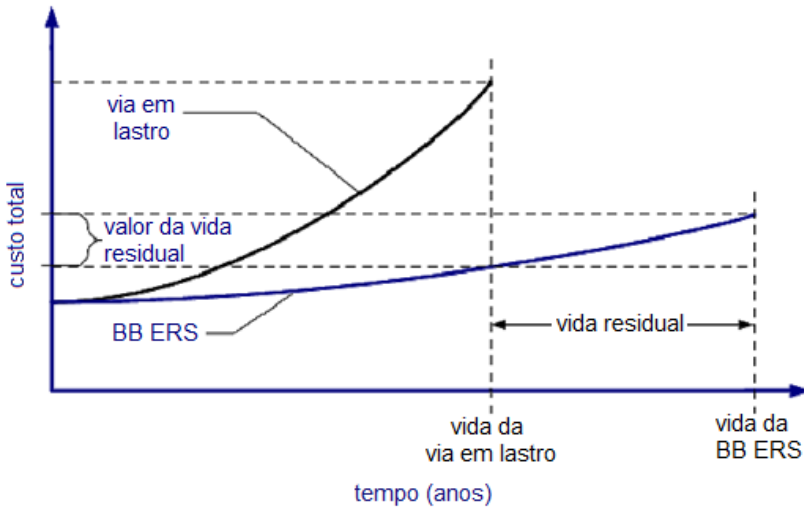


**Fonte:** Schilder e Diederich, 2007

A vida útil do sistema de via em laje de trilho embutido pode ser considerada em pelo menos 60 anos, mas depende das especificações do cliente. Portanto, o valor residual é equivalente à diferença entre a vida útil da via em lastro e da via em laje de trilho embutido (INNTRACK, 2008).

A **Figura 5.8** ilustra como o valor da vida residual é determinado. Com esta análise, o custo benefício ao evitar a necessidade de remodelação no fim da vida útil da via lastrada não é reconhecido.

**Figura 5.8** - Gráfico do valor residual



Fonte: Inntrack, 2008

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ferrovias em lastro já vêm sendo construídas por todo o mundo desde o século 19. A tecnologia utilizada para a sua aplicação hoje é o resultado de uma constante evolução, tanto a partir de estudos como por observação empírica. Apesar de ter a sua eficácia comprovada, a via em lastro apresenta algumas limitações, das quais pode-se citar a velocidade, as cargas e a disponibilidade de serviço.

A ferrovia em laje surgiu nos anos 70 do século passado para contornar as limitações da via em lastro e, apesar de ser relativamente nova, já existe uma ampla gama de estudos nessa área. O surgimento de novas tecnologias de materiais e de novas técnicas construtivas têm papel essencial no desenvolvimento dos modelos de ferrovia em laje propostos. Estes se baseiam tanto no modelo estrutural da via em lastro convencional, com o suporte discreto do trilho sobre dormentes, como também apresentam modelos totalmente novos, de suporte discreto sem o uso de dormentes ou de suporte contínuo.

As diferentes técnicas construtivas propostas, como o uso de lajes pré-fabricadas, forma deslizante ou concretagem *in loco*, buscam alta produtividade sem elevar os custos, e atendem aos rígidos padrões de qualidade exigidos para a construção da via em laje.

Devido à limitação de ajustes geométricos na via após a construção, baixa tolerância a recalques diferenciais é admitida. Portanto, a subestrutura da via em laje exige atenção especial. Pequenas diferenças no alinhamento vertical em uma via de alta velocidade podem comprometer o conforto e a segurança da viagem. A estrutura da via também pode ser comprometida devido à concentração de tensões. Em solos macios, é necessário o melhoramento do solo para aumentar a sua rigidez e evitar expansão ou quaisquer mudanças no seu volume. Em pontes e túneis, a subestrutura normalmente é rígida, mas alguns aspectos específicos devem ser observados.

Apesar do alto custo de implementação, a ferrovia em laje se apresenta economicamente viável. Isto se torna evidente ao se comparar os gastos entre vias em lastro e vias em laje a longo prazo. O baixo custo de manutenção e maior durabilidade da via em laje compensa o investimento inicial, que se paga ao longo da vida útil da via. Analisando a longo prazo, conclui-se também que as emissões de CO<sub>2</sub> não são demasiadas em relação às da via em lastro, podendo-se em alguns casos até ser menor.

A aplicação de ferrovias sobre lastro se demonstra uma opção mais adequada para vias de baixo tráfego e baixas velocidades, enquanto

o uso de vias em laje se demonstra ser indicado para vias de alta velocidade e tráfego intenso. Isso deve-se a maior capacidade de suporte de carga dos eixos e maior tempo disponível de serviço nas vias sobre laje.

