



## **Sistemas de Transporte Ferroviário: Evolução e perspectivas de desenvolvimento**

**NUNO MIGUEL GUEDES TEIXEIRA**

novembro de 2016

# SISTEMAS DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO: EVOLUÇÃO E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO

Nuno Miguel Guedes Teixeira



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

9-Nov-16



Este relatório satisfaz, parcialmente os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Nuno Miguel Guedes Teixeira, Nº 1091297, [1091297@isep.ipp.pt](mailto:1091297@isep.ipp.pt)

Orientação científica: José António Tenreiro Machado, [jtm@isep.ipp.pt](mailto:jtm@isep.ipp.pt)

Coorientação científica: Alexandra Maria Soares Ferreira Galhano, [amf@isep.ipp.pt](mailto:amf@isep.ipp.pt)



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial  
Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

9-Nov-16



*...Dedico a Deus e aos meus Anjos da Guarda.*



## *Agradecimentos*

Desejo exprimir desde já o meu mais sincero e humilde agradecimento a todas as pessoas que, embora possam não estar aqui mencionadas, de uma forma direta ou indireta, se mostraram importantes na realização desta investigação.

Ao Professor Engenheiro José Tenreiro Machado, orientador e mentor académico do ISEP, agradeço toda a colaboração, disponibilidade e apoio durante a execução da investigação e consequente dissertação. Através do seu empenho e dedicação, fez crescer o gosto por esta área de estudo, tornando aliciante toda a investigação e trabalho desenvolvido. Agradeço ainda a oportunidade que me deu de poder partilhar a sua sapiência e conhecimento.

À Professora Engenheira Alexandra Galhano, coorientadora da investigação desenvolvida, agradeço toda a confiança, apoio e disponibilidade demonstrada ao longo do estudo em questão. Pela assertividade com que me “guiou”, sempre no sentido correto, de modo atingir o fim pretendido.

A todos os docentes do Mestrado de Sistemas e Planeamento Industrial, do ISEP, agradeço toda a partilha de conhecimento, ideias e pensamentos. Estes revelaram-se ser ágeis ferramentas na arte de pensar e fazer a Engenharia.

Ao Engenheiro Paulo Rocha, do CCO do Porto da Infraestruturas de Portugal S.A., ao Engenheiro José Carlos Barbosa, da Unidade de Manutenção de Alta Velocidade da EMEF Porto, por toda a disponibilidade demonstrada na visita às unidades em questão, e procederem à clarificação das várias e pertinentes dúvidas, que tanto contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus pais e ao meu irmão, que foram os meus guias e bengalas ao longo desta enorme viagem que culmina nesta dissertação, que sempre vibraram comigo e por mim, pela ajuda, compreensão e confiança que me deram no decorrer desta caminhada. Pelas lágrimas que me limpavam do rosto, sempre que me sentia derrotado pelo cansaço. Se não fossem eles, de nada teria valido o esforço para chegar ao fim. Um especial agradecimento ao meu pai,

o meu mentor e meu ícone de esforço, perseverança, educação e respeito, por me ter incutido estes mesmos valores.

À minha namorada Cláudia Silva, pelo incansável incentivo e incondicional apoio, por ter acreditado sempre em mim, nas minhas capacidades e no trabalho desenvolvido, e ainda pela paciência e ajuda.

A toda a minha família, que sempre me acarinhou e apoiou para que chegasse mais longe, em particular à minha tia Idalina e à minha avó Júlia, por acreditarem sempre em mim e nas minhas capacidades.

Às pessoas especiais que entraram na minha vida como o caso dos “primassos” Paula Silva, Hugo Campos e Tiago Campos pela paciência, confiança, apoio e incentivo nos momentos mais críticos e mais complexos que ocorreram no decorrer desta dissertação. Obrigado por estarem lá, quando mais precisei.

Aos amigos super, híper, mega especiais Helena Rodrigues, Margarida Dias, Ana Bravo, Nicoletta Cera, Mara Rodrigues, Marisa Carvalho, Bruno Cunha, José Augusto Gonçalves, Duarte Carneiro, Susana Rocha e família Barbosa que tanto contribuíram para esta investigação, pela forma ativa como o fizeram mas muito mais pela amizade sincera e desconcertante, que nos momentos de desânimo, foi fulcral. Jamais poderei esquecer tal gesto, como tal, tê-los-ei sempre num lugar especial do meu coração.

E por fim, a todos os meus companheiros do Mestrado de Sistemas e Planeamento Industrial, do ISEP, que tantos e tão bons momentos me proporcionaram, ao longo do mesmo. Momentos inolvidáveis, de verdadeiro companheirismo e ajuda com que me presentearam, que jamais esquecerei.

## *Resumo*

Desde sempre, a troca de bens e o transporte de pessoas foram preocupações bem presentes, devido ao impacto no desenvolvimento económico e social de um país. É o caso do transporte fluvial e do Caminho de Ferro, que ao longo da História sempre mereceram uma elevada atenção. Foi na Antiga Grécia que os primeiros vestígios de um sistema com fundamentos ferroviários foram encontrados. Apesar de não ser assente em ferro, o conceito de trilhos era claro, através de sulcos no terreno calcário de Diolkos, sensivelmente em 600 a.C.. A sua finalidade era a mesma: transporte de bens e pessoas.

Com os anos e a contribuição de vários contextos, o conceito foi sofrendo evoluções. Mas foi a partir de meados do século XVIII, com a Revolução Industrial Inglesa, que ocorre o maior impulso e transformação do Caminho de Ferro. Com Richard Trevithick, a tração passa a ser feita por locomotivas a vapor, tornando as ligações mais rápidas e atrativas, do ponto de vista comercial. Surge, assim, em 1830 no Reino Unido, a primeira linha ferroviária, Liverpool-Manchester, contribuindo para a massificação das locomotivas e o aparecimento da bitola padrão. Pouco depois, o conceito de Caminho de Ferro e de locomotiva ultrapassa fronteiras, tendo o reconhecimento mundial. Rapidamente este foi visto como elemento acelerador da fixação das populações, símbolo de unidade patriótica e instrumento de guerra.

Em Portugal, o fenómeno ferroviário ficou marcado pela aposta no fabrico especializado de material circulante, pelos monumentos e suas características impares neste setor. O desinvestimento, em contraciclo com o resto da Europa, foi algo marcante do século XXI.

Mas, o desenvolvimento do Caminho de Ferro pode, nem sempre, ser o mais acertado ou ordenado. Desta forma, a matemática pode ser uma ferramenta de análise preponderante nessa área, através da análise da dimensão fractal das redes de transportes. Poderá, desta forma, tornar perceptível o ponto em que se encontra e para onde caminha o Caminho de Ferro, a nível mundial.

### *Palavras-Chave*

Caminho de ferro, via-férrea, alta velocidade, comboio, *railway*, fractal, dimensão



## *Abstract*

Since the age of time, the exchange of goods and transport of people are a very present concern due to the impact on economic and social development of a country. It's the case of inland waterway transport and railways, which always merited much attention throughout History. The first traces of a system using fundamentals rail were found in ancient Greece. Although not based on iron, the concept of tracks was clear in the furrows found on the calcareous ground of Diolkos, dated approximately from 600 b.C. Their purpose was the same as nowadays: transport of goods and people.

