



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**ISEL**



## **Desgaste Ondulatório em Caminhos de Ferro**

**Paulo Manuel G. L. Caldeira Martins**  
(Licenciado)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

*Documento Definitivo*

**Orientador:**

Professor Doutor/Eng. Joaquim Infante Barbosa

**Júri:**

**Presidente:** Professor Doutor João Carlos Quaresma Dias, Responsável de Perfil, Professor Coordenador c/Agregação, do ISEL/IPL;

**Vogal:** Doutor Mário José Gonçalves dos Santos, Investigador Principal, do INETI;

**Vogal:** Professor Doutor Joaquim Infante Barbosa, Orientador, Professor Coordenador c/Agregação, do ISEL/IPL.



## **Agradecimentos:**

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Eng. Joaquim Infante Barbosa, pelo acolhimento da ideia, pela disponibilidade e acompanhamento deste estudo.

Deixo também o meu agradecimento ao Eng. Francisco de Oliveira Sécio pela partilha de conhecimentos da sua larga experiência no projecto, instalação e manutenção de vias férreas; como colaborador do Metropolitano de Lisboa, Ferconsult, Ensitrans e Membro do Sub-comite de Instalações Fixas da UITP.

Ao Metropolitano de Lisboa, através do seu Conselho de Administração, pela disponibilização de meios de investigação e experimentação de técnicas conducentes à redução do desgaste ondulatório; pela permissão pela divulgação de dados internos de desgaste ondulatório na sua rede própria.

Ao CDI (Centro de Documentação do Metropolitano de Lisboa), pela sua colaboração na pesquisa interna de documentos sobre o tema da Tese.

Ao Dr. Luís Cabaço Martins, Administrador do Grupo Barraqueiro e Presidente da ANTROP, pelo apoio do Grupo na cedência de informações referentes à Metro do Porto e Metropolitano do Sul do Tejo.

Ao Prof. Dr. Manuel Margarido Tão do “Center for Advance Studys in Economics and Econometrics” da Faculdade de Economia da Universidade do Algarve, autor de inúmeros “paper’s” sobre o tema ferroviário, colaborador do Jornal Semanário Expresso no tema dos transportes; pela sua colaboração crítica e pelo seu apoio na componente do modo de transporte ferroviário.



## Resumo

Trata-se de uma análise técnica completa a um desgaste específico que aparece frequentemente nos sistemas ferroviários, sejam eles comboios (passageiros, carga e alta velocidade), Metropolitanos (ligeiros e pesados) ou mesmo sistemas de carros eléctricos.

Anualmente são gastos pelos sistemas ferroviários, consideráveis somas na correcção dos defeitos provocados pelo aparecimento do desgaste ondulatório nos carris de rolamento.

Ainda hoje a relativa pouca troca de conhecimentos entre os diversos sistemas ferroviários (limitado a alguns comités: UIC, UITP E ALAMYS), leva à ainda existência de algum desconhecimento sob este fenómeno específico (desgaste).

Apresenta-se uma dissertação completa sob o tema, valorizada pela experiência profissional passado num sistema ferroviário (ver CV anexo), bem como de outros sistemas congéneres; elaborada segundo os objectivos da manutenção: que possa constituir um documento técnico (manual), compilador de algumas experiências práticas, com conclusões.

A oportunidade de desenvolver tal relatório técnico completo, afigura-se oportuna, dada a opção pela implementação da alta velocidade em Portugal em bitola europeia, pela entrada do sector privado no sector ferroviário e surgimento recente dos Metropolitanos do Porto, Margem Sul do Tejo e futuramente Coimbra.



## **Abstract**

This is a complete technical analysis to a specific wear that often appears in the railway systems, whether trains (passenger, freight and high speed), Metropolitan (light and heavy) or tram systems.

Rail systems spent annually considerable sums in the correction of defects caused by the appearance of wavelike wear (corrugations) in running rails.

Even today, relatively little exchange of knowledge between the various railway systems (limited to certain committees: ALAMYS, UIC, UITP), leads to the existence of some still unknown, in this specific phenomenon (wear).

It presents a complete dissertation on the topic, valued by past experience in a rail system (see attached CV), as well as other similar systems, built according to the objectives of maintenance: it can serve as a technical document (manual), compiler some practical experiences with conclusions.

The opportunity to develop such a full technical report, it is timely, given the option of implementing the high speed in Portugal in standard gauge, by entering the private in the rail sector and the recent emergence of Oporto metro (underground), the metro of the south bank of the Tagus and the future metro of Coimbra.



## Glossário de Termos Técnicos

- Alta velocidade - Comboios que circulem a mais do que 220 Km/h
- Aparelhos de via - Agulhas, secção especial de via, permite mudança de via
- Bitola - Distância medida entre o lado interior dos carris
- Bitola internacional - Bitola estandardizada universal de 1.435 mm
- Caminhos de Ferro - Ferrovias, circulação sobre carris
- Catenárias - Condutores de electricidade colocados superiormente ao eixo da via, destinados a fornecer energia de tracção
- Carril - Barra de aço sobre a qual circulam veículos ferroviários
- Comboios pendulares - Comboios com suspensão activa que permite circularem a maiores velocidades em curvas
- Composição - Conjunto de veículos do comboio
- Contexto operacional - Condições de operacionalidade a ter em conta em projectos ou opções de aquisição
- Cróssimas - Componente interior do aparelho de via
- Draisine - Veículo ferroviário ligeiro polivalente de manutenção
- Electrificação - Conversão duma via férrea para tracção eléctrica
- Escala - Diferença entre alturas dos carris em curva
- Espaço canal - Espaço de horário entre comboios
- Ferrovias - Caminhos de ferro
- Fila Alta - Carril localizado do lado de fora numa curva
- Fila baixa - Carril localizado do lado de dentro numa curva
- Flange - Verdugo, flange da roda, rebordo
- Gabarit - Cércea de carga nos caminhos de ferro que delimita a altura e largura máxima de carregamento
- George Stephenson - Eng. dos caminhos de ferro que estabeleceu algumas soluções técnicas no século XIX, que ainda hoje prevalecem
- Lanças móveis - Partes móveis do aparelho de mudança de via
- Linha aérea - Catenária
- Locomotiva - Veículo destinado a puxar ou empurrar composições ferroviárias
- Mesa de rolamento - Superfície superior da cabeça do carril onde circulam as rodas
- Mitigação - Atenuação do efeito das alterações climáticas
- Obras de arte - Pontes e túneis
- Pantógrafo - Dispositivo colocado no tejadilho dos comboios que se destina a captar a energia disponível da catenária, parado ou em andamento



- Peso aderente - Peso total descarregado pelos eixos motores  
Shinkansen - Comboio de alta velocidade japonês  
Terceiro carril - Carril apenas destinado a fornecer energia de tracção ao comboio, em alternativa às catenárias  
Traçado - Desenho de implantação da via férrea na envolvente  
Travessa - Chulipa ou prancha grossa em que assentam os carris do caminho-de-ferro  
Tribologia - Ciência da interacção de superfícies em movimento relativo e assuntos e práticas relacionados  
Vagonetas - Pequenos vagões tremonha, usados em minas  
Verdugo - Flange, rebordo da roda que efectua o guiamento do comboio

## Terminologia

- ATM - Azienda Transporti Milanesi spa  
AVE - Alta Velocidade Espanhola  
BR - Caminhos de Ferro Britânicos  
CP - Comboios de Portugal  
DB - Caminhos de Ferro Alemães  
ITV - Instrucção Técnica de Via (REFER)  
LGV - Linha de Alta Velocidade  
ML - Metropolitano de Lisboa  
RAVE - Rede de Alta Velocidade Portuguesa  
REFER - Organismo gestor das infra-estruturas de caminho de ferro em Portugal  
SEV - Secção Especial de Via  
SNCF - Sociedade Nacional dos Caminhos de Ferro Franceses  
TGD - SEV de tangente dupla  
TGS - SEV de tangente simples  
TGV - Comboio de Alta Velocidade  
UIC - União Internacional dos Caminhos de Ferro  
UITP - União Internacional dos Transporte Públicos



<<ACERTO

## Índice

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Glossário de Termos Técnicos	v
Terminologia	vi
Índice	vii
1. Introdução	1
1.1. Caminho de Ferro – Um pouco de história	2
1.2. Importância Social	3
1.3. Descrição do Sistema Ferroviário	6
1.3.1. Via Férrea	7
1.3.2. Electrificação	9
1.3.3. Traçados	13
1.3.4. Secções Especiais de Via	14
1.3.5. Bitola	15
1.4. Modos Ferroviários	17
1.4.1. Caminho de Ferro Pesado	17
1.4.1.1. Passageiros	18
1.4.1.2. Mercadorias	19
1.4.2. Eléctricos	20
1.4.3. Metropolitanos	25
1.5. Modos Ferroviários de Futuro	27
1.5.1. Décadas de 60 a 80	27
1.5.2. Ambiente	29
1.5.2.1 CQNUAC – Conferência das Nações Unidas	30
1.5.2.2 Contribuições para a mitigação da mudança do clima	30
1.5.2.3 Protocolo de Quioto	32
1.5.2.4 Créditos de Carbono – RCE	33
1.5.3. Alta Velocidade	33
1.5.3.1 Mercadorias versus Alta Velocidade	37



1.5.4 Metros Ligeiros	39
1.5.5 “Tram-Train”	43
2. Desgaste Ondulatório	45
2.1. Contacto Roda-Carril	45
2.1.1 Introdução	46
2.1.2 Características do Interface Roda-Carril	47
2.1.3 Origem	49
2.1.4 Definição	51
2.2. Variáveis	53
2.3. Tipos de Desgaste Ondulatório	58
2.3.1 “Heavy-haul corrugation”	58
2.3.2 “Light Rail corrugation”	59
2.3.3 “Resonance corrugation”	59
2.3.4 “Rutting”	60
2.3.5 “Pinned-pinned resonance”	61
2.3.6 “Trackform”	62
2.4. Consequências do Desgaste Ondulatório	62
2.5. Custos do Desgaste Ondulatório	63
2.6. Metropolitano de Lisboa	64
2.7. Metro do Sul do Tejo	71
2.8. Metro do Porto	73
2.9. Rede Ferroviária Nacional	74
2.10. Outros Casos	75
3. Redução do Desgaste Ondulatório	77
3.1. Em Projecto	77
3.2. Em Prevenção	79
3.2.1. Esmerilagem e Fresagem dos Carris	79
3.2.2. Lubrificação no Carril	83
3.2.3. Lubrificação no Veículo	83
3.2.4. Lubrificação na Via	85
4. Remoção do Desgaste Ondulatório	86



4.1.	Actuação Preventiva	86
4.1.1.	Em Exploração	87
4.2.	Actuação Correctiva	91
5.	Meios e Processos de Medição	92
5.1.	Introdução	92
5.2.	Método de Recolha de Dados	93
5.3.	Limites Estabelecidos	94
5.4.	Medições no Metropolitano de Lisboa	96
5.5.	Medições em Outros Sistemas de Metros	98
6.	Conclusões	107
6.1.	Quadro sobre Desgaste Ondulatório	108
6.2.	Fluxograma de Decisão	109
6.3.	Aspectos Relevantes	110
7.	Referências	112



## <<ACERTO

### 1. Introdução

(...) “Por volta de 2050, os caminhos de ferro vão dominar o mercado de passageiros em viagens de duração até 3 horas, vencendo a concorrência das linhas aéreas. Mas não vai ser só nos passageiros: também no mercado de cargas, as ferrovias vão vencer a concorrência das rodovias em todos os percursos maiores do que 300 km.” (...)

Esta previsão foi feita pelo vice-presidente da Comissão Europeia para Transportes, Siim Kallas, na abertura da Innotrans 2010, em Berlim (21/09), hoje o principal evento mundial sobre transporte ferroviário.

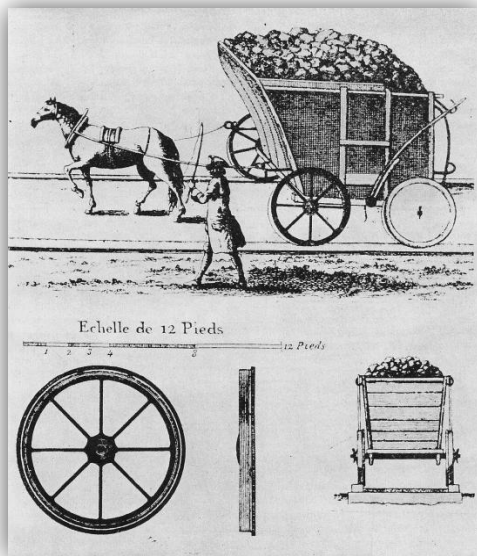
É interessante assistir, 189 anos depois da sua origem, à mensagem de que o caminho de ferro ainda tem um grande contributo a dar no presente e num futuro associado ao conforto e velocidade, mas também à racionalização da energia (eficiência), redução da poluição e acima de tudo na melhoria do ambiente.

É dentro desta evolução global, que decidimos dar o nosso melhor contributo, efectuando um trabalho (Dissertação) sob o tema: “Desgaste Ondulatório em Caminhos de Ferro”. Tratando-se de um desgaste associado à degradação: ambiental, do conforto; com elevados custos para o seu controlo e remoção a um nível imperceptível, apresentamos todo um trabalho completo sobre o tema, baseado não só numa compilação de conhecimentos teóricos, mas também apresentar casos práticos conforme a nossa experiência prática profissional passada num operador ferroviário.

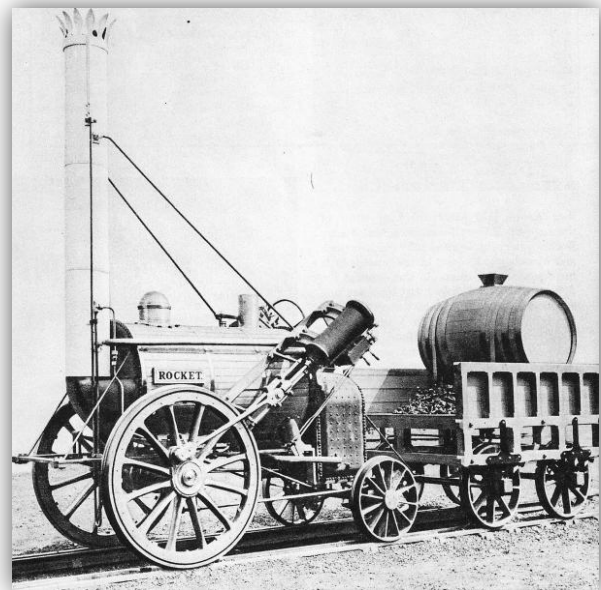
Pretende-se que esta dissertação que nos propomos efectuar, constitua um contributo, uma “mais valia” para os responsáveis técnicos de operadores ferroviários e responsáveis por infra-estruturas de via férrea.

## 1.1 O Caminho de Ferro – Um pouco de história

Muito se escreveu sobre a origem dos caminhos de ferro. Os primeiros carris metálicos de que há registo, aparecem em 1728 em Cumberland (1). O sucesso deste sistema cedo se expandiu, havendo registo de pelo menos 20 linhas na minas da zona de Northumberland, onde vagonetas transportavam minério, recorrendo a tracção animal ou em planos inclinados por gravidade (Figura 1).



**Fig. 2 Vagonete a tracção animal – antiga litografia de Gabriel Jars, Paris 1765.**



**Fig. 1 A Rocket de George Stephenson – Pictorial Encyclopédia of Railways, Hamilton Ellis.**

A primeira linha de caminho de ferro de uso não dedicado exclusivamente ao sector industrial surge em Surrey, entre Wandsworth e Croydon em 1803. Em 1804 aparece a primeira tentativa de aplicar a máquina a vapor nos caminhos de ferro. Dificuldades iniciais como o peso, dimensões, estabilidade da via, entre outras levaram a que esta aplicação só fosse possível a partir de 1812, entre Middleton e Leeds (1).

A chamada era de George Stephenson (1820–1850) surgiu com a sua primeira locomotiva em 1814. Stephenson acreditava na tecnologia e aplica com sucesso a máquina a vapor ao sistema de caminhos de ferro (Figura 2). Este aposta na aderência com único meio de traccionar as composições ferroviárias.



O grande passo dos sistemas ferroviários mineiros para o caminho de ferro tal como o conhecemos foi dado em 1821 com a companhia de caminho de ferro *Stockton & Darlington Railway*. Esta empresa em 1825 abre o seu negócio que era exclusivamente de mercadorias a também passageiros.

Neste caminho de ferro, George Stephenson como engenheiro responsável, define a distância entre carris de rolamento, em 4 ft 8 in (1435 mm); definindo o que seria chamado de bitola internacional, referência mundial.

É contudo entre Liverpool e Manchester que abre em 1825 a ligação ferroviária que deu início à “Era do Caminho de Ferro”. O caminho de ferro acompanhou, como parte integrante da revolução industrial, o alastramento desta à Europa Continental, onde se vê surgir a rede ferroviária Europeia (2).

## **1.2. Importância Social**

A agora possibilidade de se viajar ilimitadamente, percorrendo com rapidez distâncias até há pouco inacessíveis, alterou todo o modo de vida das populações: possibilitou migrações humanas, viagens de lazer, o início do que seria o turismo, viagens de negócios, acabando inclusive a consanguinidade humana. A troca comercial de mercadorias deu origem ao que seria o embrião das modernas redes logísticas.

O aparecimento das redes ferroviárias europeias, permitiu a passageiros e carga deslocarem-se com velocidades, a horários frequentes e regulares, por todo o lado; permitindo um desenvolvimento só comparado à introdução da aviação comercial a jacto nos anos 60.

O caminho de ferro, quebrou o isolamento existente das populações, em que as trocas comerciais, de ideias, migrações se iniciaram sem nunca mais parar até os dias de hoje. Foi o primeiro meio de transporte a criar as bases da civilização moderna, servindo de veículo à revolução industrial. Mostrou uma grande capacidade de adaptação às solicitações específicas de serviços, desenvolvendo-se em vários modos de transporte: caminho de ferro pesado onde se incluem os serviços de passageiros e mercadorias, os metropolitanos e os carros eléctricos.

Depois da segunda guerra mundial, verificou-se o aparecimento em massa do transporte individual, como consequência do desenvolvimento dos transportes rodoviários. Esta situação obrigou a uma reorganização natural das opções, retirando ao caminho de ferro, a posição que

detinha de detentor da exclusividade (monopólio) dos serviços. Assistiu-se nas décadas de 50 a 70 a inúmeros encerramentos de linhas secundárias, ramais, abandono de serviços de passageiros. Os casos mais notados foram as redes de eléctricos de algumas grandes cidades, que foram encerrando um pouco por todo o lado, criando uma dinâmica de encerramentos. Durante este período os únicos casos de expansão de redes, foram os serviços suburbanos das grandes cidades e os metropolitanos pesados embora com reduzidas quilometragens, dados os custos envolvidos. O caminho de ferro sente a falta de investimentos públicos, começa a ser visto como um transporte desactualizado, perdendo terreno no enquadramento social.

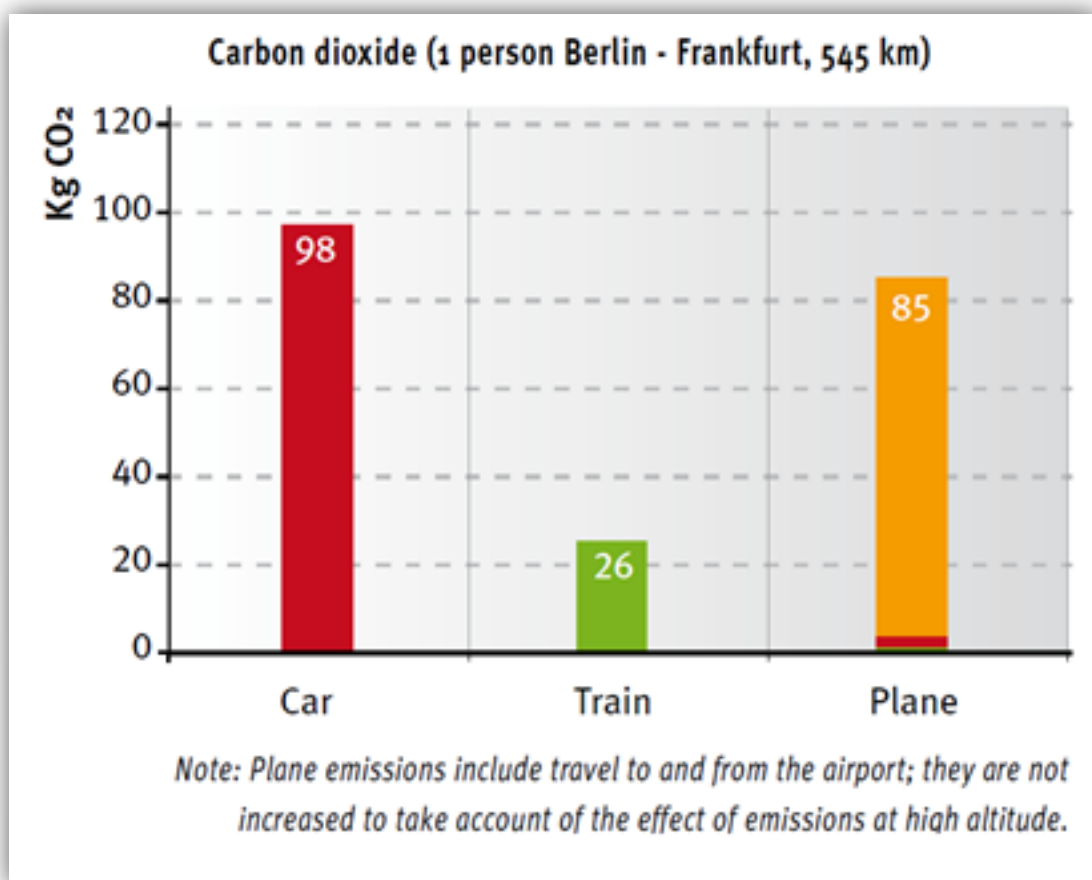


Tabela 1 Emissões em Kg CO<sub>2</sub>, produzidos na deslocação de uma pessoa entre Berlin e Frankfurt, pelos diferentes modos de transporte - Fonte [www.UIC.org/](http://www.UIC.org/).

O primeiro choque petrolífero nos anos 70, a redução das reservas mundiais de petróleo, a rodoviarização de países de Leste e asiáticos em grande escala associado ao aumento de temperatura do planeta; veio dar oportunidade ao aparecimento do 2º fôlego dos caminhos de ferro.



As características técnicas próprias do sistema de transporte ferroviário, inegavelmente posicionam este modo de transporte numa posição de topo quanto a eficiência energética, em que a possibilidade de emprego de diversos tipos de energia de tracção o adequam às limitações actualmente existentes quanto ao impacto ambiental (Tabela 1). Este 2º fôlego (oportunidade) foi prontamente aproveitado pela indústria ferroviária que respondeu ao longo deste período 1970-2010 com o aparecimento da alta velocidade em conjugação com o desenvolvimento dos metros ligeiros.

Encontram-se assim os caminhos de ferro numa 2ª fase da sua vida, a que foi chamada de reinvenção da ferrovia. Nas cidades verificou-se um autêntico “boom” com o aparecimento de novas redes de metros ligeiros (em Portugal temos o caso do Porto, Almada e futuramente Coimbra). Nas ligações intercidades atingiram-se novas velocidades de deslocação com comboios convencionais mais rápidos, comboios pendulares e através da alta-velocidade. Neste momento está-se a dar também uma nova resposta aos serviços ferroviários regionais, através do aproveitamento do material circulante desenvolvido para os metros ligeiros (o tram-train) com tracção eléctrica, a diesel ou mesmo dual; constituindo uma terceira revolução.

Nas mercadorias, cada vez mais há o entendimento da necessidade de aproveitar a grande capacidade de transporte de carga dos caminhos de ferro, que permitirá integrado numa intermodalidade, permitida pelas plataformas logísticas libertar, o actual peso da camionagem das estradas.

A abertura do mercado ferroviário ao sector privado, iniciada nos anos 90, trouxe também alguma agressividade a este meio de transporte, em todos os seus modos.

A indústria ferroviária francesa, bate novo recorde de velocidade sobre carris em Abril de 2007 (uma saga começada desde 1955 até os nossos dias), chegando aos 574,8 Km/h, em condições de extrema segurança e conforto; demonstrando que o sistema de roda-carril ainda não atingiu o seu limite técnico.

Entraram os caminhos de ferro no século XXI com uma nova imagem, constituindo uma das melhores alternativas de transporte, que seguramente terá um papel importante no desenvolvimento e bem estar da humanidade.

### 1.3. Descrição do Sistema Ferroviário

Pode-se definir o caminho de ferro, como um sistema de transporte utilizando rodas flangeadas interiormente, circulando em carris de ferro/aço (Figuras 3 e 4). Este sistema tem sido usado desde o século XVIII possibilitando que se desenvolvesse um sistema de vias com possibilidade de interligação (aparelhos de via=agulhas); inicialmente através pequenas plataformas giratórias, surgindo mais tarde os que se chamou de agulhas (aparelhos de via), também chamados de secções especiais de via.

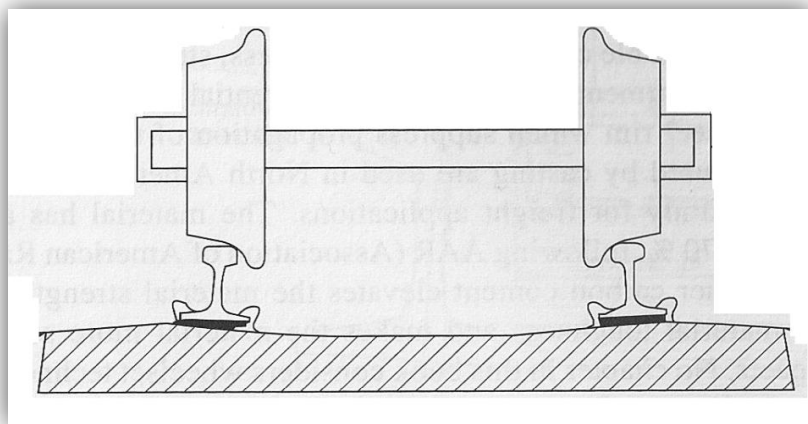


Fig. 4 Conjunto rodas/eixo ferroviário carrilado, figura do autor.

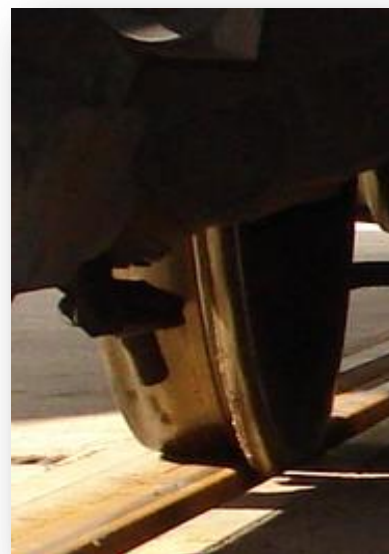


Fig. 3 – Roda carrilada, foto do autor captada em instalações do Metropolitano de Lisboa.

Sendo as rodas de formato cónico, com uma folga de transição entre o piso da roda e a flange também chamada de verdugo, permitem a auto-centragem e guiamento dos rodados evitando que nas rectas se dê o contacto do verdugo com os carris.

Se os primeiros registos dos século XIX, denunciam um caminho de ferro, em que as velocidades não ultrapassavam os 60 Km/h com pesos por eixo máximos de 10 toneladas em carris de 30 Kg/metro; já na primeira quinzena do século XX (1900 – 1915) sem encontravam sistemas que circulavam regularmente a 90 Km/h. Registos mostram velocidades regulares atingidas na Europa e Estados Unidos de 120 Km/h em 1946, 130 Km/h em 1948. Velocidades de 160 e 200 Km/h em caminhos de ferro convencionais são atingidas nos anos 60 por algumas administrações ferroviárias Europeias (*BR, SNCF e DB*).

Nas vias férreas verifica-se uma evolução dos carris, dos 30 Kg/m, passa-se para os 36 Kg/m, 50 Kg/m, 54 Kg/m (UIC 54) e 60 Kg/m (UIC 60). Os carris evoluem também na composição dos



seus aços, nos perfis utilizados, no controlo da qualidade do seu fabrico; permitindo o aumento dos pesos por eixo que evoluem desde as 10 toneladas por eixo para as 17 toneladas em 1940 e para as 22,5 toneladas nos anos 60. Certos eixos ferroviários ou mesmo determinados países, aumentam por necessidades próprias, os pesos por eixo até valores de 35 toneladas (3).

Em 1964, o Japão que dispunha até então de uma rede ferroviária limitada tecnicamente pela sua bitola métrica, inaugura uma nova ligação ferroviária entre Tóquio e Osaka: o *Shinkansen*. Esta ligação toda efectuada em bitola internacional (1,435 mm), concebida com traçados rectilíneos maioritariamente em viadutos, electrificada, com utilização de novas tecnologias de tracção, sinalização e material circulante de moderna geração, com velocidades regulares de 210 Km/h; constituiu o embrião de uma rede estrutural de ligação inter-cidades que se veio a construir em todas as três ilhas principais do Japão (4).

Abriu assim o Japão, a porta, ao segundo fôlego dos caminhos de ferro, ao lançar a primeira pedra do que viria a ser a alta velocidade. Em 1981, os franceses inauguram a sua primeira linha de alta velocidade entre Paris e Lyon, praticadas pelo *TGV* com velocidades regulares de 260 Km/h. Actualmente são praticadas em diversos países do chamado clube de alta velocidade ferroviária, velocidades regulares entre os 300, 320 e recentemente os 350 Km/h (5).

### 1.3.1 Via Férrea

O contacto entre a roda e o carril caracteriza o sistema ferroviário. A extremamente reduzida área de contacto, da ordem de  $0,5 \text{ cm}^2$ , associado às cargas envolvidas, faz com que cada passagem de cada roda, na via férrea, seja um evento irreversível: pelo desgaste e perdas de partículas associadas, pela redução da vida útil do carril e sua aproximação da fadiga metálica (tonelagem máxima) (6).

No início de operação dos caminhos de ferro, foram muitos os problemas técnicos: fracturas nos carris, rodas e eixos, alargamentos de bitola devido às amplitudes térmicas, desalinhamentos do traçado de via, entre outros; por vezes provocaram acidentes de elevadas consequências.

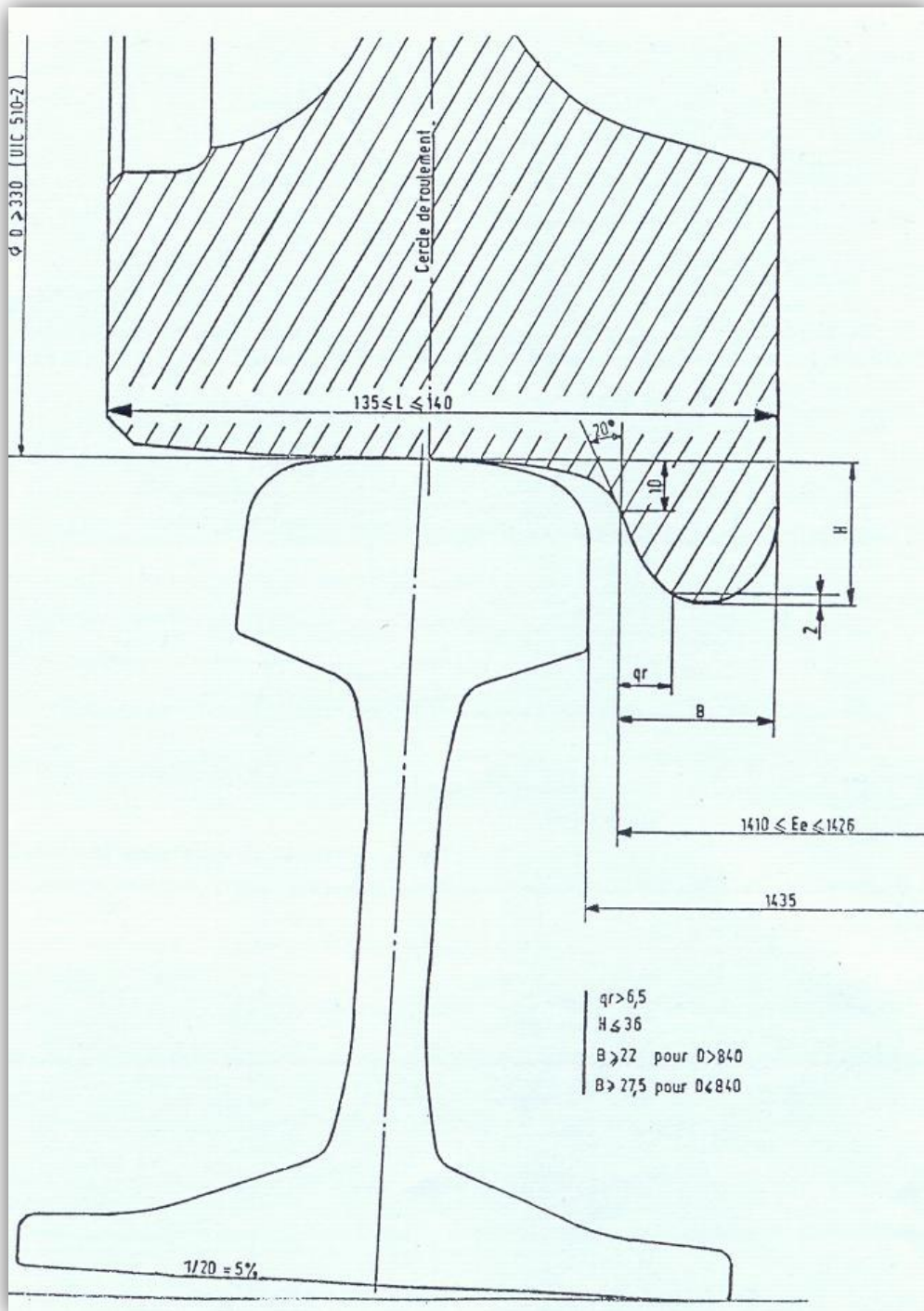


Fig. 5 Contacto roda – carril, documento ML.

