

# Capacitação da Via Permanente: Aumento de Carga/eixo, Dormentes Alternativos & Plataforma Resistente

\*Walter Vidon Jr.<sup>1</sup>, Celia M. O. Rodrigues<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ch. Vidon Especialistas, Serviços e Equip. Ferroviários, R. Halfeld 744/301, Juiz de Fora-MG.

<sup>2</sup> Planservi Engenharia, Av. Prof. Ascendino Reis 725, São Paulo-SP.

e-mail: [wvj@chvidon.com.br](mailto:wvj@chvidon.com.br); [celia.rodrigues@planservi.com.br](mailto:celia.rodrigues@planservi.com.br)

**IV Encontro de Ferrovias ANTF / UFES, 7/8 Ago 2013, Vitória-ES**

## Resumo:

A busca por mais eficiência, produtividade e lucratividade nas mais importantes ferrovias internacionais de transporte de “commodities” resulta no incessante aumento da capacidade de carga dos vagões e dos trens, com o aumento da carga por eixo sobre a via permanente. A maior eficiência somente estará garantida se a disponibilidade da via for mantida.

As características essenciais de um típico dormente ferroviário devem ser: moderada elasticidade, compressibilidade, flexibilidade e rigidez similares as dos dormentes de madeira nativa. É neste cenário que surgem os Dormentes de Madeira de Eucalipto, de Plástico Reciclável, de Concreto e de Aço como tecnologicamente viáveis na capacitação da via para aumento da carga por eixo.

No Brasil o cenário das ferrovias “heavy haul” indica crescente aumento da carga/eixo, passando de 25t para até 40t, e simultaneamente a TU cresce de 100 milhões para 200 milhões/ano; ou em ferrovias mundiais atingindo inacreditáveis 450 milhões como ocorre na “Datong-Quinhuangdao”, China e “Powder River Coal Basin” (South Morril-Gibbon), “Nebraska, USA”.

Os riscos de perda da confiabilidade são enfatizados quando as limitações inerentes aos dormentes alternativos são subestimadas. “Case-study” internacionais de “big” falhas já ocorridos são abordados (USA, Canada, Africa do Sul e Australia).

**Palavras-Chaves:** Dormentes, Aumento de Carga/Eixo, Modulo de Via, Pressões no Subgrade, Capacidade de Suporte da Via.

## 1. INTRODUÇÃO

Os mais bem sucedidos dormentes devem preencher as seguintes seis funções essenciais da via permanente [1]:

1ª) Distribuir (espalhar) sobre a maior área de lastro possível as cargas de rodas (estáticas, dinâmicas cíclicas e dinâmicas de impacto) assegurando que lastro/sublastro e principalmente o subgrade não sofram sobrecarga ou excesso de tensões;

2ª) Manter a bitola da linha e inclinação do trilho, dentro da tolerâncias especificadas;

3ª) Não gangorrear (rock-roll), ou seja, não oscilar lateralmente sob ação do tráfego;

4ª) Não correr, não se movimentar lateralmente sob ação de forças centrífugas ou térmicas, e resistir ao fenomeno de flambagem da via;

5ª) Não caminhar, não se deslocar logitudinalmente sob ação das forças de tração e frenagem dos trens, ou ação das forças térmicas; e

6ª) Permitir o isolamento elétrico entre as duas filas de trilhos.

Portanto, os dormentes produzidos a partir de diferentes materiais como madeira, concreto, aço, plástico reciclado ou fibra sintética devem ser fabricados de modo a atender esses seis requisitos básicos, essenciais e críticos.

Apesar de anos de pesquisa, desenvolvimento e emprego de dormentes fabricados a partir de

materiais alternativos como o concreto, aço e plásticos (polímeros), a experiência mostra que a madeira é ainda a matéria prima preferida para dormentes, pois possui todas as características para atender os seis critérios essenciais de desempenho já descritos [3].

## 2. DORMENTES DE MADEIRA NATIVA

As características mecânicas da madeira variam consideravelmente com as espécies, local de origem, época de corte e modo de produção. A madeira é um material de relativa baixa resistência, apresentando de maneira geral as seguintes propriedades [1] :

- a) Mod. elasticidade = 7500MPa(1,1x10<sup>6</sup> psi);
- b) Mod. ruptura = 40MPa (5800 psi);
- c) Resist. à compressão = 20MPa (2900 psi);
- d) Resist. à tração normal = 7,5MPa (1000 psi);
- e) Resist. cisalhamento = 10MPa (1450 psi);
- f) Dureza Janka = 50 MPa (7250 psi); e
- g) Densidade (m. aparente) = 0,75-1,2 gr./cm<sup>3</sup>

As razões para a preferência da madeira na produção de dormentes na maioria dos países em relação aos materiais alternativos incluem, entre outros fatores, a disponibilidade de florestas, a trabalhabilidade, o custo, o fácil manuseio, a resistência a corrosão e o principal fator: a excelente resiliência e compressibilidade das madeiras [3].

A rigidez do dormente de madeira-DM ( $ExI=617$  kN.m<sup>2</sup>) é teoricamente 19 vezes menor que o dormente de concreto monobloco ( $ExI= 11550$  kN.m<sup>2</sup>). Esta característica de resiliência da madeira assegura que para uma dada camada de lastro o DM distribui (espalha) a carga vertical de roda numa área maior, garantindo assim uma reduzida pressão vertical sobre as camadas finais da subestrutura da via.

Os dormentes de aço e de plástico possuem rigidez menor que o DM. O dormente de aço ( $ExI= 501$  kN.m<sup>2</sup>) e de plástico reciclável ( $ExI= 116$  kN.m<sup>2</sup>) possuem rigidez 20% e 80% menores respectivamente ao DM.

Em relação ao primeiro critério essencial de funcionalidade de qualquer dormente, o de distribuição e espalhamento da pressão vertical sobre o lastro, apenas os dormentes alternativos de aço ou de plástico reciclável podem apresentar desempenho similar ou até melhor que os DM.

Os dormentes de concreto monobloco em linhas tanto de carga/eixo pesada (>25t/eixo) ou de elevada velocidade (>100 km/h) dificilmente atenderão o primeiro critério essencial de desempenho. Para atender em 100%, necessitam da introdução no seu projeto de um ou mais acessórios especiais para aumento da resiliência (“high resilient rail pad”, “tie pads”/ “under sleeper pads”).

Nas linhas “heavy haul” da MRS o modo de falha mais frequente dos DM nativa é o desgaste/destruição mecânica (mais do que o apodrecimento), tais como fendilhamento na região de pregação (“splitting”), afrouxamento de tirefãos devido ao alargamento da furação (“spike-killing”) e penetração severa da placa de apoio na madeira (“plate-cutting”) [2].



Fig.1 Fendilhamento e furação alargada.



Fig. 2 Placa de apoio cortando a madeira.

A vida útil do DM é dependente da essência da madeira e das condições de produção, de secagem, e estocagem. Em geral os DM são classificados em 1ª ou 2ª Classe, referindo-se à

qualidade da espécie (madeira dura ou branda) e 1ª ou 2ª categoria (seco e isento de defeitos ou com teor de umidade e defeitos toleráveis).

O DM nativa de 1ª/1ª poderá atingir vida útil de 30/35 anos ou mesmo superior quando assentado em ambiente favorável (tangente, clima seco, local seco e bem drenado). Nestas condições atinge o fim de vida útil mais por intemperismo (desintegração das fibras) do que devido apodrecimento. O DM branda 2ª/2ª apresenta vida útil baixa de apenas 18 anos, e quando assentado em ambiente extremo (curva apertada, clima úmido, lastro e drenagem ruim) a vida útil será extremamente reduzida, para 6/8 anos [2].

O DM nativa possui quase todas as características técnicas exigidas para o dormente ferroviário e continua sendo o “melhor” tipo de dormente [3]. Entretanto, a escassez no Brasil de madeiras de qualidade (1ª classe e 1ª categoria), inexistência de técnicas para manejo florestal e produção, licenciamento e restrições ambientais, preço sempre crescente e vida útil decrescente são causas para risco de colapso na cadeia produtiva do DM nativa.

Em vista destes obstáculos de fornecimento e da constante perda de qualidade dos DM nativa, as ferrovias “heavy haul” no mundo todo já abandonaram ou estão em rápido processo de substituição do dormente de madeira nativa.