The evolution of the concept came with time and benefited from various contexts. In the mid-eighteenth century, with the English Industrial Revolution, the biggest boost and transformation of the railway occurred. With Richard Trevithick, traction started being conducted by steam locomotives, creating faster and more attractive connections, from a commercial point of view. The first railway line making the Liverpool-Manchester connection emerges in 1830 in the UK, thereby contributing to the widespread use of locomotives and the appearance of standard gauge. Shortly after, the concept of railway and locomotive goes beyond borders, receiving worldwide recognition. This was quickly seen as an accelerator of population settlement, symbol of patriotic unity and instrument of war.

In Portugal, the railway phenomenon was marked by the specialized manufacture of rolling stock, by the construction of monuments and the unique features in this sector. Disinvestment, countercyclical with the rest of Europe, was a remarkable feature of the twenty-first century.

The development of railway may not always be the most correct or ordered. Thus, mathematics can be a dominant analytical tool in this area, using analysis of the fractal dimension of transport networks. This strategy might highlight the status and the evolution of railway at a worldwide level.

### ***Keywords***

Railway, railroad, high speed, train, fractal, dimension



# Índice

AGRADECIMENTOS .....	III
RESUMO .....	V
ABSTRACT .....	VII
ÍNDICE.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABELAS .....	XIII
ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS E SIGLAS .....	XV
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO .....	3
1.3. PLANEAMENTO DO TRABALHO .....	4
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO.....	5
<b>2. A EVOLUÇÃO DO CAMINHO DE FERRO .....</b>	<b>7</b>
2.1. O INÍCIO DOS TRILHOS .....	7
2.2. O CONTRIBUTO DA MINERAÇÃO NO CAMINHO DE FERRO .....	12
2.3. AS VIAS FÉRREAS POSTERIORES AO IMPÉRIO ROMANO .....	15
2.4. O DESENVOLVIMENTO DAS VIAS FÉRREAS POSTERIORMENTE AO SÉCULO XVII.....	18
2.4.1. A ERA DO VAPOR .....	20
2.5. A CORRIDA AO CAMINHO DE FERRO .....	24
2.5.1. MASSIFICAÇÃO DO CAMINHO DE FERRO PELO MUNDO NO SÉCULO XIX.....	27
<b>3. A DISSEMINAÇÃO DOS CAMINHOS DE FERRO .....</b>	<b>29</b>
3.1. A REVOLUÇÃO INDUSTRIAL E O CAMINHO DE FERRO NA GRÃ BRETANHA.....	29
3.2. A EXPORTAÇÃO DA VIA-FÉRREA PARA AS COLÓNIAS INGLESAS .....	31
3.3. O CONTRIBUTO ANGLO-SAXÓNICO E A EXPORTAÇÃO PARA OS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA.....	35
3.4. O DESENVOLVIMENTO DA VIA-FÉRREA NA EUROPA .....	44
3.5. AS REDES FERROVIÁRIAS NA EUROPA .....	50
3.6. O IMPACTO FERROVIÁRIO NAS DUAS GUERRAS MUNDIAIS.....	60
3.7. A REVOLUÇÃO DO CAMINHO DE FERRO NO SÉCULO XX .....	66
3.8. BITOLAS MUNDIAIS .....	70
<b>4. DESENVOLVIMENTO E EVOLUÇÃO DA REDE FERROVIÁRIA EM PORTUGAL .....</b>	<b>73</b>
4.1. A CONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO.....	73
4.2. DO VAPOR PARA A ELETRICIDADE .....	76
4.3. CARATERÍSTICAS DA VIA-FÉRREA .....	77
4.4. SISTEMAS DE SEGURANÇA .....	81
4.5. MATERIAL CIRCULANTE .....	88
4.6. SUPERVISÃO DA INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA .....	92
4.7. MONUMENTOS E MARCOS FERROVIÁRIOS .....	94
<b>5. O PRESENTE E O FUTURO DO COMBOIO.....</b>	<b>97</b>
5.1. MAGLEV .....	97
5.1.1. LEVITAÇÃO.....	100
5.1.2. PROPULSÃO .....	101
5.1.3. DIREÇÃO.....	102
5.1.4. TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA.....	103
5.2. HYPERLOOP.....	104
<b>6. A MATEMÁTICA E O CAMINHO DE FERRO.....</b>	<b>107</b>
6.1. O FRACTAL E A SUA DIMENSÃO .....	107
6.1.1. MASSA-RAIO .....	110
6.1.2. ANÁLISE DE INTERSEÇÃO ACUMULATIVA .....	110

6.1.3. BOX-COUNTING.....	111
6.1.4. DIVIDERS.....	112
6.1.5. MINKOWSKI-BOULIGAND.....	113
6.1.6. CONJUNTO DE CANTOR .....	115
6.1.7. ILHA DE KOCH.....	116
6.1.8. TRIÂNGULO DE SIERPINSKI.....	118
6.1.9. ESPONJA DE MENJER .....	120
6.2. FRACTAL NO CONTEXTO FERROVIÁRIO: CONTRIBUTO MATEMÁTICO .....	120
<b>7. METODOLOGIA DO ESTUDO DE INVESTIGAÇÃO.....</b>	<b>133</b>
7.1. CRITÉRIOS DE ESCOLHA DAS IMAGENS.....	133
7.2. SOFTWARE PARA TRATAMENTO DE IMAGEM E ANÁLISE FRACTAL .....	134
7.3. SOFTWARE UTILIZADO NO ESTUDO DA DIMENSÃO FRACTAL .....	136
7.4. TIPO DE TRATAMENTO APLICADO À IMAGEM A ANALISAR .....	137
7.5. SELEÇÃO E CARATERIZAÇÃO DAS IMAGENS .....	138
7.6. TIPO DE ESTUDO E ESCOLHA DO MÉTODO PARA A ANÁLISE.....	140
<b>8. ESTUDO EMPÍRICO.....</b>	<b>143</b>
8.1. ANÁLISE FRACTAL COM OS CASOS DE ESTUDO.....	143
8.2. ANÁLISE FRACTAL.....	146
8.2.1. AUTOESTRADAS .....	147
8.2.2. REDE FERROVIÁRIA.....	148
8.2.3. ALTA VELOCIDADE .....	150
8.2.4. REDES FLUVIAIS OU RIOS.....	151
8.2.5. RIOS PRINCIPAIS.....	152
8.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	154
8.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	157
<b>9. CONCLUSÕES.....</b>	<b>165</b>
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS .....	169