Investigações da própria indústria, melhorias de materiais e projecto, controlo da qualidade no fabrico; aumentaram muito a fiabilidade e segurança dos equipamentos. As estatísticas cedo



demonstraram que os caminhos de ferro são um dos meios de transporte mais seguros do mundo, rivalizando com a aviação comercial.

A interface entre a roda e o carril, sempre foi uma fronteira de engenharias (Figura 5). A engenharia mecânica sempre esteve mais associada ao material circulante, deixando a via para os engenheiros civis. Esta fronteira marcou durante muitos anos limites técnicos deixando o contacto roda carril como uma fronteira: “terra de ninguém”. Esta demarcação infelizmente ainda hoje persiste, contudo as exigências da alta velocidade associadas à segurança de pessoas e de bens, obrigam a que se conheça melhor o extremamente complexo interface roda carril. O aprofundamento do conhecimento nos campos da metalurgia e da tribologia, têm vindo a integrar o estudo deste interface no campo da engenharia mecânica.

A infra-estrutura de via férrea evoluiu bastante ao longo dos 189 anos dos caminhos de ferro. Desde a execução da plataforma de assentamento da via, a escolha dos balastros, as travessas, as fixações e elementos elásticos aos carris, tudo mudou em termos de fiabilidade, resistência e qualidade de fabrico. Também nos aparelhos de via, sempre pontos de descontinuidade e fragilidade, hoje apresentam-se bastante fiáveis, já não existindo limitações de velocidade na sua passagem directa.

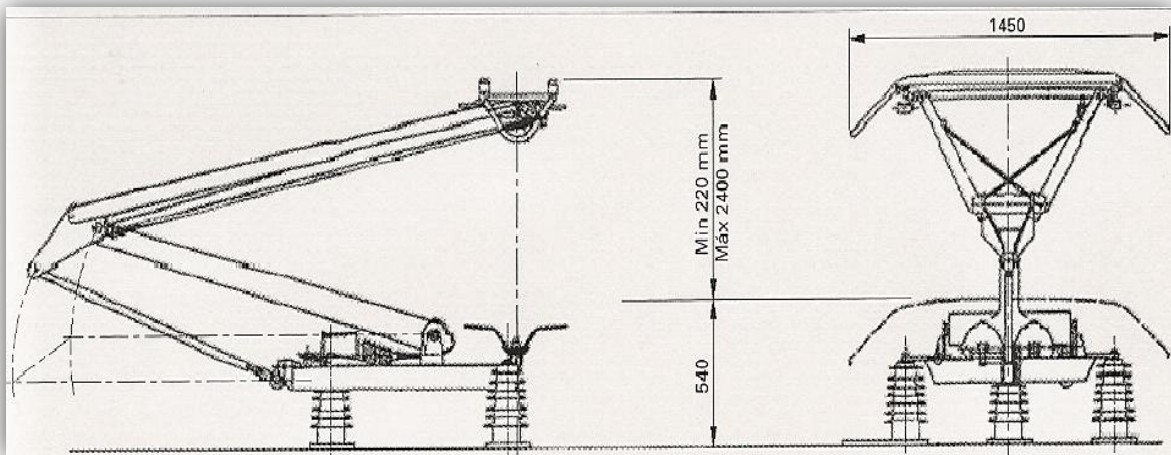
Nos anos 60, surgem as vias sem balastro, com plataformas betonadas nos metropolitanos e vias férreas suburbanas em túneis, apresentando-se como soluções de menor manutenção. Apesar de todo o desenvolvimento, mantiveram-se os perfis das rodas e dos carris.

### **1.3.2 Electrificação**

Muito cedo se recorreu à tracção eléctrica nos caminhos de ferro. A primeira instalação surge no Reino Unido em 1838, com recolha de energia através de um terceiro carril. Foi nos eléctricos que em 1888 surge a primeira captação através de linha aérea (Figura 6), abrindo campo para o aparecimento das catenárias. A sua aplicação aos caminhos de ferro aparece pela primeira vez na Suécia (Roselag Line) em 1890 (2).

Rapidamente as vantagens da electrificação justificaram o aparecimento de linhas de tracção eléctrica: nas redes de carros eléctricos, redes de metropolitanos, em vias férreas com grandes extensões em túneis, linhas suburbanas das cidades, vias com grandes frequências de comboios, e em vias com traçados montanhosos.

Nas primeiras electrificações, optou-se pela corrente contínua sendo nos eléctricos empregue 550 a 600 Volt e nos caminhos de ferro 1.500 Volt. A corrente contínua foi durante muitos anos opção de electrificação, dada a regulação da velocidade dos motores efectuar-se através da variação da voltagem. Muito cedo verificou-se que a baixa voltagem de 1500 Volt corrente contínua apresentava elevados valores de dissipação de energia, (quedas de tensão e elevadas corrente nos cabos) obrigando à construção de elevado número de subestações, bem como catenárias pesadas dadas as grandes espessuras necessárias para os cabos e fios de cobre (7).

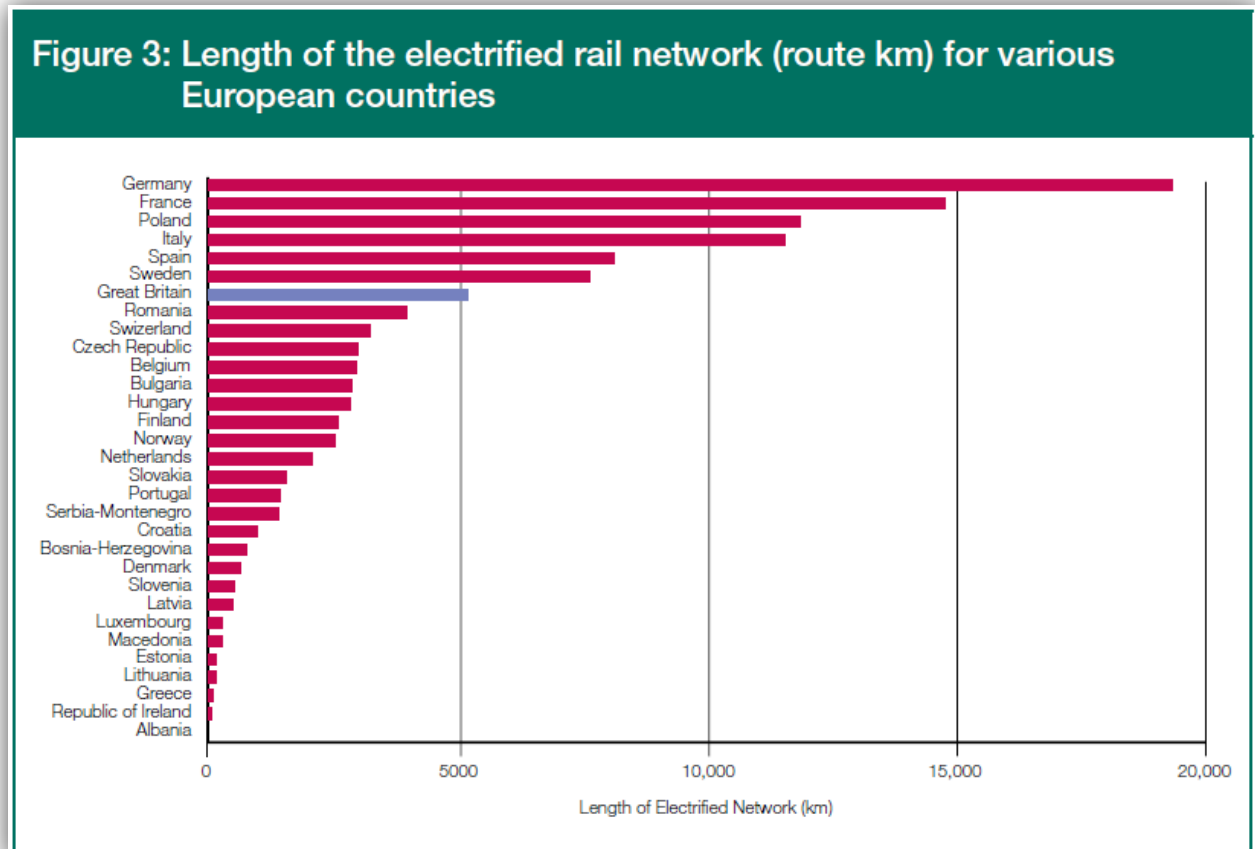


**Fig. 6 Pantógrafo de captação de corrente da catenária do livro A Catenária e as outras Instalações Fixas de Tracção Eléctrica, ANJOS, Carlos, Edição FERBRITAS 2007.**

Exemplos de electrificações a 1.500 Volt cc.: Portugal (Linha de Cascais 1926), Espanha, França, Holanda, entre outros. Ainda durante a era da corrente contínua, surgiram as electrificações a 3.000 Volt em países como: Espanha (por upgrade dos 1.500 V), Itália, Eslovénia, Bélgica, Polónia, entre outros.

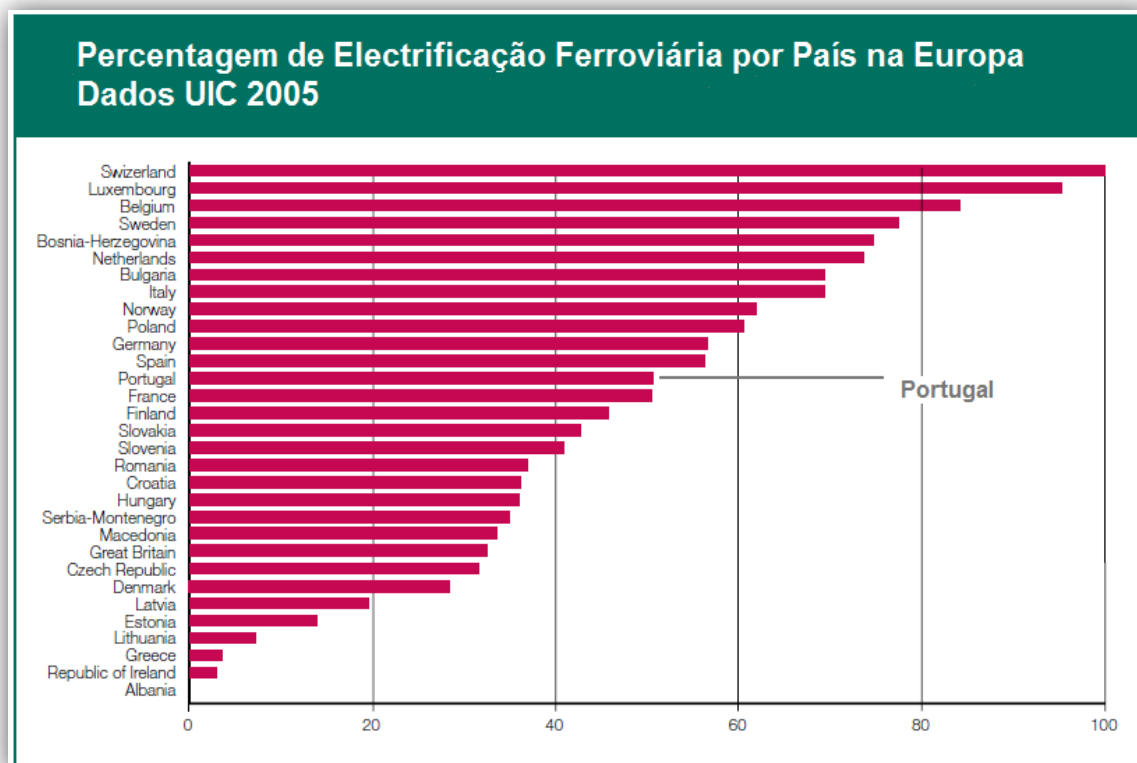
Na Alemanha, Austria e Suíça os caminhos de ferro optam pela instalação de catenárias a 15.000 Volt corrente alterna monofásica. Estes caminhos de ferro, alguns com traçados de montanha, decidiram evitar a dissipação de energia aumentando substancialmente a voltagem e recorrendo à corrente alterna. Apesar da alimentação em corrente alterna, estes tinham à época da sua instalação nas locomotivas, motores de corrente contínua. A rectificação da corrente fazia-se no interior do material circulante.

Na década de 50, na França que dispunha de grande extensão de caminhos de ferro electrificados a 1.500 Vcc, surge uma via experimental electrificada a 25.000 Volt corrente alterna 50 Hertz. O desenvolvimento desta opção de electrificação, foi o embrião das electrificações modernas, sendo esta a opção actual também para as linhas de alta velocidade (Tabela 2) (8).



**Tabela 2 Distâncias de Vias Electrificadas na Europa, fonte [www.UIC.org/](http://www.UIC.org/).**

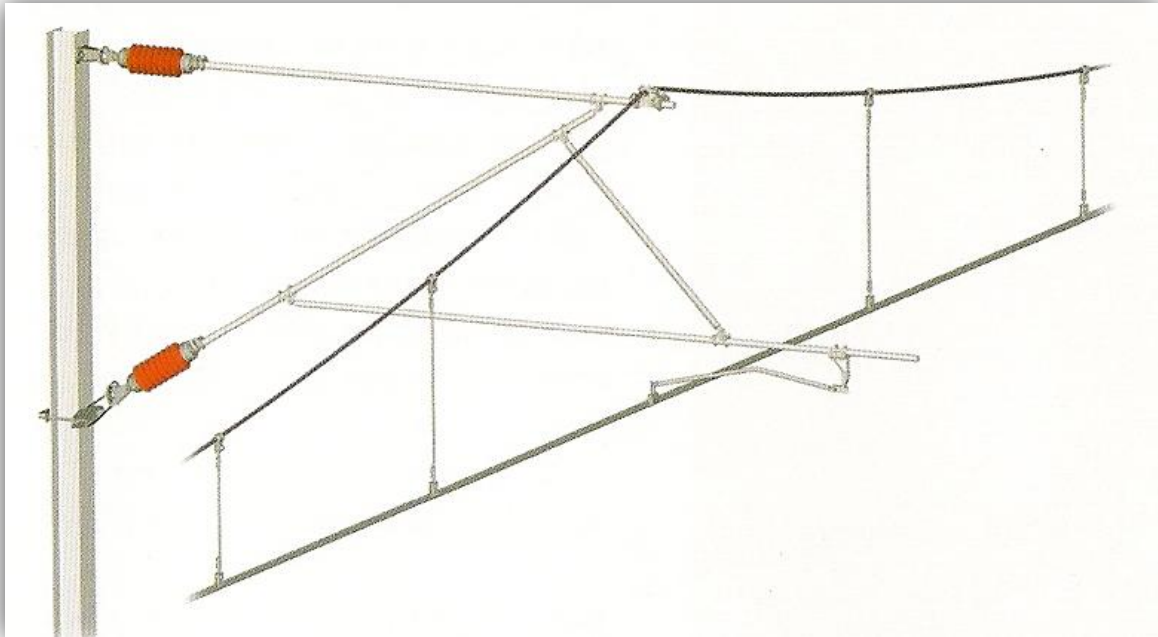
Portugal iniciou a electrificação da rede em 1956 com 25.000 V 50 Hz (com excepção da Linha de Cascais), sendo actualmente um dos países que percentualmente dispõe em termos mundiais, de uma elevada percentagem de electrificação: Extensão total da rede nacional – 2.592,3 Km; extensão total de linha electrificada – 1.444,2 Km (1.418,8 Km em 25.000 V 50 HZ e 25,4 Km em 1.500 Vcc); constituindo uma percentagem de electrificação de 56% da rede (9). Presentemente está-se a electrificar: Castelo Branco à Guarda via Beira Baixa (Covilhã), o troço entre Bombel (Vendas Novas) e Évora via Casa Branca com destino a Elvas por nova via a construir entre Évora e Elvas. Está em estudo a viabilidade de se electrificar também o troço Casa Branca a Funcheira, via Beja (10). (Tabela 3)



**Tabela 3 Percentagem de Electrificação por País , fonte [www.UIC.org/](http://www.UIC.org/).**

A futura ligação de alta velocidade entre Lisboa e Madrid, pela fronteira de Elvas/Badajoz, a ser inteiramente realizada na bitola internacional, será inteiramente electrificada em 25Kv corrente alterna com uma frequência de 50Hz (Figura 7). Pendente de decisão quanto à viabilidade de electrificação, estão secções das linhas do Oeste, Minho, Douro, Leste e Algarve.

Em termos globais a escolha do tipo de tracção está relacionada com a política energética de cada país, da política de transportes ou da evolução da própria via férrea. De um modo simplista podemos afirmar existir em termos europeus e asiáticos uma tendência para utilização da tracção eléctrica. Contrariamente nos continentes americanos e africanos uma tendência para a utilização em exclusivo da tracção diesel.



**Fig. 7 Consola de Catenária Portuguesa em 25 Kv 50 Hz do livro A Catenária e as outras Instalações Fixas de Tracção Eléctrica, ANJOS, Carlos, Edição FERBRITAS 2007.**

### 1.3.3 -Traçados

Os caminhos de ferro sempre se apresentaram como um sistema de transporte vocacionado para: grandes cargas (grandes capacidades de tracção), velocidades regulares elevadas, associado a grande eficiência energética. Esta filosofia obriga à existência de traçados exigentes na altimetria e planimetria, limitando as vias a traçados rectilíneos e planos, situação a que nem sempre a topografia o permite. Aparecem assim o que se chamam em engenharia civil, as grandes “obras de arte”, pontes e túneis, sempre associados às grandes obras ferroviárias. O século XIX está assim associado ao aparecimento das grandes obras de engenharia civil. No nosso país não será estranho referir as grandes pontes metálicas ferroviárias da casa Eifel ou os grandes túneis do Rossio (Lisboa), São Bento (Porto), Albergaria ou de Fátima-Chão de Mações.

Mais recentemente o aparecimento dos sistemas de Metropolitanos subterrâneos de Lisboa e Porto e a instalação do caminho de ferro na parte inferior do tabuleiro da ponte 25 de Abril, vieram aumentar as obras de arte associadas aos caminhos de ferro.

Se os traçados ferroviários estão associados à orografia própria dos terrenos da instalação, estes também estão associados aos orçamentos disponíveis. Os traçados em alguns casos definiram o futuro da respectiva linha.



Também o traçado influenciou por vezes a opção por bitolas estreitas dados os raios de curvatura apertados, pois as bitolas estreitas estão mais apropriadas a traçados sinuosos.

Apresentamos na Tabela 4, os valores de pendentes máximas e raios mínimos de curvatura para os diversos tipos de caminhos de ferro: pesado, metropolitanos ligeiros e pesados e sistemas de eléctricos. Trata-se de valores de grandeza de compromisso podendo haver alguns desvios não significativos.

Modo Ferroviário	Raio de curvatura mínimo	Pendente máxima
Eléctrico	16 m	12 %
Metro Ligeiro	24 m	7 %
Metro Pesado	150 m	4 %
Caminho de Ferro Convencional	700 m	2,5 %
Alta Velocidade	5.000 m	5 %

Tabela 4 Valores de Limite teórico dos Traçados Ferroviários entre os diferentes modos, tabela do autor.

### 1.3.4 – Secções Especiais de Via

Na via férrea encontramos as secções especiais de via, também conhecidas por aparelhos de mudança de via, desvios, agulhas ou mesmo outros nomes. Trata-se de secções de via férrea destinadas a permitir efectuar itinerários diferentes aos comboios. Conforme poderemos ver nas Figuras 8, 9, 9a e 10; estes são formados com carris do tipo e perfil utilizado nas vias correntes, com excepção das cróssimas e das lanças móveis. À semelhança da via férrea corrente, também se verificam desgastes nos carris componentes das secções especiais de via, essencialmente na tangente de curvatura da curva da via desviada.

Para além dos desvios existem nos espaços das estações aparelhos conhecidos como TGS's e TGD's. Conforme figura anexa estes aparelhos aparecem na forma simples (TGS) e dupla (TGD).



Fig. 8 Cróssima móvel, foto do autor.



Fig. 9a Lança móvel, foto do autor.



Fig. 9 Cróssima fixa, foto do autor.

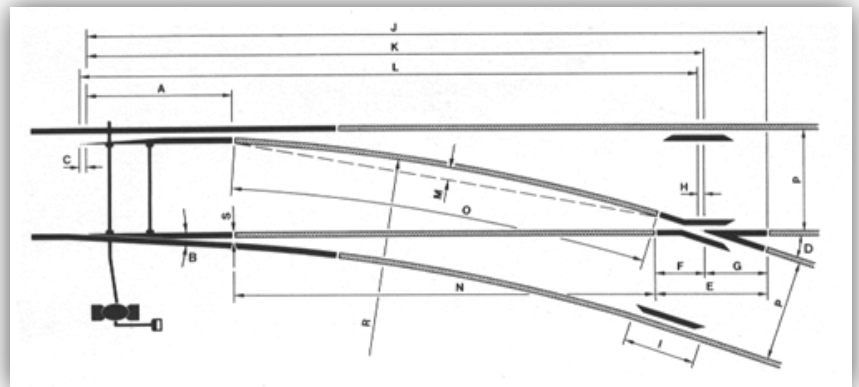


Fig. 10 Aparelho de mudança de via.

### 1.3.5 – Bitola

Designa-se por bitola de via, a distância interior medida entre os carris. Historicamente, conforme referimos no capítulo 1.1, terá sido George Stephenson que seleccionou/definiu a distância de 4 ft 8 in (1435mm) para as primeiras vias férreas, valor este que seria mais tarde definido como a bitola internacional (2).

A falta de uma normalização levou à propagação de um sem número de bitolas, constituindo o que viria a ser um dos mais graves problemas do caminho de ferro nos dias de hoje. Poderemos definir três grandes valores para bitolas de via: as bitolas mineiras também chamadas de decauville (entre 0,60 e 0,75m), as vias estreitas (entre 0,90 e 1,05m), a bitola internacional (1435mm) e as vias largas (de 1,5 a 1,675m) (2).



**Fig. 11** Bitolas Russa e Internacional entrelaçadas, fonte internet.

Neste período inicial de aparecimento dos caminhos de ferro no século XIX, existiram vários critérios de selecção de bitolas: económicos, de traçado, políticos e estratégicos, infelizmente não se pensava à época numa normalização que permitisse a comunicação entre países, pois havia muitos receios. Assim, foram criados vários erros graves, que vieram no futuro a ter repercussões graves no desenvolvimento e evolução de algumas redes ferroviárias.

Se em certos países mais tarde se veio a corrigir esta questão alterando quilómetros de vias (ex: Austrália e Espanha), outros aconteceu em que foi o sistema ferroviário abandonado por falta de resposta (redes dispersas), em detrimento da rodovia (ex: Brasil). Referimos a título de exemplo alguns países ou continentes com casos específicos de múltiplas bitolas: Continente Australiano (3 bitolas), Brasil (4 bitolas), Japão (2 bitolas) e Índia (4 bitolas). Outros caso houve de países em que a escolha recaiu em bitolas de via estreita, bitola esta limitativa na velocidade e gabarit dos comboios; o que obrigou a que mais tarde se viesse a construir uma nova rede ferroviária é o caso de alguns países asiáticos como o Japão, a Coreia do Sul e Formosa; onde apareceram redes estruturais de alta velocidade para substituir, no tráfego de passageiros, as redes antigas (11).

No caso da península Ibérica, Portugal iniciou a construção da sua primeira linha ferroviária, em direcção à fronteira (Linha do Norte até o Entroncamento e Linha do Leste até Badajoz) em bitola internacional de 1435mm. Entretanto a Espanha, por motivos de estratégia militar (receio



de utilização dos caminhos de ferro por parte de países invasores), inicia a construção dos seus caminhos de ferro numa bitola de via larga: 1676mm. Esta bitola existe também na Argentina e na Índia. Não restou a Portugal outra alternativa, senão mudar a bitola das suas recentes vias férreas, que já se aproximavam da fronteira; para a via larga que se veio a optar para a península. Presentemente é a Espanha que está em grande força a construir toda uma rede de alta velocidade em bitola internacional, tendo mesmo elaborado um plano para a substituição total da bitola ibérica (1676mm) naquele país. A Espanha é presentemente o segundo país (atrás da França), em quilometragem de vias de alta-velocidade, prevendo-se que brevemente passe para a primeira posição.

Também o maior país do mundo a Rússia, Filândia e novos países do Báltico, optaram por uma bitola diferente da internacional utilizada na Europa e América do Norte; assim estes escolheram também uma bitola considerada larga mas com 1524mm (Figura 11).

Presentemente não existe nenhum país com uma rede ferroviária utilizando bitola do grupo das bitolas mineiras na sua rede principal. Já nas chamadas bitolas de via estreita, existem alguns países com bitolas métricas nas suas redes principais; são todos os países da Africa sub-Saariana (incluindo Angola, Moçambique e República da África do Sul), alguns países asiáticos. Esta bitola foi também utilizada em vias férreas consideradas secundárias, construídas em zonas de traçados difíceis. É o caso das vias estreitas do Norte de Portugal (Linhas da Póvoa, Guimarães, Tâmega, Corgo, Tua, Sabor e Linhas do Vale do Vouga). Também o nosso país neste caso integrou as Linhas da Póvoa do Varzim e da Trofa na rede do Metropolitano do Porto, nova rede construída na bitola internacional; à semelhança do Metropolitano de Lisboa. A Linha de Guimarães foi mudada a bitola de métrica para a bitola ibérica (1676mm), permitindo aos comboios de longo curso (intercidades) ligarem Lisboa e o Porto a Guimarães (substituindo as vias estreitas).

As bitolas não limitam o peso por eixo, sendo o desgaste ondulatório uma constante.

## **1.4 Modos ferroviários**

### **1.4.1 Caminho de Ferro Pesado**

Quando na à década de 60 século XX se falava em caminhos de ferro, imediatamente se associava a uma ideia de elevado peso. Locomotivas pesadas, independentemente do tipo de tracção, rebocando composições com um elevado número de carruagens igualmente pesadas. O



conceito de comboio surge de uma unidade de tracção (locomotiva), com peso aderente suficiente para poder rebocar uma composição, seja de passageiros ou de mercadorias. As vias férreas permitiram tonelagens por eixo cada vez mais elevadas, atingindo na Europa as 22,5 toneladas/eixo podendo em alguns países atingir as 30 toneladas, como são os casos da Austrália, Estados Unidos da América e República da África do Sul.

#### 1.4.1.1 Passageiros



**Fig. 12 Comboio automotor pendular, foto do autor.**



**Fig. 13 Locomotiva universal, foto do autor.**

No serviço de passageiros, surgem vários tipos de serviços comerciais: os comboios rápidos de longo curso de marcha acelerada, os inter-regionais e regionais de longo curso e os suburbanos.

Presentemente, existem duas configurações técnicas para os comboios de passageiros: composições com locomotiva + carruagens e composições automotoras, havendo vantagens e inconvenientes em cada configuração. As composições automotoras dispõem do equipamento de tracção espalhado por debaixo da composição, dispondo de espaço total para os salões de passageiros.

Por outro lado, as composições que dispõem de locomotiva, perdem algum espaço não disponível para o transporte de passageiros. Presentemente, quer com composições de longo curso ou mesmo suburbanas, as locomotivas efectuam um serviço do tipo “push-pull” (puxa-empurra), ou seja; deixa de ser necessária a manobra de inversão da máquina no fim da viagem, pois esta tanto pode puxar a composição como empurra-la. Se uma locomotiva apresenta um



peso total em ordem de marcha na ordem das 80 toneladas, uma automotora dispõe de uma unidade motora de menor peso, mas também de menor potência o que poderá exigir mais do que uma unidade motora. Para efeitos de desgaste de via férrea, teremos uma unidade motora pesada de elevada potência, versus mais do que uma unidade motora (portanto mais eixos motores) de menor peso por eixo e menor potência disponível. O caminho de ferro pesado convencional, poderá circular a velocidades até os 220 Km/h, em ambas as configurações atrás descritas. No nosso país, a nossa rede convencional de caminhos de ferro dispõe de serviços do tipo “Alfa Pendular” (Figura 12) efectuados por comboios automotores de composição fixa de seis carruagens que circulam a uma velocidade máxima de 220 Km/h e de serviços inter-cidades compostos de locomotiva (Figura 13) e um conjunto variável de carruagens, que circulam a 200 Km/h de velocidade máxima (a limitação a 200 Km/h é devido às carruagens).

Alguns países como a Itália, dispõem de comboios de composição fixa de dez carruagens com duas locomotivas (uma em cada extremidade). Com esta configuração evitam manobras no fim de cada viagem, evitando o “push-pull”.

#### **1.4.1.2 Mercadorias**

O caminho de ferro apresenta-se como um bom meio de transporte para o transporte de mercadorias. De modo geral apresenta uma maior capacidade de carga por vagão do que o concorrente camião, podendo apenas uma locomotiva puxar centenas ou mesmo milhares de toneladas de carga. Quando necessário recorre-se à dupla (tripla ou mais...) tracção. São frequentes na Austrália, África do Sul ou mesmo Estados Unidos da América, comboios de mercadorias com 20.000 toneladas de peso bruto rebocado (2).

Esta capacidade torna os serviços de mercadorias por caminho de ferro rentáveis sob o ponto de vista económico.

O desenvolvimento das unidades de tracção, levou a que as modernas locomotivas disponham de sistemas de doseamento da potência necessária ao arranque de um comboio, evitando a descolagem das rodas por sobreposição dos esforços de atrito. Poderemos mesmo dizer, que as unidades modernas de material circulante conseguem usar o atrito ao extremo.

A este desenvolvimento esteve associado o aparecimento da electrónica de potência, que substituiu os antigos sistemas de graduação de corrente de actuação pelo maquinista, por sistemas de regulação electrónicos com sistema de anti-patinagem.



Em 1977 dois construtores europeus de material circulante, responderam a um concurso público internacional, para o fornecimento de locomotivas universais (passageiros e carga), lançado pelos caminhos de ferro de passageiros Norte Americanos (AMTRAK). Estas unidades destinavam-se ao “North-East corridor”, linha eslrtrificada entre Boston-New York-Washington DC. Os ferroviários americanos riam-se das locomotivas europeias de apenas quatro eixos, pesando 101 toneladas, que se destinavam a substituir unidades dos anos 40 com 238 toneladas de peso (seis eixos motores e quatro portadores).

A extraordinária revolução e rendimento de tracção da regulação electrónica de velocidade, associado a frenagens reostáticas com recuperaço de energia (na época em embrião) levou a que estas unidades trazidas da Europa, ultrapassassem todas as expectativas, cumprindo na íntegra as especificações norte americanas. A escolha da AMTRAK recaiu na então ASEA, deixando para trás o fabricante francês Alstom. Estas locomotivas, ainda hoje em serviço têm a alcunha de “Mighty Mouse” (1).