Segundo sites de ONGs do setor ambiental, no Brasil 35% da madeira nativa/tropical comercializada é ilegal, sem documentação. 50% da madeira nativa/tropical comercializada tem documentos, mas sua origem é questionável, não rastreadas ou incorporando práticas ilegais na produção. Apenas 15% da madeira nativa é certificada ou tem origem garantida.

### 3. DORMENTES DE EUCALIPTO

No Brasil, a maior conscientização ambiental aliada a exploração predatória liquidou a oferta e disponibilidade da madeira proveniente de florestas nativas para produção de dormentes. Restando apenas a utilização de madeiras de reflorestamento, entre elas se destaca a madeira de eucalipto. Dessa maneira, surgiu nos últimos 10 anos a oferta do dormente de madeira alternativa, o

dormente de eucalipto que é considerado como o dormente ecologicamente correto.

O DM de eucalipto possui densidade ou massa específica de valor elevadíssimo indo de 0,9 a 1,2 t/m<sup>3</sup> para a maioria de suas essências (cerca de 600) [6,7]. Somente essa característica mecânica deveria garantir um excelente desempenho na linha. Entretanto a madeira de eucalipto possui fragilidades que limitam sua vida útil na via a um máximo de 13/15 anos [8], e em varias situações pode não ultrapassar a 4 anos. Esses valores foram obtidos na MRS na década de 2000/10, e valores similares, já tinham sido observados na Austrália (a terra mãe da arvore de eucalipto) nas linhas de carga geral (6 MTBT/ano (na “Kwinana-Koolyanobbing”, Westrail”) e em ferrovia de minério (60 MTBT/ano na “Hamersley Iron” (atual “Pilbara Iron Railway”). O principal modo de falha do dormente de eucalipto na “Hamersley” foi a alta incidência de fendilhamento (“end-splitting”) e o afrouxamento da fixação, ocorrendo em apenas 4 anos de assentamento [11,12].

Na “Westrail Australia”, o principal modo de falha foi apodrecimento da região de fixação e o conseqüente afrouxamento da pregação (“spike-grip-loosing”) ocorrendo em mais de 50% da população após 14/15 anos do assentamento [10]. A essência dos dormentes de eucalipto predominante tanto na “Hamersley” e “Westrail” foi “Jarrah” [10,11].



Fig. 3 D. Eucalipto na MRS retirados devido ao apodrecimento nos furos e fendilhamento.

Na MRS inicialmente o modo de falha dos DM de eucalipto foi muito similar ao da “Kwinana - Koolyanobbing”, isto é, afrouxamento dos tiferãos (“spike-grip-loosing”) devido ao apodrecimento apenas no interior dos furos. Esses dormentes foram produzidos em 1992

para o trecho Norte da Ferrovia do Aço (50 km) que entrou em operação no final de 1993. No final de 2005 estes dormentes foram todos retirados (vida útil estimada de 13/14 anos). As essências dos dormentes predominante na MRS em 1992 foram *E. Citriodora*, *E. Maculata* e *Tereticornis*.



Fig. 4 D. Eucalipto, apodrecimento apenas no interior dos furos.



Fig. 5 D. Eucalipto, fendilhamento das extremidades passando pelos furos de pregação.

Os DM de eucalipto recentemente assentados na rota dos trens minério da MRS apresentam modo de falha completamente diferente dos dormentes de eucalipto adquiridos no início dos anos 90.

O modo de falha atual e predominante na MRS é muito similar ao ocorrido na "Hamersley", com alta incidência de fendilhamento das extremidades do dormente ("end-splitting") e prematuro alargamento dos furos de pregação ("spike-killing") ocorrendo antes de 4 anos de assentamento, ou imediatamente após a instalação na linha. As causas do fendilhamento prematuro destes dormentes são: a) DM de Eucalipto ser

produzido de "dormente solteiro" (seção da tora de madeira produzindo apenas 01 dorm.) ou de "madeira verde" (teor de umidade elevada ~35%), e secagem inadequada das toras na serraria; e b) Dormente produzido de espécies de eucalipto de 3ª classe e inapropriadas para produção de dormentes pois fendilham muito.



Fig. 6 D. Eucalipto, fendilhamento do corpo

As espécies de madeira de eucalipto inapropriadas para produção de dormentes devido a forte tendência de fendilhamento são: 1) *E. Alba*, 2) *E. Saligna* e 3) *E. Grandis* que foram introduzidas no Brasil à partir de 1908 para produção de lenha para locomotivas a vapor, e que atualmente são as mais produzidas devido ao rápido crescimento e utilização industrial [7].

As espécies de eucalipto de primeira classe existentes no Brasil as quais praticamente não fendilham em condições ambientais normais são as seguintes [7]: 1) *E. Citriodora*; 2) *E. Maculata*; 3) *E. Paniculata*; 4) *E. Creba* e 5) *E. Siderophloia*. Um segundo grupo de essências com leve ou moderada tendência são: 1) *E. Tereticornis*; 2) *E. Rostrata* e 3) *E. Botryoides*.

A melhor espécie de eucalipto para produção de dormentes é o *E. Marginata* também conhecido internacionalmente como "Jarrah" e também o *E. Diversicolor* cujo nome vulgar é "Karri" [7]. Infelizmente estas duas espécies jamais se adaptaram e cresceram no Brasil. Entretanto, mesmo o Eucalipto "Jarrah" falhou nas linhas da "Hamersley Iron" (atual "Pilbara Iron Ore Railway" da mineradora "Rio Tinto".) devido principalmente as condições extremas (umidade e alta temperatura no mesmo período), que frequentemente ocorre no

território semi-árido do Noroeste australiano, conhecido como “The Outback”[11].

O modo de falha preferencial do DM de eucalipto quando produzido a partir de essências de 1ª qualidade é o apodrecimento (“tie decay”) nos furos com o afrouxamento da pregação (“spike-grip-loosing”). Resultando num sério risco para a segurança da via, pois ocorre de forma agrupada (“tie clustering”) envolvendo até dez dorm. em sequência [8].

Quando o DM de eucalipto é produzido de essências pobres, secagem insuficiente ou inexistente das toras, será o fendilhamento das extremidades que irá provocar forte perda de aperto da pregação (“spike-grip-loosing”). Este modo de falha geralmente não acontece de forma agrupada, mas sua incidência por km pode ser severa, atingindo até 1/5 da dormitação em apenas 4 anos [8].

O eucalipto é uma madeira dura, de elevada massa específica ( $1,2 \text{ t/m}^3$ ), mas muito sensível ao ataque de fungos que penetram pelos furos da pregação. Entretanto, o DM de eucalipto, possuindo fibras de puro cerne que é impermeável, não é madeira apropriada para tratamento por métodos tradicionais de impregnação com preservativos hidrossolúveis (cca, bicromato) ou químicos (creosoto). A penetração do preservativo atinge poucos milímetros. Na Inglaterra, o DM de eucalipto “Jarrah” é assentado sem tratamento.

A forte tendência do DM de Eucalipto fendilhar seria o resultado de elevado nível das tensões internas durante o processo de secagem na linha. Fendilhamento de dormente novo recém instalado é indicativo que a madeira de eucalipto não foi seca antes da produção do dormente. O fendilhamento também pode ser o efeito de excessiva Força Lateral exercida pelas rodas, que empurra a placa de apoio contra os tirefãos, que por sua vez causam a ruptura das células da madeira de Eucalipto.

Uma explicação para a baixa resistência da madeira de eucalipto ao apodrecimento, em relação as madeiras nativas, seria que no eucalipto após o corte inicia-se um processo de morte celular diferente das madeiras nativas. No eucalipto as células produzem uma enzima de celulose que é alimento preferencial de fungos. Já a madeira nativa após o corte produz uma toxina que até sua

extinção, afugenta os fungos e parasitas por um longo tempo.

A produção de DM de Eucalipto no Brasil é estimada em cerca de 500 mil peças/ano e a capacidade instalada de seis produtores em cerca de 1,5 milhão/ano.

#### 4. DORMENTE DE PLÁSTICO RECICLÁVEL

No início da década de 90 um novo nicho industrial começa surgir nos USA dedicado a fabricação de artefatos de “Madeira Plástica” a partir de material reciclável. Vários fabricantes desse novo ramo industrial tiveram a idéia de produzir dormentes de “Madeira Plástica”.