## Índice de Figuras

FIGURA 1 – RUTWAY DIOLKOS, GRÉCIA [10].....	9
FIGURA 2 – STREET OF TOMBS, ITÁLIA [11].....	10
FIGURA 3 – TRIRREME [19].....	11
FIGURA 4 – GALERIA DE ALARGAMENTOS, TRÊS MINAS [25].....	13
FIGURA 5 – CARRINHO “HUND” [27].....	14
FIGURA 6 – DER REIZUG, SALZBURGO [35].....	15
FIGURA 7 – VIA TANFIELD NO INÍCIO DO SÉCULO XVII [43].....	17
FIGURA 8 – THE PUFFING DEVIL [55].....	21
FIGURA 9 – LONDON STEAM CARRIAGE [56].....	22
FIGURA 10 – PENYDARREN [58].....	23
FIGURA 11 – SALAMANCA [59].....	23
FIGURA 12 – L&M RAILWAY [62].....	26
FIGURA 13 – LOCOMOTIVA ROCKET [63].....	26
FIGURA 14 – FISHBELLY (“BARRIGA DE PEIXE”) GRAVITATIONAL RAILWAYS [68].....	28
FIGURA 15 – LOCOMOTIVA A VAPOR NA RI [71].....	30
FIGURA 16 – LIGAÇÃO DUBLIN-KINGSTOWN [72].....	33
FIGURA 17 – “RAILROAD” PRIVADA NOS EUA [74].....	36
FIGURA 18 – “DITACTOR” NA VIRGINIA, EM 1865 [75].....	38
FIGURA 19 – SINALIZAÇÃO “BRAÇO” ARTICULADO, ATUALMENTE [80].....	41
FIGURA 20 – CONSTRUÇÃO DO CF NA EUROPA, SÉCULO XIX [82].....	46
FIGURA 21 – ENTRADA DO TÚNEL FREJUS, LADO FRANCÊS (ESQUERDA) E ITALIANO (DIREITA) [85].....	49
FIGURA 22 – INAUGURAÇÃO DO TÚNEL GOTTHARD, 1882 [89].....	59
FIGURA 23 – ASSENTAMENTO DO CARRIL [132].....	72
FIGURA 24 – CANTONAMENTO AUTOMÁTICO, REFER [143].....	82
FIGURA 25 – BALIZA EBICAB [147].....	86
FIGURA 26 – DANDY WAGON [153].....	88
FIGURA 27 – UNIDADES MÚLTIPLAS ELÉTRICAS DA BOMBARDIER, ESTAÇÃO S. BENTO [155].....	91
FIGURA 28 – PONTE D. MARIA PIA, PORTO [159].....	95
FIGURA 29 – MAGLEV NA VIA DE CIRCULAÇÃO [162].....	99
FIGURA 30 – MOTOR LINEAR [163].....	101
FIGURA 31 – BOBINAS E CORREDOR DE UM MAGLEV ELETRODINÂMICO [165].....	103
FIGURA 32 – TRANSPAPID, ALEMANHA [166].....	104
FIGURA 33 – MLX01, JAPÃO [167].....	104
FIGURA 34 – HYPERLOOP, EUA [171].....	105
FIGURA 35 – MÉTODO DIVIDERS [177].....	112
FIGURA 36 – DIMENSÃO MINKOWSKI-BOULIGAND [178].....	113
FIGURA 37 – CONJUNTO DE CANTOR [179].....	115
FIGURA 38 – ILHA DE KOCH [180].....	116
FIGURA 39 – TRIÂNGULO DE SIERPINSKI [181].....	120
FIGURA 40 – ESPONJA DE MENGER [182].....	120
FIGURA 41 – MAPA DAS REDES ANALISADAS [185].....	121
FIGURA 42 – ANÁLISE FRACTAL DA COSTA DOS VÁRIOS PAÍSES [201][202][203][204][205].....	144
FIGURA 43 – GRÁFICO RADAR DA ANÁLISE FRACTAL.....	146
FIGURA 44 – REGRESSÃO LINEAR DA ANÁLISE FRACTAL.....	146

FIGURA 45 – CONJUNTO 1 DE MAPAS DAS AUTOESTRADAS ANALISADAS .....	147
FIGURA 46 - CONJUNTO 2 DE MAPAS DAS AUTOESTRADAS ANALISADAS.....	148
FIGURA 47 - CONJUNTO 1 DE MAPAS GERAIS DAS REDES FERROVIÁRIAS ANALISADAS.....	149
FIGURA 48 - CONJUNTO 2 DE MAPAS GERAIS DAS REDES FERROVIÁRIAS ANALISADAS.....	149
FIGURA 49 – CONJUNTO 1 DE MAPAS DAS REDES DE AV .....	150
FIGURA 50 – CONJUNTO 2 DE MAPAS DAS REDES DE AV .....	150
FIGURA 51 – CONJUNTO 1 DE MAPAS DOS RIOS E CANAIS .....	151
FIGURA 52 – CONJUNTO 2 DE MAPAS DOS RIOS E CANAIS .....	152
FIGURA 53 – CONJUNTO 1 DE MAPAS DOS RIOS PRINCIPAIS .....	153
FIGURA 54 – CONJUNTO 2 DE MAPAS DOS RIOS PRINCIPAIS .....	153
FIGURA 55 – GRÁFICO RADAR DA ANÁLISE FRACTAL DA RF COMPARADA COM A REDE DE AV .....	154
FIGURA 56 - REGRESSÃO LINEAR DA ANÁLISE FRACTAL DA RF COMPARADA COM A REDE DE AV .....	155
FIGURA 57 – GRÁFICO RADAR DA ANÁLISE FRACTAL DA REDE FLUVIAL COMPARADA COM OS RIOS PRINCIPAIS	155
FIGURA 58 – REGRESSÃO LINEAR DA ANÁLISE FRACTAL DA REDE FLUVIAL COMPARADA COM RIOS PRINCIPAIS	155
FIGURA 59 - SCATTERPLOT DA CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE REDES DE AV E OS REDES FLUVIAIS .....	157

## *Índice de Tabelas*

TABELA 1 – CALENDARIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	5
TABELA 2 – BITOLAS UTILIZADAS NO JAPÃO [104] .....	67
TABELA 3 – ELETRIFICAÇÃO DAS LINHAS NO JAPÃO [104] .....	67
TABELA 4 – DADOS FERROVIÁRIOS DAS LINHAS E SISTEMAS DE SEGURANÇA, EM PORTUGAL [143]...	87
TABELA 5 – DADOS SOBRE OS CCO [143].....	93
TABELA 6 – RESULTADOS OBTIDOS VS. RESULTADOS PUBLICADOS.....	145
TABELA 7 – RESULTADOS ANÁLISE FRACTAL .....	154
TABELA 8 - RESULTADOS T-TEST DE DUAS CAUDAS (TWO-TAILED) .....	156



## *Acrónimos, abreviaturas e siglas*

a.C	–	Antes de Cristo
ABB	–	<i>Asea Brown Boveri</i>
AM	–	<i>Amplitude Modulation</i>
AV	–	Alta Velocidade
AVE	–	<i>Alta Velocidad Española</i>
B&O	–	<i>Baltimore and Ohio</i>
CCFBA	–	Companhia dos Caminhos de Ferro da Beira Alta
CCFLPZM	–	Companhia do Carril de Ferro de Lisboa, do Porto à Foz e Matosinhos
CCFNP	–	Companhia dos Caminhos de Ferro do Norte de Portugal
CCO	–	Centro de Comando Operacional
CF	–	Caminho de Ferro
CFE	–	Caminhos de Ferro do Estado
CONVEL	–	Controlo Automático de Velocidade
CP	–	Comboios de Portugal
CPCFP	–	Companhia Peninsular dos Caminhos de Ferro de Portugal
CRCFP	–	Companhia Real dos Caminhos de Ferro Portugueses
CTC	–	Comando de Tráfego Centralizado
d.C	–	Depois de Cristo
DC	–	Corrente contínua
DCFDM	–	Direção dos Caminhos de Ferro do Douro e Minho
DL	–	<i>Downlink</i>
DLA	–	<i>Diffusion-Limited Aggregation</i>
EBICAB	–	Sistema desenvolvido pela Ericsson e propriedade da Bombardier
EDS	–	<i>Electrodynamics Suspension</i>
EMEF	–	Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário
EMS	–	<i>Electromagnetic Suspension</i>
EOLM	–	<i>End Of Loop Marker</i>