#### **1.4.2 Eléctricos**

A adaptação do caminho de ferro às cidades faz-se através dos sistemas de carros eléctricos. A ausência de modos de transporte concorrentes, levou a que desenvolvessem redes de carros eléctricos nas principais cidades do mundo. Os eléctricos surgem então como a única alternativa viável para o transporte de pessoas e bens (em alguns casos), sendo instalados mesmo em carreiras de muito fraca afluência de passageiros. Verifica-se com este meio de transporte, pela primeira vez, que este “gerava” clientes atraídos pela fácil acessibilidade; constituindo um dos primeiros promotores do desenvolvimento urbano. Entre o princípio do século XIX e o início da primeira guerra mundial (1914), são instalados milhares de quilómetros em redes de eléctricos. A título de informação referimos o facto de no Reino Unido haver, neste período, mais de 200 redes de eléctricos (2).

Desenvolveram-se neste período vários sistemas urbanos, interurbanos e regionais, também chamados de vicinais. Em todas as cidades, as redes de eléctricos marcavam presença, pela sua dimensão, nos Estados Unidos da América os chamados “Interurbans” faziam ligações entre cidades e povoações de menor dimensão, ligações essas inclusive em marcha acelerada. Na Europa, os chamados vicinais permitiam por exemplo que se viajasse por toda a Bélgica, ou de Milão até à Suíça. Portugal dispõe de um exemplo de uma linha vicinal de eléctricos; trata-se do eléctrico de Sintra à Praia das Maças e Azenhas do Mar no passado (Figura 14).



O aparecimento do transporte rodoviário, ainda que numa fase incipiente, veio terminar com algumas das linhas regionais de baixo número de passageiros. Os operadores de transporte “penduravam” os seus serviços nas redes de estradas, à medida que estas iam aparecendo, libertando-se dos encargos das suas próprias infra-estruturas. Mas foi após a segunda guerra mundial que, com o desenvolvimento dos motores Diesel, associados à necessidade de reconstrução de alguns territórios, que veio a ditar o desaparecimento de todas as redes de eléctricos, que não as urbanas das grandes cidades.



**Fig. 14** Linha vicinal do Elétrico de Sintra, foto Bob Lennox Docherty.



**Fig. 15** Elétrico PCC dos anos 30's, internet.

No final da década de 30, alguns gestores de redes de carros eléctricos americanas, vendo o panorama de decréscimo dos sistemas e prevendo um futuro negativo para o modo, reúnem-se numa conferência de presidentes de empresas, com o fim de desenvolver um novo tipo de veículo que se venha a melhor adaptar às condições de tráfego da época e futuras. Assim, desta reunião surgiu um grupo de trabalho composto por empresas de transportes e construtores, que desenvolveu um veículo que veio a constituir as configurações técnicas do futuro: o PCC “President Conference Car” (Figura 15) (12).

Este veículo apresentou nos finais dos anos 30, as seguintes características técnicas inovadoras: carroçaria metálica, portas automáticas, desenho exterior inovador, bogies, engrenagens helicoidais, rodas resilientes (reduzidoras de ruído), travagem reostática, freios de emergência

electromagnéticos. Tratou-se de uma grande evolução para a época, um veículo “all-electric” (todo eléctrico), sem recorrer a sistemas pneumáticos. Os PCC's permitiram às redes de eléctricos urbanas sobreviverem, agora com veículos aptos às novas condicionantes de circulação em conjunto com os trânsitos das grandes cidades. Estava também aberta a configuração técnica, que viria orientar a evolução do modo (12).



**Fig. 16 O automóvel toma conta das cidades, internet.**

Infelizmente, cidades houve que já não aderiram a esta inovação. O transporte individual, associado a políticas de transporte que o beneficiavam e promoviam, políticas energéticas à base do consumo de petróleo, a inércia entretanto iniciada pelos encerramentos das redes vicinais e interurbanas que entretanto se criou, o aumento de custo do material circulante dada a perda do factor escala, políticas urbanas de desregulação do trânsito (falta de prioridades aos transportes públicos e de corredores em via própria dedicada nas cidades); ditou o fim para muitas redes urbanas, algumas eficazes e bem estruturadas, sendo os eléctricos a fase visível da decadência que se iniciou nos anos 50 e 60 em relação aos modos ferroviários.



Não podemos também deixar de referir a influência que a introdução das redes de Metropolitanos que entretanto surgiram no período pós-guerra, teve na substituição do modo eléctrico por redes de Metropolitanos.

Alguns países (ex: Alemanha, Áustria, Holanda, Itália, Suíça, Europa de Leste) e cidades (ex: Melbourne, Boston, São Francisco, Toronto, etc.), mantiveram teimosamente este modo de transporte nas suas grandes cidades, inclusive sendo responsáveis pelo seu desenvolvimento.

Com o primeiro grande choque petrolífero, nos anos 70, surgem algumas dúvidas sobre o desenvolvimento assentado apenas sobre o modo rodoviário. Congestionamentos, o “smog” (concentração de poluição provocada por baixa nebulosidade), ruído, insustentabilidade dos centros das grandes cidades, mudaram os pensamentos e tendências (Figura 16) (12).

O exemplo de cidades como Zurique, Viena, Amesterdão, Haia, Colónia, Dusseldorf, entre muitas outras, vistas como cidades sustentáveis, eficazes, detentoras de políticas de transportes fortes, denunciou um denominador comum: todas tinham eléctricos. Assim, ainda no final da década de 70, verifica-se o reaparecimento dos eléctricos em algumas cidades norte americanas e francesas. Estavam dados os passos para o reaparecimento em força deste modo de transporte, que se tem processado até os dias de hoje.

Este reaparecimento/investimento, para ter credibilidade política, romper com dogmas consolidados, ter a aceitação dos moradores e utilizadores, salvaguardou-se com características técnicas importantes: grande percentagem em via própria, elevada média comercial (similar à dos metros pesados), prioridade semaforica total, paragens com cais de acesso e coberturas, informação electrónica ao público, entre outras características importantes. Do inglês surge o nome “light rail”, abandonando o nome antigo de “tramway”; em França também lhe é dado o nome de “metro léger”. Surgem os metros ligeiros que falaremos em capítulo separado, por se tratar, no nosso entender de um modo ferroviário de futuro.



Fig. 18 Eléctrico de Lisboa, foto do autor.



Fig. 17 Metro ligeiro de Almada, foto do autor.



Fig. 19 Eléctrico de Milão, foto do autor.

Não podemos terminar este capítulo referente ao modo eléctrico sem referir a sua recente evolução. Se, como tudo indicava, o eléctrico evoluiria para o modo metro ligeiro; entretanto a indústria ferroviária aparece com um novo tipo de material circulante, o eléctrico rebaixado. Este material circulante, de imediato ganhou adeptos pela sua fácil acessibilidade. Qualquer lancil de passeio com 25 a 30 cm de altura, constituiria um cais de entrada, sem obstruções arquitectónicas (estrado do veículo à face com o passeio). Algumas redes de carros eléctricos, começaram a substituir os seus veículos mais antigos por novos rebaixados, modificando “up-grade” o tipo de serviço e uma vez mais trazendo melhoradas características de transporte (Figuras 17, 18 e 19).

Esta evolução, veículos rebaixados, trouxe posteriormente a reboque a indústria dos autocarros, que tem tentado cada vez mais rebaixar os estrados dos seus veículos, mas também deu ao modo eléctrico uma nova razão de existir.

Assim, encontram-se hoje algumas cidades com linhas de metro ligeiro, ligadas no mesmo sistema a linhas de eléctrico convencionais com veículos rebaixados. A evolução das redes de eléctricos convencionais, agora providas de veículos rebaixados, encontra um novo sucesso sustentado, ao ponto de uma cidade francesa; Bordéus, inaugurar o seu novo “tramway” (40 anos depois de circular o último eléctrico na cidade) optando pelo nome convencional em vez de metro ligeiro. Este novo sistema de carros eléctricos de Bordéus apresentou outra inovação que teve já seguimento noutras cidades: anulamento das catenárias nos locais históricos. Sistemas técnicos vários estão a surgir, de modo a que nos centros históricos não existam cabos aéreos captadores de energia, sejam carris de energia instalados no pavimento, que são apenas energizados durante a passagem do eléctrico, ou por armazenamento em baterias ou nos recentes super-condensadores.

### 1.4.3 Metropolitanos

Em plena revolução industrial, a cidade de Londres inaugura em Janeiro de 1863, seis quilómetros de linhas de comboio subterrâneo, ligando duas principais grandes estações: Paddington e Farringdon Street, através da City, coração económico da cidade (Figura 20). Esta linha possuía cinco estações intermédias, duas das quais interligadas com estações de caminhos de ferro à superfície: Euston e King’s Cross. Experiências várias de redução dos fumos das locomotivas a vapor, levaram à introdução de tanques com água nas locomotivas, para efectuar a lavagem dos fumos do escape (condensação) (2).

Resultou desta configuração técnica o desbloqueamento que existia para a introdução de comboios a vapor em redes subterrâneas, uma vez resolvido o problema dos fumos. Os comboios eram muito confortáveis, tendo o serviço sido de imediato um sucesso; nos primeiros seis meses registou uma média de 26.500 passageiros/dia. A



**Fig. 20 Rede metro de Londres, metro de Londres.**



empresa que construiu esta primeira linha subterrânea chamava-se “Metropolitan Railway”, tendo os utentes abreviado o nome para “Metro”. Surge assim o modo e o nome que iria ser utilizado por todo o mundo (2).

O segundo metro a abrir a seguir ao Londres, foi o Metro elevado de Chicago em 1892; seguindo-se Budapest em 1896, Paris em Julho de 1900, Nova York em Outubro de 1904 e Madrid em 1919. Mas é nas décadas de 50 e 60 que se vê surgir um grande número de redes de pequena/média dimensão, pelas capitais europeias e asiáticas. Tratando-se de redes isoladas, também nestes casos e apesar de surgirem sistemas com bastantes inovações técnicas, não existiram preocupações de standardização. Encontram-se diferenças a nível de captação da energia, de voltagem, traçados, dimensões de cais, de composições e carruagens, gabarit's, mesmo soluções diferentes a nível de instalação de via (11).

Tratando-se de obras de significativo porte, em cidades normalmente de grandes dimensões, os Metros apresentam-se como um símbolo das cidades onde estão instalados, sendo frequente encontrarem-se soluções arquitectónicas e artísticas muito interessantes. A imagem de modernidade trazida pelos Metros, fez com todos estes sistemas surgissem como redes isoladas, não possuindo interligações com os sistemas antigos existentes nas suas vizinhanças, pois encontravam-se na maior parte dos casos construídos com diferentes soluções técnicas.

Todas estas redes de Metro têm vindo a evoluir as suas redes, como é o caso de Madrid que ocupa presentemente o terceiro lugar mundial em extensão de rede. Algumas redes constituem o principal meio de transporte da área metropolitana onde se encontram instalados (11).

A UITP – “Union International des Transports Publics”, na sua pagina na internet apresenta o seguinte texto para definir a importâncias das redes de Metros:

### **Metros em figuras**

(...)

Em 2006, as redes de metro transportaram cerca de 155 milhões de passageiros por dia, ou seja, 34 vezes a média diária do número de passageiros transportados por aviação comercial. Esta comparação, claramente demonstra a importância económica e social no desenvolvimento organização e desenvolvimento de um sistema de Metro.



O Metro é o mais eficiente modo de transporte em termos de consumo de energia e de ocupação de espaço. Para se transportar até 50,000 passageiros por hora e direcção, um sistema de Metro precisa de um canal de via própria até 9 m de largura, onde os autocarros precisam de 35m, e os automóveis 175m. Um kEP (kg equivalente de petróleo) permite que uma só pessoa viajar mais de 48km por metro, 38km por autocarro, mas não menos de 19km por carro (13).  
(...)

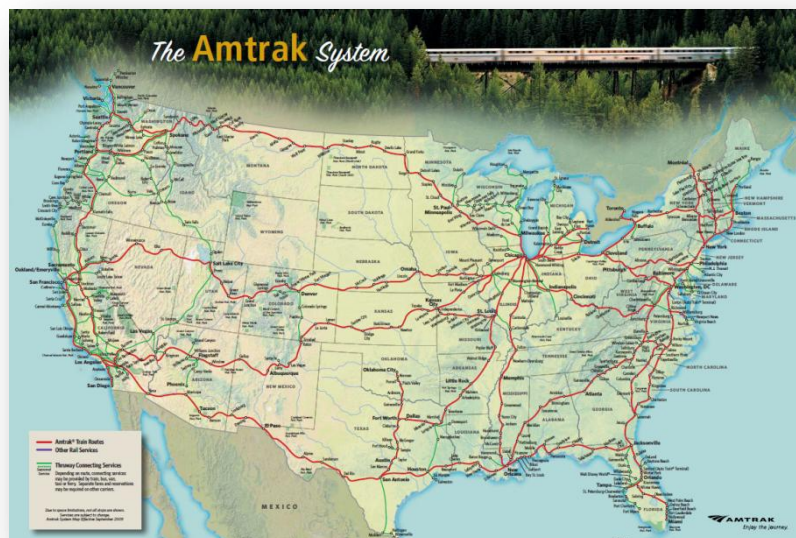
## **1.5 Modos Ferroviários de Futuro**

### **1.5.1 Décadas de 60 a 80**

Conforme referimos em capítulos anteriores, o caminho de ferro (falamos de todos os modos ferroviários) foi o primeiro modo de transporte a surgir na época industrial. Por esse motivo, de uma posição monopolista inicial, sem concorrência em que se desenvolveu e espalhou em todos os serviços e mercados, cedo começou a perder a sua hegemonia, à medida em que os modos rodoviários e aéreos se desenvolviam, ganhavam acessibilidade, retirando mercados tradicionalmente do caminho de ferro.

Após a 2ª guerra mundial, todas as empresas de caminhos de ferro encontram-se em situações económicas difíceis, dado disporem de infra-estruturas destruídas (nos países que entraram em guerra), ou obsoletas em face das novas solicitações ditadas pela concorrência. Assim, surge a nacionalização de todas as empresas ferroviárias europeias e consequente criação das empresas ferroviárias nacionais. O caminho de ferro ganha uma componente de serviço público, entrando agora numa nova era. Nos anos 60 na Europa inicia-se uma política de encerramentos de linhas secundárias e ramais que atingem dezenas de milhares de quilómetros. As linhas uma vez encerradas são de imediato levantados os carris, em França chega-se mesmo ao ponto de se dinamitarem túneis.

Nos Estados Unidos da América, todas as empresas ferroviárias (neste país sendo todas privadas) desistem do transporte de passageiros em completo declínio dadas as distâncias, o desenvolvimento da aviação comercial interna e duma política de construções de estradas. Assim, todas as empresas ferroviárias americanas dedicam-se a um sector cada vez mais lucrativo; o transporte de mercadorias.



**Fig. 21 Rede do Trans Europe Express e sistema de transportes de passageiros de longo curso da America do Norte, da AMTRAK, [www.AMTRAK.com](http://www.AMTRAK.com).**

O senado norte americano, pretendendo manter uma alternativa ferroviária de passageiros de longo curso (ligações entre cidades), cria nos anos 70 a AMTRAK, uma empresa do estado criada objectivamente para manter serviços de transporte de passageiros de via férrea no espaço americano.

A criação da UIC – União Internacional dos Caminhos de Ferro, é vista como um sopro de esperança para tentar no espaço europeu e mundial, criar normas, promover ligações internacionais entre países, contrariando a tendência de isolamento das empresas ferroviárias. Deste esforço de normalização surge um material circulante que permite viajar em diversas redes ferroviárias, ao possuir capacidade de receber diferentes tensões de catenária, gabarit's universais, compatibilidade em sistemas de sinalização. Afastadas algumas dificuldades técnicas, são criadas nas décadas de 50 a 70, ligações internacionais de prestígio no espaço europeu: os TEE – Trans Europe Express. Esta rede de comboios destinava-se a criar e fidelizar uma clientela de 1ª classe em serviços internacionais. Esta opção muito cedo demonstrou-se ser uma política comercial errada, dado ser um estrato de clientes que cedo fugiu para a aviação comercial, que se lançou com os aviões a jacto nos finais da década de 60. O mercado nacional de passageiros de cada rede ferroviária apresentava-se ainda com saúde. Nas mercadorias, no espaço europeu, contrariamente ao que se passava nos EUA, a fuga de clientes para a rodovia apresentava-se em decréscimo constante e sustentado (2).

A UIC democratiza os seus TEE – Trans Europ Express, abrindo-os a um mercado mais alargado, introduzindo em larga escala a 2ª classe. Muda o nome dos TEE para EC – Eurocity's.



Um comboio com designação de EC teria que possuir ar-condicionado, reserva electrónica de lugares e uma velocidade média comercial acima dos 90 Km/h em todo o seu percurso (8).

A França a Alemanha e a Itália, desenvolvem nos seus mercados domésticos, ligações rápidas com velocidades que já atingiam os 220 Km/h. Os serviços suburbanos das grandes cidades recebem grandes injeções de capital, executando-se neste mercado grandes obras: a criação do RER (Reseaux Express Regional) em Paris, os S-Bahn nas cidades alemãs, grandes obras em Madrid e nas grandes capitais europeias.

No final da década de 70, início dos anos 80, os mercados ferroviários de longo curso continuam em queda, proporcionalmente ao desenvolvimento da aviação e à automobilização das famílias. Nas mercadorias são anulados por toda a Europa os serviços de “detalhe”, também chamados de encomendas expresso. A grande perda de prestígio dos caminhos de ferro dá-se com o abandono dos correios. Tradicionalmente transportador preferencial dos serviços postais, vê-se perante a situação destes criarem os seus próprios serviços rodoviários de transporte. São alegados pelos correios, falta de pontualidade, roturas de carga, elevados custos, rigidez de oferta e de horários.

### **1.5.2 Ambiente**

A transferência de serviços que se verificou neste período nos serviços por caminhos de ferro, para a rodovia e aviação comercial, acompanhado com o aumento da mobilidade das populações em geral, cedo congestionou as cidades, redes de estradas nacionais e aeroportos europeus. Verifica-se neste período que os transportadores rodoviários de passageiros (autocarros), também aparecem a denunciar uma situação dramática, nos seus serviços, de quebra de passageiros, verificando-se que os modos ferroviários ainda tinham a preferência pelos utilizadores dos transportes, apesar da situação de permanente decréscimo de passageiros que se verificou ser global a todos os transportadores.

Entretanto, verifica-se que as concentrações atmosféricas globais de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso aumentaram bastante, em consequência das actividades humanas desde 1750 e agora ultrapassam em muito os valores pré-industriais, determinados com base em testemunhos de gelo de milhares de anos. A compreensão das influências antrópicas no aquecimento e arrefecimento do clima, aumentou desde a publicação do TRA (Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC), promovendo um nível muito alto de confiança (90%) de que o efeito líquido global



das actividades humanas, em média, desde 1750 foi de aquecimento, com uma força radiativo de  $+1,6$  [ $+0,6$  a  $+2,4$ ]  $Wm^{-2}$ .

O aquecimento do sistema climático é agora inequívoco, como está agora evidente nas observações dos aumentos das temperaturas médias globais do ar e do oceano, do derretimento generalizado da neve e do gelo e da elevação do nível global médio do mar. Em escalas continental, regional e da bacia oceânica, foram observadas numerosas mudanças de longo prazo no clima, as quais abarcam mudanças nas temperaturas e no gelo do Ártico, mudanças generalizadas na quantidade de precipitação, salinidade do oceano, padrões de vento e aspectos de eventos climáticos extremos, como secas, precipitação extrema, ondas de calor e intensidade dos ciclones tropicais.

A conclusão entretanto a que se chegou, de que a continuação das emissões de gases de efeito estufa nas taxas actuais ou acima delas, levará a um aquecimento adicional e induzirá muitas mudanças no sistema climático global durante o século XXI, as quais muito provavelmente serão maiores do que as observadas durante o século XX; levou à tomada de decisões internacionalmente de modo a se atingir um desenvolvimento sustentável (14).

#### **1.5.2.1 CQNUAC - Conferência Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas**

A CQNUAC (Conferência Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas, em inglês – UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) é um tratado internacional que foi resultado da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD) informalmente conhecida por Cimeira da Terra realizada no Rio de Janeiro em 1992. Este tratado foi assinado por quase todos os países no Mundo e tem como objectivo a estabilização de emissão GEE (Gases de Efeito de Estufa) para a atmosfera de forma a contrariar o aquecimento global. Este tratado ainda não fixou limites obrigatórios nas emissões e não incluiu dispositivos coercivos. Deixa no entanto fixada a necessidade de actualizações (protocolos) futuras para actualização dos valores e criação de limites obrigatórios para as emissões GEE.



O mais conhecido é o Protocolo de Quioto. Este trouxe ao tratado medidas mais poderosas apoiadas por leis. Neste protocolo ficam também definidas as medidas para a mitigação da mudança do clima pois não será possível interromper ou reverter a alteração do clima e o aumento da temperatura na superfície terrestre. Além da ideia de mitigação (=atenuação do efeito das alterações climáticas) é também referida a necessidade de implementação de mecanismos que nos permitam adaptar às mudanças que irão ocorrer por via da mudança do clima. Um dos princípios que fundamentam o Protocolo é o da responsabilidade comum mas diferenciada nas alterações climáticas, ou seja, as emissões GEE tem origem em diversos países ou grupos de países com diversos níveis de responsabilidade. Para definir estes níveis de responsabilidade os signatários da CQNUAC consideraram os seguintes conjuntos:

- Países do Anexo I (países industrializados);
- Países Anexo II (países desenvolvidos que pagam os custos para países em desenvolvimento);
- Países em desenvolvimento – Países Não Anexo I (14)

#### **1.5.2.2 Contribuições para a mitigação da mudança do clima**

Definem-se então as seguintes contribuições para a mitigação do clima. Novos investimentos em infra-estruturas na área da energia nos países em desenvolvimento, e a sua modernização nos países industrializados assim como políticas que promovam a segurança energética poderão criar oportunidades para que se alcancem reduções de emissões de gases GEE em relação aos cenários do RECE. Destacamos:

- ✓ Sistemas de transportes:
  - Aposta em sistemas de transporte privados com baixas emissões de GEE ou nulas como é o caso respectivamente dos motores híbridos e no futuro próximo os motores eléctricos dos automóveis;
  - Nas redes de transporte opção por sistemas ferroviários com zero emissões de GEE em detrimento de sistemas rodoviários com emissões de gases de efeito de estufa agregados;
  - Aposta nos biocombustíveis no período em que coexistem veículos com motores de combustão interna;
  - Optimização dos motores dos aviões de forma a reduzir as emissões GEE.



A criação do mercado do carbono poderá criar meios para que os produtores e consumidores invistam de forma significativa em produtos, tecnologias e processos com baixas emissões de GEE. Por outro lado as políticas deverão abranger instrumentos económicos, de financiamento e de regulamentação.

O futuro passará pelo desenvolvimento sustentável que é a forma mais correcta de mitigação da mudança do clima. Esta vontade implicará o uso de recursos não planeados inicialmente e o entendimento e concordância entre de todas as nações do planeta de contribuição e responsabilização das alterações climáticas.

### 1.5.2.3 Protocolo de Quioto

O Protocolo de Quioto incide nas emissões de seis gases com efeito de estufa:

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
- Metano (CH<sub>4</sub>).
- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O);
- Hidrocarbonetos fluorados (HFC);
- Hidrocarbonetos perfluorados (PFC).
- Hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>).

O Protocolo constitui um importante passo em frente na luta contra o aquecimento global, pois contém objectivos vinculativos e quantificados de limitação e redução dos gases com efeito de estufa. Globalmente, os Estados signatários do Anexo I da Conferência-Quadro comprometem-se a reduzir as suas emissões GEE em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990, durante o período 2008-2012. O Anexo B do Protocolo apresenta os compromissos quantificados assumidos pelos Estados signatários.

Os Estados-Membros da União Europeia terão de reduzir, em conjunto, as suas emissões de gases com efeito de estufa em 8% entre 2008 e 2012.

O Protocolo de Quioto prevê, para além do desenvolvimento de políticas e medidas nacionais, três mecanismos de mercado para atingir o objectivo global de redução: o comércio internacional de emissões (CELE), a implementação conjunta e o mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL).



#### **1.5.2.4 Créditos de Carbono – RCE**

Os Créditos de carbono ou Redução Certificada de Emissões (RCE) são certificados emitidos para um agente que reduziu a sua emissão de GEE.

Por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, corresponde a um crédito de carbono, ou seja:

Assim, aqueles países ou indústrias que não conseguem atingir as metas de reduções de emissões, tornam-se compradores de créditos de carbono. Por outro lado, aquelas indústrias que conseguiram diminuir suas emissões abaixo das cotas determinadas, podem vender, a preços de mercado, o excedente de "redução de emissão" ou "permissão de emissão" no mercado nacional ou internacional.

Os países desenvolvidos podem estimular a redução da emissão de gases causadores do efeito estufa em países em desenvolvimento através do mercado de carbono, quando adquirem créditos de carbono provenientes destes últimos.

Como já referimos, no âmbito do Protocolo, a União Europeia ficou, como um todo, obrigada a reduzir as suas emissões face ao ano base (1990) em 8 %, tendo esta quantidade sido repartida por todos os Estados membros, através do compromisso comunitário de partilha de responsabilidades. Portugal assinou o Protocolo de Quioto em 31 de Maio de 1998 e ratificou-o em 31 de Maio de 2002, onde assumiu o compromisso de limitar o aumento das suas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) em não mais que 27 %, no período de 2008-2012, relativamente aos valores do ano base (14).

#### **1.5.3 Alta Velocidade**

Depois de uma primeira tentativa de mudar a bitola da sua rede ferroviária em 1915, de bitola métrica para internacional, o Japão em 1 de Outubro de 1964 inaugura a primeira ligação de alta velocidade no mundo, entre Tokio e Osaka o “Shinkansen” (Figura 22 e 23) (4).



Fig. 22 Shinkansen e o monte Fuji, Pictorial Encyclopédia of Railways Hamilton Ellis.



Fig. 23 Shinkansen 1964, O. S. Nock.



Fig. 24 Rede de alta-velocidade no Japão, High Speed in Japan, Peter Semmens e Mikió Miura.



Fig. 25 Interior do Shinkansen, High Speed in Japan, Peter Semmens e Mikió Miura.



A sua rede ferroviária principal, encontrava-se esgotada: a bitola métrica, bastante limitativa nas velocidades atingidas, traçados sinuosos, pendentes elevadas limitavam o desempenho agora exigido pela moderna sociedade japonesa. Assim, na sequência de diversas tentativas no passado, são dados no final da década de 50 passos significativos para o lançamento de um projecto nacional; construir de raiz toda uma rede ferroviária de grande capacidade, em bitola internacional; decidindo-se também que nesta nova rede ferroviária se praticariam velocidades elevadas. Assim, no princípio dos anos 60, o Japão decide investir num meio de transporte cuja tecnologia tinha mais de 100 anos, criando toda uma rede nova de raiz com todas as características das actuais linhas de alta velocidade (Figura 24) (4).

Estas vias férreas serão construídas grande parte em viadutos e túneis, em terrenos extremamente sísmicos, em zona de clima caracterizado por ter grandes amplitudes térmicas. As velocidades iniciais, à época da sua abertura rondavam os 210 Km/h, sendo que hoje se encontram muito próximas dos 320 Km/h (4).

Esta rede de alta velocidade caracteriza-se por grandes frequências horárias, de comboios de grande capacidade (alguns com dois pisos), com uma exploração muito similar à de um sistema de metro (Figura 25). Foram tecnologias inovadoras à época, sistemas de segurança, sinalização, tracção, transmissão de corrente, suspensão, etc, entre outras. Salientamos contudo a manutenção do sistema roda carril, utilizando os perfis tradicionais. Só 20 anos depois, a França, país tradicionalmente investidor e utilizador do caminho de ferro, inaugura o primeiro troço (Paris – Lyon) do que será a primeira fase da maior rede de alta velocidade do mundo. A França dispôs desde sempre de uma excelente rede de caminhos de ferro, toda ela em bitola internacional. Excelentes traçados desde sempre que permitiram aos comboios franceses andarem a velocidades muito elevadas. Têm sido estes que desde 1955 têm vindo a bater recordes sucessivos de velocidade sobre os carris: 1955 (331 Km/h), 26 Fevereiro/1981 (380 Km/h), 1996 (515Km/h) e Abril/2007 (574,8 Km/h). Nos anos 80, velocidades de 200 Km/h em França existiam já em muitas vias principais de ligação de Paris a muitas regiões. Sobrecarregamento aéreo e rodoviário de alguns eixos de França, levou ao entendimento da necessidade de prestar serviços competitivos com a aviação comercial até distâncias de 700 Km. Assim se criaram as auto-estradas ferroviária e se inaugurou o TGV – Train de Gran Vitesse (15).



Fig. 28 TGV 1980, [www.SNCF.com](http://www.SNCF.com).



Fig. 27 Eurostar TGV Túnel do canal da Mancha, High Speed in Europe de David Haydock.



Fig. 26 Alta velocidade espanhola, High Speed in Europe de David Haydock.

Desde a abertura da primeira fase em 1980 (Figura 26), nunca mais se parou com um plano de modernização. Contrariamente ao Japão em que os comboios de alta velocidade se encontram restritos à sua rede específica, em França, um qualquer comboio de alta velocidade, sai de uma das centenárias gares de Paris, nos subúrbios entra na LGV (ligne de gran vitesse) onde reduz substancialmente tempos de percurso, saindo posteriormente para a rede antiga, podendo atingir todos os destinos. A abertura do túnel do canal da mancha, a abertura de ligações internacionais, levam presentemente o TGV ao Reino Unido (Figura 27), Bélgica, Holanda, Alemanha Suíça e Itália.



Em Espanha, a rede de bitola ibérica deste país carecia de grandes investimentos, dados os tempos dilatados entre as principais cidades. Com a exposição mundial de Sevilha em 1992, este país inaugurou o primeiro troço de alta velocidade entre Madrid e esta cidade: o AVE – Alta Velocidade Espanhola. Seguiu-se posteriormente a ligação Madrid – Barcelona e Madrid a Valladolid com um túnel de mais de 20 Km na cordilheira do Guadarrama a norte de Madrid (Figura 28). Está a poucos meses da finalização e consequente abertura ao tráfego, a ligação de Madrid a Valência, o que tornará a Espanha como o país que no mundo terá maior extensão de linhas de alta velocidade (à frente da França, China e Alemanha).

Em construção encontram-se várias linhas como: a ligação de Barcelona à França, Madrid a Lisboa, Madrid a La Coruña e Vigo, entre outras.

A nível mundial, presentemente existem planos de alta velocidade, alguns em avançado estado de lançamento: na Argentina, no Brasil (Rio – São Paulo – Campinas), nos Estados Unidos (TGV Califórnia e mais nove projectos), Portugal, Espanha, França, Itália, Reino Unido, Bélgica, Rússia, Japão e Coreia do Sul.

A alta velocidade é um “segundo fôlego” para o caminho de ferro e também para o mundo em que vivemos, apresenta-se hoje e no futuro como um meio alternativo, limpo, não poluente, rápido, constituindo um excelente emprego do desenvolvimento de soluções dos diversos ramos da engenharia; sendo objecto do nosso estudo (15).

### **1.5.3.1 Mercadorias versus Alta Velocidade**

Muito se tem falado do transporte de mercadorias e das linhas de alta velocidade. A questão da viabilização dos investimentos também no mercado dos transportes de mercadorias, tem sido um assunto bastantes vezes abordado mas não suficientemente esclarecido. O que se passa então? Qual o panorama existente actualmente?

Para melhor se entender a situação presente, há que referir o seguinte:

- As vias férreas de alta velocidade são investimentos só justificáveis para grandes tráfegos de passageiros, ligando grandes centros urbanos;
- Prevê-se que um serviço deste tipo tenha uma capacidade própria de “gerar” novos clientes e mercados, dada a nova acessibilidade e encurtamento de tempos de transporte;
- Uma via de alta velocidade deve ser projectada com traçados que permitam que no futuro se aumente a velocidade dos comboios e a sua cadência quando a relação mercado/economia/técnica assim o permitir e exigir. Há que se retirar lições do caso da



alta velocidade Japonesa, que se iniciou em 1964 a 210 Km/h, praticando hoje velocidades maiores na ordem dos 300 Km/h.