O Brasil é um país de dimensões continentais, e o modal ferroviário, que é vantajoso para transporte em grandes distâncias, ainda é muito mal implementado. Existe um enorme gargalo no escoamento de produtos do interior do país para os portos. Isso gera prejuízo em diversos setores como o agrícola, o pecuário e o mineral. O transporte ferroviário é o que melhor se adequa a essa demanda em muitos casos.

A Secretaria de Transportes Nacional busca priorizar investimentos na área de transporte ferroviário e hidroviário, e através do PAC (Programa de Aceleração do Crescimento) apresenta um grande plano para a ampliação da malha ferroviária no Brasil (PERRUPATO, 2012). Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, o Brasil é o sexto maior produtor de cimento no mundo, que é a principal matéria-prima para a construção de vias em laje de concreto. O país possui 87 plantas industriais cimenteiras, que em 2013 produziram 70 milhões de toneladas de cimento, e têm capacidade instalada de 86 milhões de toneladas por ano (KIHARA ; VISEDO, 2014).

Este trabalho apresentou diferentes sistemas de ferrovias em laje, e realizou um estudo comparando-os com a ferrovia em lastro. A ferrovia em laje se mostrou uma tecnologia bem consolidada e competitiva. Na situação em que encontramos o Brasil atualmente, é válido considerar a implantação deste sistema, cujas características se adequam a muitas das vias que serão reconstruídas ou iniciadas do zero nos próximos anos.

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BILOW, D. N.; RANDICH G. M. **Slab track for the next 100 years**. Portland Cement Association. Skokie, IL, 2000.

BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estradas de Ferro I**. Editora LTC – Rio de Janeiro, 1979.

ESVELD C. **Modern Railway Track**. 2ª Edição, Delft University of Technology, 2001

ESVELD, C. **SLAB TRACK: A Competitive Solution**. Delft University of Technology, 1999

FERNÁNDEZ, P. M. et. al, **Monitoring and analysis of vibration transmission for various track typologies. A case study**. Department of Transport Engineering and Infrastructure, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain ; Railways Group, Technological Innovation Directorate, Málaga, Spain, 2013

HAMMOND, G. ; JOJNES, C. **Inventory of Carbon & Energy (ICE)**. Versão 1.6a, University of Bath, Reino Unido, 2008

INNOTRACK, **Thematic priority 6: Sustainable Development Global Change and Ecosystems, Validation methodology and criteria for the evaluation of frame type unballasted or slab track based superstructure innovations**. Project No. TIPS-CT-2006-031415, 2008

JANG, S. Y, et al. **Development of Prefabricated Concrete Slab Track Systems and Trial Installation on Renevue Line**. Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Coreia do Sul; Sampyo E&C, Seul, Coreia do Sul, 2008

KANG, Y. S, et al. **A Study of Track and Train Dynamic Behavior of Transition Zone Between Concrete Slab Track and Ballasted Track**. Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Coreia do Sul; Sampyo E&C, Seul, Coreia do Sul, 2008

KIHARA, Y. ; VISEDO, G. **A Indústria do Cimento e o Desenvolvimento do Brasil**. Associação Brasileira de Cimento Portland, 2014. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil>>. Acesso em: 29 Junho 2014.

MARQUES, J. M. G. **Construção e manutenção de infraestruturas ferroviárias. Via em laje**. Universidade de Lisboa, Portugal, 2013

MAX BÖGL, **FFB Slab Track Bögl**. Sengenthal, Alemanha, 2012.

MAX BÖGL, **BÜB Level Crossing Bögl**. Sengenthal, Alemanha, 2010.

MICHAS, G. **Slab Track Systems for High-Speed Railways**. Royal Institute of Technology. Estocolmo, Suécia, 2012.

MILFORD, R. L. ; Allwood, J. M. **Assessing the CO<sub>2</sub> impact of current and future rail track in the UK**. Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge, Reino Unido, 2009

MORITOH, Y ; ZENDA, Y. ; NAGAKURA, K. **Noise control of high speed Shinkansen**. Noise Reduction Group, Railway Technical Research Institute, Tóquio, Japão, 1995

PERRUPATO, Marcelo. **Plano Nacional de Logística e Transportes: Permanente, Intermodal, Participativo e Integrado**. Santa Maria: Secretaria Nacional de Transportes, 2012. 93 slides, color.

RAIL ONE, **Rheda 2000 Ballastless Track System**. Neumarkt, Alemanha, 2011

REN PENG, C. et al. **Experimental study on dynamic load magnification factor for ballastless track-subgrade of high-speed railway**. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University ; MOE Key Laboratory of Soft Soil and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University ; Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou, China, 2013

SCHILDER, R; DIEDERICH, D. **Installation Quality of Slab Track – A Decisive Factor for Maintenance**. RTR, 2007

SEBASTIAN TERFLOTH, Wikimedia Commons, **File:Schwellen Rheda.jpg**. 2 Novembro de 2004. Disponível em: <[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schwellen\\_Rheda.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schwellen_Rheda.jpg)>. Acesso em: 19 junho 2014.