ERA	–	<i>European Union Agency for Railways</i>
ERTMS	–	<i>European Rail Traffic Management System</i>
ETCS	–	<i>European Train Control System</i>
EUA	–	Estados Unidos da América
FEPASA	–	Ferrovias Paulista S.A.
FSK	–	<i>Frequency-Shift Keying</i>
GAC	–	Graficagem Automática de Comboios
GB	–	Grã-Bretanha
GI	–	Gestor de Infraestrutura
GSM-R	–	<i>Global System for Mobile Communications - Railway</i>
HEMS	–	<i>Hybrid Electromagnetic Suspension</i>
IBM	–	<i>International Business Machines</i>
ICE	–	<i>IntercityExpress</i>
IP	–	Infraestrutura de Portugal
IPT	–	<i>Image Processing Toolbox</i>
L&M	–	<i>Liverpool &amp; Manchester</i>
LEU	–	<i>Lineside Electronics Unit</i>
LIM	–	<i>Linear Induction Motor</i>
LSM	–	<i>Linear Synchronous Motor</i>
MAGLEV	–	<i>Magnetic Levitation Transport</i>
OTF	–	Operador Transporte Ferroviário
PII	–	Programação Informatizada de Itinerários
POC	–	Parque Oficinal Centro
PON	–	Parque Oficinal Norte
POS	–	Parque Oficinal Sul
R.A.T.P.	–	<i>Régie Autonome des Transports Parisiens</i>
R.E.R.	–	<i>Réseau Express Régional</i>
RBC	–	<i>Radio Block Centre</i>
REFER	–	Rede Ferroviária Nacional
RENFE	–	<i>Red Nacional de Ferrocarriles Españoles</i>
RI	–	Revolução Industrial

RSHA	–	Escritório Central de Segurança do Reich
S.B.P.	–	<i>Star Branched Polymer</i>
SAC	–	Seguimento Automático de Comboios
SAE	–	Sistema Auxiliar de Exploração
SATU	–	Sistema de Transportes Automáticos de Oeiras
SBB	–	<i>Swiss Federal Railways</i>
SCC&RR	–	<i>South Carolina Canal and Rail Road Company</i>
SENETE	–	Sistemas de Energia, Transporte e Equipamentos
SEPTA	–	<i>South-eastern Pennsylvania Transportation Authority</i>
SIP	–	Sistema de Informação ao Público
SNCF	–	<i>Société Nationale des Chemins de fer Français</i>
Sorefame	–	Sociedades Reunidas de Fabricações Metálicas
SPSS	–	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>
TGV	–	<i>Train à Grande Vitesse</i>
UL	–	<i>Uplink</i>
UMAV	–	Unidade de Manutenção de Alta Velocidade
UNISIG	–	Norma de certificação
VF	–	Via-Férrea/Via Ferroviária
WW	–	<i>Wagonway</i>



# 1. INTRODUÇÃO

Na introdução geral ao tema que nos propomos abordar, começamos com uma contextualização do trabalho realizado, na qual se apresenta o tema proposto para a dissertação, assim como uma breve descrição do problema, pesquisa e respetiva solução. Em seguida, são retratados os objetivos e as motivações do autor para a elaboração desta dissertação, assim como a sua calendarização e estruturação das diferentes tarefas envolvidas. Por fim, é apresentada a organização deste documento.

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Este documento tem como objetivo descrever o trabalho desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Tese/Dissertação (TEDI). Este trabalho insere-se no âmbito do curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Ramo de Sistemas e Planeamento Industrial.

Esta dissertação tem como foco os sistemas de transporte ferroviário, em que é possível perceber o aparecimento, a evolução, a expansão e a importância da via-férrea (VF) e do comboio a nível mundial. Incide ainda sobre os motivos do aparecimento, os contributos e os desenvolvimentos feitos na VF e no comboio, de modo a ser perceptível qual o momento atual vivido neste tipo de transporte, bem como para que paragens nos levará o mesmo, num futuro próximo.

Apesar de esta dissertação incidir sobre os sistemas ferroviárias, a investigação foi mais lata e abrangente. Para que fosse realçada a evolução e preponderância da VF, seria necessária uma contextualização no campo dos transportes terrestres, mais precisamente nos sistemas de transportes.

Contudo, mesmo que o contexto fosse direcionado, ainda assim, seria necessário perceber quais os transportes que concorrem direta e justificadamente com a VF e o comboio. Os transportes são o automóvel e o barco fluvial. Em termos de equiparação das metodologias de implementação e da importância das ligações económico-sociais, o automóvel e o barco fluvial são concorrentes históricos. As importantes ligações aos grandes polos de negócios; as exigentes políticas económicas de importação e de exportação de mercadorias e matérias-primas e as restritivas medidas ambientais, são algumas das razões pelas quais estes sistemas de transporte se afiguram como concorrentes. Contudo, não teria sentido analisar os automóveis ou os barcos, devido às grandes diferenças entre os vários estilos, modelos e potências existentes, mas sim o sistema de transporte *per si*. No caso do automóvel o que seria coerente analisar, seria a autoestrada enquanto para os barcos, seriam os rios.

A escolha da autoestrada é tida como potenciadora e vantajosa quanto à ligação dos importantes polos de negócio e do trânsito de mercadorias, em detrimento de toda a rede rodoviária. No caso da escolha dos rios, a importância é similar à da rodovia, acrescentando, também, a componente histórica do barco, como sendo um dos transportes mais antigos da história.

Quando se fala em desenvolvimento económico e financeiro de uma nação, fala-se em importação e exportação, na troca de bens e ligação de pessoas em tempo útil, a grandes centros de decisão. O automóvel pode, sem dúvida, ser uma opção. Contudo, é um transporte limitado, quando falamos em grandes distâncias: os limites de velocidade, o trânsito e a limitação de carga e peso, assumem-se como grandes condicionantes. Desta forma, algumas das limitações podem influenciar diretamente a rapidez de ligações. Ainda que devidamente reguladas e controladas, algumas destas limitações podem ser diminuídas com as autoestradas, que permitem um melhor e maior fluxo automóvel, sem trânsito, bem como uma maior velocidade de circulação.

Apesar de tudo, também é importante realçar que muitos transportes, ao longo dos anos, foram efetuados através de meios fluviais. O barco pode ser de madeira, ferro, aço, fibra de vidro ou alumínio, mas o seu propósito sempre foi, primordialmente, o mesmo: o transporte e as trocas comerciais. A sua importância terá sido adquirida desde a antiga Mesopotâmia, cujos barcos eram utilizados no transporte de curta distância. Estima-se que o início da utilização destes date da Idade da Pedra, hipoteticamente como canoas. Vários foram os barcos que ficaram notabilizados pela sua imponência, capacidade de transporte de pessoas ou mercadorias, como é o caso do transporte fluvial londrino, através do rio Tamisa, efetuada pela empresa *MBNA Thames Clippers*, ou ainda o caso do transporte fluvial em Portugal, com a travessia do Tejo, efetuada pela empresa *Transtejo*. De salientar ainda o maior barco de mercadorias do mundo, o *Maersk Mc-Kinney Moller*, da empresa *Maersk* [1].