Do anteriormente referido, conclui-se que uma via de alta velocidade terá grande frequência horária de comboios, todos a velocidade regular, com tendência a aumentar ao longo da vida útil da infra-estrutura.

Estas três condicionantes limitam a introdução de composições de mercadorias que circulem a velocidades muito mais baixas dos que os comboios de passageiros. Existem também questões relacionadas com a infra-estrutura da via férrea. Os comboios de alta velocidade têm limitações de peso, assim como as próprias vias de alta velocidade, uma vez que massas em muito alta velocidade exigem bastante das estruturas. Também as suspensões dos comboios estão preparadas para não provocarem danos nas vias em alta velocidade.

Assim, quando em certas vias de alta velocidade (por ex: em França), passam comboios intervalados a menos de dez minutos a 300 Km/h, as vias têm que se encontrar em excelentes condições de manutenção, não podendo estar sujeitas à passagem de vagões com diferentes pesos por eixo, locomotivas convencionais pesadas, em material circulante que não dispõe duma monitoria electrónica a todos os seus pontos técnicos nevrálgicos e que não está sujeito a uma manutenção tão apertada. Para além de se disporem de cargas que poderão não estar condicionadas para se cruzarem com composições aerodinâmicas de alta velocidade.

O que até à data se tem passado nas redes ferroviárias que dispõem de alta velocidade, é o aproveitamento da disponibilização, por parte dos serviços de passageiros, das linhas antigas agora substituídas (duplicadas) pelas novas vias. Ao saírem os serviços de comboios rápidos das vias convencionais, deixam a possibilidade de nestas vias se transportar intensivamente mercadorias.

No caso português, existem factores críticos distintos:

- Uma procura crescente do mercado de mercadorias, de ligação do porto de Sines à fronteira de Badajoz;
- Inexistência de uma linha paralela à de alta velocidade, a linha existente é indirecta, seguindo através do Entroncamento, Abrantes, Ponte de Sôr e Portalegre, não dispondo de factores de competitividade;

- As linhas deixadas disponíveis pelos comboios de passageiros são de bitola ibérica limitando o acesso para além dos Pirinéus.

Assim, foi decidido construir-se uma linha entre Évora e a Fronteira em bitola ibérica, para viabilizar uma linha directa de mercadorias de Sines à fronteira de Elvas/Badajoz. A bitola limitará o acesso fora da península, contudo o mercado actual de mercadorias é todo realizado no espaço da península.



Fig. 29 TGV postal, internet.

A figura acima, mostra uma das duas composições de alta velocidade que existem para o transporte postal. Trata-se de uma composição do tipo que poderá ser o transporte de carga por alta velocidade no futuro, num sistema muito similar ao da carga aérea. Contudo será limitado a cargas de maior dimensão.

#### 1.5.4 Metros Ligeiros

Falámos no ponto 1.4.2 no modo eléctrico e na sua evolução. Constatámos que o desenvolvimento do modo eléctrico bifurcou em dois caminhos distintos; as modernas redes de eléctricos convencionais e os metros ligeiros.

Nos anos 60, a rede de eléctricos da cidade alemã de Colónia, perante um aumento drástico do tráfego rodoviário, nas suas avenidas centrais, que inviabilizava o elevado movimento dos eléctricos desta grande rede que se une fisicamente à rede de eléctricos da cidade de Bona; tinha duas alternativa: encerrar linhas substituindo-as por autocarros ou proceder a uma solução de “enterramento”. Nos anos 60 ninguém punha ainda o aumento do tráfego rodoviário em causa, poucas vozes à época se erguiam contra o que parecia um futuro incontornável.



**Fig. 30** Pré-metro Bruxelas, Light Rail Review.



**Fig. 31** Rampa de saída do túnel dos eléctricos de Colónia, Rhein Ruhr Stadbahn Album 1.

Assim se iniciou uma solução que se entenderia como um “pré-metro”, não havendo necessidade de se construir um metro, até porque se dispunha de uma rede de eléctricos moderna eficaz. Passava-se a enterrar as linhas de eléctricos, nos seus pontos de maior conflito. Estes túneis e estações seriam construídos com dimensionamento a pensar que num futuro circulariam composições de metro em vez de eléctricos (Figura 31) (16).

Não existindo veículos rebaixados à época, decidiu-se construir cais altos (90 a 100 cm de altura), altear progressivamente o pavimento dos eléctricos que passariam por estas vias enterradas. Desenvolveu-se um tipo de porta que permitia a saída nivelada em cais alto, ou que se desdobrava em degraus para simples paragens colocadas na rua. Estas vias que nos subúrbios se apresentavam como simples linhas de eléctricos, ao chegar ao centro de Colónia, entravam em rampas, seguindo velozmente à semelhança dos metros pesados até as estações. Uniformizaram-se as médias comerciais nas linhas à superfície, dotando-as de vias próprias, prioridades semafóricas totais, cais altos nas paragens de elevado movimento. Este desenvolvimento veio a resultar no que se chama hoje de metro ligeiro. O seu sucesso levou ao abandono da ideia inicial de “pré-metro” nunca mais se falando no objectivo final (16).

O metro ligeiro adaptava-se extraordinariamente às condições técnicas e económicas de cada projecto e cidade (Figura 30). Permitia um desenvolvimento diferente para cada situação, podendo circular em túnel, em vias próprias, ou mesmo no seio do espaço urbano. Constituía uma solução à medida, bastante menos dispendiosa. Assim, Colónia foi um marco na criação de um novo modo de transporte ferroviário; à época as soluções adoptadas por esta cidade fizeram

escola, tendo-se espalhado inicialmente por todas as cidades alemãs. Algumas redes de eléctricos decidiram efectuar nas suas linhas de maior movimento “upgrades”: Milão criou o Metrotranvia, as cidades alemãs deram a este modelo o nome de “stadtbahn” em vez do tradicional “strassenbahn”. Mas os nomes que vieram a melhor definir este modo foi o de Metro Ligeiro ou Light Rail (17).



Fig. 33 - Metro ligeiro de Berlin



Fig. 32 - Paragem de metro ligeiro de Berlin

O sucesso deste modo tem sido muito elevado, pois permite criar linhas de metro ligeiro dimensionadas para baixos tráfegos de passageiros, constituindo uma alternativa ao modo autocarro ou mesmo eléctrico moderno. Mas, também pode ser dimensionado para grandes capacidades, sendo alternativa aos dispendiosos metros pesados e mesmo ser alternativas às linhas suburbanas de comboio pesado.

Hoje, não há país que não possua uma ou várias redes de metro ligeiro. Este modo tem tido grande implantação no continente americano: Estados Unidos da América (várias cidades), Canadá (várias cidades), México, Brasil e Argentina. Na Europa tem sido muito grande a implantação deste modo: Portugal (Porto, Almada e futuramente Coimbra), Espanha (Madrid três sistemas distintos, Barcelona dois sistemas distintos, Valência, Zaragoza, Valladolid, Bilbao, Sevilha, Alicante, Santa Cruz de Tenerife nas ilhas Canárias, entre outras), França (várias cidades), Alemanha (Figuras 32 e 33), Reino Unido (várias cidades), Irlanda, Grécia, Luxemburgo, Bélgica, Holanda, Itália. Também na Europa algumas cidades com eléctricos procederam ao upgrade de algumas carreiras das suas redes de eléctricos, com especial incidência no bloco leste. Não pretendemos listar todas as redes mas sim dar uma ideia do “boom” que foi e está a ser o aparecimento deste modo, ao ponto de podermos afirmar que neste



século XXI, ainda não se abriu nenhuma rede de Metro pesado de raiz, apenas se verificando prolongamentos de redes existentes. Os Metros Ligeiros são presentemente opções mais adequadas e credíveis de investimentos, tendo em conta que o transporte próprio é e será sempre uma presença concorrente constante.

Existem casos de Metros ligeiros que substituíram serviços prestados por caminho de ferro pesado (12).

O caso do Metro do Porto é o que consideramos um “case study” (Figura 34). Em pouco mais de dez anos, passou-se do “nada” para o maior Metro do país. Um projecto em que os mesmos veículos circulam em; túneis no centro do Porto, em vias próprias à superfície e em antigos canais ferroviários de caminho de ferro de bitola métrica como eram as linhas de via estreita da Póvoa do Varzim e da Trofa. Operam num espaço englobando várias aglomerações e autarquias: Porto, Gaia, Gondomar, Matosinhos, Aeroporto de Pedras Rubras, Vila do Conde, Póvoa de Varzim, Maia. Presentemente a sua rede ronda os 60 Km de extensão (superior ao de Lisboa de 40 Km), tendo planos de expansão em curso que dotarão esta rede de uma centena de quilómetros. A sua velocidade média comercial é similar à do Metro de Lisboa, apesar de operar em diferentes e várias condições; tendo ultrapassado a cifra de 100 milhões de passageiros/ano em 2008.



Fig. 34 Metro do Porto, foto do autor.



Este exemplo nacional mostra a credibilidade e força deste modo ferroviário recente, que classificámos como modo de futuro em conjunto com a alta velocidade.

A UITP – “Union International des Transports Publics”, na sua pagina na internet apresenta o seguinte texto para definir a importâncias das redes de Metros Ligeiros (Light Rail):

### **Light rail in figures**

(...)

Today, there are some 400 systems in operation worldwide, with constructions in some 60 more and plans in well above 200.

Europe is the densest LRT continent with 170 systems in operation and nearly 100 more in construction or planning, but North America (30 in operation, 10 in construction) and Asia are also very active in opening new systems.

The next emerging LRT region is the Middle East where the post-oil age is being actively anticipated.

Capacity of light rail: 6-axle tram: 170 pax / multi-articulated light rail vehicle: 200-350 pax (13).

(...)

### **1.5.5 “Tram-Train”**

Na Alemanha, a cidade de Karlsruhe decidiu aumentar a eficiência do seu serviço de transportes públicos, neste caso dos eléctricos. Esta cidade de 300 mil habitantes, que se expandia para os seus subúrbios, possuía uma rede de eléctricos eficiente, mas pequena e localizada essencialmente na zona central da cidade. Sendo uma zona de entroncamento de várias vias de caminho de ferro, decidiu-se desenvolver um tipo de serviço público inovador; expandir os serviços da sua eficiente rede de eléctricos, introduzindo-os nas vias de caminho de ferro, que partilhariam com os comboios da DB-Deutsh Bahn, efectuando um serviço suburbano.

O material circulante a desenvolver partilharia as vias do caminho de ferro e dos carros eléctricos, ambas as redes de bitola internacional. Assim, dificuldades técnicas como o dimensionamento dos veículos, diferentes correntes de catenárias (eléctricos=600 Vcc,

comboios=15.000 V16Hz), questões de segurança, velocidades, entre outras, foram sendo ultrapassadas, criando-se um veículo híbrido.



Fig. 36 Tram-Train ao lado do ICE alemão, internet.



Fig. 35 Eléctrico ao lado do Tram-Train em Karlsruhe, foto do autor.



Fig. 37 Tram-train a sair das vias dos CF para o espaço urbano, foto do autor.

Esta inovação permitiria criar um serviço suburbano de qualidade inexistente, utilizando as linhas de caminhos de ferro; deixando os passageiros na zona central da cidade, utilizando a rede de carros eléctricos existente. O serviço foi implantado, sendo um sucesso; tinha sido criado um novo tipo de modo ferroviário. Deitaram-se abaixo barreiras psicológicas uma vez que a tecnologia assim o permitiu.

Este modelo de sistema foi também logo adaptado por outras cidades alemãs, tendo o sistema também sido exportado para os Estados Unidos, e Europa; surgiu o conceito de Tram-Train.



O desenvolvimento do material circulante utilizado pelo Tram-Train, evolução do eléctrico e do Metro Ligeiro, vê novas evoluções com o aparecimento de um modelo a Diesel e outro dual que poderia funcionar sem catenárias a Diesel ou a electricidade quando em vias electrificadas. Estavam ultrapassadas todas as dificuldades técnicas.

Este modo de transporte que consideramos de futuro, que se encontra em desenvolvimento, permitiu desenvolver um material circulante ligeiro que poderia ser utilizado também pelos caminhos de ferro. Assim, deu também um segundo fôlego aos serviços de caminhos de ferro regionais que se encontravam em decadência dados os custos de exploração versus pequeno número de passageiros; ao permitir substituir velhas automotoras pesadas por veículos ligeiros (tipo eléctrico) articulados, de tracção eléctrica ou a Diesel.

Cidades que dispõem de Tram-Train:

- Karlsruhe, Saarbruecken, Kassel, Nordhausen, Chemnitz, Rijn-Gouwe-Lijn, Alicante, Mulhouse, Liberec...

## **2. Desgaste Ondulatório**

### **2.1 Contacto Roda-Carril**

Para além de uma visão histórica, apresentámos nos capítulos anteriores uma noção da evolução técnica dos diversos tipos (segmentos) e serviços existentes nos caminhos de ferro; com incidência para os modos actuais e futuros. Trata-se do “contexto operacional” um conhecimento muito importante para se poder abordar, analisar, compreender as condições e condicionantes ao aparecimento do Desgaste Ondulatório e das consequências que este terá nos serviços.

O contacto roda-carril é a característica principal do caminho de ferro. É surpreendente perceber que a área de contacto entre a roda e o carril é do tamanho de uma pequena moeda de 10 cêntimos ( $\pm 1 \text{ cm}^2$ ). Contudo, a passagem de uma roda é definida como um evento irreversível, resultando no desgaste da superfície de contacto através da descolagem de pequenas partículas de poeira metálica, antes do seu estado final de desgaste por fractura de fadiga dos metais.

Assim, os desgastes provocados pelo intenso movimento, na infra-estrutura de via, constitui o calcanhar de Aquiles financeiro do caminho de ferro.

Quando o caminho de ferro surgiu, existem registos de ocorrências frequentes com origem em problemas técnicos: carris partidos, eixos e rodas fracturados. Muitas investigações, experiências



foram levadas a cabo, ao longo destes 150 anos de existência com o fim de reduzir ou mesmo erradicar estes problemas.

Tradicionalmente, a tecnologia do contacto roda-carril, encontrava-se dividida pela fronteira da linha de contacto: tradicionalmente, a engenharia mecânica estudava o material circulante, ficando a infra-estrutura de via férrea a cargo da engenharia civil. Infelizmente esta demarcação manteve o estudo do contacto roda-carril até há poucos anos numa zona de “ninguém”.

Foi a necessidade de atingir, cada vez velocidades mais elevadas; 300 Km/h em alta velocidade e os 220 Km/h em comboios convencionais, reduzir os elevados custos provocados pelo tráfego ferroviário; que levou a uma necessidade de melhor estudar o contacto-roda carril. Desenvolvimentos nos estudos da metalurgia e da tribologia, puxaram esta fronteira para o seio da engenharia mecânica.

### **2.1.1 Introdução**

Rodas de formato cónico dispendo de uma flange, circulando sobre carris de aço, permitem um guiamento quando se circula em recta, de modo a não existir contacto físico da flange com o carril. Esta disposição foi definida de origem pelos técnicos pioneiros do caminhos de ferro: George Stephenson e Isambard Kingdom Brunel. Ambos explicaram detalhadamente o mecanismo de guiamento proporcionado pelas rodas de formato cónico.

Se os primeiros caminhos de ferro circulavam com um peso máximo por eixo de 10 toneladas, a uma velocidade até 60 Km/h em carris de 30 Kg/m, cedo estes valores foram incrementados. Assim, no início do século XX já se atingiam velocidades de 90 Km/h, 120 Km/h em 1946, 160 e 200 Km/h nos anos 80. Também o peso por eixo aumentou: 13 a 14 toneladas em 1905, 17 toneladas em 1940 e 22 toneladas em 1960. Na Europa algumas linhas específicas como o Kiruna-Narvick (Suécia) praticam as 30 toneladas por eixo, valores normais nos Estados Unidos e Austrália, onde também atingem em certos trajectos atingem as 40 toneladas por eixo. Para aguentar estas cargas pontuais, também os carris foram aumentando dimensionalmente: 30Kg/m, 36 Kg/m, 43 Kg/m, 50 Kg/m, 54 Kg/m e 60 Kg/m. De pequenas secções de carril de aço forjado, até as barras longas com 18 metros de comprimento, onde tratamentos metalúrgicos, cada vez mais apurados: redução de fósforo e de contaminantes, baixo teor de hidrogénio, aditivos à base de vanadium ou alumínio; mudaram as características destes à fractura e outros defeitos metalúrgicos. Também o desenvolvimento dos processos de análise, à base de ensaios não



destrutivos, aumentaram a qualidade dos materiais instalados nas infra-estruturas a um nível de resistência e segurança.

Mas não são só as altas velocidades e os pesos por eixo que têm vindo a incrementar o estudo do sistema roda-carril. A introdução da electrónica e processos informáticos de estudo, desde os anos 80 nesta área de estudo, permitiram uma optimização da regulação do controlo do atrito na tracção e frenagem aumentando em muito o desempenho (performance) das circulações; mas também trazendo novos problemas. Apesar de se terem efectuados bastantes estudos com resultados práticos resultantes, é geralmente assumido que uma completa análise do desgaste ondulatório, está ainda por se fazer, dado o elevado número de variáveis e as ainda limitações informáticas e de cálculo existentes.

É expectável que a questão das alterações climática e aquecimento global, coloque os caminhos de ferro num estágio de maior exigência. Em conclusão poderemos afirmar que altas velocidades, elevados pesos por eixo, optimização do desempenho nas capacidades de tracção e frenagem, são motivos para continuar a promover a investigação, e inovação; aumentando as exigências de qualidade e quantidade.

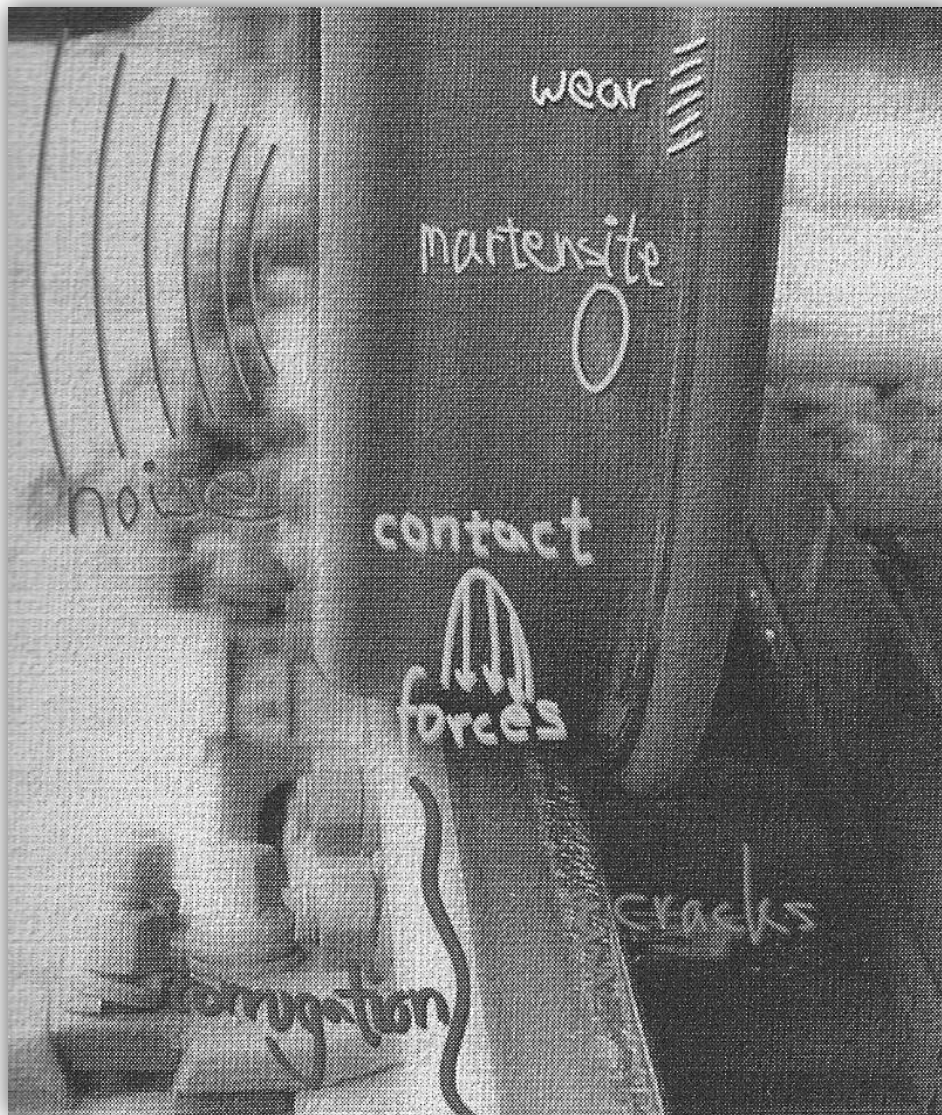
Muito trabalho encontra-se ainda por fazer na redução da manutenção, redução dos custos operacionais, melhorias ambientais e na segurança.

### **2.1.2 Características do Interface Roda-Carril**

O interface entre a roda e o carril é caracterizado pela sua alta eficiência. São extremamente reduzidas as perdas no contacto (deflexão) entre as superfícies rígidas da roda e do carril, que se encontram num reduzido ponto de contacto. Esta característica permite condições favoráveis de eficiência energética na tracção e transporte de massas (Figura 38) (18).

Contudo, neste reduzido contacto existem também alguns fenómenos indesejáveis. Extremamente elevados esforços verticais de contacto, mas também esforços laterais e longitudinais, induzem à existência de stress nos materiais como cedências e fadiga. Forças de contacto combinadas, provocadas pelo rolamento da roda, produzem desgastes. Esforços de tracção e frenagem podem provocar descolamentos/deslizamentos que levem ao aplanamento da roda (lisos) e aumentos de temperatura ao ponto de atingir-se diferentes fases dos materiais ou mesmo fracturas por alteração das características metalúrgicas dos materiais. Estes fenómenos

podem criar irregularidades, alterações dos perfis da roda ou do carril, reduzindo o comportamento dinâmico do veículo, aumentando os esforços de contacto, vibrações e ruído que resultam no desconforto dos passageiros e áreas envolventes à via férrea.



**Fig. 38** Implicações do contacto roda/carril, Ekberg, *Railway Gazette International*.

Cabe à manutenção a correcção destes defeitos, que se não forem executados poderão levar a situações de acidente por fractura ou mesmo galgamento do verdugo da roda.

O desempenho dos esforços de tracção e frenagem depende do coeficiente de atrito entre a roda e o carril. As características do atrito variam conforme as condições climáticas ou pela interposição de contaminantes no interface.



Os valores do coeficiente de atrito variam assim, dependendo das condições entre 0,08 e 0,5. Baixos atritos provocam o descolamento da roda (patinagem), associado a lisos, deformações do carril. Alto atrito provoca elevados consumos e desgastes.

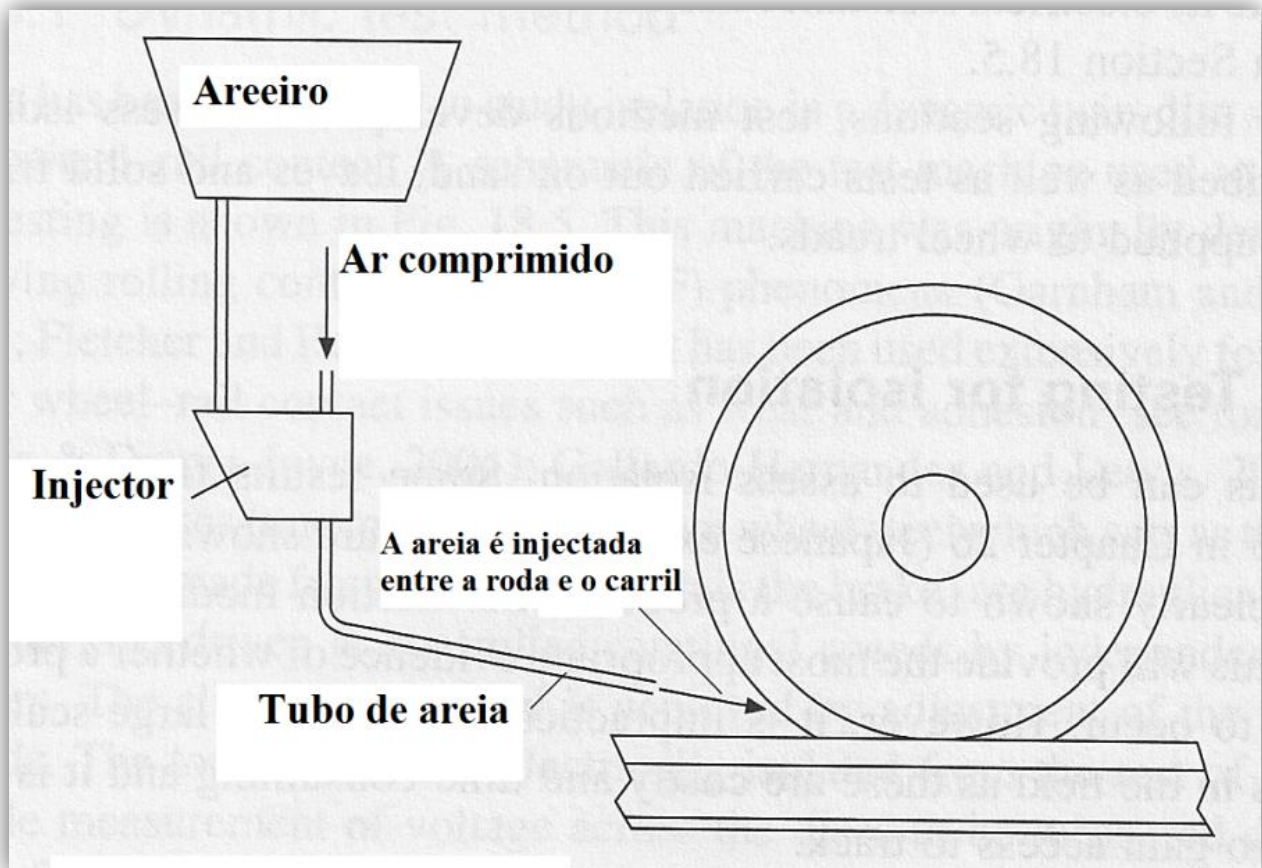


Fig. 39 Dispositivo de areeiro - (controlo de atrito), autor.

Tradicionalmente o atrito é controlado, através do operador ou automaticamente, pela interposição de areia na superfície de contacto, para aumentar as condições de atrito, ou inversamente utilizar-se a lubrificação de verdugos para reduzir o atrito em certas condições (Figura 39).

### 2.1.3 Origem

Na infra-estrutura de via os carris constituem o elemento:

- De suporte;
- De rolamento;

- De guiamento.

Na via férrea os carris vibram, produzem ruído e deformam-se sobre o efeito das cargas. A acumulação de deformações resultado dos desgastes provocados pela passagem regular dos comboios, leva a uma degradação progressiva dos perfis transversal e longitudinal (Figura 40).

A experiência demonstra que, se não forem tomadas medidas correctivas de controlo dos desgastes nos carris, resulta uma auto-deterioração ao ponto de não se poderem regenerar; obrigando à sua substituição.

Quando na mesa de rolamento, se detectam deformações afastadas regularmente, estamos na presença de desgaste ondulatório. O desgaste ondulatório poder ter variações no tipo e formato de onda, bem como na distância entre picos.

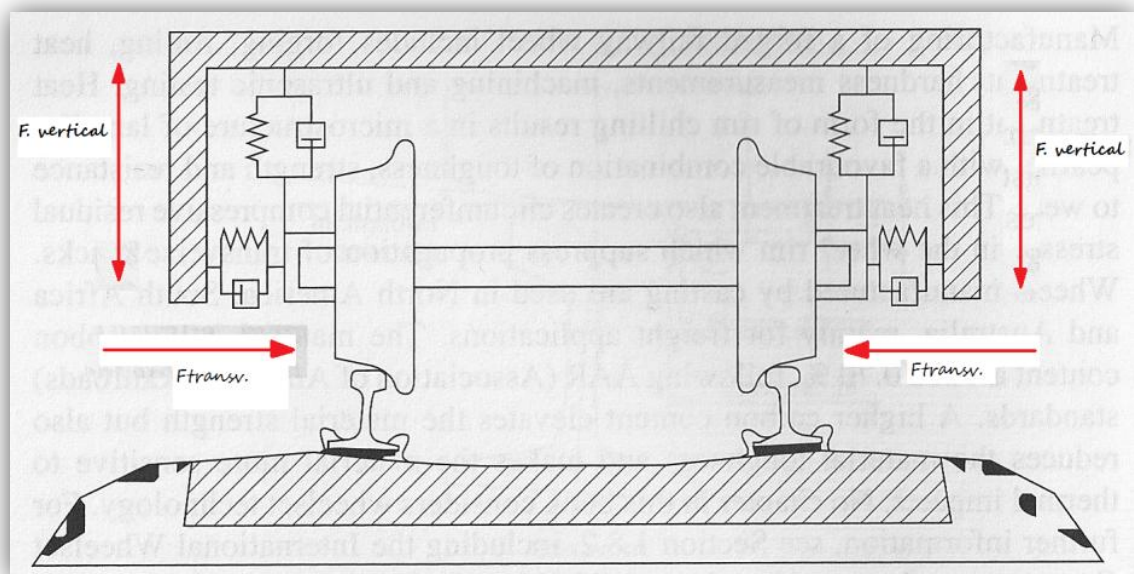


Fig. 40 Esforços transmitidos à via, modificada pelo autor.

O desgaste ondulatório ao deformar o perfil do carril, provocará o aparecimento de pontos de pressão unitária elevada, onde se iniciarão ao nível do plano de rolamento defeitos: aplanamento da cabeça do carril, rebarbas, escamação, esmagamentos e fissuras transversais. As deformações, consequência do desgaste ondulatório, vão amplificar todas as formas de solicitações à estrutura do carril, particularmente nos locais em curva ou onde se verificam maiores esforços de aceleração e travagem.



Podemos afirmar que nenhum sistema ferroviário estará livre de possuir desgaste ondulatorio. Como veremos adiante, podendo variar como consequência de grande número de variáveis, este desgaste aparece ligado ao contacto roda-carril. Curiosamente o desgaste ondulatorio como se verificará, está mais ligado à exploração de veículos de passageiros ligeiros (metropolitanos e metros ligeiros ou eléctricos); do que em caminhos de ferro pesados de mercadorias.

#### **2.1.4 Definição**

O desgaste ondulatorio é uma consequência física do contacto roda-carril, sendo um fenómeno de prática corrente na indústria ferroviária. É caracterizado pelo aparecimento de deformações ondulatorias de periodicidade variável, no plano (mesa) de rolamento; longitudinalmente, por manchas horizontais ovaladas ou “estreladas” ou por um traço ondulado, com um comprimento e onda que pode variar caso-a-caso.

Foram identificados seis tipos diferentes de desgaste ondulatorio, com significativas características próprias:

- “rutting” (200 a 400 Hz fila baixa das curvas);
- “Heavy-haul” (baixa frequência, desgastes, fila baixa);
- “Light Rail” (baixas frequências);
- “Resonance” (frequências variáveis);
- “pinned-pinned” resonance (altas frequências);
- “Trackform” (específico a um tipo de via) (19).

Vários estudos têm sido feitos para a compreensão deste fenómeno, no sentido da sua prevenção e redução. Existe a compreensão de que o desgaste ondulatorio não é um fenómeno simples, não tem apenas uma única causa, nem uma única solução. Existem estudos contraditórios; alguns documentos antigos apresentam soluções de como evitar o desgaste ondulatorio, dando o fenómeno como completamente estudado e dominado, situação que se tem verificado não ser assim. Ainda hoje se constata com modernas gerações de material circulante, infra-estruturas de via inovadoras, instaladas sobre elementos resilientes, não conseguiram erradicar o fenómeno que permanece e por vezes até se incrementa.