O trabalho pioneiro de pesquisa iniciou-se em 1994, e envolveu três operadoras ferroviárias (“Norfolk Southern”, “Conrail” e “CTA-Chicago Transit Authority”), três instituições de estudo e pesquisas (“Rutgers University”, “US Army Research & Development Center” e “TTCI”), e um fabricante (“USPL”) [13].

Até 2000 foram produzidos 1.500 dormentes de plástico reciclável - DPR para testes em linhas de Metro e Trens de Subúrbio nos USA. Um ano depois, a aceitação do DPR foi imediata entre estas operadoras sendo produzidos em 2001 cerca de 33.000 peças [13].

Os primeiros protótipos fabricados no Brasil foram para a MRS (6.000 peças entre 2004 e 2008) produzidos por quatro diferentes fornecedores, e geralmente apresentavam índice de falhas elevado, em torno de 15%. Em 2012 o índice de falhas em serviço tinha caído para menos de 2%, considerado aceitável [13].

As características físicas e mecânicas mínimas dos DPR foram estabelecidas pela AREMA:

- a) Mod. elasticidade = 1.175 Mpa (170.000 psi)
- b) Mod. ruptura = 14 Mpa (2.000 psi)
- c) T. compressão no Patim = 6,3 Mpa (900 psi)
- d) Ret.lateral (Single Push Test)= 90N (2,0kips)
- e) F. de arrancamento= 8,5/22,5kN 1,9/5,0 kips
- g) Expansão térmica =  $5.8 \times 10^{-5} \text{ cm/cm}^\circ\text{C}$

O DPR possui modulo de elasticidade nominal = 1.170 MPa (170.000 psi), cerca de 5 a 6 vezes menor que o DM, constituindo a sua maior fragilidade. Através da introdução de reforço estrutural (como barras e vergalhões) e otimização da seção transversal, os fabricantes conseguiram aumentar em quase 100% (350.000 psi) este valor. Uma melhoria significativa, mas que não modifica a tendência

do DPR de bitola larga de forte tendência a formação do fenômeno de “center bound” (apoio no lastro apenas na região central do dormente).

Quando o DPR de bitola larga é assentado em lastro contaminado, com altura insuficiente, ou sofre socaria em todo seu comprimento, o fenômeno de “center bound” é formado entre 60 a 80 MTBT e ao redor de 100 MTBT será eminente ocorrência de fratura no meio do DPR.

Os três principais modo de falha do DPR são:

- Trinca de instalação, ocorrendo durante a pregação devido a não execução de furo piloto antes da inserção do tirefã;
- Fratura de placa de apoio em nível elevado (15%) quando tonelagem atinge 900 MTBT (deform. vertical na sede placa) [15,16];
- Fratura no meio do DPR devido a migração do lastro para a região central do dormente e apoio no centro do DPR (“center-bound”)



Fig. 7 Fratura do DPR na região de pregação.

Os dois primeiros modos de falha são muitos frequentes na América do Norte. Já no Brasil ocorre fratura no meio da peça devido ao fenômeno “center bound” sendo muito frequente no DPR de bitola larga (devido ao reduzido ombro), e raramente ocorre na bitola estreita.

O DPR possui limitações para reutilização da furação antiga, pois uma vez retirado o tirefã ou prego de linha, este jamais manterá o torque original ao ser “arriado” no mesmo furo

O DPR possui excelente compressibilidade e resiliência similares aos dormentes de madeira. Também, para uma similar altura de lastro, o DPR distribuirá (espalha) para o lastro a carga da roda numa área maior, garantindo, dessa maneira, menor pressão vertical sobre o sublastro e subleito.



Fig. 8 DPR de bitola larga c/ fratura “center bound” assentado em lastro contaminado e insuficiente.



Fig. 9 Grupo (clustering) de DPR de bitola larga fraturados no modo “center bound”.

A vida útil do DPR é referida em MTBT, e devido sua excessiva flexibilidade, fraturas de placa de apoio (em altas taxas) foram observadas no “FAST/TTCI” após 900 MTBT. Portanto, o DPR não deve ser empregado em ferrovias “heavy haul” onde esta tonelagem será atingida em poucos anos. Entretanto, nas linhas de pátio, terminais, linhas de cruzamento, e linhas de baixa ou moderada tonelagem (até 25 MTBT) o DPR poderá atingir vida útil acima de 35 anos.

Nos USA são produzidos por ano ~1,5 milhão peças. No Brasil, a produção de três pioneiros fornecedores não atinge a 100 mil peças/ano.

## 5. DORMENTES DE CONCRETO

A aplicação em larga escala de dormentes de concreto - DC na Europa ocorreu logo depois da II Grande Guerra, isto devido a exaustão das florestas nativas (devastação por batalhas, fabricação de embarcações de guerra, uso

industrial etc.) e dificuldades de importação de madeira de países asiáticos ou africanos. Esses fatores econômicos impuseram a opção por DC [1]. Atualmente cerca de 60% da malha ferroviária da Europa (160.000 km) é constituída por DC, e são fabricados cerca de 15 milhões de peças anualmente [20].

Na Europa na década de 50, o Comitê Europeu de Normalização (CEN/UIC) estabeleceu o limite máximo de carga de qualquer natureza sobre os trilhos em 22,5 ton/eixo; somente para locomotivas é permitido 25 t/eixo. Esta determinação está vigente à dezenas de anos. A esta limitação se deve o sucesso do emprego de D.C. no continente europeu.

Nos USA a primeira e limitada instalação de DC para testes ocorreu em 1957 (500 peças) devido principalmente há iniciativas e esforços da AAR (“Association of American Railroad”) e da PCA (“Portland Cement Association”). Entre 1960 e 1967 centenas de milhares de DC foram produzidos e instalados em conformidade com especificações da AAR/PCA. Mas também muito cedo, milhares de problemas surgiram [17].

Entretanto, em outubro de 1971, as instituições FRA, ACI (“American Cement Institute”) e AREA (atual AREMA) entraram no processo, e publicaram a primeira especificação para DC de larga aceitação (ainda em caráter preliminar). Desta data em diante somente AREA foi a única instituição responsável por normas e padrões para DC nos USA [17,18].

A AREMA anualmente e sistematicamente publica atualizações desta especificação original, onde são encontradas recomendações para projeto, testes de homologação, produção e padrões para instalação de DC.

Em 2013, apenas cerca de 5% da malha ferroviária na America do Norte (15.000 km) é em DC, e são fabricados cerca de 800 mil peças/ano por dois grandes fornecedores.

Atualmente nos USA são produzidos muito mais DPR (Dormente de Plástico Reciclável) do que DC. Esta baixa aceitação do DC nos USA é devido principalmente aos fatores: a) Liberdade das operadoras para progressivo aumento da carga/eixo; b) Receio dos efeitos adversos na via e nos DC das cargas dinâmicas cíclicas e de impacto geradas pelas rodas dos vagões; c) Gasto elevado na preparação/reforço da subestrutura da via (lastro, sublastro, subgrade e subleito); d) Baixo custo do DM nativa; e) Solidez econômica e capacidade técnica da

cadeia de fornecedores de DM nativa (“Railway Tie Association”); f) Demanda estável e colossal do DM nativa (15 milhões de peças/ano).

O DC na América do Norte possui larga aceitação nos projetos de trens urbanos e desde 1980 está instalado na linha de passageiros Boston-Washington, “The Northeast Corridor”, de tráfego misto, e ainda sobrevive depois de sérias falhas. Nestas vias predominam trens de vel. moderada e 18 t/eixo. Já nas linhas “heavy haul” americanas, altamente rentáveis e dedicadas ao transporte de carvão ou “containers double-stake”, a subestrutura da via foi totalmente construída ou reconstruída para emprego á eito de DC.

A recomendação da “AREMA 2008, 2.10.4 §e, chapter 1, Part 2 Ballast”, indica “Os dormentes de concreto são pesados e muito menos flexível em absorver cargas de impacto e transmitem para o lastro carga excessivamente elevada, que resultará no esmagamento, trituração e quebra das pedras de constituição do lastro. Portanto, obrigatoriamente a seleção do material de lastro tem de ser muito restritiva para garantir um desempenho satisfatório da via. O lastro para as instalações com dormente de concreto tem de ser obrigatoriamente produzido de granito, basalto ou quartzo”.