Outra das preocupações que concorre diretamente com as questões económico-sociais, no que respeita ao transporte de pessoas e bens, são as questões ambientais e de segurança. A questão ambiental tem uma forte preponderância nas sociedades atuais, onde as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são uma preocupação constante. Com efeito, quando se fala na emissão de gases poluentes, não é possível menosprezar que um automóvel elétrico, é o veículo menos poluente, comparado com os três transportes em concorrência. Mas, se for considerado o automóvel a *diesel*, o comboio elétrico e o *ferry*, o comboio é o menos poluente, no transporte de pessoas e bens [2].

No que diz respeito à segurança, de acordo com as estatísticas, os comboios, comparativamente aos automóveis, são o transporte com menor risco de fatalidade, por passageiro [3].

Tendo em vista a paralelização feita nos parágrafos anteriores, foram considerados, para análise dos sistemas de transporte, as autoestradas, os rios e as vias férreas. Torna-se importante comparar a evolução e o desenvolvimento destes três sistemas de transporte, dando, naturalmente ênfase ao aparecimento e contexto do comboio.

## **1.2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO**

O principal objetivo desta investigação prende-se com o estudo e análise fractal dos sistemas de transporte, com maior incidência nos sistemas ferroviários, com vista a perceber se existe uma correlação entre as autoestradas, caminho de ferro e redes fluviais.

No fim da investigação, pretende-se obter as dimensões fractais dos objetos em estudo, os mapas dos sistemas de transporte, por forma a tirar ilações conclusivas. Para que tal fosse possível, foram determinadas algumas etapas:

- ◆ Estudo da história da VF;
- ◆ Estudo da história do comboio;
  - Contextualização do comboio em Portugal e sua evolução;
- ◆ Estudo do estado atual do comboio e uma visão sobre o futuro do mesmo;
- ◆ Pesquisa e obtenção dos mapas dos sistemas de transporte;
- ◆ Tratamento das imagens obtidas para uma análise fidedigna;
- ◆ Análise de dimensão fractal.

Este desafio foi aceite tendo em conta a importância dos sistemas de transporte no panorama económico-social das nações. A oportunidade de dar a conhecer a evolução da VF e do comboio, a sua preponderância e influência no seio dos transportes e, por fim, a contribuição da matemática como ferramenta de análise, assumiram-se como uma enorme motivação.

### **1.3. PLANEAMENTO DO TRABALHO**

O estudo do transporte ferroviário e as suas envolventes foram a componente central deste trabalho. Como consequência desta análise, surgiu a necessidade de sistematizar o estudo, criando etapas e metas, patentes na tabela 1, de modo a rentabilizar e maximizar o tempo disponível para o efeito.

**Tabela 1 – Calendarização da Dissertação**

ID	Nome da Etapa	Início	Fim	Duração	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out
1	Estudo de documentação	15-fev	13-mar	4s									
2	Levantamento história caminho de ferro	14-mar	10-abr	4s									
3	Descrição "estado da arte" do caminho de ferro	11-abr	15-mai	5s									
4	Descrição "estado da arte" do comboio	16-mai	12-jun	4s									
5	Estudo sobre a VF e comboios em Portugal	13-jun	03-jul	3s									
6	Estudo do fractal e dimensão fractal	04-jul	25-jul	3s									
7	Teste de conhecimento com <i>software fractalyse</i>	25-jul	07-ago	2s									
8	Pesquisa mapas para análise fractal	08-ago	21-ago	2s									
9	Tratamento de imagem dos mapas selecionados	22-ago	11-set	3s									
10	Análise fractal dos mapas	12-set	25-set	2s									
11	Comparação e interpretação dos resultados	26-set	02-out	1s									
12	Discussão dos resultados	03-out	16-out	2s									
13	Conclusões e considerações	17-out	30-out	2s									
14	Redação da dissertação	14-mar	30-out	33s									

#### 1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Este relatório encontra-se organizado numa estrutura de nove capítulos. O primeiro capítulo apresenta a “Introdução”, servindo para contextualizar a investigação desenvolvida, os objetivos e motivações do autor. No segundo capítulo, intitulado “A evolução do caminho de ferro” é apresentado o aparecimento, desenvolvimento e evolução da VF. O terceiro capítulo, com o título “A disseminação dos caminhos de ferro” trata da “corrida” aos caminhos de ferro, com a Revolução Industrial inglesa, passando pelas redes de caminho de ferro europeias. “Desenvolvimento e evolução da rede ferroviária em Portugal” é o título do quarto capítulo, onde se aborda a construção e o desenvolvimento da VF e do comboio em Portugal, bem como alguns monumentos e características ímpares da ferrovia no nosso país. No quinto capítulo, com o título “O presente e o futuro do comboio” é possível contrastar o presente e o futuro do comboio a nível mundial. O sexto capítulo, “A matemática e o caminho de ferro” tem como tema central a matemática, no âmbito da dimensão fractal, enquadrada no caminho de ferro. O sétimo capítulo, designado de “Metodologia do estudo de investigação”, descreve todo o processo de seleção, os critérios adotados, tipo de investigação, *software* utilizado e caracterização dos mapas para a análise desta investigação. No oitavo capítulo intitulado “Estudo empírico” é demonstrada a análise efetuada, os mapas analisados e os resultados obtidos. É ainda neste capítulo que são discutidos os resultados de forma aprofundada, obtendo e comentando assim as ilações da análise feita. No nono e último capítulo designado de “Conclusões” é efetuada uma reflexão sobre os pontos fortes e os principais constrangimentos/limitações sentidas durante a realização desta dissertação, bem como são fornecidas algumas sugestões que poderão servir de ponto de partida para futuras investigações relevantes nesta temática.



## 2. A EVOLUÇÃO DO CAMINHO DE FERRO

Os dados relativos à evolução do Caminho de Ferro (CF) apresentam indícios de que este nasceu na era dos romanos, muito embora não se possa afirmar que foram estes ou os gregos que idealizaram o CF, nem tão pouco, que o CF era entendido como atualmente é conhecido, isto é, como conceito de transporte público, puxado por locomotivas, com vagões de passageiros, sobre carris de ferro. Nenhum destes componentes tinha mais do que sessenta anos quando apareceram juntos pela primeira vez em 1830 em Liverpool e Manchester [4].

### 2.1. O INÍCIO DOS TRILHOS

No século VI a.C., na Grécia Antiga, apareceram vestígios da primeira via-férrea. No entanto, o conceito nessa altura não assentava numa via com duas linhas de ferro. Numa civilização em que o trabalho escravo aparecia associado às mais diversas funções, o primeiro transporte com semelhança a uma carruagem de transporte era puxado por escravos como força de tração, através de sulcos de calcário, que funcionavam como carris.

Desta forma, estes não podiam sair da pista, assemelhando-se a uma estrada privada. Mais tarde, surgem variantes desta com linhas em madeira e, por vezes, em pedra. No que

respeita à tração, existe também a evolução para a força de animais como o cavalo. Esta forma de transporte era essencialmente utilizada para a movimentação de mercadorias, para que esta se processasse de forma mais célere e menos custosa. Este tipo de CF, embora em pequena quantidade, pode ser encontrado na época da Grécia Antiga e dos Romanos [4].

A via-férrea começou como uma estrada deliberadamente concebida com sulcos de calcário, que permitia orientar as rodas dos veículos que neles circulavam. Exemplos destas vias podem ser encontrados nas ruas de Pompeia, bem como as importantes e famosas *rutways* de Malta e Gozo [4].