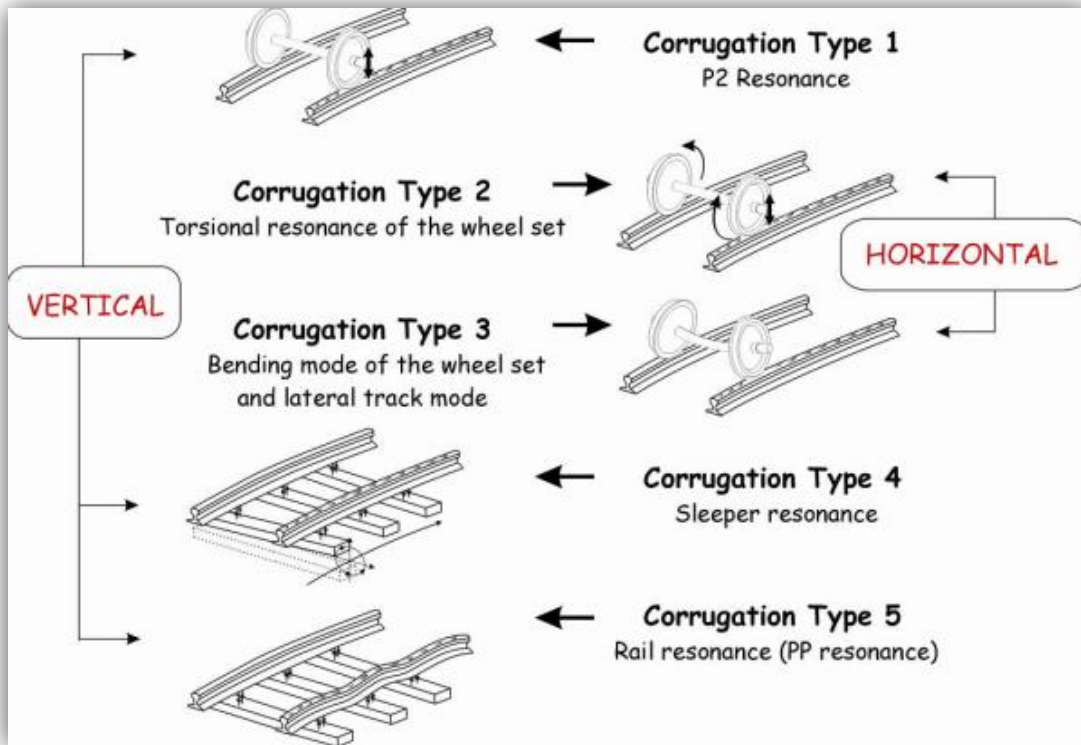


Fig. 41 Tipo de desgaste ondulatório.

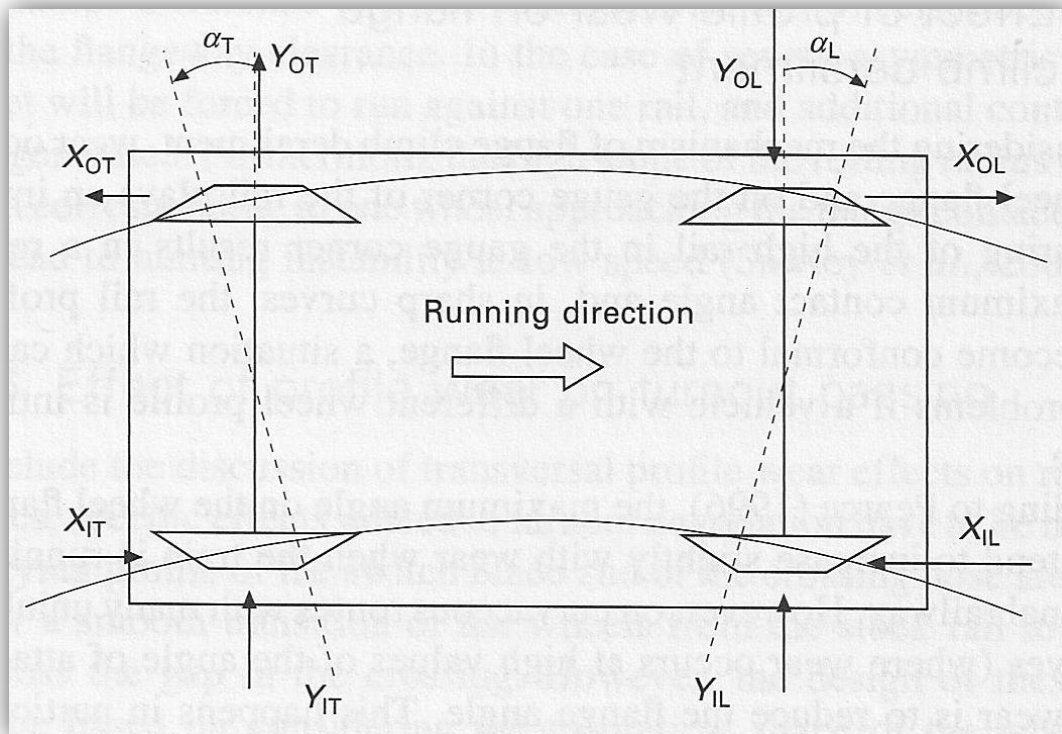
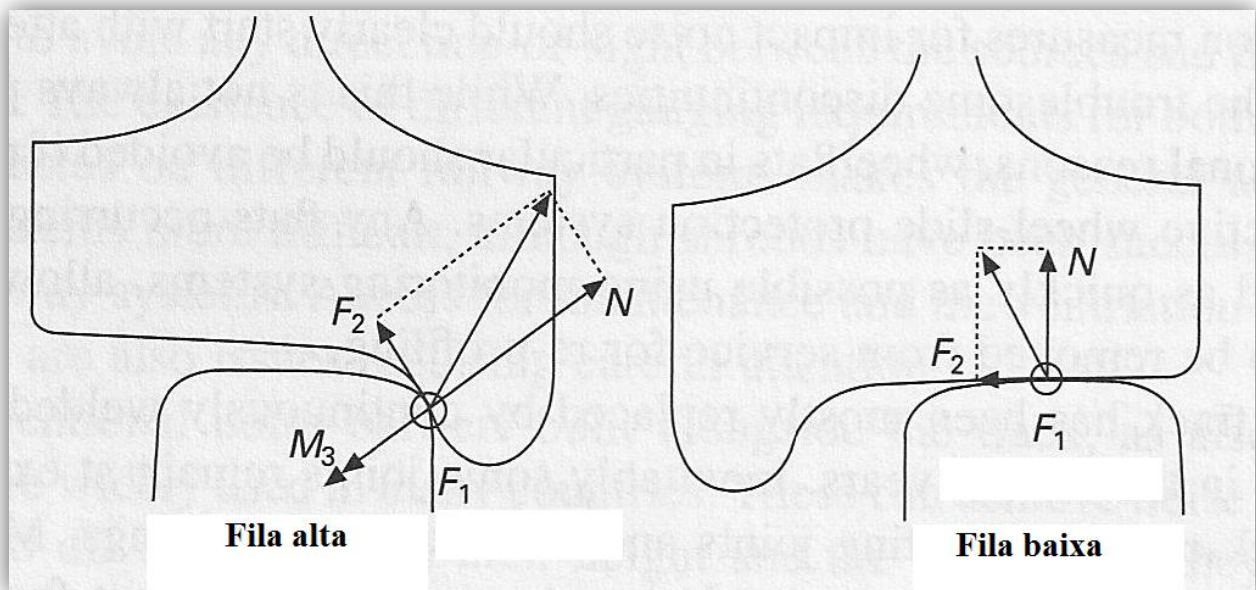


Fig. 42 Comportamento do bogie em curva, S. Bruni e F. Braghin, Politécnico de Milão.

As suas causas, que têm sido objecto de grande investigação, denunciam um elevado número de variáveis envolvidas no processo. Sob a passagem de uma carga rolante (em movimento), produzem-se vibrações transversais no carril (a nosso ver auxiliadas pelo facto do formato cónico das rodas e pela permanente auto-centragem destas em recta e em curva), com uma frequência que entrará em ressonância com o período da variação de pressão específica sobre o carril.

Também; sendo constante a força tangencial no ponto de contacto, as variações do coeficiente de atrito, são função da velocidade angular da roda, como a massa do veículo não acompanha instantaneamente estas variações, produzem-se pequenos escorregamentos instantâneos (e consequentes atritos) que determinarão o aparecimento do desgaste ondulatorio de carris (Figura 42 e43).



**Fig. 43** Vista esquemática das forças que actuam nas rodas de um bogie em curva.

Desenho a ser entendido em conjunto com a Fig. 42, modificado pelo autor.

$N$  - força normal;  $F_2$  força transversal responsável pelo desgaste ondulatorio na fila baixa.

## 2.2 Variáveis

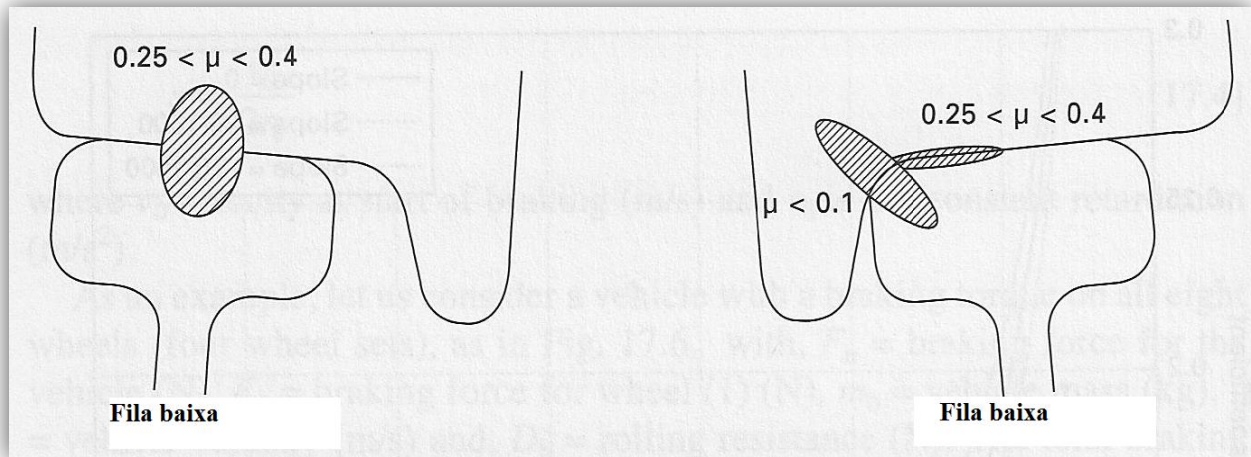
Poderemos então enumerar algumas das variáveis que garantidamente influenciarão nas causas do aparecimento dos diferentes tipos de desgastes ondulatorios:

- Estrutura e tipo de materiais;



- Variação ou estabilidade do coeficiente de aderência/atrito (linha à superfície ou em túnel, intempérie, amplitudes térmicas, ambientes e condicionantes);
- Tipo de exploração (arranque e paragem, velocidade e aceleração);
- Condução manual ou automática (com coincidência dos pontos de actuação);
- Tipo de material circulante (peso, número de rodados, bogie, distância entre eixos, versus materiais ligeiros de suspensões pneumáticas);
- Traçado (curvas e respectivos raios de curvatura, rectas, pendentes);
- N° de eixos motores;
- Eixos rígidos (sem diferencial não acompanham os diferentes perímetros em curva das duas filas de carris = alta e baixa) e distância entre eixos e pivots de bogies;
- Nas curvas, o diferencial entre a velocidade real e a velocidade para a qual o valor de escala foi projectado;
- Controlo de tracção (graduadores em escada versus reguladores electrónicos em rampa);
- Tipo de frenagem (calços, cepos, discos, frenagens reostáticas, ar-comprimido ou de recuperação/reostática);
- Tipo de leito de via (c/ ou s/balastro, elementos resilientes, plataforma, mantas, etc.);
- Composição e tipo de carris utilizados;
- Sistemas de fixação carril/travessa, tipo de travessas;
- Distância entre travessas (define o vão de carril suspenso, sem apoio);
- Perfil longitudinal do carril e da roda (desgastes);
- Pontos de continuidade do carril;
- Alinhamento da via;
- Secções Especiais de Via;
- Pesos por eixo, distribuição de peso;
- Frequência de passagem de comboios do mesmo tipo e série (frotas similares);
- Resposta do material circulante;

- Ressonância, vibrações, fricção, choque, fadiga.



**Fig. 44** Coeficientes de aderência ideais em curva, modificado pelo autor.

Todas as variáveis atrás descritas podem indiferentemente influenciar, isoladamente ou sistematicamente pequenos escorregamentos (descolagens) das rodas (motoras e portadoras) do material circulante, dado o fraco coeficiente de aderência entre metais. Estes escorregamentos, poderão ter um carácter sistemático agravado por:

- Marchas horárias similares (comboios suburbanos, metros ligeiros e pesados e eléctricos);
- Materiais circulantes compostos por frotas homogéneas (reagindo da mesma forma);
- Conduções automáticas (incidência de actuação) ou muito condicionadas a horários rígidos;
- Outros factores.

Assim; verificamos que o desgaste ondulatório poderá ter diferentes características atrás enumeradas (formato de onda, frequência, conjugação de ondas, localização na mesa de rolamento, etc.) que estarão associadas a agrupamentos das variáveis atrás descritas; característica própria de cada linha ou caminho de ferro.

Quando nos referimos à frequência característica do desgaste ondulatório, ou comprimento de onda, teremos:

—

L Comprimento de onda;  
será velocidade do veículo;  
frequência característica (19).

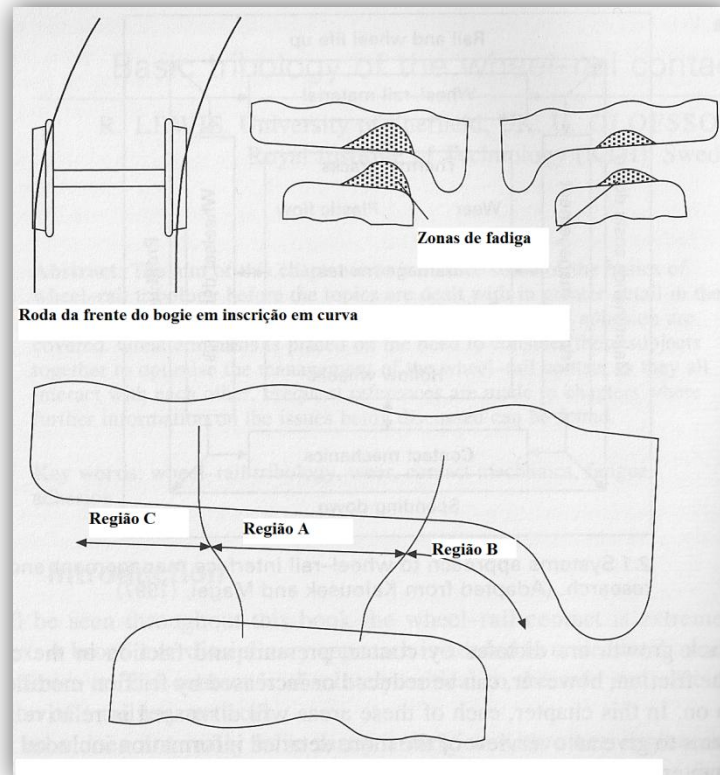


Fig. 45 Roda frontal do bogie em inscrição de curva. Zonas sujeitas a contacto/stress, modificado pelo autor.

29. III. 1984

Annexe

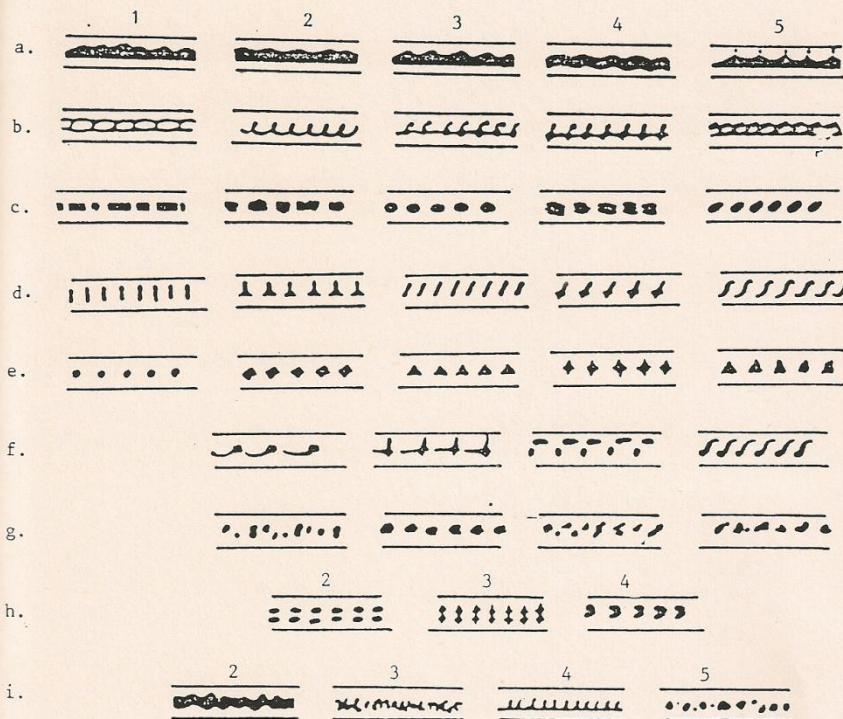
Types d'usure ondulatoire (bulletin de l'AICCF, août 1958)

Point 9.1.1. du questionnaire

Indiquez le type d'usure (par exemple b2 ou h3)

Bulletin de l'A.I. du Congrès des Chemins de Fer

Août 1958



Formes des crêtes produites par l'usure ondulatoire courte

- |                          |                             |
|--------------------------|-----------------------------|
| a. bandes continues      | f. bosses crochues          |
| b. bandes discontinues   | g. bosses irrégulières      |
| c. bosses longitudinales | h. bosses doubles           |
| d. bosses transversales  | i. bosses de forme spéciale |
| e. bosses ponctuées      |                             |

Fig. 46 Documento de 1984 onde definiu o tipo de desgaste ondulatório. Relatório UITP sub comité de instalações fixas de 1984 ACOTRAL Roma.

## 2.3 Tipos de Desgaste Ondulatório

### 2.3.1 “Heavy-haul corrugation”

Este tipo de desgaste ondulatório de onda longa, está associado a caminhos de ferro com elevados pesos por eixo acima das 15 toneladas, com cargas uniformes, velocidades regulares baixas mas constante velocidade. Este tipo de desgaste ondulatório terá como origem irregularidades da própria via (juntas, soldaduras, irregularidades e descontinuidades). Este desgaste aparece na fila alta das curvas, não estando necessariamente ligado somente a curvas, podendo existir em rectas. O seu comprimento de onda varia entre 200 – 300 mm corresponde à frequência de 30 Hz devido à baixa velocidade dos comboios. É um desgaste caracterizado por grande deformação plástica (Figura 47) (19).



Fig. 47 Exemplo de heavy-haul corrugation, S. L. Grassie Engineering Ltd, Germany.

Causa:

O efeito de grande deformação plástica do carril de baixo comprimento de onda (longa), resulta do elevado stress originado por grande peso por eixo. As frequentes/periódicas cargas rígidas dos pesados vagões com elevadas cargas dinâmicas, excitadas pelas irregularidades do carril (anteriormente referidas) vão formando na via deformações que ao entrarem em ressonância (resultado das características da suspensão e da velocidade) vão progressivamente alastrar. Nas curvas este tipo de desgaste verifica-se essencialmente na fila baixa devido aos eixos rígidos dos vagões (diferencial de velocidade entre as filas alta e baixa).



### 2.3.2 “Light Rail corrugation”

Este tipo de desgaste ondulado tem algumas similaridades com o descrito anteriormente. Trata-se de um desgaste caracterizado por um baixo comprimento de onda. Surge de materiais circulantes que apesar de baixo peso por eixo apresentam frotas homogêneas de comportamento similares, elevadas frequências entre veículos composições e grande número de eixos motores. É um desgaste caracterizado por uma grande profundidade da cavidade (amplitude) que podem atingir valores de 1 mm de profundidade (19).

Causa:

Este resulta das cargas dinâmicas em velocidades médias elevadas e regulares, excitadas por irregularidades nos carris que vão imprimindo na via deformações que ao entrarem em ressonância vão alastrando. Estas deformações, associadas aos metros e light rail, estarão também ligadas às elevadas “performances” destes sistemas com elevadas acelerações e frenagens constantes. Alguns carris de baixo peso poderão estar mais vulneráveis a estas solicitações à via.

### 2.3.3 “Resonance corrugation”

Este desgaste ondulado definido também como P2, está muito ligado aos sistemas de eléctricos. Sendo o segmento de veículos ferroviários que menor peso por eixo apresenta, estes sistemas apresentam características de frequentes descolamentos pontuais, derivado do tipo de movimentos, baixo peso e grande potência disponível nas rodas. Este tipo de desgaste ondulado pode ser bastante severo em curvas apertadas e em rectas (19).

Causa:

Trata-se de um desgaste que tem como excitação a ressonância torsional dos eixos nas curvas. Sendo um desgaste cuja frequência coincide com a frequência de ressonância do veículo, esta característica serve de excitação ao seu alastramento. Esta característica é auxiliada pelo facto da maioria das vias dos carros eléctricos se encontrar embebida em plataformas de betão rígido, onde os elementos resilientes da via se reduzem a uma “manta”, contrastando com o reduzido peso dos veículos. Este desgaste ondulado resultante tem uma baixa frequência com boa transmissão aos edifícios circundantes.



### 2.3.4 “Rutting”

Este tipo de desgaste ondulatório está muito associado aos metropolitanos pesados que possuem curvas de pequeno raio, onde as velocidades praticadas se encontrem abaixo dos valores de projecto das curvas (escala em excesso). Este desgaste aparece essencialmente na fila baixa das curvas e em rectas onde os esforços de aceleração e frenagem sejam severos. Discretas irregularidades podem servir de elemento iniciador deste desgaste de comprimento de onda uniforme em aparência com pequena modulação. Este tipo de desgaste, uma vez detectado, surge com rapidez, podendo atingir dezenas de milímetros. É perceptível um pó fino na cabeça do carril (Figura 48) (19).



**Fig. 48 Exemplo de "rutting" no Metropolitano de Lisboa, foto do autor.**

Causa:

Ressonância torsional dos eixos motores nas curvas. O “Rutting” ocorre quando existe uma perda de aderência alternada entre a roda exterior e interior de um mesmo eixo numa curva.

Esta é característica de veículos sem compensadores torcionais no eixos.



Fig. 49 Compensadores torcionais dos eixos, internet.

### 2.3.5 “Pinned – pinned resonance”

O termo “roaring rails” denuncia este tipo de desgaste ondulatório, associado ao caminho de ferro, principalmente nas linhas em que se pratiquem velocidades altas (de 160 – 200 Km/h). Trata-se de um desgaste associado a material circulante de médio peso por eixo (entre 10 a 20 toneladas), visível a olho nu em curvas suaves de grande raio, onde o material circulante negocie a curva sem que o verdugo (flange) da roda toque o lateral do carril (19).

Causa:

Este desgaste aparece em velocidades acima dos 160, perto dos 200 Km/h, sendo proveniente de condições de desgaste (fricção) de alta frequência (770 Hz para carris de 54 Kg/m ou 1200 Hz para 60 Kg/m) de esforços transversais, em que as frequências de ressonâncias são ditadas pelas fixações laterais dos carris e pelo peso por metro destes.



### 2.3.6 “Trackform”

Trata-se de desgastes ondulatórios não pertencentes aos grupos referidos anteriormente, que estão associados a tipos de via sem balastro específicos, onde as bases das travessas se encontram assentes em “pantufas” aborrachadas, com o fim de evitar a propagação de vibrações à plataforma/pavimento, em curvas abaixo dos 400 metros de raio (19).

Causa:

A introdução de elementos de borracha com comportamentos distintos, pode em certos casos provocar ressonância, em conjugação com outros esforços em situação de curvas de reduzido raio, associado a elevados esforços transversais.

### 2.4 Consequências do Desgaste Ondulatório

O desgaste ondulatório está associado a ruído e vibrações, numa primeira fase. Quando este surge (a sua detecção pode ser através de meios de auscultação de via ou mesmo a olho nu), os níveis de ruído rapidamente começam a aumentar criando condições ambientalmente indesejadas (Figura 50).



Fig. 50 Desgaste visível a olho nú, foto do autor.



As vibrações resultantes das condições de rolamento das composições provocam danos na própria via e construções (infra-estruturas) circundantes criando uma realimentação do próprio defeito.

Podemos então definir como principais consequências do desgaste ondulatório:

- Aumento dos níveis de vibrações;
- Degradação precoce dos carris (exponencial) ao ponto de terem que ser substituídos;
- Degradação de elementos estruturais da infra-estrutura como travessas, fixações e plataformas de via;
- Aumento do ruído devido à irregularidade do plano de rolamento;
- Alteração dos perfis teóricos do carril e rodados;
- Alteração do comportamento dinâmico do material circulante, podendo em certos casos alterar as condições de conforto, velocidade e a segurança;
- Rolamento incómodo do comboio, reduzindo a qualidade do serviço;
- Impactos ambientais elevados;
- Influência negativa nos edifícios circundantes, gerando elevado número de reclamações;
- Aumento substancial dos custos da operacionalidade;
- Redução do tempo de vida dos elementos dos veículos.

## **2.5 Custos do Desgaste Ondulatório**

O combate ao desgaste ondulatório já se encontra referenciado nas primeiras décadas do século XX, sendo actualmente, por motivos económicos, ambientais e de segurança uma maior preocupação.

A prevenção/remoção dos desgaste ondulatório, que nos referiremos mais adiante, consome caso-a-caso diferentes mas elevados tempos de mão de obra homem e equipamentos, para o seu controlo na exploração. A remoção do desgaste ondulatório no carril, ou como veremos a sua manutenção a um nível (imperceptível) estacionário é uma actividade permanente directamente associada aos níveis de tráfego das vias férreas em exploração, integrada na manutenção das infra-estruturas de via.



Cada empresa ferroviária, como veremos adiante, valoriza à sua maneira a remoção do desgaste ondulatório; não existindo uma metodologia estandardizada de ataque. As altas velocidades praticadas e conseqüente maior exigência em relação ao estado das infra-estruturas, associado a exigências ambientais, trará no futuro uma maior necessidade de normalização deste procedimento de manutenção.

Segundo o “Transit Cooperative Research Program”, programa patrocinado pelo organismo Norte Americano “Federal Transit Administration” são gastos mundialmente \$100 milhões de U.S. Dollars nas conseqüências directas dos desgaste ondulatório (20).

Segundo o programa Europeu “Corrugations” iniciado em Junho de 2002, para combater esta “persistente” conseqüência em sistemas de Metropolitanos ligeiros e pesados; são gastos anualmente na Europa €60 milhões de Euros como conseqüência directa deste desgaste. Este mesmo programa, adianta serem gastos anualmente pelo Metro de Bruxelas (STIB) €3 milhões. Dos Estados Unidos ao Japão, passando pela Europa, existem diversos grupos de estudos decididos em fazer baixar os custos inerentes ao combate a este fenómeno, que constituí uma percentagem estimada entre 20 a 30% dos custos de manutenção com a infra-estrutura de via férrea.

## **2.6 Metropolitano de Lisboa**

Poucos meses após a inauguração do Metropolitano de Lisboa, S.A.R.L.; em 29 de Dezembro de 1959, começou a aparecer o desgaste ondulatório na via. Primeiramente nas curvas mais apertadas, seguindo-se as de maior raio. Nas estações o desgaste ondulatório também fez o seu aparecimento. O desgaste era caracterizado pelo aparecimento de “ondas curtas” nas estações e filas baixas das curvas; “onda longa” nas filas altas das curvas. Relatos da época referem acções de contacto com a linha de Cascais a fim de saber se esta também tinha aqueles níveis de desgaste.

A primeira acção correctiva, realizou-se com pouco êxito, através de equipamento ligeiro, dada a pouca ergonomia num trabalho que se verificava interminável.

O pior caso registado, verificado em termos de desgaste ondulatório foi a curva do Rossio aos Restauradores (hoje desactivada), que tinha o menor raio da rede em exploração, igual a 99



metros, em que nos primeiros anos de exploração. O pouco rendimento das esmeriladoras utilizadas levou ao início da substituição de carris, assim que estes atingiam valores de desgaste não possíveis de corrigir com esmeriladoras ligeiras. O pior caso registado era o da curva Restauradores ao Rossio em que se substituíam carris a cada 9 meses. A amplitude máxima do desgaste ondulatório, medida na época, foi registada acima de 2 mm (Figura 51).

Entre 1961 e 1964, já equipados com 4 máquinas esmeriladoras ligeiras (Matisa), foi possível prolongar nas curvas do Rossio de 9 para 14 meses as substituições de carris. A esta data concluiu-se que uma regularização sistemática do perfil longitudinal dos carris, prolongava a vida destes (21).

Em 1965 compraram-se os primeiros carris com  $90 \text{ Kg/mm}^2$  e 50 Kg/metro, para aplicar exclusivamente em zonas de curvas. Os carris normalmente utilizados tinham anteriormente  $70 \text{ Kg/mm}^2$  (21).

Em 25 de Novembro de 1966, dado o grande peso de mão de obra utilizado nas esmeriladoras ligeiras e o ainda pouco rendimento obtido;

entrou ao serviço a primeira unidade pesada de esmerilar carris. Adquirida em 2ª mão ao Metro de Hamburgo, esta esmeriladora não tinha propulsão própria, necessitava de estar rebocada a um locotractor (Figura 52). A energia necessária provinha do terceiro carril, que necessitava de estar



**Fig. 51** Uma fotografia antiga do desgaste ondulatório nos carris do Metropolitano de Lisboa no seu início (+/-1960), fonte ML.

ligado para esta operar. Esta unidade apenas esmerilava o plano de rolamento, não reperfilava o carril.



**Fig. 52 Antiga esmeriladora do ML no PMO II, preservada para futuro museu, foto do autor.**

Assim, durante o período de utilização desta unidade, as cabeças dos carris em toda a rede, encontravam-se aplanadas. Verificou-se que pelo facto de esta unidade não reperfilar o carril, não se conseguia evitar a esmerilagem manual utilizando esmeriladoras ligeiras. Em 18 de Dezembro de 1975, decidiu-se colocar esta unidade fora de serviço, tendo actuado pela última vez (21).

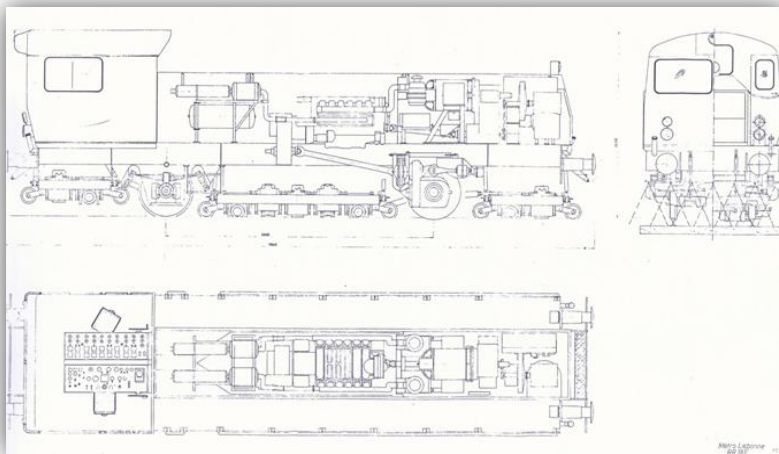
Entre 1972 e 1974 a situação tinha atingido o limite do incomportável. Aumentara-se a rigidez dos carris da rede, efectuaram-se algumas experiências com palmilhas de borracha nas travessas; continuando o desgaste ondulatório a persistir.

Técnicos do ML efectuam contactos e viagens aos Metros Europeus a fim de observarem os métodos utilizados por outras redes no combate ao desgaste ondulatório. Várias opções se colocam, tendo chegado à conclusão de que se teria que abordar o problema de forma preventiva, através de acções sistemáticas de actuação.