A carga ou pressão transmitida pelo D. C. para o lastro diretamente embaixo do dormente é modelada pela teoria BOEF (“Beam On Elastic Foundation”) que foi introduzida por Winkler em 1876, sendo de total e ampla aceitação pelos pesquisadores e profissionais [41].

A teoria BOEF basea-se na proporcionalidade da pressão reativa a ação da roda  $p(x)$  e a deformação vertical produzida  $w(x)$  em qualquer ponto distante ( $x$ ) da roda:

$$p(x) = kw(x).$$

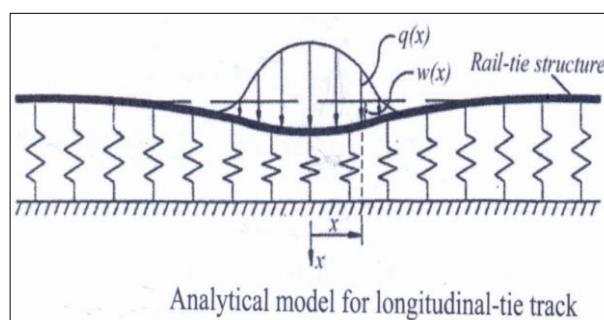


Fig. 10 “BOEF Modelling”, Prof. Arnold D. Kerr, University of Delaware - “Fundamentals of Railway Track Engineering”.

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + p(x) = q(x)$$

$$p(x)_{max} = kw_{max}(x)$$

$$w_{max}(x) = w(o) \rightarrow w(o) = \frac{P\beta}{2k} = \frac{P}{2k} x^4 \sqrt{\frac{k}{4EI}}$$

$$p(x)_{max.} = k x \frac{P\beta}{2k} \quad p(x)_{max.} = \frac{P}{k} x^4 \sqrt{\frac{k}{4EI}}$$

onde:

$w(x)$  é a deflexão vertical do trilho na distancia  $(x)$  da carga de roda P ;

$w(o)$  é a deflexão vertical em cima da carga de roda P;

$p(x)$  é a pressão distribuída e continua da base de um “dormente longitudinal” sobre o lastro;

$q(x)$  representa a pressão vertical da roda, no ponto distante  $(x)$  da roda;

$(k)$  é cte. de proporcionalidade é o parâmetro fundamental, é denominado de *Módulo da Via*, é uma das expressões da *Rigidez da Via (C)*.

A teoria BOEF assume que cada trilho age como uma viga contínua apoiada sobre suportes elásticos, e estas molas representam o efeito da rigidez combinada dos dormentes, lastro, sublastro e o subleito. Por isso a teoria BOEF não pode ser empregada para prever o efeito de carga de roda sobre um componente individual e específico da subestrutura. Mas essa teoria prevê com bastante exatidão o efeito da rigidez do conjunto (tipo de dormente, fixação, lastro, sublastro e subleito) na pressão transmitida para lastro diretamente embaixo do dormente [44].

Entretanto, testes e estudos recentes (1986 e 2012) comprovam que a proporcionalidade admitida pela teoria BOEF só tem 100% de validade para cargas/eixo abaixo de 25t. A partir desse valor a deformação vertical da subestrutura da via passa por comportamento não linear com o aumento da carga/eixo devido ao fenômeno de “strain hardening of soil” [51].

O *Módulo da Via(k)* é o parâmetro fundamental da teoria BOEF, sendo a constante de mola da via, representa a rigidez da linha e o efeito elástico de todos os componentes da via situados embaixo do trilho. A grandeza física *Modulo de Via (k)* associa carga distribuída versus deflexão vertical, sendo diferente da

grandeza física *Rigidez da Via (C)* que associa carga concentrada versus deflexão vertical.

O modo ou a maneira de distribuição da carga de roda para o dormente, do dormente para o lastro, do lastro para o sublastro, subleito e finalmente para o terreno natural é influenciado de forma dramática pelo grau de rigidez de todo sistema, expresso e representado pelo *Modulo da Via (k)* [39,40,42].

A AREMA no Chapter 30, part I, section 1.8 “INFLUENCE OF CROSS TIES ON TRACK STIFFNESS AND TRANSITIONS” indica: “A *Rigidez Vertical da Via ou Modulo da Via, (k)*, representa a resposta vertical de todo sistema abaixo do patim do trilho incluindo dormentes, fixações, todo tipo de almofadas (de trilhos-“rail pads”, de dormentes-“tie pads”, de lastro-“ballast mats”), lastro, sublastro, e subleito. Cada um desses componentes contribui para o *Modulo da Via total*, sendo importante utilizar componentes apropriados da via permanente para manter uniforme rigidez da linha quando atravessando qualquer condição de subleito e estruturas. Falhas ao fazê-lo podem causar variações na rigidez da linha, as quais resultarão no aumento das cargas dinâmicas de roda, acelerada degradação (soldas e juntas batendo, perda de nivelamento) e, ainda uma má qualidade de viagem/rolamento dos veículos (“poor ride”). *Modulo da Via (k)* varia para cada tipo de dormente empregado”.

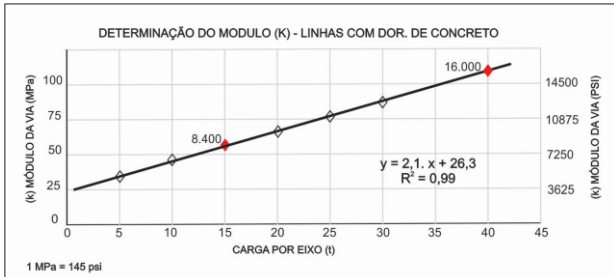
Os dormentes significativamente influenciam a resposta vertical da via. Os valores típicos do *Módulo de Via* indicados pela AREMA para as principais configurações de via permanente, em geral são:

- 1)  $(k) = 1000$  psi/in (7MPa/mm) linha de DM, imediatamente após socaria;
- 2)  $(k) = 3000$  psi/in (21MPa/mm) linha de DM, compactada pelo trafégo;
- 3)  $(k) = 3000$  psi/in (21MPa/mm) linha de DPR e de D. de Aço, compactada pelo trafégo;
- 4)  $(k) = 6000$  psi/in (41MPa/mm) linha de D. de Concreto compactada pelo trafégo.

Os valores da AREMA para *Módulo de Via* foram obtidos de testes com veículos ou instrumentação simulando carga/eixo de 15t/25t. Entretanto, experiências e testes realizados pela “University of Pretoria” em 2012 com instrumentação digital de ultima geração (RVM – “Remote Video Monitoring”) revelaram o aumento de  $(k)$  para 40t/eixo [52], e

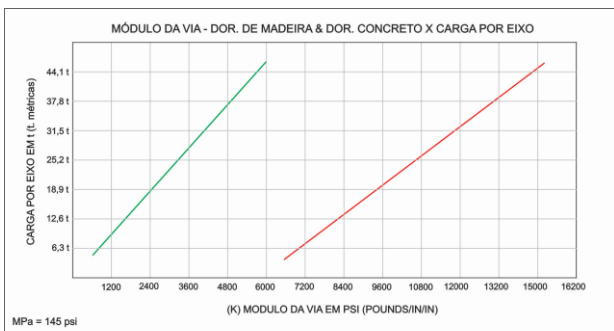


confirmando testes já realizados em 1986 por pesquisadores da AAR onde o mesmo efeito foi detectado [45]. As medições do *Modulo da Via* ( $k$ ) com “Remote Video Monitoring” para D. de Concreto + 40t/eixo revelaram ( $k$ ) 300% superior do indicado pela AREMA para DC. Fig. 11 e 12.



Fonte: P. J. Gräbe - The Effect of Axle Load on Track and Foundation Resilient Deformation under HH Conditions, University of Pretoria, 10th IHHA New Delhi, 2013.

Fig.11 Variação do *Modulo da Via* ( $k$ ) e carga/eixo medição “University of Pretoria” 2012 [52].



Fonte: Dr. Allan M. Zarembski - Testing Track Strength, RT&S July 1986

Fig.12 Variação do *Modulo da Via* ( $k$ ) e carga/eixo medição AAR 1986 [45].