As *rutways* eram estradas artesanais construídas pelos antigos Gregos, Persas, Babilónios e Assírios, esculpidas na rocha ou em sulcos calcários. Os sulcos eram afastados uns dos outros da mesma distância que o eixo dos transportes comuns da época, e assim, os sulcos direcionavam pelas vias os mesmos. Estas *rutways* eram utilizadas para ligar as grandes cidades a locais sagrados como Atenas e Elêusis e entre Sparta e Ayklia, ambas na Grécia [4], mas não só. Na época, todas as embarcações que quisessem chegar a Atenas através do mar Jónico, não tinham um acesso fácil, o que obviamente dificultava o transporte e a troca de bens e mercadorias chegados por mar. O mesmo acontecia com as embarcações que se dirigiam para a guerra, como na época da guerra do Peloponeso [5]. Estas vias teriam entre 6 a 8,5 km e estima-se que estiveram em funcionamento entre 600 a.C. e 1 d.C. Muitos séculos mais tarde elas dariam origem ao Canal de Corinto [6], no qual as embarcações navegam atualmente.

Assim, neste contexto, surge a bem posicionada localidade de Istmo de Corinto, que liga a península do Peloponeso à parte continental da Grécia. Com este “atalho”, evitariam a navegação no mar Egeu, onde a navegação era perigosa devido aos ventos fortes e à costa traiçoeira. Assim, Istmo de Corinto passou a ser um ponto estratégico que servia de ligação terrestre entre as águas calmas do Golfo de Corinto e o Golfo de Salónica [6][7].

Algumas destas vias, construídas por volta de 600 a.C., eram muito ambiciosas. Nessa época, os habitantes da antiga Corinto, construíram Diolkos (figura 1), que é considerado por muitos como o primeiro CF do mundo. Por norma, estes sulcos tinham entre 1,38 e 1,44 metros de largura entre eles, medida aproximada que viria a ser perpetuada até aos dias de hoje [8][9]. Grande parte das vias ainda preservadas pode ser encontrada em Malta.



**Figura 1 – Rutway Diolkos, Grécia [10]**

Pese embora a sua data, finalidade e modo de conceção não sejam consensuais, a explicação mais plausível é a de que, nessa época, o calcário que formava as ilhas era removido por carros de madeira de dois eixos, para construir terrenos agrícolas. Desta forma, a base macia do terreno ficava exposta, sendo mais facilmente desgastável e moldável com a circulação destes. Como esta modificação da estrada comum pode ser considerada como accidental, dificilmente tais sulcos poderão considerar-se como CF. Estes sulcos podem ainda ser vistos como uma ajuda à passagem dos carros através das rochas que obstruíam as estradas comuns ou ainda como barreiras que evitavam que os carros saíssem da estrada. Isto pode ser constatado pelos vestígios encontrados numa estrada romana que liga a Little St. Bernard, nos Alpes franceses. Contudo, não terá sido apenas utilizado na época da Antiga Grécia, já que a Rua dos Túmulos (figura 2), em Syracuse, Itália, data do século XVI [4], espelha a presença desses sulcos. Nas pedreiras de Vers, em Provence, França, que forneceram pedra para Pont Du Gard, existem ainda vários sulcos de grande extensão [4].

Mas, na realidade, quem estava mais próximo e verdadeiramente orientado para os princípios ferroviários eram os gregos. O teatro em Esparta reconstruído em 30 a.C., tinha um local apenas para espetáculos ocasionais.



**Figura 2 – *Street of Tombs, Itália* [11]**

Não era, portanto, uma estrutura fixa mas sim algo móvel: normalmente assente numa espécie de carruagem, inclinada para um dos lados (o lado onde as rodas assentavam no sulco) e movida, quando necessário, em múltiplas rodas através de três linhas espaçadas esculpidas na pedra, vulgo sulcos. Mediam cerca de 34 metros de comprimento e 8 metros de largura [12]. Um método similar é encontrado no Teatro de Megalópolis do século III a.C. onde, possivelmente, devido ao facto de utilizarem madeira ao invés de pedra, não é possível encontrar vestígios evidentes dos trilhos [13]. Estes CF tiveram outra utilidade: a teatral. Na tragédia grega formal, as cenas que envolviam a morte eram autorizadas fora do palco, uma vez que era encenada a morte do rei, assassinado na banheira e, para o seu transporte, era utilizado uma espécie de trólei, através dos trilhos em pedra [4]. Inclusive, até o boneco automático de Heron de Alexandria no século I a.C., uma maravilha da criatividade mecanizada rolou sob o seu próprio poder num palco em madeira, em que foram criados canais longitudinais de modo a que as rodas conseguissem deslizar sobre os mesmos [14]. É claro que, para serem considerados CF, estes exemplos são claramente curtos em termos de distância. Mas estes levam-nos a dois exemplos mais extensos, um romano e um grego [4].

O exemplo mais extenso é Diolkos, servindo de ligação entre o Golfo de Corinto e o Golfo de Salónica que evitou a longa e perigosa viagem, por mar, em torno de Peloponeso. Desde então, a ambição de variados governantes foi a construção de um canal fluvial através de Istmo. Contudo, apenas o imperador Nero deu início à conceção e construção do mesmo, apesar de poucos créditos ter tido sobre tal [15]. Essa tarefa foi dificultada pela baixa altitude: em nenhum ponto, o cume de Istmo tinha menos de 75 metros acima do mar. Uma altura que tiveram de superar para criar o canal (terminado em 1893), na mesma linha que

Nero, tendo sido destruído parte do trabalho deste e os vestígios de Diolkos. Os historiadores gregos relatam oito ocasiões entre 428 a.C. e 30 a.C., em que foram transportados navios de guerra através de Istmo. Já fontes romanas, Strabo e Pliny, falam no transporte de barcos, ao contrário de navios, em vagões. Em 67 d.C. a sua utilização foi interrompida, para que decorressem os trabalhos do canal concebido por Nero. Desde então, nunca mais se ouviu falar na Diolkos. Existem dois relatos de transporte de barcos por Istmo na época Bizantina, em 873 d.C. e 1150 d.C., sendo mais provável a referência a um trajeto diferente ou sem trilho [16]. Contudo, era questionável o motivo da utilização que era dado, na altura, a Diolkos [17].

A visão padrão sugerida na literatura antiga era a de que servia como meio de transporte para navios. Contudo os historiadores gregos tinham uma preocupação mais militar em detrimento da comercial. Apesar de existir a possibilidade de transporte de navios de guerra através de Diolkos, não seria este o seu objetivo principal. Até ao século IV a.C., o maior navio de guerra era o trirreme. Segundo Tucídides [18], em 428 a.C. os Espartanos tiveram de construir rampas para puxar os seus trirremes (figura 3) da água para Diolkos. Tal dever-se-ia à não existência de rampas ou, a existirem, eram pequenas, o que leva a acreditar que Diolkos não foi criada originalmente para trirremes ou mesmo para navios [4].