Em 1973, lançou-se um concurso internacional para aquisição de uma unidade pesada que efectuasse a operação de reperfilagem dos carris e removesse em simultâneo o desgaste



ondulatório. Em 12 de Fevereiro de 1976 foi colocada ao serviço, pelo ML, uma unidade esmeriladora nova de marca SPENO, que iniciou um programa de esmerilagem preventiva sistemática que ainda hoje prevalece (Figuras 53 e 54). O investimento efectuado nesta unidade, associado a um programa de esmerilagem sistemático; deu origem a um período de mais do que três décadas de estabilidade. Esta unidade de elevado rendimento, permitiu reperfilar toda a rede eliminando o desgaste ondulatório que nunca deixou de existir em 16 anos de exploração do Metro. Uma vez recuperado e repostas as vias da rede em condições ideais de exploração; projectou-se um plano de esmerilagem preventiva sistemática, que permitisse manter o desgaste ondulatório a um nível imperceptível.



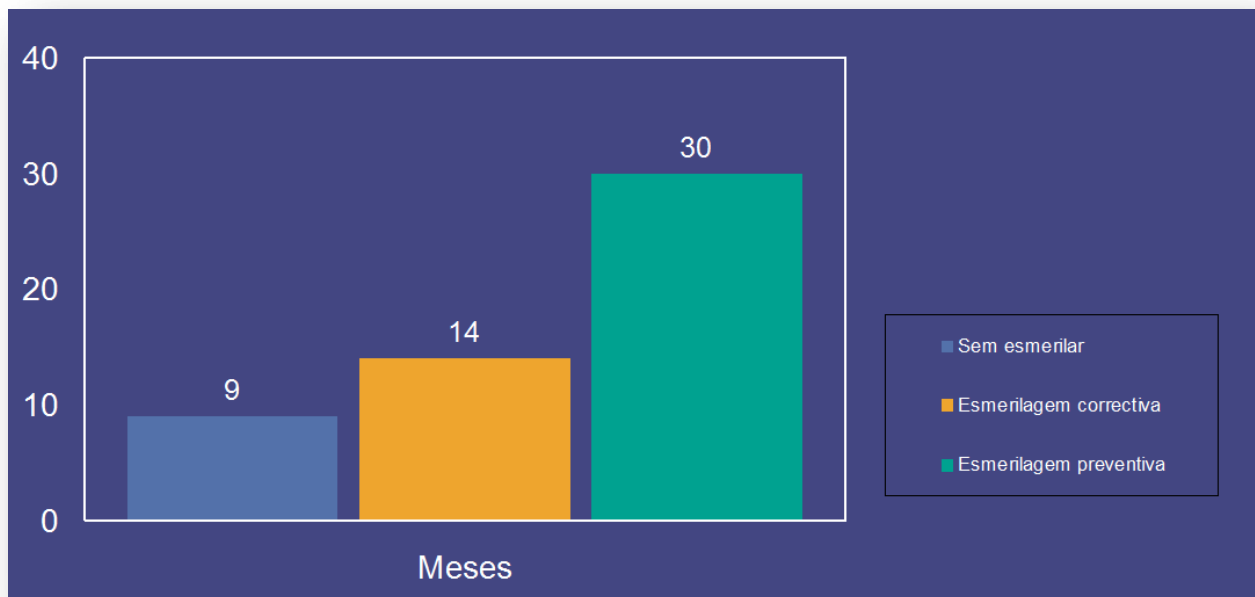
**Fig. 53** Unidade esmeriladora Speno, esquemas técnicos, documentação ML.



**Fig. 54** Unidade esmeriladora Speno, foto do autor.

Verificou-se que a rede do Metropolitano de Lisboa, tem pelas características abordadas anteriormente, aptidão para possuir bastante desgaste ondulatório. A abordagem iniciada com colocação da unidade pesada de esmerilagem de carris pelo ML, fez escola internacional nos meios específicos ferroviários. A nossa unidade esmeriladora de carris, fabricada pela empresa “Speno” de origem Suíça, foi a precursora de um conjunto de unidade que prestam serviços no mundo inteiro, lançando a Speno na liderança mundial de esmerilagem de vias. O ML chegou a alugar a unidade esmeriladora ao Metro de Madrid, à época também envolvido no mesmo problema.

Conclusões muito interessantes foram retiradas à época. O exemplo da desaparecida curva dos Restauradores ao Rossio, com 99 metros de raio, em que se tornava necessário substituir os carris, em cada 9 meses e que se tinha passado para 14 meses com uma esmerilagem manual deficiente; tinha agora passado para 30 meses (Tabela 5) (21).



**Tabela 5** Evolução do tempo de substituição dos carris da curva (raio = 99 m) Rossio - Restauradores. antes e depois da esmerilagem, dados ML, tabela do autor.

Conclusão: Passagens regulares com a esmeriladora permitiam não só, manter o perfil teórico transversal, otimizar o comportamento dinâmico do material circulante, como prolongar bastante a vida dos carris.



O Metropolitano de Lisboa, abandona nos anos 80 a via balastrada passando a adoptar uma via de origem em França, desenvolvida pelo Eng. Roger Sonnevile. Esta via é caracterizada pela ausência de balastro ao estar assente em travessas bibloco RS de betão, em leito betonado através de elemento resilientes amortecedores de vibrações, solução de via utilizada ainda hoje pela sua reduzida manutenção.

No campo do material circulante as duas primeiras gerações de material circulante (ML7 e ML79), já foram retiradas de circulação, possuindo-se uma frota moderna e homogénea dos anos 90. Contudo, apesar de se ter renovado as vias e o material circulante; nada mudo quanto ao desgaste ondulatorio. A experiência permite conhecer que se parar durante quatro meses a operação de esmerilagem, o desgaste ondulatorio aparece a um nível perceptível, começando nas curvas de menor raio.

Uma vez detectado, a sua progressão segue numa linha exponencial.



Curva	Raio de curvatura	Periodicidade de actuação	% Rede
Curvas de $R < 200$ m		esmeriladas a cada 3 meses	4 %
Curvas de Raio $200 \text{ m} \leq R < 300$ m		esmeriladas a cada 4 meses	25 %
Curvas de Raio $300 \text{ m} \leq R < 500$ m		esmeriladas a cada 6 meses	9 %
Curvas de Raio $500 \text{ m} \leq R < 700$ m		esmeriladas 1 vez por ano	2 %
Curvas de Raio $\geq 700$ m e rectas		esmeriladas 1 vez de 2 em 2 anos	51 %
Términos		esmerilados a cada 8 anos	9 %

Tabela 6 Programa resumido de esmerilagem preventiva sistemática do Metropolitano de Lisboa, dados ML, tabela do autor.

Dados médios retirados de um universo de 10 anos	
Total de metros de via simples esmerilada por ano	105.521 m
Total médio de actuações por ano	105 actuações
Extensão mínima esmerilada	545 m
Extensão máxima esmerilada	1.530 m
Tempos de actuação mínimo por noite	1 hora
Tempo de actuação máximo por noite	2:55 horas/min
Rendimento médio de esmerilagem	500 m/hora
Redução sonora após remoção do desgaste ondulatório	2 a 5 dB (a)
Redução média percentual das vibrações	58%
(a) Dependente do estado inicial dos carris	

Tabela 7 Dados médios de actuações/ano de remoção do desgaste ondulatório, fonte ML, tabela do autor.



## 2.7 Metro do Sul do Tejo

Seguindo as tendências mundiais quanto à evolução dos transportes, também o nosso país introduziu o modo metro ligeiro nas cidades de Almada, Porto e futuramente Coimbra. O Metro do Sul do Tejo, integra-se no segmento dos metros ligeiros, sendo este todo instalado à superfície.

Com um comprimento total de vias de 25 quilómetros, esta rede composta por três linhas foi construída na bitola internacional (1435 mm), apresenta pendentes máximas de 6,5% e raios de curvatura mínimos de 25 metros em exploração e 17 em estaleiro. A sua moderna frota composta por 24 composições triplas do modelo Combino Plus do construtor Siemens, contém todas as inovações usadas à data da sua construção. Algumas situações a comentar que atestam a modernidade deste material circulante:

- O veículo C008 esteve um ano a circular numa das maiores redes de eléctricos do mundo, Melbourne na região de Vitória na Austrália (Figura 55);
- O C006 esteve em exposição na cidade espanhola de León para relançar os eléctricos nesta cidade (Figura 54);
- O C004 possui um equipamento protótipo que lhe permite circular até 2,5 quilómetros autónomo das catenárias. Este equipamento protótipo experimentado pela Siemens na rede de Almada, destina-se a ser instalado em redes que atravessem centros históricos de cidades classificadas que se opte localmente pela não instalação de catenárias (22).

Esta rede iniciou o seu serviço a nível experimental em 30 de Abril de 2007. Uma vez finalizadas as obras da primeira fase, iniciou a exploração em 26 de Novembro de 2008. Ao fim de quase 2 anos de serviço em pleno, começaram em algumas curvas de pequeno raio de curvatura a aparecer sintomas de ruído e desgaste ondulatorio, como é o caso em Corroios da curva do Millenium (Figura 57).



**Fig. 56 Combino MTS em Leon Espanha, internet.**



**Fig. 55 Combimo MTS 008 em Melbourne Austrália, Bombardier.**

O Metro do Sul do Tejo em face desta evolução iniciou um projecto de correcção através de contratação ao exterior duma empreitada de recolha de dados, seguida de medidas correctivas de esmerilagem de via. Estudos efectuados e dado ser um sistema de vias à superfície optou-se por actuações correctivas despoletadas sempre que se verifique o aparecimento de desgaste ondulatório a um nível perceptível.



**Fig. 57** Desgaste ondulatório do tipo "Light Rail corrugation" , no MTS curva do Millenium, foto do autor.

Quanto ao ruído, situação em metros de superfície igualmente crítica, esta empresa decidiu nas curvas onde se registavam situações de ruído, instalar um sistema dinâmico de atenuação de ruído. Este sistema inovador, cuja primeira instalação em Portugal se fez neste Metro, injecta um tipo de massa na mesa de rolamento, à passagem de cada composição. Este produto (massa) interpõe-se entre a roda e o carril, atenuando ou mesmo erradicando situações de ruído. Esta “lubrificação” controlada, apesar de se efectuar na mesa de rolamento não retira aos comboios capacidades de tracção ou de frenagem.



## 2.8 Metro do Porto

Para a segunda cidade do país, instalou-se um sistema de metro ligeiro, seguindo também as tendências mundiais. A opção de um metro ligeiro permitiu projectar uma rede de grande dimensão, com troços subterrâneos, mas que também utiliza antigos canais de linhas de via estreita.

Com um comprimento total de vias de 60 quilómetros, esta rede é presentemente a maior rede de Metro do nosso país, composta por 5 linhas e 70 estações, foi construída na bitola internacional (1435 mm), apresenta pendentes máximas de 7,0% e raios de curvatura mínimos de 25 metros em exploração. A sua moderna frota composta por 72 composições do modelo Flexity Outlook (Eurotram) do construtor Bombardier e 30 composições de longo curso do modelo Flexity Swift do mesmo construtor Bombardier (22).

Trata-se de uma frota moderna, actualizada contendo todas as inovações usadas à data da sua construção. Algumas situações a comentar que atestam a modernidade deste material circulante:

- O modelo Eurotram existe também nas cidades de Estrasburgo e Milão;
- Um Eurotram do Metro do Porto também esteve a circular experimentalmente, durante um ano na cidade Australiana de Melbourne, que possui a maior rede de eléctricos do hemisfério Sul;
- O modelo Flexity Swift constitui o que se chama de modelo Tram-Train.

Esta rede iniciou o seu serviço em 7 de Dezembro de 2003, estando em operação há aproximadamente 7 anos.



Fig. 58 Metro do Porto - medições do desgaste ondulatório, Grupo Barraqueiro.

A Metro do Porto, actua regularmente em todas as linhas e parque com uma unidade pesada esmeriladora de carris, seguindo um plano preventivo, tendo também actuações correctivas. Esta rede de metro ligeiro, apresenta uma evolução exponencial do desgaste ondulatório, quando este aparece (22).

## 2.9 Rede Ferroviária Nacional

A rede ferroviária Nacional está repartida pelas linhas suburbanas das cidades de Lisboa, Porto e Coimbra, rede de ligações intercidades, ligações regionais e de mercadorias. A cada linha é definida uma importância hierárquica, sendo-lhe atribuído um plano de manutenção tendo em conta o seu contexto operacional, sua importância estratégica no panorama nacional, pelas velocidades praticáveis e tipo de serviços.

Seguindo uma lógica, também na Rede Ferroviária Nacional o desgaste ondulatório aparece essencialmente nas linhas suburbanas de Lisboa e Porto. A grande frequência de serviços (centenas de serviços diários), compostos por frotas homogéneas, com marchas horárias de



grande desempenho (acelerações/desacelerações e nº de paragens); faz com que sejam estes os casos mais frequentes de desgaste ondulatorio. É também perceptível desgaste ondulatorio nas linhas do Norte, linha onde existem alguns troços autorizados a 220 Km/h. Outros casos haverá em vias caracterizadas por maior sinuosidade.

No caminho de ferro, verifica-se que o desgaste ondulatorio está associado a uma segmentação de serviços, como é o caso dos suburbanos ou corredores exclusivos de circulações de mercadorias de grande tonelagem. Nas restantes vias a multiplicidade de material circulante de comportamento dinâmico díspar, não propicia o aparecimento do desgaste ondulatorio com ao nível dos serviços com frotas similares dedicadas.

A REFER dispõe de programas de esmerilagem preventiva e correctiva, bem como de medições regulares de modo a obter uma monitoria da rede ferroviária nacional. Para o efeito existem fichas de procedimento, as ITV – “Instrução Técnica de Via” (ITV 007 e 008), estando definido:

- Quantidade mínima de material a remover;
- Quantidade máxima de material a remover;
- Tolerâncias do perfil longitudinal do carril para ondas curtas e largas.

## **2.10 Outros Casos**

Não conseguimos estabelecer informações com a (Carris), no sentido de obtermos alguns dados válidos, contudo deixa-se algumas observações efectuadas.

A (Carris) é a empresa responsável pela operação da rede de transportes constituída por autocarros e eléctricos. A rede de eléctricos de Lisboa foi no passado uma rede modelo tendo mesmo nos anos 20 e 30 sido objecto de referência nos meios internacionais. Lisboa é uma cidade de perfil acidentado, tendo conseguido instalar uma rede eficaz de eléctricos em ruas estreitas e pendentes extremamente inclinadas (14%). Para o efeito foi seleccionada à época uma bitola estreita (90 cm), para permitir curvas até 12 metros de raio.



**Fig. 59** Eléctrico articulado da CARRIS, foto do autor.

Esta rede manteve-se intacta até 1959, ano em que devido à inauguração do Metropolitano de Lisboa, se assistiu aos primeiros cortes. Apesar disto, só em 1968 é que o número de passageiros transportados pelos eléctricos, foram ultrapassados pelos transportados de autocarro. Nos anos 80 uma consultoria de prestígio Suíça efectuou um estudo de viabilidade da rede de eléctricos, tendo-se à época lançado todo um projecto de expansão desta rede. Foi Lisboa, uma das primeiras cidades do mundo, que anunciou a intenção de reinvestimento nos eléctricos.

Infelizmente, nunca se veio a verificar este reinvestimento; em vez disso assistiu-se nos anos 90, em pleno renascimento deste segmento por toda a Europa e USA, a um drástico encerramento de grande parte de rede, situação que chegou a ser criticada internacionalmente. Timidamente adquiriram-se dez veículos articulados à Siemens dum modelo que se destinava a Valência, número inferior às necessidades de relançamento do modo (Figura 59). Também se efectuou um trabalho interessante de modernização da frota de eléctricos de colinas permitindo-se manter algumas linhas históricas em funcionamento (12, 18, 25 e 28). Também aqui se ficou por 50 unidades, número insuficiente, tendo-se à época degradado o serviço através da redução das frequências.



Trata-se duma rede que se encontra numa situação de congelamento, que poderia/poderá um dia voltar a dar um contributo importante no aumento da qualidade do serviço de transporte, captando clientes para os transportes colectivos.

Esta rede, ao dispor de curvas apertadas, traçados sinuosos e pendentes agravadas, tem desgaste ondulatório, situação visível em algumas curvas. Também, desde sempre, que ocasionalmente se vê um eléctrico esmerilador, que efectua periodicamente voltas à rede. O Departamento de Via desta empresa também dispõe de esmeriladoras ligeiras de via, para utilização em casos pontuais.

### **3. Redução do Desgaste Ondulatório**

#### **3.1 Em Projecto**

É na fase de projecto que se podem tomar alguns cuidados, que no futuro possam vir a reduzir a incidência de desgaste ondulatório, evitando situações crónicas de difícil correcção, que penalizem economicamente, todo um sistema ferroviário. Quando no projecto de uma nova rede ou de uma simples extensão de linha, deve ser tido em conta:

- Tipo de traçado da futura rede ou extensão de linha;
- Tipo de via;
- Desenho do material circulante.

Assim, nos traçados devem evitar-se curvas de raio pequeno ou tangentes pequenas nos aparelhos de via. Deverá ter em conta o cálculo da escala nas curvas, visto que por vezes as vias são calculadas para determinadas velocidades que não são atingidas em exploração. Daqui resulta uma escala exagerada para as velocidades praticadas, fazendo com que os comboios em curva descaiam sobre as filas baixas dando as curvas com uma inscrição dinâmica deficiente, resultando em desgaste ondulatório. Também o projecto de traçado de via deverá ter em atenção o desenho da transição de entrada e saída das curvas (parábola ou clutóide) (23).

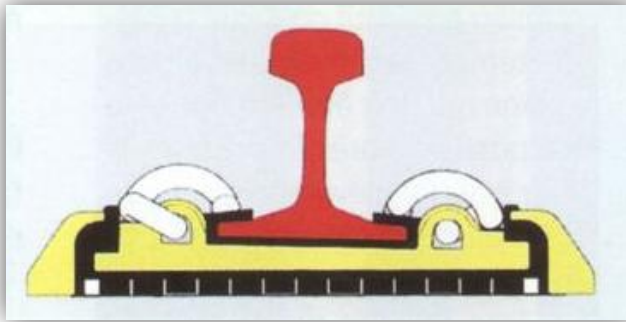


Fig. 60 Elementos resilientes absorvedores de vibrações, documentação ML.



Fig. 61 Absorvedor de ruído documentação ML.

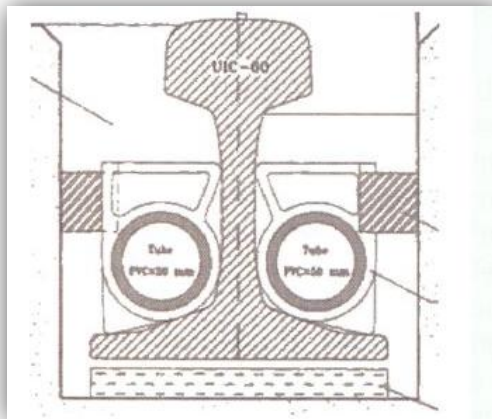


Fig. 62 - "Corkelast" - vias que permitem o acesso de veículos rodoviários de socorro às vias, Catálogo "Corkelast"

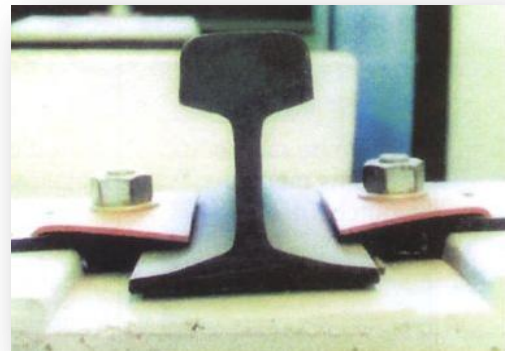


Fig. 63 - Fixação Nabla, foto do autor

Também os diversos componentes das vias férreas, devem ter cuidados de projecto podendo vir a evitar situações crónicas dispendiosas e limitativas do sistema. Assim será muito importante a selecção correcta das características dos carris (perfil, rigidez, tenacidade, composição dos aços, etc.) e das fixações (rígidas, mais ou menos elásticas).

Já no projecto de via é extremamente importante considerar: a) vias com ou sem balastro; b) plataformas mais ou menos rígidas; c) travessas bibloco ou monobloco; d) valores de bitola variáveis (sobre-bitola ou não nas curvas); e) tipo de secções especiais de via; f) inclinação dos carris; g) elementos resilientes; h) atenuadores; i) isolantes (Figuras 60, 61, 62 e 63).



No material circulante também há configurações a ter em conta nos cadernos de encargos ou mesmo no projecto. No desenho dos bogies/rodados há que ter atenção: evitar eixos rígidos, estudar a viabilidade de aplicar dissipadores de binário, conceber a suspensão de modo que o eixo tenha movimentos transversais e oscilações (permitem a inscrição idealizada das rodas em curva, com o eixo perpendicular à tangente da curva).

Devem evitar-se motores rigidamente ligados às rodas (massas rígidas), espaço entre eixos dos bogies demasiado afastados.

Outros aspectos e considerações: a) pesos brutos elevados originam mais peso por eixo; b) controlo da tracção e frenagem em “rampa”(variador de frequência); c) frenagem por discos de freio; d) bogies com sistemas “anti-lacete” cujas variáveis poderão fazer a diferença entre um material circulante bom ou danoso com elevados custos de exploração e ambientais (23).

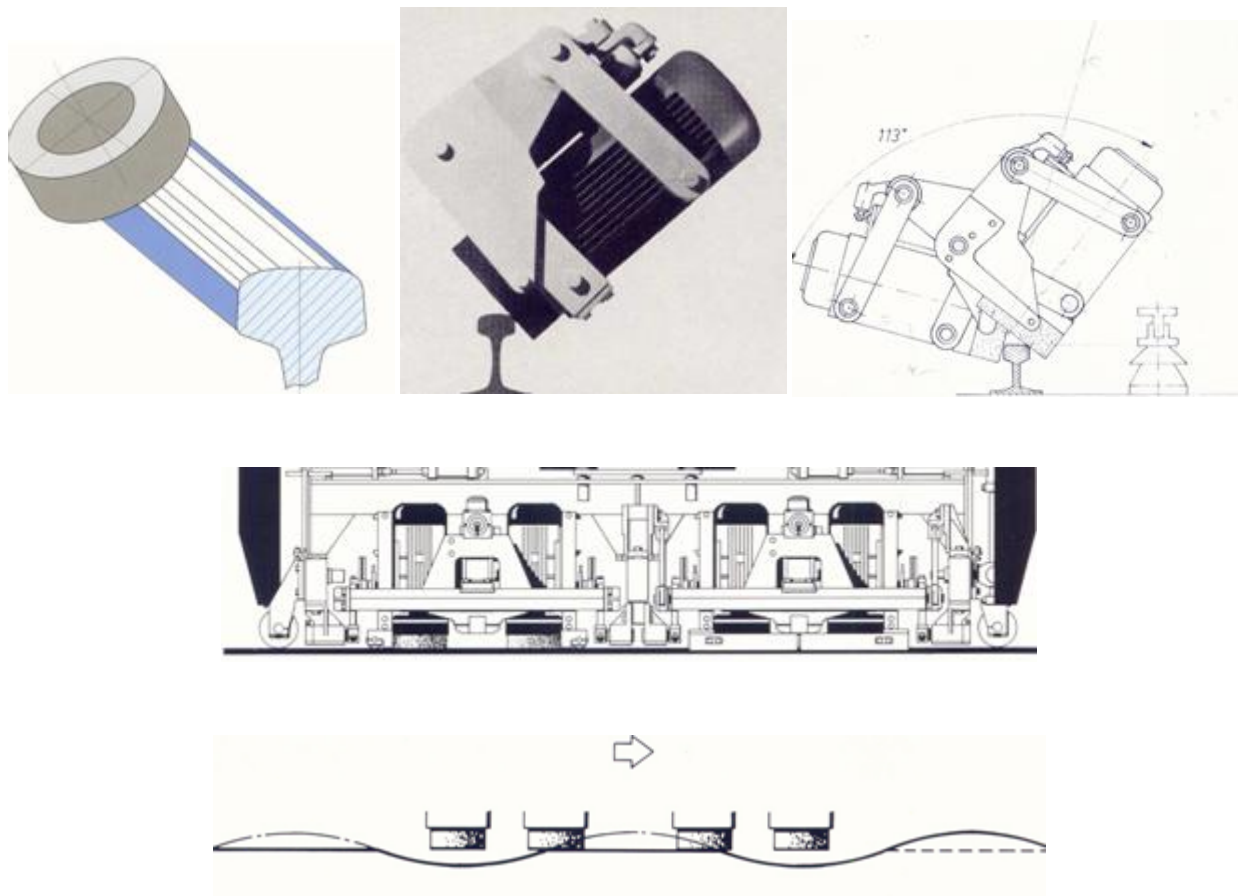
## **3.2 Em Prevenção**

### **3.2.1 Esmerilagem e Fresagem dos Carris**

Existem actualmente dois métodos de remoção do desgaste ondulatório frequentemente usados:

- Esmerilagem;
- Fresagem.

A Esmerilagem prevê a rectificação do carril e devolução do seu perfil de origem através de rebôlos de esmeril. Existem várias patentes técnicas, com pequenas diferenças de processo (método). Basicamente o esmeril actua tangencialmente, ao perfil da cabeça do carril, variando o ângulo de ataque, consoante o ponto de actuação no perfil.



**Fig. 64 Componentes de esmerilagem de uma unidade, documentação Speno.**

Assim definiram-se 8 ou 9 ângulos para o perfil completo da cabeça do carril, constituindo 8 faixas (pistas) de esmerilagem. Se as antigas unidades esmeriladoras dispunham de ângulos fixos, presentemente os ângulos variam consoante a necessidade de remoção do desgaste. A pressão transmitida ao esmeril é também função da amplitude do desgaste, da opção do operador ou do sistema automático.

Para efectuar todo o perfil da cabeça do carril são necessários 8 rebolos. Assim, o rendimento de uma unidade esmeriladora conta-se em múltiplos de 8 (8, 16, 24, 32...). Para caminhos de ferro de alta velocidade, ou mesmo convencional em que o espaço canal é reduzido, não havendo tempo disponível no horário para a unidade efectuar várias passagens; usam-se esmeriladores com elevado número de rebôlos. Em redes fechadas do tipo metropolitanos e eléctricos, são usadas maioritariamente esmeriladoras de 8 rebôlos, porque existe disponibilidade, fora do horário de exploração, para executar o plano de manutenção, com várias passagens pelo mesmo troço. Para efectuar o perfil da cabeça do carril a esmerilagem actua entre os ângulos  $+15^\circ$  (lado de fora da via) e  $-75^\circ$  (interior da via) (Figura 65 e 66).

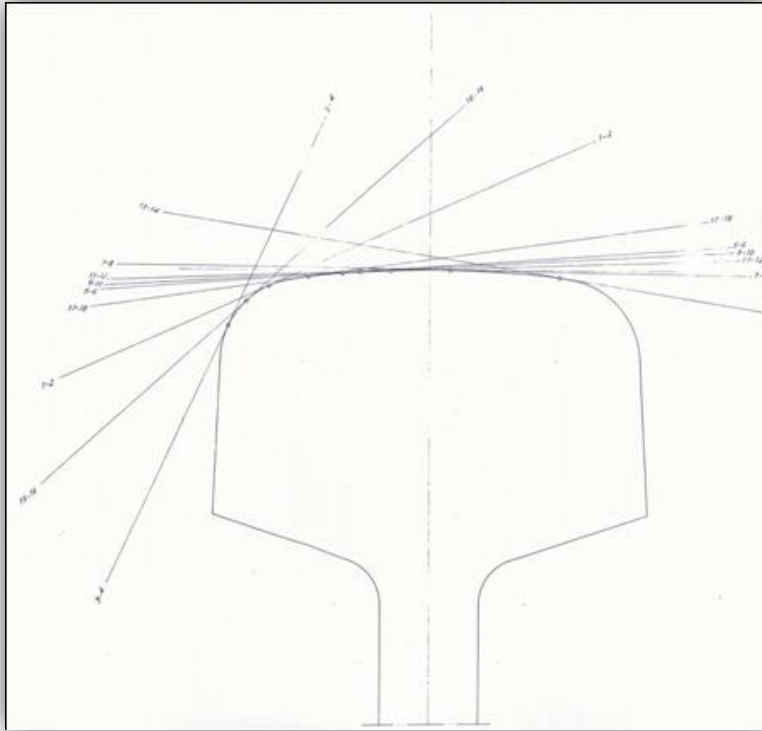


Fig. 65 Ângulos de ataque das mós (rebôlos), documento ML.

Nº do Motor	Ângulo do Eixo das Mós com o P.B.V.
1 – 2	66°
3 – 4	25°
5 – 6	86°
7 – 8	89°
9 – 10	87°
11 – 12	88°
13 – 14	81°
15 – 16	48°
17 – 18	82°

Fig. 66 Ângulos de Esmerilagem, documento ML.

Presentemente as unidades esmeriladoras encontram-se aptas a esmerilar com alto rendimento, nos casos de actuação correctiva com mau estado da via, ou para apenas efectuarem uma actuação preventiva com uma rectificação entre 0,1 a 0,2 mm (21).

Alguns caminhos de ferro, usam estas unidades para executarem em algumas curvas de pequeno raio, alterações ao perfil do carril, de modo a aproveitar o formato cónico das rodas dos comboios, para jogar com os diferentes perímetros. Permitem assim, compensar as diferenças entre as filas altas e baixas, evitando escorregamentos que possam iniciar ou induzir o aparecimento do desgaste ondulatório.

A esmerilagem tem como principal desvantagem, o facto de resultarem desta, partículas contendo metal, abrasivo e resinas sintéticas do ligante. Assim, estas unidades dispõem de potentes aspiradores que recolhem na esmerilagem pelo menos 70% das poeiras produzidas (21).

A Fresagem é apenas usado por um fabricante austríaco (Linsinger), mas que tem tido algum sucesso dado o acabamento (tolerâncias) final do trabalho de reperfilagem.



**Fig. 67 Um carril reperfilado pelo método de fresagem "Linsinger", foto do autor.**

Este método apresenta como desvantagem: o custo das peças (ferros) da fresa, o facto da fresa apenas efectuar rigidamente um perfil de carril pois é necessário mudar a fresa para trabalhar com outro perfil e pelas grandes dimensões globais da unidade. Não deixa contudo de ser uma alternativa ao processo da esmerilagem.

Da operação da fresagem resultam aparas, facilmente recuperadas através de um canal magnético.

O custo destas unidades é normalmente muito elevado, não sendo um investimento ao alcance de todos e limita a sua implementação. Em sistemas ferroviários abertos, interligados com outras redes, não existindo problemas de bitolas, permite a existência de prestadores de serviços (empresas) que operem em diversas administrações, países ou sistemas. No caso de sistemas fechados como são os metropolitanos, ainda por cima com diferentes características limitativas (traçados, gabarits), obriga à aquisição de unidades específicas, dificultando a sua rendibilização como a utilização noutras redes.



### 3.2.2 Lubrificação no Carril

A lubrificação da mesa de rolamento é um sistema novo usado com o fim de atenuar o ruído, tendo sido lançado muito recentemente no mercado. O processo consiste na interposição de uma massa (tipo consistente), através de um sistema mecânico actuado à passagem de cada comboio e colocado na mesa de rolamento, alterando as características do contacto roda carril, reduzindo o ruído proveniente de elevados atritos e contactos metálicos.

Esta massa (Figura 68), cuja composição não retira aos comboios capacidades de tracção e frenagem, reduz a vibração na via ao ser injectada na mesa de rolamento. Ainda não se conhecem os resultados a longo prazo existindo uma noção de que sem retirar as condições de atrito dos comboios, tão necessária a um desempenho de segurança, poderá diminuir o aparecimento do desgaste ondulatorio.