O resultado é o crescimento devastador na pressão  $p(x)$  reativa à carga de roda que será distribuída necessariamente para o lastro pelo DC. A modelagem BOEF (valores ainda que conservadores devido ao “strain hardening of soil” indica que a via convencional com DM + 30t/eixo com baixa rigidez representada pelo *Modulo da Via* ( $k$ ) = 3000psi gera  $p(x)$  = 410 lb/in, já a via com o mais bem projetado e fabricado DC + 40 t/eixo possuirá sempre uma rigidez elevada ( $k$ ) = 16000psi, e resulta  $p(x)$  = 840 lb/in, um terrível crescimento de 105%. Fig. 13.

Outra adversidade para DC em linhas de alta carga/eixo foi indicada pelos Drs. Ernest Selig e Allan M. Zarembski que no estudo para a subestrutura do “Alameda Corridor” ligação entre os portos de Los Angeles e Long Beach em três linhas a 9m abaixo do nível do solo (em trincheira), 36t/eixo e 150 MTBT/ano [44]. Eles concluíram que a máxima rigidez da via para resistir as cargas dinâmicas cíclicas (defeitos admissíveis de nivelamento para 64 km/h), e as

cargas dinâmicas de impacto (rodas calejadas e soldas canoadas), o *Modulo da Via* não pode ser maior que ( $k$ ) = 10.000psi.

Uma rigidez acima deste valor prejudica a interação entre as rodas e via produzindo acelerada degradação do lastro. Em consequência a via sofrerá rápida perda do nivelamento, impactando a vel. dos trens e finalmente reduzindo a capacidade da via [21,23,26,30,31,32,37,38].

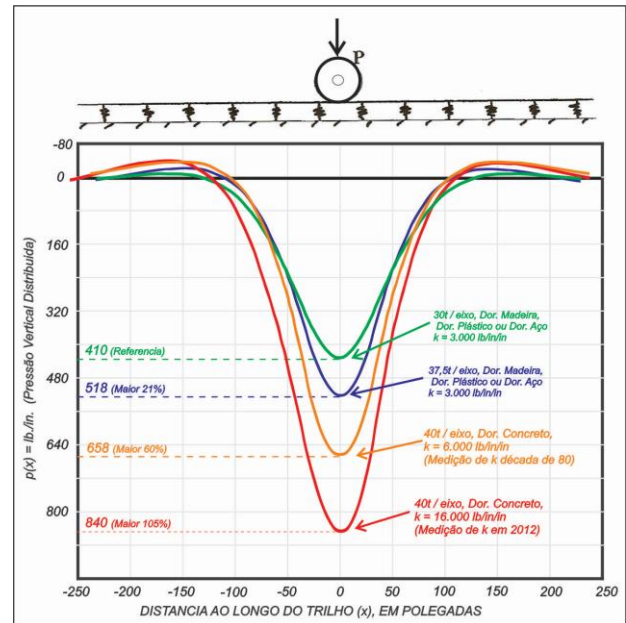


Fig.13 Rigidez da via ( $k$ ) e variação de  $p(x)$  pressão distribuída e longitudinal ao longo do patim do Tr.

O DC pode ser empregado em linhas de “heavy haul” em construção desde que ações de prevenção sejam tomadas na fase de projeto e rigorosamente adotadas na fase de execução. Essas ações são:

- Dimensionamento da subestrutura através de Metodologia Mecanicista, na qual a rigidez de cada camada (Resiliencia) é considerada;
- Emprego de lastro de alta qualidade (granito, basalto ou quartzo apenas);
- Eficiente sistema de drenagem nas regiões sujeitas as chuvas superiores a 1000 mm/ano;
- Excelente padrão de execução das camadas da subestrutura (lastro, sublastro e subleito);

O DC para emprego em linha “havy haul” com DM, 30t/eixo, lastro de vida útil vencida (acima de 1000 MTBT), drenagem e subleito deteriorado, ou trilhos com RCF, Squats, anomalias em soldas (“battered welds/joints”) constituirá a pior solução técnica, e poderá se transformar num investimento de alto risco operacional. As ações de prevenção serão: a) Emprego de “Under Sleeper Pads” em 100%

- dos DC. Cada “Sleeper Pad” aumenta o custo do DC em cerca de 50%;
- b) Monitoramento para verificação da redução do *Modulo de Via* para  $(k) \leq 10.000\text{psi}$ ;
- c) Remoção anual de % da subestrutura deteriorada de modo que 100% da extensão seja concluída antes que a MTBT acumulada atinja a 50% vida útil da nova subestrutura;



Fig. 14 DC destruídos em local de excesso de  $(k)$ .



Fig. 15 Destruição do lastro pelo excesso de  $p(x)$ .



Fig. 16 Anomalia na solda e lastro pulverizado.

A vida útil de DC num ambiente “heavy haul” de 36 ou 40 t/eixo, de anomalias em trilhos, soldas e rodas, atravessando região de chuvas abundantes (índice pluv. = 2.000 ml/ano), e com subleito desconsolidado é uma verdadeira loteria. Talvez os DC atinjam vida útil 3x ao da subestrutura que lhe dá suporte, algo de 3.000 MTBT. Significando um tempo inferior à 15 anos. Valores até menores vem ocorrendo em algumas “heavy haul” chinesas como “Datong-Quinhuandao Railway”, “ShuoHuang Railway” todas em DC, e após 6 a 8 anos de operação já presenciavam rápida deterioração da via [30,31,32]. Todas estão executando extensas correções na subestrutura e no DC.

A mais recente adversidade sobre DC foi a divulgação em meados de 2K de testes/ensaios de campo de que a elevada rigidez dos DC e a sua inerente ausência de resiliência provoca péssima interação com as pedras de lastro [53]. Na prática, resulta na dramática redução da área de distribuição da pressão sobre o lastro para apenas 8% da área original. Mesmo após a socaria do DC esta área de distribuição jamais ultrapassaria 12%. Esse fenômeno gera excessivo aumento de pressão sobre a subestrutura das linhas “heavy haul” para inaceitáveis 830% quando a carga passa para 40t/eixo. A constatação da excessiva pressão sobre o lastro gerada pelo DC levou a criação dos “Tie pads” ou “Under Sleeper Pads” (USP). Desde 2008 nenhum DC na Austria e Alemanha é produzido sem este pacote de elastômeros de 30/50mm de espessura fixado na face de contato com lastro. DC equipado com USP apresenta similar compressibilidade e resiliência que o DM, mas o custo atual de cada USP é de cerca de 50% do custo do DC.

O último fator adverso do DC é sua baixa trabalhabilidade exigindo equipamento de grande porte para instalação e manuseio devido seu peso, em média 380 kg. O DC do futuro é o “Frame Sleeper” [22] cujo peso é de cerca de 800 kg, e possui excelente resiliência, distribuindo insignificante pressão para o lastro, menor que DPR e D. Aço.

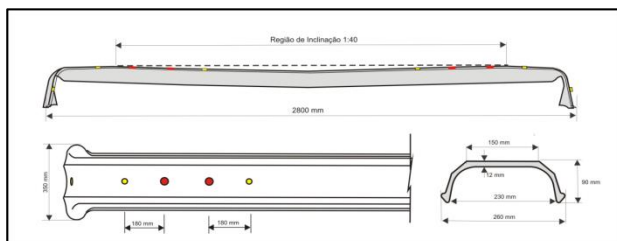
## 5. DORMENTES DE AÇO

As primeiras instalações de dormentes de aço - DA ocorreram há mais de 80 anos (década de 30) na British Rail (atual Network Rail) quando a indústria do aço entrou em depressão [1]. Desde então, os DA tem sido instalados em

vários países onde a baixa vida útil dos DM é problema devido ao ataque de fungos. Na Europa o emprego de DA foi limitado nos anos pioneiros pelas deficiências dos então dispositivos de fixação de trilhos e isolamento elétrico, pois a maioria dos países já dispunham de circuito de via para controle de tráfego. Essa séria limitação somente foi superada na década de 70 com a difusão da fixação elástica (grampo ou clip elástico).