**Figura 3 – Trirreme [19]**

Para contrapor essa ideia, existia ainda uma dificuldade acrescida para o seu transporte: um trirreme vazio pesaria 25 toneladas, tinha 34 metros de comprimento e 5,5 metros de largura (no ponto mais largo do casco) [20]. Desta forma, seria necessário um enorme esforço, quer fosse animal ou humano, para transportar tal navio [4]. O mesmo se poderá

aplicar a navios mercantes que, por volta do século IV a.C., pesariam entre 70 e 150 toneladas e com 6 a 9 metros de largura [21]. Apesar dos motivos que não apoiam esta teoria, existia um cais ao lado de Diolkos, aparentemente original, onde os navios podiam atracar para carregar e descarregar as cargas mais comuns. Dada a grande dimensão do comércio grego, as cargas em questão podia ser qualquer coisa, apesar de, quando eram de pequena dimensão (como fardos ou ânforas), poderiam ser transportadas com recurso a animais ou carrinho. Embora houvesse uma estrada em terra na rota referida, uma ferrovia ou similar teria sido desejável, tendo em conta que na altura anterior a Diolkos existia um tráfego considerável de blocos de mármore do leste para oeste e de grandes vigas, no sentido contrário [4].

Diolkos só poderia ter sido construída em Coríntio, que muito prosperou devido à sua posição estratégica: era estratégica para o controlo do tráfego do norte para o sul em Peloponeso e do tráfego do leste para o oeste em Istmo [22]. Contudo, Diolkos não foi construída para o comércio de e para Coríntio. Em vez disso, de modo a incentivar o comércio e lucrar com este, os comerciantes que negociavam através de Istmo, entre o Egeu e a Grécia ocidental, estavam dispostos a pagar os custos do transporte e os impostos de entrada que Coríntio cobrava [4].

Pode assim compreender-se que Diolkos terá tido a sua utilização essencialmente comercial e não apenas naval. Esta não era apenas a verdadeira ferrovia, bastante extensa, mas, também, uma ferrovia pública, aberta a todos os que estivessem dispostos a pagar para utilizá-la [4]. Este transporte, assente em trilhos de pedra ou madeira, caiu em desuso quando o Império Romano entrou em colapso.

## **2.2. O CONTRIBUTO DA MINERAÇÃO NO CAMINHO DE FERRO**

Apesar dos primeiros vestígios reportarem à época da Grécia Antiga, outras áreas e necessidades aguçaram o engenho e deram o seu contributo para o desenvolvimento e aparecimento do verdadeiro sentido do CF. Foi o caso da indústria da mineração [4].

Esta indústria dos tempos ancestrais teve grande importância e relevo, nomeadamente a mineração de ouro romana no noroeste de Espanha e em Portugal. Estas minas foram um enorme negócio, sendo que uma das primeiras minerações mais conhecidas foi a Três Minas, em Vila Pouca de Aguiar, Portugal. Esta teve início no século I d.C. e contava com dois grandes poços de exploração a céu aberto, cada um com 400 metros de comprimento.

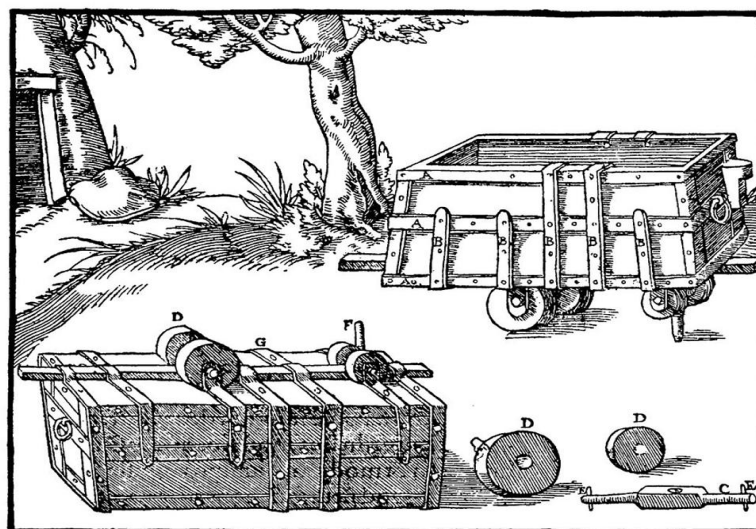
Estes estavam ligados à superfície por uma galeria a 50 metros de profundidade, cuja função era a remoção do minério e detritos, a galeria dos Alargamentos, com uma extensão de 150 metros [23][24]. Este transporte era efetuado com recurso a um método em tudo similar ao de Diolkos, com sulcos marcados no chão e, por vezes, em madeira, tracionados com força humana ou animal (figura 4).



**Figura 4 – Galeria de Alargamentos, Três Minas [25]**

Outros países deram o seu contributo histórico para a formação do CF, como é o caso da Transilvânia e do sudoeste do país de Gales, com as minas de ouro de Dolaucothi (South Wales). Nestas minas os trilhos, por vezes, eram construídos em madeira [4].

Mas foi Três Minas que evidenciou as questões mais fascinantes no contexto do desenvolvimento dos CF. Quando estes surgiram ou reapareceram no final da Idade Média, eles são sempre encontrados no mesmo contexto: nas minas de metais e subterrâneos até à entrada das galerias, com carrinhos empurrados à mão. Assim, a única diferença é que, enquanto os sulcos de Três Minas são rasgados na rocha, as calhas posteriores são feitas em madeira [26]. O carrinho mais conhecido e mais comum nas minas da época era o carrinho “*hund*” (em alemão) com o pino de guia virado para o solo, com rodas flangeadas que encaixavam numa ranhura entre as duas tábuas paralelas que formavam os trilhos [4] (figura 5).



A—RECTANGULAR IRON BANDS ON TRUCK. B—ITS IRON STRAPS. C—IRON AXLE.  
D—WOODEN ROLLERS. E—SMALL IRON KEYS. F—LARGE BLUNT IRON PIN.  
G—SAME TRUCK UPSIDE DOWN.

**Figura 5 – Carrinho “hund” [27]**

As evidências deste veículo são patentes num manuscrito de 1480 de St. Dié des Vosges [4]. Mas estes trilhos não ficaram limitados a minas. A localidade de Fusina, em Itália, reclama para si o aparecimento das rodas guiadas por lancis de pedra, numa estrutura existente para mover os barcos entre o rio Brenta e a lagoa de Veneza. Contudo, consta que estes já existiam quando foi construído pela primeira vez, em 1437. O trilho também apresenta engenharia militar. Um desenho chamado *Anonymous of the Hussite Wars*, datado entre 1486 e 1492, mostra um camião de entulho para construção de uma muralha, movendo-se, incontestavelmente, sobre trilhos. Já em 1335, Guido de Vigevano, vindo de Milão, descreveu uma torre de cerco com rodas. Esta ter-se-á movido sobre duas vigas maciças para atravessar um fosso de uma cidade sob ataque [28]. É possível que não houvesse ligação entre os trilhos Romanos e os trilhos das minas medievais. Contudo, existe uma continuidade que é inegável. Mas não foi em Espanha nem em Portugal que os trilhos perduraram. Foram utilizados nas minas Bizantinas e nas minas Sérvias dos Balcãs, onde os mineiros alemães, que se mudaram para aquela área no século XIII, terão encontrado e utilizado com frequência mas, mais tarde, apagado esses mesmos vestígios [29]. A área mais propícia para a perpetuação desta engenharia poderá ter sido os Alpes, em especial a localidade de Tirol. Tal pode dever-se à existência de fatores que favorecem este legado, como o facto de ter existido uma forte mineração romana na região, bem como vários fatores que levaram à continuidade da mineração na Idade Média [4]. Assim, as leis de mineração romana patentes numa inscrição em Aljustrel, Portugal, têm uma semelhança com as mais antigas leis de mineração medievais, promulgada em 1185 pelo arcebispo de

Trento, Itália [30]. Por outro lado, recentemente foi descoberto que os romanos, nas suas minas em Espanha e Portugal, utilizavam noras e mecanismos à base de água para extração do minério [31]. Estes mecanismos reaparecem, volvidos quase mil anos, em 1135, na mina de ouro de Fritzbach, a sul de Salzburg. Em 1200, nas minas de prata de Trento, também se encontram presentes estes mecanismos de apoio à mineração [32]. O registo mais antigo conhecido de uma ferrovia medieval na Europa encontra-se espelhado num vitral da catedral de *Freiburg*, na Alemanha, datado do ano de 1350 [33].