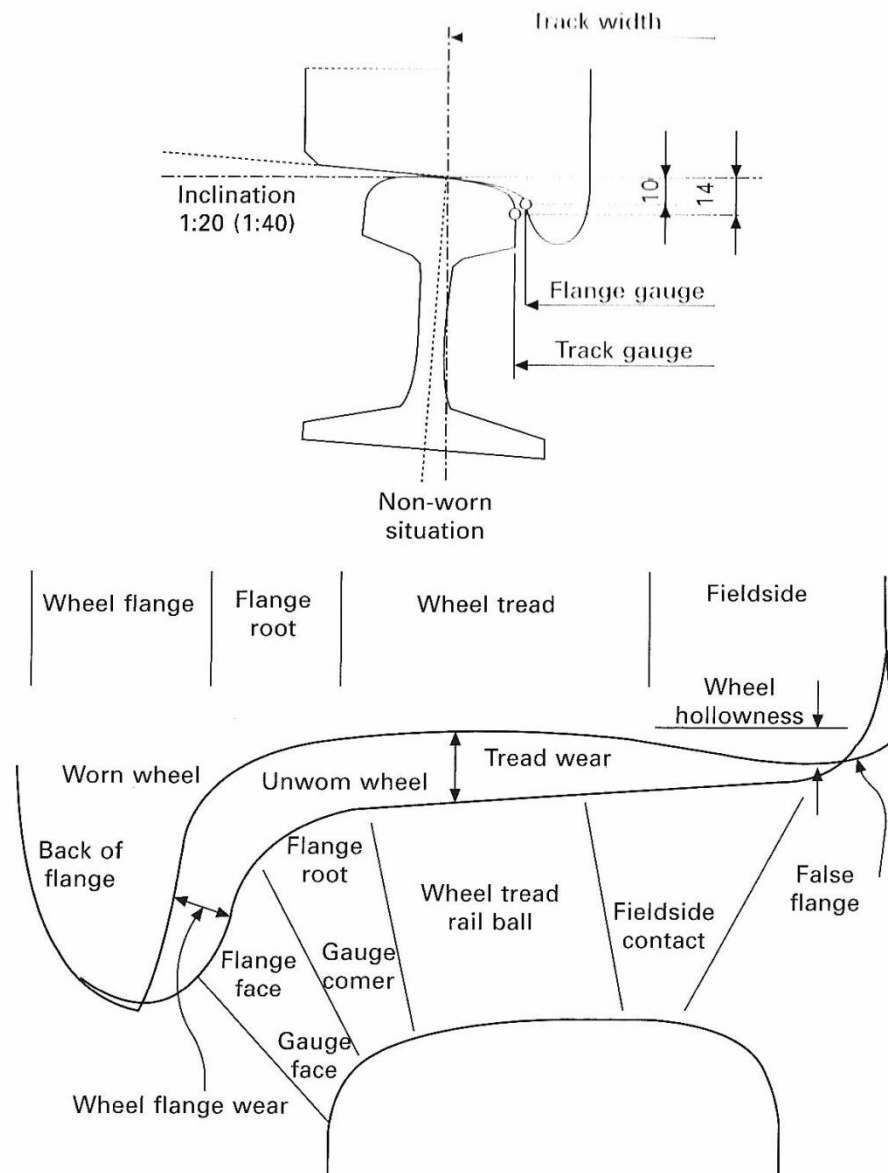
O Metro do Sul do Tejo foi o primeiro a instalar este sistema em 2009 tendo sido realizada uma experiência no Metro de Lisboa, registando-se uma diminuição do ruído roda carril, confirmando que não existe perda de desempenho dos comboios por falta de aderência.

### 3.2.3. Lubrificação no Veículo

Existe também no material circulante um sistema de lubrificação instalada com actuação na zona curva da transição da parte cónica do plano de rolamento da roda para o verdugo, onde existe maior incidência de desgaste e por essa razão verifica-se maior alteração do perfil das rodas (Figura 69).



**Fig. 68 Atenuador de ruído, foto do autor.**



**Fig. 69 Zonas das rodas sujeitas a maior impacto (stress), Wheel-rail Interface Handbook.**

Esta lubrificação é efectuada através de um sistema tipo “baton” (Figura 70), que apenas contacta com esta zona da roda, quando a composição estiver a inscrever uma curva. Este “baton” à base de grafite, reduz o atrito neste ponto da roda, sujeito a maior desgaste. Trata-se de um método indirecto, mas de um modo sistemático evita defeitos, desgastes, alterações do perfil das rodas e dos carris, ruído, vibração, evitando o aparecimento do desgaste ondulatório.

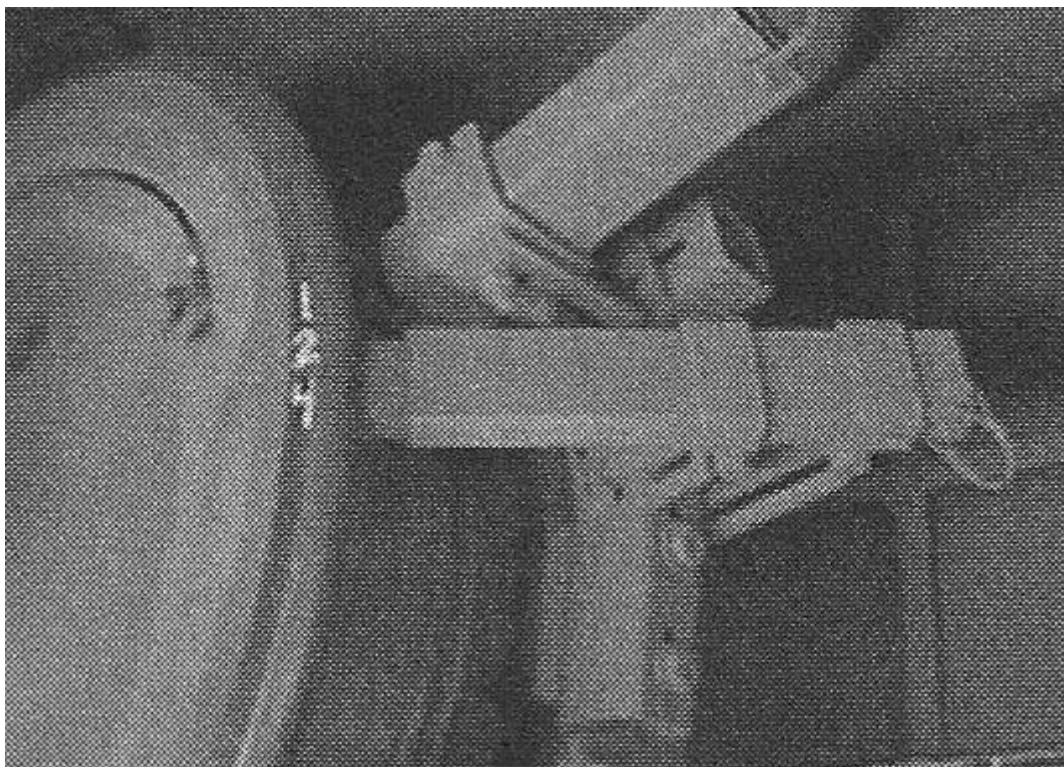


Fig. 70 Lubrificadores de verdugos (controladores de atrito), *Wheel-rail Interface Handbook*.

### 3.2.4 Lubrificação na Via

Também na via férrea se recorre à lubrificação dos carris, com o fim de melhor inscrever dinamicamente o comboio em curva, controlando o atrito, reduzindo desgastes laterais na via e rodados. Esta lubrificação da parte lateral interior dos carris da fila alta das curvas e nas lanças dos aparelhos de via, é efectuada mecanicamente, através de um “pente” espalhador colocado lateralmente aos carris, sendo injectada massa lubrificante actuado pela passagem do comboio (Figura 71).

Esta lubrificação é muito usada, pois reduz desgastes e indirectamente também situações de ruído de alta frequência. Tem como inconveniente, a desafinação do sistema de lubrificação, que em excesso deposita massa na via em demasia que se espalha para a mesa de rolamento ou em contrário apresenta-se obstruído. Quando esta situação se dá, torna-se necessário recorrer aos piquetes, para que com solvente, limpem manualmente toda a superfície de contacto do carril retirando a massa lubrificante. Este tipo de ocorrência diminuiu bastante com os novos sistemas de lubrificação de accionamento eléctrico com regulação electrónica permitindo um doseamento de massa lubrificante adequado.

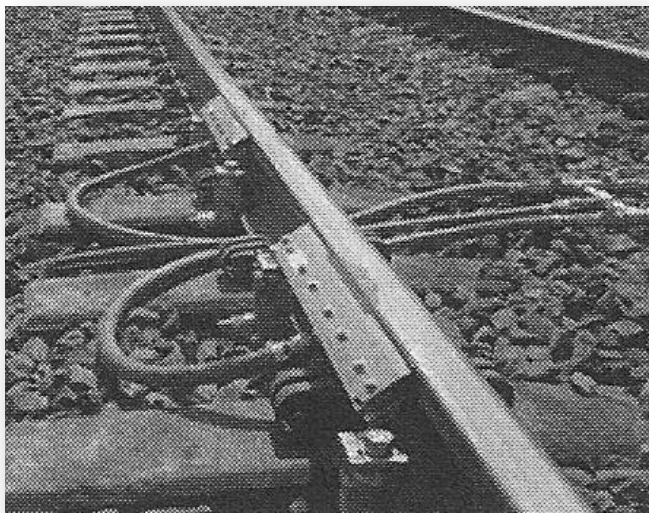


Fig. 71 Lubrificador de Via, documentação ML.

Todos estes sistemas de lubrificação, são instalados essencialmente por motivos de prevenção de desgastes redução de ruído e vibração. Estão contudo também associados à redução do desgaste ondulatorio pelo facto de retardar o aparecimento de defeitos na via que levam à sua formação.

#### 4. Remoção do Desgaste Ondulatório

Como foi referido anteriormente a existência de desgaste ondulatorio é uma situação indesejável e a sua remoção/manutenção a um nível imperceptível, é uma opção dispendiosa. Também não se identificou que a erradicação total do desgaste ondulatorio seria possível e qual o método.

Está-se então perante um fenómeno presente em todas as ferrovias, em maior ou menor escala sendo necessário para o reduzir, acções de manutenção específicas. Assim, consoante as características que originam o fenómeno a remoção do desgaste ondulatorio deverá ser objecto de estudo, tendo em conta o contexto operacional do troço ou via em questão.

Deste estudo deverá sair definida a abordagem ao tipo de manutenção mais adequada:

- Actuação Preventiva;
- Actuação Correctiva.

##### 4.1 Actuação Preventiva

Em presença de desgaste ondulatorio, que é uma situação decorrente do contacto roda/carril sob condições “adversas” próprias, consoante o tipo e dimensão atingidos, estar-se perante uma decisão. Qual o procedimento a tomar?



A opção é por uma acção de manutenção baseada em critérios económicos, de conforto, ambientais e de segurança.

Se o sistema transportar passageiros exigirá uma decisão de acção de remover proporcional à evolução do desgaste, que normalmente também está associado ao número de circulações horárias em exploração (frequência, cadência). Se não se pretender deixar entrar o sistema num estado de deformação/degradação, que obrigue à substituição de componentes dispendiosos e, que obriguem a restrições de tráfego na intervenção, teremos que implementar uma actuação preventiva.

A atitude preventiva pressupõe criar todo um programa de manutenção, que através da rectificação do plano de rolamento e reperfilagem do perfil transversal do carril, remova e mantenha o desgaste ondulatório numa fase em que se evitam as consequências que este possa provocar.

Na actuação preventiva são usadas unidades ferroviárias pesadas de fabricantes conhecidos (Speno, Plasser & Theurer, Loram-Rotra, Linsinger, Fairmount-Tamper, etc.), em regime regular; que actuando segundo um programa sistemático mantenham o desgaste ondulatório em níveis imperceptíveis.

#### **4.1.1 Em Exploração**

Uma vez o sistema em serviço e em exploração, a actuação preventiva irá cair sobre a manutenção preventiva (sistemática ou “on condition”) e sobre dispositivos activos de redução de atritos. Assim; consideraríamos as seguintes actuações para controlar ou remover, ao nível imperceptível, o desgaste ondulatório nas nossas vias:

- Esmerilagem reperfilagem preventiva;
- Controlo do atrito na mesa de rolamento;
- Controlo do atrito lateral dos carris em curva;
- Lubrificação embarcada.



**Fig. 73** Unidade esmeriladora Speno, catálogo Speno.



**Fig. 72** Unidade esmeriladora Speno em operação, propriedade do Metropolitano de Lisboa, foto do autor.

Alguns destes dispositivos estão também ligados a outros defeitos ou fenómenos que possam ocorrer.

A acção de remoção do desgaste ondulatorio de um carril ou dum troço de via, passa: a) pela substituição do(s) carril(s) envolvido(s); b) pela esmerilagem/reperfilagem; sendo uma das mais importantes acções de controlo e remoção deste desgaste.

Como se observou nos capítulos anteriores, uma das mais importantes actuações associadas ao desgaste ondulatorio é a esmerilagem/reperfilagem. Na unidade adquirida pelo Metropolitano de Lisboa, o fabricante Speno iniciou a prática de associação da esmerilagem com o reperfilamento do carril. Hoje os diferentes fabricantes de unidades esmeriladoras de carris apresentam unidades que, em simultâneo, removem o desgaste ondulatorio, normalmente situado na mesa de rolamento e criarem no carril o seu perfil de origem.

Existem pelo menos quatro processos patenteados de remoção do desgaste ondulatorio através da esmerilagem, existindo um outro que utiliza a fresagem:

- Speno (Suíça) dispõe de um processo de esmerilagem patentado, que através de rebolos orientados angularmente rectifica toda a cabeça do carril. Esta empresa é uma referência no campo da investigação e de soluções universais;
- Plasser & Theurer (Áustria) líder de vendas de equipamento ferroviário de serviço, dispõe de um sistema de esmerilagem alternativo, utilizando mós com o formato negativo da cabeça do carril;



- Fairmaunt Tamper (USA) fabricante de equipamento ferroviário de serviço, com mercado essencialmente Norte Americano dispõe de uma unidade esmeriladora utilizando rebôlos de pequeno diâmetro;
- Loram Rotra (Itália) pequeno fabricante de equipamento de via dispõe de uma esmeriladora com processo patenteado;
- Linsinguer (Áustria) fabricante pequeno de equipamento de via férrea, que desenvolveu um processo de fresagem da cabeça do carril com elevada tolerância de acabamento.

Todas as unidades possuem actualmente meios de medição/auscultação do estado da via antes da operação de esmerilagem, dispondo de programas de actuação com vista a otimizar a actuação. Tendo em consideração que a passagem de uma roda é definida como uma acção irreversível, resultando num desgaste da superfície de contacto através da deformação e descolagem de pequenas partículas microscópicas de poeira metálica; será o somatório do número de passagem de eixos que provocará a evolução do desgaste ondulatório. A experiência também demonstra que, se não forem tomadas medidas correctivas de controlo dos desgastes nos carris, resulta uma autodeterioração ao ponto de não se poderem regenerar; obrigando à sua substituição.

Os meios de avaliação e medição da superfície dos carris, actualmente à disposição no mercado, permitem executar uma previsão da evolução do desgaste antes mesmo de atingir uma situação perceptível. Assim, será possível programar as operações de esmerilagem, de modo a poderem ser realizadas quando o desgaste ondulatório se encontra num desenvolvimento controlável (Figura 75).

As unidades esmeriladoras existentes no mercado, permitem efectuar passagens com o fim de regularizar/rectificar a superfície de contacto dos carris, evitando o aparecimento de pontos de pressão unitária elevada e as formas de sobrecarga na estrutura do carril.

O Metropolitano de Lisboa identificou que com o programa de esmerilagem preventivo sistemático, outros defeitos existentes nos carris como esmagamentos pontuais, escamações, rebarbas e pequenas fracturas desapareceram, dado haver uma rectificação preventiva e programada das superfícies.

A operação de esmerilagem, ao rectificar a superfície de rolamento do carril remove os defeitos metalúrgicos, desgastes, deformação por esmagamentos, fissuras e zonas de “stress” pontuais, evitando a sua progressão e constituindo um meio de aumentar a vida útil de um carril, das infra-estruturas e do material circulante (Figura 75).

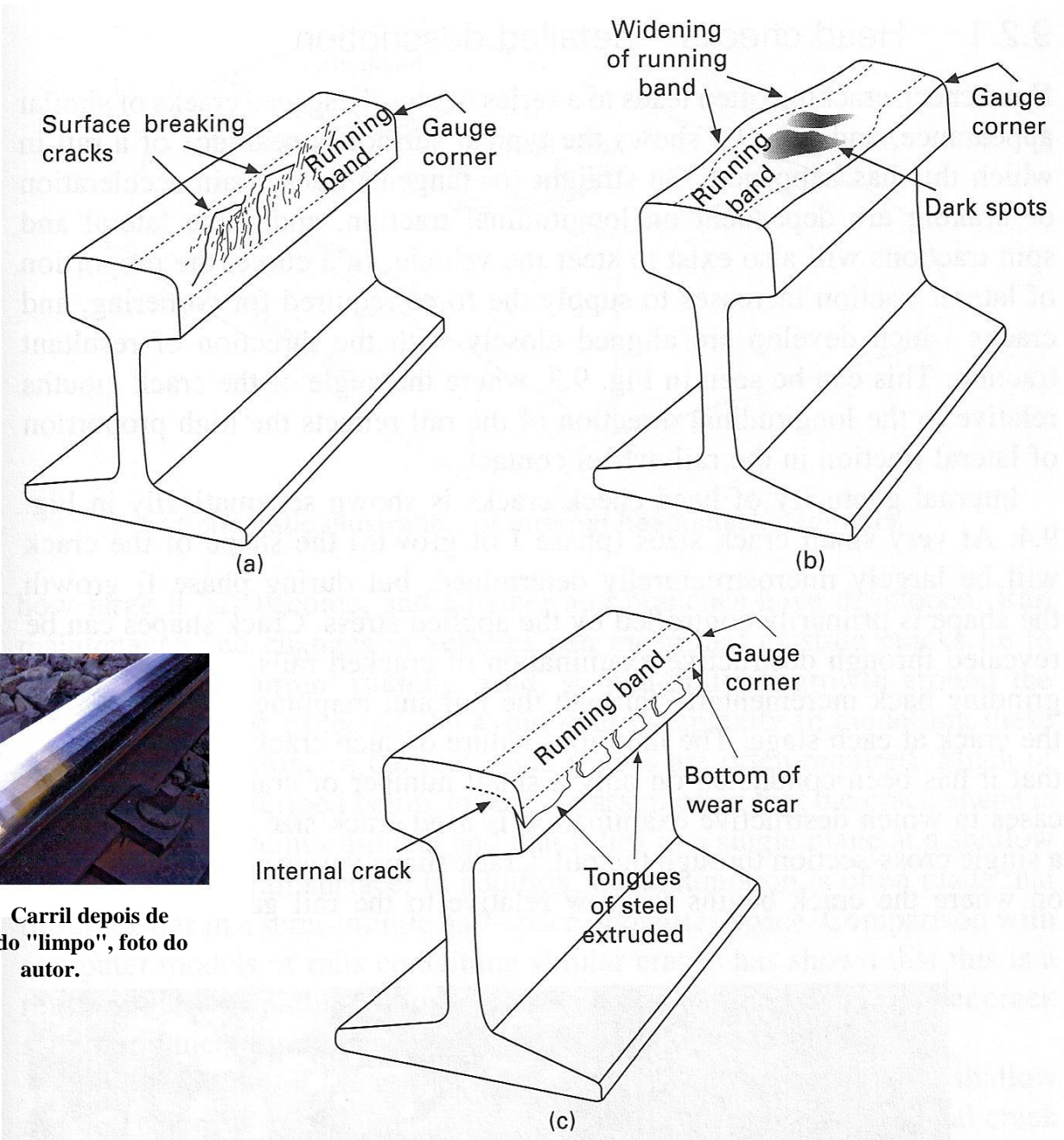


Fig. 74 Carril depois de esmerilado "limpo", foto do autor.

Fig. 75 Defeitos do carril removidos com a esmerilagem; rebarba, fadiga, fissuras e esmagamentos



A esmerilagem de via é uma operação dispendiosa dado o custo no investimento numa unidade esmeriladora. A falta de normalização existente nos Metropolitanos, já anteriormente referida, leva a que cada sistema tenha as suas próprias limitações: gabarit, bitola, sistema de captação de corrente, traçados limitativos à entrada de máquinas de via provenientes dos caminhos de ferro. Esta individualização de cada rede, obriga à execução de unidades esmeriladoras com parâmetros individualizados, dificultando o “out-sourcing” e subcontratação de serviços e aumentando as despesas.

O facto de as unidades esmeriladoras mais modernas serem todas controladas através de computador, com programas de optimização, permitiu que na Áustria se iniciasse uma experiência de alteração dos perfis dos carris em algumas curvas. Esta pequena alteração no perfil da cabeça dos carris, coloca a fila alta a contactar a roda no seu ponto de maior diâmetro junto do verdugo e a fila baixa assente na zona de menor diâmetro da roda.

Assim, consegue-se à custa de variação dos perfis dos carris em curva, situação fácil de manter com um programa de manutenção preventivo sistemático e uma moderna unidade esmeriladora de carris; compensar os diferentes perfis das filas alta e baixa, reduzindo o escorregamento das rodas e consequentemente o desgaste ondulatório.

#### **4.2 Actuação Correctiva**

Dependendo da “sensibilidade” dos elementos responsáveis pela gestão de cada sistema ferroviário e dos procedimentos de gestão de ocorrências e manutenção, estará associado uma maior ou menor qualidade das suas vias férreas. Assim, encontramos sistemas ferroviários em que se verifica bastante investimento, mas com as suas vias num estado deplorável na superfície do seu carril de rolamento. Por vezes também se verificam situações contrárias, de sistemas ao qual se associava a ideia de pouco investimento, mas que dispõem de vias férreas em excelente estado (qualidade).

Não foram identificados, registos de acidentes provocados directamente pelo desgaste ondulatório. Sabe-se contudo que o desgaste ondulatório poderá reduzir drasticamente a vida útil de elementos da infra-estrutura de via como carris, fixações, travessas e plataforma de via, sendo estes que indirectamente, caso não sejam substituídos, que podem estar ligados a roturas da infra-estrutura.



Assim, até há poucos anos, certas administrações optavam por uma actuação que chamamos de correctiva, ou seja, apenas se intervir quando a situação estiver mais perto do limite de se verificarem roturas na exploração por avarias provocadas pelo desgaste ondulatório. Assim, verificam-se casos de metros e de sistemas de “mass transit” que apenas contratavam prestação de serviços de esmerilagem de via anualmente para repor as suas vias numa situação de normalidade. Estes sistemas são caracterizados por elevado ruído, vibrações, passando uma imagem de degradação/decadência e desleixo de um sistema.

Presentemente, verifica-se a nível global uma maior exigência de conforto dos serviços e de condições ambientais. Também de modo geral hoje se verifica pela parte das populações, uma exigência de melhor ambiente nas cidades e centros urbanos. São frequentes situações de queixas de moradores na vizinhança de vias férreas, sejam elas caminhos de ferro, metros ou eléctricos; queixando-se de ruídos e de vibrações nas suas casas, provocado pela passagem dos comboios. Presentemente, já não há muito espaço de manobra para os gestores técnicos ferroviários, limitados pelas recentes legislações de ruído e ambientais.

Nas vias de alta velocidade será de todo impossível não ter implementado um programa de manutenção preventivo de esmerilagem de via férrea, dada a elevada exigência quanto a parâmetros de via.

Há situações de caminhos de ferro em que estes valores não se impõem pelos reduzidos tráfegos. não justificam todo este conjunto de actuações dispendiosas, como são os: ramais portuários, linhas regionais de baixa velocidade, linhas dedicadas de mercadorias, entre outras que não estejam submetidos às exigências anteriormente referidas.

Não deixamos fechar este capítulo, sem referir que existem hoje bastante mais meios de recolha e análise dos parâmetros de via, permitindo que se tenha a qualquer altura uma completa quantificação (monitoria) do nosso sistema ferroviário, que falaremos no ponto 4.

## **5. Meios e Processos de Medição**

### **5.1 Introdução**

O desenvolvimento dos métodos de Ensaio Não Destrutivos, associado aos meios de recolha de medições, sem contacto utilizando, o “laser” e o ultra-som permitiu que se passasse da simples



operação de esmerilagem, baseada em medições pouco rigorosas; para leituras micrométricas que permitem imediatamente avaliar a evolução do desgaste entre a roda e o carril. Assim, o conhecimento do estado da instalação permite uma melhor avaliação da fase em que se encontra o desgaste ondulatório, permitindo rectificações ligeiras permitindo aumentar a sua vida útil.

Estes meios de auscultação e de recolha de dados, associados a unidades esmeriladoras de última geração, permitem efectuar programas de manutenção de esmerilagem de via, com grande eficiência precisão e qualidade, obtendo-se grandes ganhos no aumento da vida útil dos carris e indirectamente dos rodados e infra-estrutura.

## 5.2 Método de recolha de dados

Existem no mercado várias configurações de equipamentos de recolha de dados, que permitem efectuar o levantamento gráfico do estado da superfície do carril na mesa de rolamento, podendo-se em certos casos recolher o perfil transversal da cabeça do carril em troços contínuos de centenas de metros.

A configuração destes aparelhos varia entre versão ligeira ou embarcada:

- Os aparelhos de medição na sua configuração ligeira, são normalmente instalados em pequenos “charriots” providos de roletes e destinam-se a ser operados manualmente. Estes apresentam-se como equipamentos portáteis, capazes de serem transportados em veículos rodoviários ligeiros até um determinado troço de via, para recolha de dados. Uma vez montado no local, estes são ligados a computadores portáteis do tipo “notebook” ou “PDA’s”, que registam os dados recolhidos, que são posteriormente levados para se avaliarem os resultados e estabelecer o programa de actuação. Destinam-se a empresas de prestação de serviços, empreiteiros, fiscalização;
- Os aparelhos embarcados encontram-se normalmente instalados em veículos ferroviários e destinam-se à manutenção pesada; podendo estar na própria unidade esmeriladora de carris que efectua um levantamento de dados ante de proceder à esmerilagem, num veículo de serviço tipo draisine ou mesmo como é o caso da alta velocidade japonesa, estar instalado num comboio de alta velocidade. A dificuldade, cada vez maior, das equipas de manutenção de obterem autorizações para intervirem na via, leva a que algumas medições e auscultações sejam feitas por aparelhos instalados em comboios de alta velocidade. Assim, as medições são efectuadas por veículos em movimento, à mesma velocidade das circulações mais rápidas de passageiros, intercalados entre comboios.



### 5.3 Limites Estabelecidos

As medições da geometria do carril visam determinar os valores de desgaste ondulatório da mesa de rolamento dos carris, ou seja o nivelamento longitudinal do topo da cabeça do carril (superfície de contacto/mesa de rolamento).

Presentemente e como referimos anteriormente, as modernas unidades esmeriladoras de carris, possuem sistemas de medição sem contacto de todos os parâmetros necessários e definidos para caracterizar o estado “antes da esmerilagem” e “depois da esmerilagem”. A análise após o levantamento de parâmetros “antes da Esmerilagem”, permite ao responsável pela decisão de programação dos parâmetros de remoção do desgaste ondulatório, definir o tipo de actuação correctiva a efectuar. Algumas unidades possuem programas informáticos que propõem ao operador uma actuação exactamente nos pontos onde se verifica desgaste, visando só remover o material necessário, aumentando a eficiência da operação.

Existem também meios ligeiros de medição e levantamento de parâmetros do carril com equipamentos portáteis. Permite-se assim, que uma equipa possa, sem ter que recorrer a uma circulação ferroviária que ocupe um canal de horário, efectuar medidas pontuais por amostragem e detectar uma área a intervir, possibilitam que um inspector possa fiscalizar e confirmar os valores dados por um prestador de serviços externo, confirmando a boa execução do trabalho.

Equipamentos ligeiros mais usuais:

- Régua medidora da geometria do carril; trata-se duma régua electrónica com 1 metro de comprimento, que possui diversos pontos de medição sem contacto, que efectua o levantamento do nivelamento longitudinal registando-o em gráfico (após ligação a computador). A leitura do gráfico permite obter o estado do desgaste ondulatório, com uma resolução de 0.01 mm e uma precisão com uma tolerância de +/-0.02mm. Existem pelo menos dois fabricantes de equipamentos deste tipo: a “Rectiway” da Geismar (Figura 75) e a Vogel/Prosutec (Figura 78)

(24);

**Fig. 76 Régua medidora da geometria do carril  
Vogel/Prosutec, documentação da marca.**





Fig. 78 “Rectiway” da Geismar, catálogo da marca.



Fig. 77 Trolley de medição do desgaste ondulatório, documentação ML.

- Trolley de medição do desgaste ondulatório; trata-se de um pequeno charriot em alumínio, desmontável para se poder transportar em veículos rodoviários ligeiros, que efectua, uma vez montado e ligado a um computador ou um PDA, uma leitura contínua com armazenamento de dados (Figura 78). Estes equipamentos registam graficamente a longitude e amplitude de onda na mesa de rolamento, localizam no gráfico referências que permitem identificar posteriormente os locais (24).
- Existem outros dispositivos para medições pontuais mais detalhadas como a medição do material removido após a esmerilagem; assim são usadas cêrceas específicas, calibres e comparadores.

Podemos então definir para o registo gráfico da geometria do carril e restantes medições detalhadas; uma resolução de 0,01 mm e uma precisão +/-0,02 mm.

Tolerâncias de recepção da esmerilagem preventiva do desgaste ondulatório de carris:

	Comprimento de Onda	Tolerâncias
Ondas Curtas	30 a 200 mm	+/- 0,02 mm
Ondas Longas	200 a 3000 mm	+/- 0,3 mm

Estabeleceram-se limites para a quantidade de material a remover, na mesa de rolamento, por cada actuação na esmerilagem preventiva:

- Quantidade mínima = 0,2 mm;
- Quantidade máxima = 0,3 mm.



Para a esmerilagem correctiva, em que se poderá estar na presença de casos de degradação gravosos, os valores limite para a quantidade de material a remover não estão sujeitos a limite.

O tipo e modelo de Unidade Esmeriladora terá que possuir um rendimento " $\eta$ " mínimo. Este "rendimento" é definido em " $\chi$ " Metros por Hora [m/h]. Esta variável " $\chi$ " define o número de metros esmerilados (21).

Considera-se uma distância esmerilada, quando é atingido um estado de acabamento final de:

- Reperfilagem da cabeça do carril entre os ângulos  $-70^{\circ}/+15^{\circ}$  (interior/exterior) e do perfil transversal do carril U 50, com uma tolerância de  $\pm 0.5$  mm;
- Ondas Curtas - remoção do desgaste ondulatório, na mesa de rolamento, com a uma tolerância admitida de 0,02 mm, medidos numa distância de 30 a 200 mm;
- Ondas Longas - remoção do desgaste ondulatório na mesa de rolamento, com uma tolerância admitida de 0,3 mm, medidos numa distância de 200 a 3000 mm;
- Atingido um grau de rugosidade mínimo de  $10 \mu$ .

Para se obter este "estado final" a que chamamos de "esmerilado" não é considerado o número de passagens, pois a velocidade de trabalho pode variar de equipamento para equipamento e consoante o estado inicial da via férrea.

O rendimento mínimo admitido pelos serviços técnicos, por exemplo do Metropolitano de Lisboa é de 500 metros, de via esmerilada por hora, atingindo o acabamento final acima definido (21).

#### **5.4 Medições no Metropolitano de Lisboa**

O Metropolitano de Lisboa é uma rede fechada maioritariamente em túnel, tendo também algumas situações em viaduto. À data da sua abertura em 29 de Dezembro de 1959, passou a ser a única via com bitola internacional em conjunto com os eléctricos da cidade do Porto, em Portugal. Desde a sua origem que foram aplicadas soluções técnicas inovadoras relacionadas com a via e material circulante. Tem tido sempre uma política de geral de actualização tecnológica, renovação sistemática e contínua das suas infra-estruturas e material circulante.

O traçado das suas vias prevê curvas com raios mínimos em exploração de 150m e de 70 metros em estaleiro. Existem pendentes frequentes de 4%. Estes traçados são frequentes em Metros pesados sendo uma condicionante para se implantarem em espaços urbanos.

Apresenta um valor médio entre estações inferior a 1 quilómetro, o que em conjunto com as velocidades praticadas (elevada média comercial), traçado exigente, número de comboios por dia por linha superior a 3 centenas, com uma frota homogénea de 16 eixos motores por composição; coloca o Metropolitano de Lisboa vulnerável ao aparecimento deste inevitável fenómeno físico.