Os DA são produzidos a partir de perfil laminado de aço de metalurgia média (0,3 %C, 1,3%Mn; “yeld strength” = 250 MPa). A maioria dos formatos de seção transversal seguem a configuração de uma calha invertida (“inverted trough”) com bordas em forma de cordão (“beaded edges”). A seção transversal definida pela norma europeia UIC-865 apresenta o melhor desempenho e tem aceitação quase universal há mais de 40 anos. O perfil UIC-865 tem 28,5 kg/m e 12 mm de espessura da mesa (sede do trilho). As principais características mecânicas e físicas são:

MECHANICAL PROPERTIES	
Description	Typical Value
Moment of Inertia to x-x axis	$J_x = 277.5 \text{ cm}^4$
Moment of Inertia to y-y axis	$J_y = 2393 \text{ cm}^4$
Moment of resistance of the upper fiber	$W_o = 103.16 \text{ cm}^3$
Moment of resistance of the lower fiber	$W_u = 43.98 \text{ cm}^3$
Theoretical weight / linear meter	G = 28.46 kg/m
Tensile Strength	520 - 620 Mpa
Yield Strength	260 Mpa
Minimum elongation	18%



As extremidades do DA são encurvadas para baixo para formar uma aba (“spade”) e confinar o lastro no interior da calha. O comprimento da aba pode ser curta ou longa (long-spade). O corpo do DA pode ser reto (“flat”) ou inclinado apenas nas sedes do patim dos trilhos ou possuir a configuração “V-shaped”, isto é, uma única dobra no meio do comprimento do DC, criando a inclinação necessária ao patim do trilho (“rail cant”). A sede do patim pode ter dois furos (um de cada lado) para alojamento dos elementos de fixação (olhal fundido para o grampo elástico e isoladores) ou apenas preparada para soldagem do olhal. Dos dois

lados da sede do patim ainda são instalados dois furos de diâmetro menores, furos de inspeção, para verificação do completo preenchimento do lastro na calha.

Uma vez obtido o perfil de aço laminado na seção desejada, o processo produtivo do DA é rápido e simples constando basicamente de corte, furação, dobramento e pintura.



Fig. 17 Inspeção de DA de bitola larga na MRS.



Fig. 18 Construção de linha em DA na EFVM.



Fig 19 Substituição à oito de DM por DA na EFVM

O peso do DA com “long-spade” de bitola larga é 89kg, para b. de padrão é 83kg, e o peso para bitola métrica é 77 kg. Devido ao peso

reduzido, elevada resistência mecânica, é imune a choques e a impactos e fácil empilhamento por “paletes” o DA possui trabalhabilidade excelente, e não necessita de equipamentos de grande porte para manuseio e instalação.

A Austrália, Inglaterra e Alemanha são grandes fabricantes e usuários de DA. Apenas duas ferrovias “heavy haul” de transporte de minério de ferro empregam intensivamente DA. A EFVM no Brasil já possui na linha principal cerca de 3 milhões de peças. A segunda “heavy haul” é a SNIM Nouadhibou – Nouakchat na Mauritania [54] com 650 km, que hoje opera trens de 250 vagões, e foi construída com DA (1966) em lastro de pedra e areia do deserto. A EFVM iniciou em 1984 a substituição de DM por DA e está prestes a completar 100% em DA com fixação elástica Pandrol e Denik. Já a SNIM emprega ainda uma obsoleta fixação elástica RN de pressão por torque de fabricação francesa, apesar dos trens serem modernos com locomotivas GM/SD70MAC e truques com “frame-brace” e “elastic pad”.

A reduzida aceitação do DA nas “heavy haul” é devido ao histórico de falhas das versões anteriores dos DA. Os modos de falha foram: frequentes fraturas por fadiga na região dos furos (espessura insuficiente, inferior a 12mm) [66] e por instabilidade dinâmica (migração do lastro dentro da calha do DA) devido ao completo desconhecimento dos fundamentos da interação dormente e lastro [61,65].



Fig.20 D. Aço na BC Rail (Canada) com trincas de fadiga entre os furos, perfil não UIC de 10mm.

Felizmente esses problemas foram resolvidos pela EFVM em 84/1985 para bitola estreita e pela BRRDD (British Rail Research & Development Division) em 1995 para as bitolas largas (1,435/1,6m) [55,58,66,67].

A EFVM criou o conceito de “long-spade” e a validade do perfil UIC-865 [58], já o BRRDD estabeleceu o conceito de “V Shaped” que acabou com o fenômeno de migração de lastro e extinguiu o problema de instabilidade dinâmica ou efeito gangorra dos DA [58].

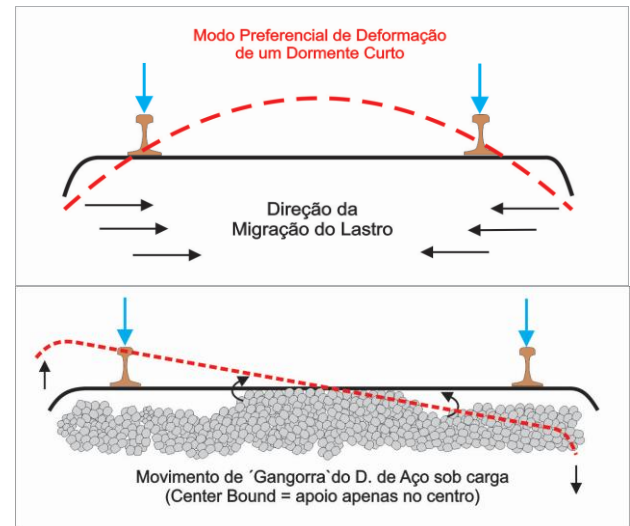


Fig 21 Instabilidade Dinâmica do D. Aço de Bitola Larga antes do V-Shaped.

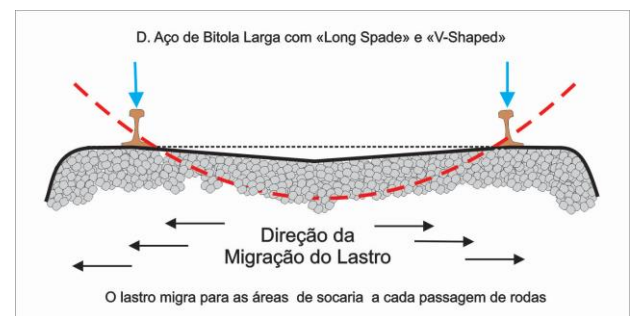


Fig. 22 D. Aço de Bitola Larga com o conceito “V-Shaped” (inclinação de 1:40 em toda peça).

Já o pessoal da EFVM provou que o perfil UIC era imune a trinca de fadiga, e com o conceito de “long-spade” criou o confinamento do lastro no interior e sob o DA. Este procedimento fez o DA impedir ou retardar a quebra do lastro devido ao tráfego e, em consequência, propiciou a excelente e inigualável distribuição de pressão sobre o lastro exercida pelo DA.

O Brasil possui três fabricantes de DA independentes (nenhum está ligado à siderúrgicas). Todos utilizam perfil UIC-865 laminado pela GERDAU ou laminado na China, Índia ou Europa. A capacidade instalada é superior a 1500 mil DA/ano. A CSN, na década de 80, já laminou o perfil UIC e produziu DA, aplicando nas vias internas da usina de Volta Redonda.

Em 2005 o prof. e cientista australiano Dr. Buddhima Indraratana, através de extensiva

modelagem e ensaios com “large-scale triaxial tests” na “University of Wollongong”, provou o efeito positivo do fenômeno “confining ballast pressure”. O DA com “long-spade” é o único tipo de dormente que possui naturalmente essa propriedade [68,69,70,71].

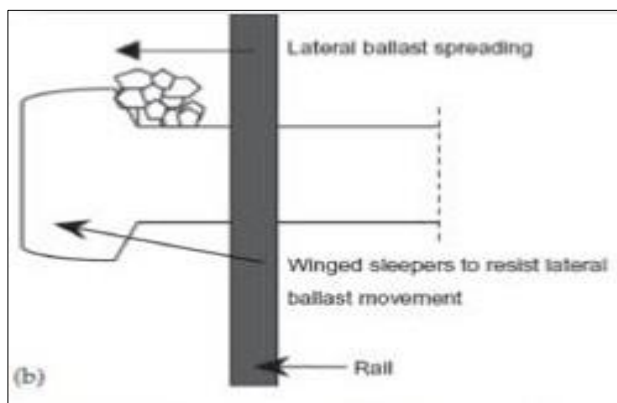


Fig 23 Efeito das abas do DA “long-spade” na pressão de confinamento do lastro.