Presentemente o Metropolitano de Lisboa, pratica um plano de monitorização do desgaste ondulatório, onde também se controlam outros elementos, através de meios visuais, medições da própria empresa ou contratada, através de equipamentos ligeiros de medição e registo. Esta monitoria gera um plano de actuações sistemáticas com uma unidade esmeriladora de carris da marca Speno.

O Metropolitano de Lisboa, ao manter esta sistematicidade, colocou a sua via num elevado grau de qualidade em relação a outras redes congéneres, pois as actuações são efectuadas com os carris com o desgaste ondulatório perto do limite que o torna perceptível. Assim, em situação de normalidade a esmeriladora efectuará duas passagens (ida e volta) com uma remoção de material

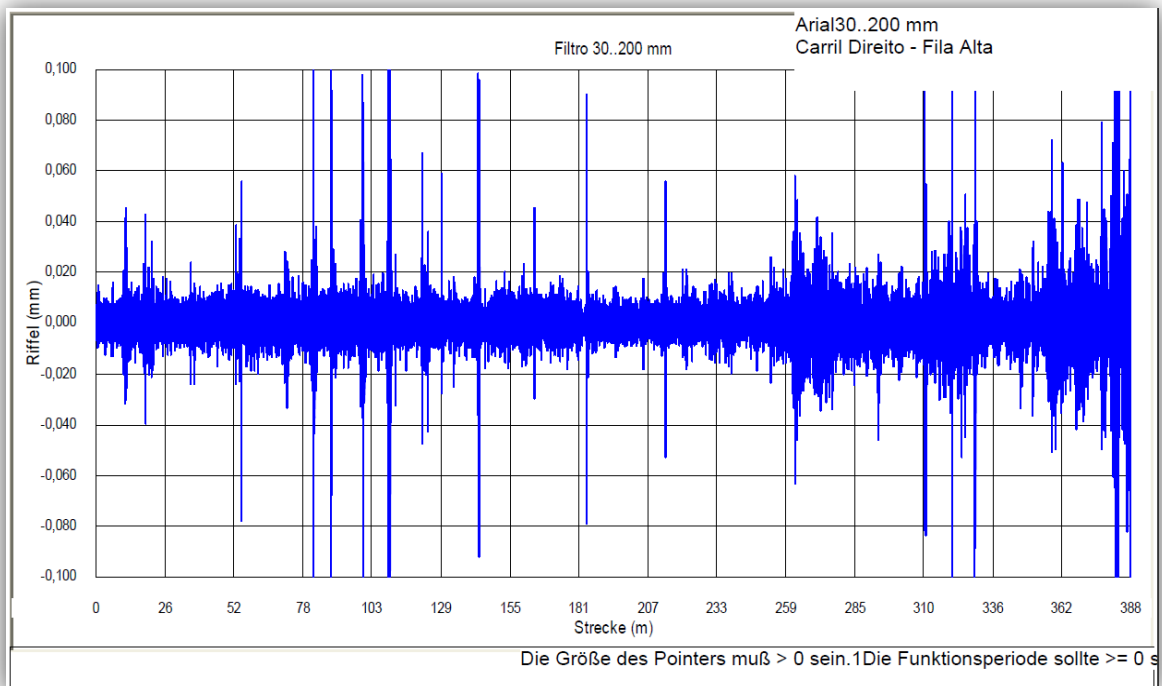


Fig. 79 Exemplo de medição efectuada na curva Campo Grande – Alvalade, documento ML



máxima (para as duas passagens) de 0,2 mm.

Ensaio efectuados mostram que se pararmos a operação de esmerilagem de via (remoção do desgaste ondulatório), este aparece a um nível perceptível ao fim de aproximadamente 4 meses nas curvas de 150 metros de raio. A sua evolução segue uma linha exponencial, atingindo-se ao fim de 10 meses valores de amplitude de mais do que 1 mm em ondas curtas, num desgaste ondulatório definido como “Rutting”.

### **5.5 Medições em outros Sistemas de Metros**

Efectuámos uma compilação de dados extremamente interessantes, que nos permite observar outras situações nos sistemas de Metropolitanos de outras áreas metropolitanas. Estes dados são provenientes de estudos da UITP – Comité International des Metros – Sous-comité installations fixes (25).



Tabela 7 “Caractéristiques des instruments mesurant le profil d’usure ondulatoire utilisés par les réseaux”

Réseau	Appareils	Caracté-ristiques	Grandeur mesurée	Principe	Précision	Support Traitement
AMT GENES	Anciens non modifiés	Portable	Amplitude, longueurs d'ondes		0,1 mm	papier
ATAC ROME	nouveaux	Portable	Amplitude, longueurs d'ondes	mécanique	0,05 mm	papier
ATM MILAN	nouveaux	I Portable II embarqués (60 km/h)	Amplitude	I mécanique II électro - magnétique	I 0,05 mm II 0,01 mm	I Papier II Disque optique II analyse avec logiciel
BVG BERLIN	nouveaux	Portable	Amplitude longueurs d'ondes	Palpeur sur table de roulement avec traceur	0,05 mm	Papier
CMSP SAO PAOLO	Anciens non modifiés	Portable	longueurs d'ondes	Pantographe	0,01 mm	enregistrement graphique
CPTM SAO PAOLO	nouveaux	Portable Embarqués	Amplitude longueurs d'ondes	Palpeur mécanique Voir document joint	0,05 mm	
FCG BARCELONE	nouveaux et anciens modifiés	Portable	Amplitude longueurs d'ondes	mécanique	haute	papier visuel
LUL LONDRES	nouveaux	Portable Embarqués (8 km/h)	Amplitude longueurs d'ondes	plusieurs instruments utilisés : accéléromètre sur boîte d'essieu d'un véhicule de mesure (TRV), palpeurs	de 1 à 4 mm	informatique Analyse numérique, etc
MB BILBAO	nouveaux	Portable Manuel	Amplitude longueurs d'ondes	mesure sans contact	entre 0,01 et 0,02 mm	fichier texte analyse FFT
METROREX BUCAREST		Portable	Amplitude longueurs d'ondes	dispositif de mesure mécanique par palpement de la surface supérieure du rail		
MTR HONGKONG	nouveaux	I Portable II embarqués (2 km/h)	Amplitude longueurs d'ondes	I courant de Foucault	0,1 mm	traceur analogique et digital memory card dans logiciel sous forme de fichier texte
MVV MUNICH	Anciens non modifiés	Portable	Amplitude longueurs d'ondes	mécanique	0,1 mm	papier millimétré visuel



<b>RATP</b> PARIS	nouveaux	I Portable II embarqués (40 km/h)	Amplitude longueurs d'ondes	I patin glissant de 0,8 m (mesure centrale) II patin glissant de 0,3 m (mesure par 8 capteurs de proximité)	I 0,01 mm II 0,05 mm	numérique filtrage onde longue/courte, calcul profondeur moyenne, analyse statistique
<b>RET</b> ROTTERDAM	Anciens non modifiés	Portable	Amplitude	mécanique	0,1 mm	stylo
<b>SPT</b> GLASGOW	nouveaux	Portable	Amplitude longueurs d'ondes		quelques microns	numérique Raw-RMS
<b>TMB</b> BARCELONE	Anciens non modifiés	Portable : Embarqués (60 km/h)	Amplitude longueurs d'ondes	triangulation optique		Informatique
<b>TUSR</b> TEHERAN	Anciens non modifiés	Portable				
<b>TWM</b> NEWCASTLE		Portable	Amplitude longueurs d'ondes			
<b>WL</b> VIENNE	nouveaux	Portable	Amplitude longueurs d'ondes	électro - magnétique	0,05 mm	numérique Tableur



Tabela 8 “Procédés d’élimination de l’usure ondulatoire“

Réseau		Elimination de l’usure ondulatoire par meulage
AMT	GENES	Manuel ou par train utilisant des meules radiales et tangentes pour re profilage du champignon
ATAC	ROME	Train SPENO
ATM	MILAN	Train SPENO RR24 MC-2 meules à angles variable (de -70 ° à + 30 °)
BVG	BERLIN	Meule à axe vertical sur champignon du rail
CMSP	SÃO PAULO	19 meules à rail orientables
CPTM	SÃO PAULO	Train SPENO
FCG	BARCELONE	Système de meules rotatives MECNO
HHA	HAMBOURG	Train meuleur Meulage manuel avec tête de meulage rotative inclinable
LUL	LONDRES	Train SPENO 24MC-1 RATP à 24 meules train meuleur Rotra MS901
MB	BILBAO	Machine à meule horizontale
METROREX	BUCAREST	GEISMAR
MLEP	LISBONNE	Meulage
MTR	HONGKONG	Machine de meulage au profil Pandrol Jackson à 16 meules
MVV	MUNICH	Train SPENO
RATP	PARIS	meulage avec train meuleur équipé de meules à axe vertical inclinables
RET	ROTTERDAM	Meulage du champignon avec 5 meules une meule par facette
SMRT	SINGAPOUR	SPENO 16 meules RGV
STC	MEXICO	Machine Plasser and Theurer GWM-110 à 4 meules vibrantes
STIB	BRUXELLES	Meulage par train SPENO RR24MC6 et HRR12M Meulage par la STIB avec le "shorlug"
SPT	GLASGOW	Sur le point d'utiliser l'équipement Schweerbau comportant 4 meules
TUSR	TEHERAN	par meules
TWM	NEWCASTLE	Meulage
VAG	NUREMBERG	Meules et train SPENO
WL	VIENNE	Meule rotative horizontale
WMATA	WASHINGTON	Meulage



Tabela 9 “Lutte contre l’usure ondulatoire et stratégies des réseaux“

Réseau		Critère déclenchement meulage	Fréquence meulage (périodicité fixe) ou fréquence de contrôle (limite dépassée)
CPTM	SÃO PAULO	Périodicité fixe	-
FCG	BARCELONE	Périodicité fixe	3 ou 6 mois
HHA	HAMBOURG	Périodicité fixe	1 an
MTR	HONGKONG	Périodicité fixe	selon paramètres géométriques de la voie
MVV	MUNICH	Périodicité fixe	-
RATP	PARIS	Périodicité fixe	déterminée par l'analyse des réclamations de riverains dans les zones récurrentes
STC	MEXICO	Périodicité fixe	1 an
STIB	BRUXELLES	Périodicité fixe	-
TUSR	TEHERAN	Périodicité fixe	-
AMT	GENES	Limite 0,3 mm dépassée	15 jours
ATAC	ROME	Limite 0,3 mm dépassée	-
ATM	MILAN	Limite 0,3 mm dépassée	1 par mois
BVG	BERLIN	Limite 0,3 mm dépassée	contrôle visuel trimestriel mesures si nécessaire
CMSP	SÃO PAULO	Limite 0,25 mm dépassée	1 an
CPTM	SÃO PAULO	Limite dépassée	6 mois
LUL	LONDRES	Limite 0,08 mm dépassée	
MB	BILBAO	Limite dépassée 0,18 mm pose ballast 0,10 mm pose béton	1 fois par mois dans les courbes à l'étude
METROREX	BUCAREST	Limite dépassée	3 mois
MTR	HONGKONG	Limite 0,4 mm dépassée	trimestrielle
MVV	MUNICH	Dépassement valeur maximale	-
RATP	PARIS	Limite 0,2 mm dépassée	6 mois
SPT	GLASGOW	Limite dépassée	-



Tabela 10 “Contrôle du meulage“

Réseau		Défaut résiduel accepté après meulage	Précision de l'appareillage de mesure du réseau
AMT	GENES	0,05 mm	0,1 mm
ATAC	ROME	0,03 mm	0,05 mm
ATM	MILAN	0,05 mm	0,05 mm et 0,01 mm
BVG	BERLIN	0,05 mm	0,05 mm
CMSP	SÃO PAULO	0,25 mm	0,01 mm
CPTM	SÃO PAULO	0,15 mm	0,05 mm
LUL	LONDRES	0,01 mm	inférieure à 0,01 mm
MB	BILBAO	0,01 mm	entre 0,01 et 0,02 mm
METRORE X	BUCAREST	de 0,1 à 0,15 mm	
MTR	HONG KONG	0,05 mm	0,1 mm
RATP	PARIS	0,05 mm	0,01 mm
RET	ROTTERDAM	0,3 mm / m	0,1 mm
SMRT	SINGAPOUR	0,4 mm	



**Tabela 11 “Modifications d’opérations de maintenance de la voie visant à limiter le développement de l’usure ondulatoire“**

Réseau	Modification table et congé de roulement par usinage	modification de la rugosité du rail	Après meulage, enlèv. couche d'acier supplémentaire après eff. ondulations	Dispositifs spéciaux de lubrification
AMT GENES				graissage manuel du congé du rail et graissage du bord de la roue du train
ATM MILAN				Expérimentation puis abandon d'un système à pédale eau pulvérisée pour finalement système de lubrification des roues Deux fois moins d'opérations de meulage
BVG BERLIN		rugosité	Couche supplémentaire d'épaisseur 0,1 mm	
CPTM SÃO PAULO		rugosité		Rampe de graissage en voie actionnée par le passage de la roue
FCG BARCELONE				Actuellement, test d'un système en voie de lubrification en complément de celui des trains
HHA HAMBURG				Dispositif d'arrosage à eau - Peu de sites équipés
MB BILBAO	Au stade expérimental uniquement : re profilage selon UIC avec machine SPENO	rugosité	Couche supplémentaire	Tests actuels de fluide modifiant la friction pour éviter le glissement du rail
METROREX BUCAREST				Graissage par pression du boudin de la roue
MTR HONG KONG	Décalage de la zone de contact du congé vers le dessus du rail			UL : lubrification par spray montée sur MR LL : Bâton lubrifiant monté sur MR
MVV MUNICH	Rail avec congé de raccordement de 15 mm			Dispositifs spéciaux de lubrification
RATP PARIS				
RET ROTTERDAM				Points de lubrification en voie tramway : Véhicule pour lubrification Métro : SRS click'o'matic
SMRT SINGAPOUR	Meulage RGV pour obtenir un profil jauge UIC 60	rugosité		Lubrification par roue du congé de roulement
SPT GLASGOW				Dispositifs de lubrification par sticks montés sur le MR
TUSR TEHERAN		rugosité		



VAG NUREMBERG		rugosité	Couche supplémentaire	A déclenchement par chocs ou secousses
WL VIENNE	re profilage du rail			nach Fa. S-R-S
WMATA WASHINGTON	Meulage du profil pour réduire le contact rail/roue en courbe			

**Tabela 12 “Modifications d’opérations de maintenance du matériel roulant visant à limiter le développement de l’usure ondulatoire“**

Réseau		Modification du profil de roue	Re profilage selon type d'usinage	Dispositifs embarqués d'optimis. Rail/roue	Autres
ATM	MILAN			graissage embarqué	
BVG	BERLIN		limité (en tenant compte du profil roue usée)		
HHA	HAMBOURG			Dans l'avenir, graissage du congé de roulement par pulvérisation	
LUL	LONDRES	contact conforme: diminution de charge de 23 % et de contrainte maxi de 50 %		Sticks graisseurs contre phénom. du stick-slip Améliore la tenue des roues, mais la voie a tendance à s'user rapidement ce qui a nécessité l'emploi de rampes de graissage fixes	
MB	BILBAO		Re-profilage selon 3 profils de roue qui dépendent de son usure		
MTR	HONG KONG	Le Profil BR-P8 a été modifié		Spray déclenché en courbe < 750 m si vitesse > 22 km/h Lubrification par stick	
MVV	MUNICH	Pas en rapport avec usure ondulatoire hauteur de boudin passant de 19 mm à 24 mm	Modification de roue par reprofilage	R2.2/R3.3 Trains avec boudin graisseur	
RATP	PARIS				
RET	ROTTERDAM	Type nouveau de roue de meilleure qualité de roulement UIC-510-Z			
TWM	NEWCASTLE			Depuis 1986, Système de lubrification d'1 train sur 10	Depuis 1996, répartiteur de poids sur bogie moteur Système de mesure de



					roue pour mieux évaluer son diamètre
VAG	NUREMBERG			Graissage du mentonnet sur certains trains	
WL	VIENNE			Stick graisseur de boudin	

Tabela 13 “Nombre de lignes par type de matériel roulant“

Réseau		Lignes de métro	Lignes de chemin de fer	Lignes de tramway
AMT	GENES	1		
ATAC	ROME	2		
ATM	MILAN	3		19
BVG	BERLIN			30
CMSP	SÃO PAULO	3		
CPTM	SÃO PAULO		8	
FCG	BARCELONE	2		
GIF	MEXICO	1		
HHA	HAMBOURG	3		
LUL	LONDRES	10		
MB	BILBAO	1		
METROREX	BUCAREST	4		
MLEP	LISBONNE		4	
MTR	HONGKONG	5		
MVV	MUNICH	6		10
RATP	PARIS	9	2	2
RET	ROTTERDAM	2		8
SMRT	SINGAPOUR	2		
SPT	GLASGOW	2		
STIB	BRUXELLES	3		
TMB	BARCELONE	5		
TUSR	TEHERAN		1	
TWM	NEWCASTLE	2		
VAG	NUREMBERG		2	5
WL	VIENNE	5		33



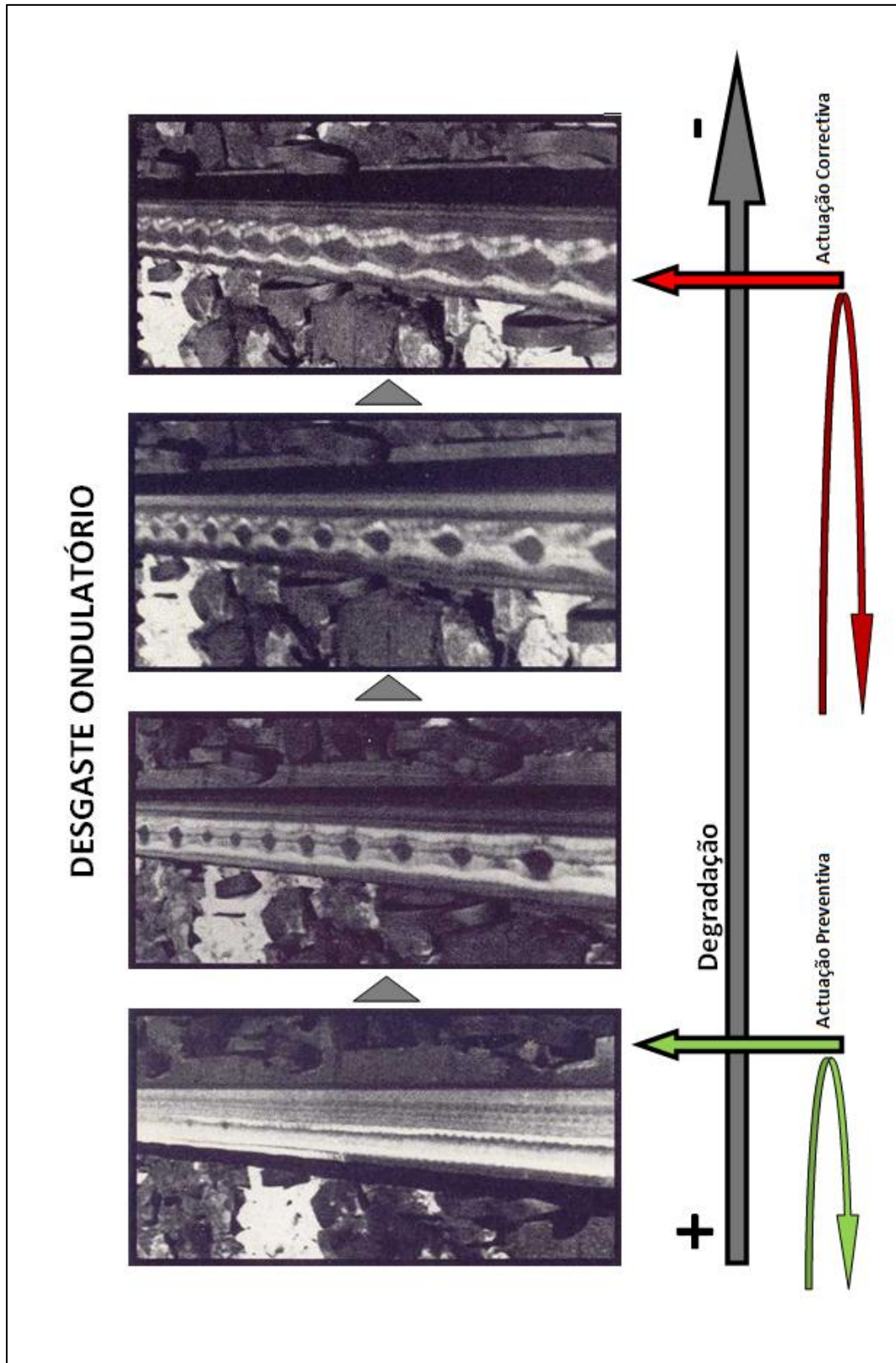
## **6. Conclusões**

### **6.1 Quadro sobre Desgaste Ondulatório**



TIPO DE DESGASTE ONDULATÓRIO	DESCRIÇÃO	LOCAL DE INCIDÊNCIA	FREQUÊNCIA Hz	CONSEQUÊNCIAS
<b>Heavy haul</b>	Este tipo de desgaste ondulatorio de onda longa, está associado a <b>caminhos de ferro com elevados pesos por eixo</b> acima das 15 toneladas, com cargas uniformes, velocidades regulares baixas mas constantes velocidades. O seu comprimento de onda entre 200 – 300 mm corresponde à frequência de 30 Hz devido à baixa velocidade dos comboios.	Fila alta das curvas e também em rectas é despoletado por juntas, irregularidades, soldaduras e descontinuidades	30 a 100 Hz	Desgaste caracterizado por grande deformação plástica dos carris.
<b>Light rail</b>	Este tipo de desgaste ondulatorio tem algumas similaridades com o descrito anteriormente. Surge de materiais circulantes que apesar de baixo peso por eixo apresentam frotas homogéneas de comportamento similares, elevadas frequências entre veículos composições e grande número de eixos motores como o <b>Light rail/Metros Ligeros</b> .	Curvas e rectas é despoletado por frotas homogéneas e composições com elevado número de eixos motores.	50 a 100 Hz	Desgaste caracterizado por grande profundidade das cavas com deformação plástica dos carris.
<b>Resonance (P2)</b>	Este desgaste ondulatorio definido também como P2, está muito ligado aos <b>sistemas de eléctricos</b> . Sendo o segmento de veículos ferroviários de menor peso por eixo apresenta, estes sistemas apresentam características de frequentes descolamentos pontuais, derivado do tipo de movimentos, baixo peso e grande potência disponível nas rodas.	Curvas e fila alta das rectas é despoletado por frotas homogéneas e composições tipo eléctricos de baixo peso.	50 a 100 Hz	Este tipo de desgaste ondulatorio pode ser bastante severo em curvas apertadas e em rectas.
<b>Rutting</b>	Este tipo de desgaste ondulatorio está muito associado aos <b>metropolitano</b> s pesados. Discretas irregularidades podem servir de elemento iniciador deste desgaste de comprimento de onda uniforme em aparência com pequena modulação. Este tipo de desgaste, uma vez detectado, surge com rapidez, podendo atingir dezenas de milímetros. É perceptível um pó fino na cabeça do carril.	Fila baixa nas curvas, é despoletado por os comboios circularerem em curvas de reduzido raio em velocidades abaixo dos valores de projecto (escala em excesso). Rectas onde os esforços de aceleração e travagem sejam severos	250 a 400 Hz	Desgaste de comprimento de onda uniforme em aparência com pequena modulação. Este tipo de desgaste, uma vez detectado, surge com rapidez, podendo atingir dezenas de milímetros.
<b>Pinned-pinned (roaring rails)</b>	O termo "roaring rails" denuncia este tipo de desgaste ondulatorio, associado ao <b>caminho de ferro</b> , principalmente nas linhas em que se praticam <b>velocidades altas</b> (de 160 – 200 Km/h). Trata-se de um desgaste associado a material circulante de médio peso por eixo (entre 10 a 20 toneladas).	Visível a olho nu em curvas suaves de grande raio, onde o material circulante negocia a curva sem que o verdugo (flange) da roda toque o lateral do carril.	400 a 1200 Hz	Desgaste de pequena modulação na curva interior dos carris
<b>Trackform specific</b>	Trata-se de desgastes ondulatorios não pertencentes aos grupos referidos anteriormente, que estão associados a tipos de <b>via sem balastro específicos</b> , onde as bases das travessas se encontram assentes em "pantufas" aborachadas, com o fim de evitar a propagação de vibrações à plataforma pavimento, em curvas abaixo dos 400 metros de raio.	Curvas apertadas assentes em blocos resilientes; ressonância. Pode ser induzido pelo espaço entre travessas.	Pode variar	Desgaste produzido rapidamente após a esmentagem, é visível podendo apresentar alguma evolução.

## 6.2 Fluxograma de Decisão





### 6.3 Aspectos Relevantes

Tratando-se de uma consequência física directa do interface roda/carril, conforme estudo efectuado, concluímos que a cada tipo de serviço ferroviário, caberá um tipo diagnosticado de desgaste ondulatório.

Este desgaste ondulatório poderá apresentar-se de diversas formas, dimensão e frequência; sendo função de um elevado número e tipo de variáveis, também assinaladas em diversos estudos, que ainda inviabilizam uma quantificação que permita um cálculo.

Algumas destas variáveis poderão ser atenuadas em projecto ou experimentalmente em exploração, no sentido da atenuação da frequência do aparecimento do desgaste, mas dificilmente erradicadas.

O gestor ou responsável pela exploração ferroviária deverá considerar o desgaste ondulatório como um fenómeno próprio das características do interface roda carril; devendo o seu controlo fazer parte integrada das operações de manutenção das infra-estruturas.

O termo “remoção do desgaste ondulatório a um nível imperceptível” significa que estar-se apenas a “controlar” um processo dinâmico evolutivo.

Cabe ao gestor ferroviário definir qual o nível do controlo que pretende efectuar, nível que está associado à relação “custo-benefício” e que não só ditará o estado de qualidade de conforto e ambiental, como o tipo de serviço que prestará aos clientes finais.

Está provado que a esmerilagem preventiva sistemática ou seja o controlo do desgaste ondulatório a um nível imperceptível, apresenta outras vantagens como evitar a progressão de defeitos provocados pela fadiga metálica, prolongando a vida dos carris. Então remover o desgaste ondulatório é:

- Restaurar a qualidade do plano de rolamento;
- Repor a geometria original do carril;
- Prolongar a vida útil dos carris.



As consequências do não controlo do desgaste ondulatorio, surgem seguindo progressão logarítmica e levarão, no seu estado final, a danos irreversíveis na infra-estrutura (plataforma de via, travessas, fixações, carris) mas também no material circulante (alteração do perfil de rodados, suspensão); obrigando a dispendiosos investimentos de reparação/substituição.

A operação do controlo do desgaste ondulatorio deve fazer parte integrante da manutenção, estimando-se que os seus custos constituam entre 20 a 30% do custo total da manutenção da infra-estrutura de via.



## 7. Referências

- (1). ELLIS, Hamilton; *The Pictorial Encyclopedia of Railways*: Hamlyn, London 1977;
- (2). NOCK, O. S.; *Encyclopedia of Railways*: Octopus Books Limited, London 1977;
- (3). R. LUNDÉN, Chalmers/CHARMEC; B. PAULSSON, Banverket; *Introduction to Wheel-rail Interface Research*; Professor do Royal Institute of Technology (KTH); Sweden;
- (4). SEMMENS, Peter; *High Speed in Japan – SINKANSEN – THE WORLD’S BUSIEST HIGH-SPEED RAILWAY*: Platform 5 Publishing Ltd., Sheffield U.K. 1997;
- (5). LA VIE DU RAIL; *L’Album des Records*: Edicion Hors Serie Juin 1990, Recorde Mundial de Velocidade Ferroviária (18 Maio 1990) 515,30 Km/h, Paris 1990;
- (6). SMITH, Roderick A.; *Future Rail Research Center*, Imperial College, London 2009;
- (7). TRANSPORT, Department; *Britain’s Transport Infrastructure – Rail Electrification*, July 2009;
- (8). UIC – Union International des Chemins de Fer, página da internet, [www.uic.org/](http://www.uic.org/), Paris 2010;
- (9). ANJOS, Carlos; *A Catenária e as outras Instalações Fixas de Tracção Eléctrica*, edição Ferbritas, 1ª edição 2007;
- (10). REFER; *Directório da Rede 2010*, página internet da empresa, [www.refer.pt/](http://www.refer.pt/), 2010;
- (11). BUSSHELL, Chris; *Jane’s Urban Transport Systems*: 15ª Edição, British Library Cataloguing-in-Publication Data, Surrey U.K. 1996;



- (12). LRTA, *Light Rail Transit Association*: página internet, [www.lrta.org/](http://www.lrta.org/), 2010;
- (13). UITP – International Union of Public Transport: página internet, [www.uitp.org/](http://www.uitp.org/), 2010;
- (14). Martins, Ana; *Tese de Mestrado – Eficiência Energética em Edifícios de Habitação*, ISEL 2010;
- (15). HAYDOCK, David; *High Speed in Europe*: Platform 5 Publishing Ltd., Sheffield U.K. 1995;
- (16). GRONECK, Cristoph; LOHKEMPER Paul; SCHWANDL Robert; *Light Rail Networks in the Rhine-Ruhr Area – Vol 1 e 2*, Berlin 2005;
- (17). ATM – Azienda Transporti Milanesi s.p.a.; *Actual situation in tramway traffic* (relatório); 1<sup>st</sup> International Tramway Conference Workshop; Praga; Maio 2010;
- (18). LEWIS, R.; OLOFSSON, U.; *Wheel-Rail interface handbook*: Woodhead Publishing in Mechanical Engineering, Oxford Cambridge 2009;
- (19). GRASSIE, S. L.; *Rail Corrugation*: Stuart Grassie Engineering Ltd. Germany 2007;
- (20). CORRUGATION, página Europeia da internet sobre o tema do Desgaste Ondulatório, [www.corrugation.eu/](http://www.corrugation.eu/), 2010;
- (21). METROPOLITANO DE LISBOA, CDI – Centro de Documentação Interna da Empresa, Lisboa 2010;
- (22). GRUPO BARRAQUEIRO, Documentação referente aos Metros de Margem Sul e Porto, enviada na sequência de solicitação, Lisboa 2010;
- (23). GARNHAM, J. E. and BEYNON, J.H. (1991), *The early detection of roling-sliding contact fatigue cracks*, Leicester; UK;



- (24). SOMAFEL; *Relatório Gráficos e Medições de Desgaste Ondulatório de Carris – Metro de Lisboa*; Lisboa 2010;
- (25). UITP – International Union of Public Transport; Rapport provisoire RATP Paris, Depouillement et Analyse du Questionnaire UITP; *Usure Ondulatoire*, Conférence de Milan, Novembro 2001;

### Outras Referências

ROBINSON, Mark; KAPOOR Ajay; *Fatigue in Railway Infrastructure*: Woodhead Publishing in Mechanical Engineering, Oxford Cambridge 2009;

BRITISH STEEL; *The Track Handbook*: Edição 1992, Publish by British Steel Track Products, Cumbria 1992;

REFER; ITV – 007; *Procedimento de Trabalho de Esmerilagem Preventiva e Correctiva do Desgaste Ondulatório pelo Sistema de Mós Oscilantes*; Engenharia de Infraestruturas Via Qualidade e Normalização; Lisboa 2001;

PERNES, Orlando Galrinho; *Desgaste Ondulatório de Carris*, Gazeta dos Caminhos de Ferro; Lisboa, Fevereiro 1951;

UITP – International Union of Public Transport; International Metropolitan Railway Committee Sub-Committee on Fixed Installations; *Study: Experimentation on Noise and Vibrations*, RATP Paris, 1985;

UITP – International Union of Public Transport; Comité International des Métros Sous – Comité Installations Fixes; *Etude de L'Usure Ondulatoire*, Azienda Consortile Laziale (ACOTRAL), Roma, 1984;



UITP – International Union of Public Transport (UITP Position Paper); *Keeping and upgrading long established tramway systems*, Bruxellas 2009;

ATM – Azienda Transpor ti Milanesi s.p.a.; *Tramway Network Maintenance in Milan*; Direzione Impianti Fissi e Sistemi; Maio 20010;