O DA é o dormente que atende de modo excelente a primeira e principal função de qualquer dormente: Distribuir (espalhar) sobre a maior área de lastro a pressão das rodas assegurando que lastro, sublastro e subgrade não sofram excessivas tensões.

A linhas da EFVM e MRS com DA apresentam excelente geometria da via, mínimo assentamento vertical do lastro e quase inexistência de bolsão de lama e lastro poluído. Na MRS entre 2006 e 2009 os DA foram assentados na Linha de São Paulo (30 MTBT/ano). Substituição dos DC fraturados (biblocos) diretamente para DA “long-spade & V-shaped”, apesar do lastro estar totalmente degradado e poluído, e ainda a socaria dos DA ter sido total manual, surpreendentemente a geometria da via permanece em ótimas condições até os dias de hoje. A formação de bolsão de lama que era considerada crônica nesta seção de via com DC, desapareceu apesar da TBT no período ter sido triplicada.

## 6. CONCLUSÕES

O dormente alternativo indicado para linhas de moderada tonelagem anual (até 30 MTBT) e mais apto para substituição do DM nativo, é o DPR pois projeta vida útil alta de 30/35 anos, sendo praticamente imune aos modos de falhas inerentes ao DM de Eucalipto, que possui baixa imunidade ao apodrecimento e projeta baixa vida útil de 13/15 anos.

O dormente alternativo mais adequado para as linhas “heavy haul” (150-250 MTBT/ano) e mais apto para substituir o DM nativo é o DA “long-spade & V shaped” para bitola larga (2,80m de comp., e 610mm de espaç.) e o DA apenas “long-spade” para bitola estreita (2,20m mínimo de comp., 610mm de espaç.).

O DA é praticamente imune ao aumento da carga/eixo para 40t [56,57], pois possui propriedades (“confining ballast pressure” e baixa rigidez) que previnem a quebra e o prematuro assentamento vertical do lastro. Esses fatores são assegurados pela excelente distribuição de pressão sobre o subleito.



Fig. 24 Linha SP da MRS e DC bibloco, c/ bolsão, lastro com vegetação (contaminado c/finos).



Fig. 25 Linha SP da MRS e DA, isenta de defeitos, lastro com vegetação e ainda contaminado.

O DA permite que a subestrutura existente para o DM seja reutilizada sem necessidade de substituição do lastro antigo (mesmo com elevada contaminação por finos) [65]. Exigindo mínima necessidade de reforço de subleito. Apenas seria necessária revisão do sistema de drenagem e da altura mínima de lastro.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **British Railway Track, Design, Construction and Maintenance**, 1994 Edition, Chapter 12 Sleepers and Chapter 14 Ballast, pages 242-264, 312-323. Published by The Permanent Way Institution, Nottingham.
2. Celia M. O. Rodrigues, W. Vidon Jr., Marcio Otávio Almeida, José Luis Esteves, “**Avaliação das Caudas de Substituição de DM Nativa**” Gerencia Corporativa de Engenharia da MRS, 22/06/2009, Juiz de Fora/MG.
3. Dr. Allan Zarembski “**Wood Cross-Tie Benefits**” ZETA-TECH Report 2003/USA.
4. William Hay “**Railroad Engineering**”, Second Edition, 1982, Chapter 22 Cross Ties, and Chapter 23 “Concrete and Other Artificial Ties, pages 436-468, 469-483. Library of Congress ISBN 0-471-36400-2/USA.
5. Dr. Allan Zarembski, David A. Webb, Geof Webb, “**Tie Guide-Handbook for Commercial Timbers Used By The Crosstie Industry**”, 2006. The Railway Tie Association/USA.
6. Adriano W. Ballarin, “**Desempenho Mecânico de D. Prismáticos de Eucalipto Citriodora**”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu, UNESP, 1999. São Paulo.
7. Francisco Ronald Niederauer, “**Emprego da Madeira de Eucalipto como Dormente**”, 1º Encontro Brasileiro em Preservação de Madeiras, Outubro 1982, IBDF/IPT, São Paulo.
8. Fernando Cesar Silva, W. Vidon Jr., “**Desempenho e Vida Útil de DM Eucalipto na MRS**”, Diretoria de Produção – Superin. de Transportes, 5/11/2001, Juiz de Fora/MG.
9. “**Cost Comparison of Alternate Crosstie Material: Concrete, Steel and Composite Plastic**”, RTA – Tie Report Nº 2, 2005/USA.
10. J. F. Hoare, A. F. Payne, “**Track Structure For The Kwinana To Koolyanobbing Railway and The Case For Rehabilitation**”, session 403 paper J.5, and session 202, paper B.2, 1<sup>st</sup> IHHA Perth, 1978 Australia.
11. N. R. Geddes, B. H. Longson, P. J. Dwyer, “**Track Component, Development at Hamersley Iron Railway**” session 408 paper J.4, 1<sup>st</sup> IHHA Perth, 1978 Australia.
12. W. R. Fahey, E. H. Williams, I. Haby, W. J. Adamson, “**Derailments On A Heavy Haul Railway**”, session 315 paper E.4, 1<sup>st</sup> IHHA Perth, 1978 Australia.
13. Celia M. O. Rodrigues, W. Vidon Jr., “**Dormente de Plástico Reciclável - DPR Uma Alternativa Viável para DM**”, 1º Encontro Nacional de Tecnologia Metroferroviária, 2011, USP São Paulo.
14. Celia M. O. Rodrigues, “**Composite Plastic Ties In MRS Heavy Haul Railroad**” Joint Rail Conference - JRC 2010, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA.
15. Richard P. Reiff, Gary T. Fry, David D. Davis, “**Tie Plate Cracking On Wood /Composite Ties: A Parametric Study**” Joint Rail Conference-JRC 2011, TTCI/Pueblo, USA.
16. Leonard Allen, “**Evaluation of Tie Plate Cracking on Composite Ties**”, FRA, Research Report 08-21, Dec. 2008/USA.
17. John W. Weber, “**Development Of The Prestressed Concrete Tie In The USA**”, Proceedings of Railroad Track Mechanics & Technology Symposium, Princeton University, April 1975, Princeton/USA.
18. Russell Lutch, “**Prestressed Concrete Ties in North America**”, Michican Technological University, 2010 AREMA Annual Conference.
19. Nigel Peters, Steven Mattson, “**CN 60E Concrete Tie Development**”, 2004 AREMA Annual Conference.
20. Dipl. Ing. Dr. Joachim Heintz, “**Prestressed Concrete Tie Production**”, 2000 AREMA Annual Conference.
21. John Zeman, J. Riley, Christopher P. L. Barkan, David A. Lange, “**Failure Mode and Effect Analysis of Concrete Ties in North America**”, 9<sup>th</sup> IHHA 2009, Shanghai, China.
22. Dipl. Ing. Dr. Klaus Riessberger, “**Frame –Sleeper Upgrade ballast track**”, 2001 WCRR - World Conf. Railway Research, Köln, Germany.
23. P. Jeffrey McQueen, “**Flexural Performance Requirements For Prestressed Concrete Ties By Factoring**”, 2013 AREMA Annual Conference.
24. Devin K. Harris, Russel Lutch, Teresa M. Ahlborn, Pelle Duong, “**Optimization of a Prestressed Crosstie for Heavy Haul Applications**, Journal Of Transportation Engineering, ASCE Nov. 2011.
25. J. Buekett, S. Conquegood, “**Requirements for Prestressed Concrete Tie Performance**”, 4<sup>th</sup> IHHA 1989 Brisbane, Australia.
26. F. E. Dean, D. R. Ahlbeck, H. D. Harrison, J. M. Tuten, “**Effect of Tie Pad Stiffness On The Impact Loading of Concrete Ties**”, 3<sup>rd</sup> IHHA 1982 Colorado Spring, CO, USA.
27. Konstantinos Giannakos, “**The Use Of Attenuating Tie Pads and Its Influence On The Rail Seat Load In Heavy Haul Railroads**”, Joint Rail Conference - JRC 2010, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA.
28. “**Mgr. Rail Integrity In Heavy Axle Load Regime: Experience of Indian Railways**”, 9<sup>th</sup> IHHA 2009, Shanghai, China.
29. J. S. Maree, “**Aspects of Resilient Rail Pads on Richard Bay Coal Line**”, 5<sup>th</sup> IHHA 1993 Beijing, China.
30. W. C. Kuys, “**Track Structure Failure Under 26 Tonnes axle on South Africa Richard Bay Coal Line**”, 4<sup>th</sup> IHHA 1989 Brisbane, Australia.
31. Xurong Wang, Jianfeng Zhang, “**Research On Service Life Extending Technology Of Rail In Datong-Qinhuangdao Railway**”, 10<sup>th</sup> IHHA 2013, New Delhi, India.
32. J. L. Xue, J.Z. Jia, X.H. Meng, Z.T. Ke, G. M. Zhang, “**Strengthening Technology Of Existing Infrastructure On Upgrading Axle Axle Loads On ShuoHuang Line**”, 10<sup>th</sup> IHHA 2013, New Delhi, India.
33. F. O. Medanha, G. Fernandez, R.W.H. Oliveira, R. Hilário, M.C. Lima, “**Geotechnical and Geological Survey Of Infrastructure EFC**” 10<sup>th</sup> IHHA2013, New Delhi, India.
34. F. O. Medanha, “**Análise de Cap. da Plataforma para o ACPE e Proposta para Capacitação**”, Estudo Técnico Nº 14121, Vale-EFC, 25/01/2013.
36. T. J. Ludlow, “**The Journey to 40 Tonnes Axle Load-The FMG Experience**”, 2011 IHHA Specialist Technical Session, Calgary, Canada.
37. Prof. Gerald P. Raymond, “**Black Mesa Concrete Ties Failures: Track and Support Rehabilitation For a**

- Mine Company Railroad**", Lecture notes, 1998, Queen's University, Kingston, ON, Canada.
38. Prof. Gerald P. Raymond, "**Santa Fe (ATSF) El Dorado-Kansas Concrete Ties Failures: A Track Rehabilitation In a Semi-Arid Region Part 1: Geotechnical Investigation, Part 2: Geotechnical Reconstruction**", Lecture notes, 1999, Queen's University, Kingston, ON, Canada.
39. Prof. Gerald P. Raymond, "**Subgrade Requirements For Heavy Haul Railways**" Lecture notes, 1998, Queen's University, Kingston, ON, Canada.
40. Prof. Gerald P. Raymond, "**Analysis Of Track and Subgrade Stability**" Lecture notes, 1998, Queen's University, Kingston, ON, Canada.
41. Dr. Arnold Kerr, "**On the Stress Analysis of Rail and Ties**", AREA Bulletin 659, 1976.
42. Dr. Arnold Kerr, "**On the Determination of The Track Support Modulus (k)**", Pergamon, Elsevier, International Journal Of Solids and Structures 37 (2000) 4335-435.
43. Lucas Bathrust, Arnold Kerr, "**An Improved Analysis For The Determination Of Required Ballast Depth**", 1999 AREMA Annual Conf.
44. Ernest T. Selig, A. Zarembski, J. Redden, "**Stiff Track Modulus Considerations**", Rail Track Structures, February 2002.
45. Allan Zarembiski, "**Testing Track Strength**", Rail Track Structures, July 1986.
46. Ernest T. Selig, "**Ballast Part I: Its Key Roles and Qualities**", RT&S Series On Critical Issues In Ballast Maintenance, March 1998.
47. Ernest T. Selig, "**Ballast Performance Part III: Considering more key Factors**", RT&S Series On Critical Issues In Ballast, July 1998.
48. Dingqing Li, Steve Chismer, "**Soft Subgrade Remedies Under Heavy Axle Loads**", TTCI R&D RT&S, Oct. 1999.
49. Ernest T. Selig, Darrel Cantrell "**Ballast M/W: Putting Basics Into Practice**", RT&S Magazine, Sep. 2002.
50. David Read, Jim Hyslip, Russel McDaniel, Hank Lees, "**Track Substructure Research – Ballast Fouling Investigations**", TTCI R&D RT&S Magazine, Dec. 2010.
51. David Read, Dingqing Li, Eric Gehringer, Erol Tutumuler, "**Evaluation of: Ballast Under Heavy Axle Loads**", TTCI R&D RT&S Magazine, Aug. 2012
52. D.J. Vorster, P.J. Grabe, "**The Effect of Axle Load on Track and Foundation Resilient Deformation Under Heavy Haul Conditions**", 10th IHHA 2013 New Delhi, India.
53. Stefan Potocan, "**Under Sleeper Pads For Cycle Mgr. Used in Building Sustainable High Quality Tracks**" 10th IHHA 2013 New Dheli, India.
54. R. Guittard, "**Heavy Convoy Traffic In Desert Zones-SNIM Mauritania Railway**", session 502 paper A.6, 1<sup>st</sup> IHHA Perth, 1978 Australia.
55. J. H. Brown, M. G. Baggot, "**Track & Vehicle Maintenance On The Mt. Newman Mining Railroad - The 1<sup>st</sup> Large Steel Sleeper Instalation on Heavy Haul Line**", 3<sup>rd</sup> IHHA 1982 Colorado Spring, CO, USA.
56. J. H. Brown, D. H. Skinner, "**The Development Of A Steel Sleeper System For Heavy Haul Railways**", paper X.3, 1<sup>st</sup> IHHA Perth, 1978 Australia.
57. G. Tew, S. Marich, "**Achieving Performance Of Steel Sleepers Through Accurate Design**", 4<sup>th</sup> IHHA 1989 Brisbane, Australia.
58. Ernani Duval B. de Paula, "**Pesquisa de D. aço na EFVM**", III Encontro Nacional de Trilhos, ABNT/CB-6, 1990, Rio de Janeiro/RJ.
59. M. Kamiura, "**Effective Method Involving The Installation Of Steel Sleepers**", 5<sup>th</sup> IHHA 1993 Beijing, China.
60. "**Steel Sleepers**", BSC Track Products, 1998, Workington, Cumbria, England.
61. Alan Briggs, "**TTS, Tie & Track Systems Guidelines**", 1998 Lemont, IL/USA.
62. Stephen Townsend, "**OneSteel trak-lok Steel Sleepers: A Description & Guidelines for Use**", Aug. 2002 OneSteel Manufacturing Pty Limited, Australia.
63. Australian Rail Track Corporation – ARTC, "**Steel Sleepers – Usage and Installation Standards**", 2008.
64. Rafael Jimenez, Joe LoPresti, "**Performance Of Alternative Tie Material Under Heavy Axle Load Traffic**", TTCI R&D RT&S, Jan. 2004.
65. Colin Wheeler, "**Making The Case For Steel Sleepers - A miracle cure for Ballast**", Track Technology section, IRJ Magazine, Feb. 2004, [www.railjournal.com](http://www.railjournal.com).
66. Gregory W. Bayer, "**New Steel Tie Makers Target Mainline Track**", BHP Steel Ties failures at BC Rail (British Columbia Railway), Progressive Railroading Magazine, Jun. 1996.
67. Gordon Russel, "**Sleeper Upgrading at BC Rail**", Permanent way section, IRJ Magazine, Mar. 1989, [www.railjournal.com](http://www.railjournal.com).
68. Buddhima Indraratna, Sanjay Shrawan Mimbalkar, Cholachat Rujikiatkamjorn, "**Frontier Technologies in Design and Construction for Sustainable Transport Infrastructure**", U. of Wollongong, A 2012. UOW Library: [research-pubs@uow.edu.au](mailto:research-pubs@uow.edu.au)
69. Buddhima Indraratna, Cholachat Rujikiatkamjorn, Jayan Sylaja J. S. Vinod, Hadi Khabbaz, "**A Review of Ballast Characteristics, Geosynthetics, Confining Pressures and Native Vegetation in Rail Track Stabilization**" U. of Wollongong, 2009. UOW Library: [research-pubs@uow.edu.au](mailto:research-pubs@uow.edu.au)
70. Buddhima Indraratna, M. A. Shahin, D. Christie, "**State-Of-The-Art Analysis and Modelling Of Ballast-Formation-Track Interaction**" CORE, Melbourne, May 2006.
71. Buddhima Indraratna, Wadud Salim, Cholachat Rujikiatkamjorn, "**Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track**" © 2011 by Taylor and Francis Group, LLC.