### **2.3. AS VIAS FÉRREAS POSTERIORES AO IMPÉRIO ROMANO**

O período após a queda do Império Romano é marcado por uma ausência de dados relativamente à evolução da VF, sendo que é em 1504 que surge novamente indicadores a ela relativos [34].

Em 1515, nos escritos do cardeal e futuro arcebispo de Salzburgo, Matthaus Lang, é descrito um teleférico - *Der Reizug* (figura 6) - que dava acesso ao Forte de Hohensalzburg, perto de Salzburgo, usando trilhos de madeira e a força animal e humana como força de tração. A descrição foi confirmada por uma gravura de 1650, de Georg Christoph, que ilustra uma fortaleza com o seu *Reizug* [34].



**Figura 6 – *Der Reizug*, Salzburgo [35]**

Este teleférico ou funicular, aberto em 1504, é de via única e conta com 190 metros de comprimento. Este, ainda se encontra em funcionamento e aberto ao público, apesar de modernizado, surgindo como sendo, provavelmente, a mais antiga linha ferroviária ativa

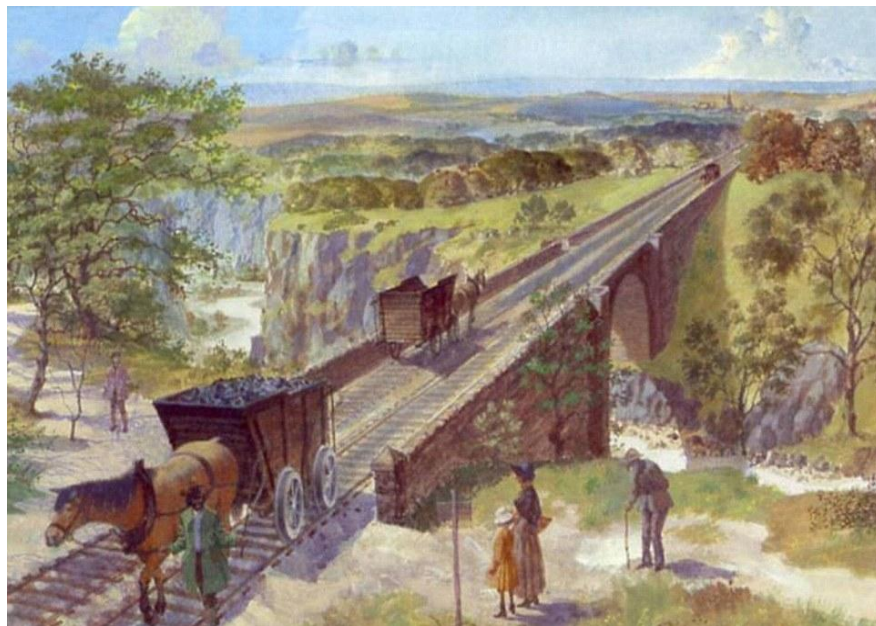
do mundo. Contudo, as mais bem-sucedidas aplicações ferroviárias ocorreram na Grã-Bretanha (GB) [34].

Por volta de 1550, são encontradas evidências da utilização de “*hunds*” ou carrinhos de mão feitos em madeira para transporte de minério, provando, assim, a sua utilização desde meados do século XV. Esta tecnologia teria sido introduzida por mineiros alemães que trabalhavam nas *Mines Royal* em Lake District, perto de Keswick (agora Cúmbria), em Inglaterra [26].

Mas, foi entre 1603 e 1604 que, oficialmente, o *wagonway* (ou *tramway*) foi construído, em East Midlands, Inglaterra, através da parceria entre Sir Percival Willoughby, proprietário das terras locais e dono de *Wollaton Hall* e Huntingdon Beaumont, o arrendatário das minas de carvão de Strelley [36][37]. É a estes que é atribuída a autoria do primeiro *wagonway* (WW) de superfície do mundo. Este foi considerado um passo significativo para o desenvolvimento dos CF, tendo circulado duas milhas de trilhos feitos em madeira, entre Strelley e Wollaton, com o intuito de auxiliar o transporte de carvão. O WW era puxado por cavalos, permitindo carregar cargas entre 10 a 13 toneladas de carvão em cada viagem [38]. A bitola real é desconhecida, contudo, estima-se que seria 1,372 mm [39]. O seu custo rondava £172 e o trajeto terminava em *Wollaton Lane End*, de onde foi levado a maior parte do carvão. As minas de Strelley estiveram em funcionamento apenas até 1620, provavelmente altura em que já estariam totalmente aproveitadas. Acredita-se que, após tal finalidade, o WW terá sido abandonado [38]. Contudo, a sua autoria foi questionada recentemente, sendo sugerido que uma WW em Broseley, tivesse sido a primeira a nível mundial [40]. Esta terá sido, assim, a primeira forma mais próxima dos CF dos dias de hoje, embora não exista uma prova documental cabal que apoie estas declarações [38][41].

Até ao início da Revolução Industrial (RI), as vias foram feitas em madeira. Tinham algumas polegadas de largura e eram fixadas, de ponta a ponta, em troncos de madeira, colocados transversalmente em intervalos de dois a três pés de medida. Com o tempo, tornou-se prática comum cobrir os mesmos com um revestimento fino de ferro de modo a conferir durabilidade e reduzir o atrito da respetiva via. Contudo, o desgaste dos rolos de madeira dos WW era maior e o peso da carga nos WW levava à deformação da via [38][41].

Em 1671, foi construída a *Wagon Tanfield* (ou *Tanfield Railway*), uma VF de bitola padrão, que ligava Gateshead e Country Durhan, Inglaterra, até a um cais de madeira no rio Tyne. Esta era constituída por trilhos de madeira, retos e paralelos, em cima dos quais circulavam parte dos *WW* em madeira, com rodas de ferro flangeadas, puxados por cavalos (figura 7). Esta via tinha 5 km de extensão e servia para transporte de minério (carvão). Esteve em funcionamento até 1964, estando agora aberta apenas para fins turísticos, sendo preservado e mantido o troço entre Sunnyside e Causey (que data de 1725) e reclamada como a mais antiga VF em funcionamento [33][42].



**Figura 7 – Via Tanfield no início do século XVII [43]**

Mas o desgaste dos trilhos de madeira era muito grande à medida que o peso transportado aumentava. Assim, a *Coalbrookdale Iron Works*, empresa responsável pela via de Shropshire, começou a reforçar a sua via em madeira com barras de ferro [44], de forma a reduzir custos de manutenção e facilitar a passagem dos vagões. Como resultado da constatação desse desgaste e manutenção da via, em 1767, estes começaram a construir as vias com barras de ferro. Estas barras teriam, provavelmente, 1829 mm de comprimento, com quatro “orelhas” salientes de 75 mm por 95 mm, a fim de permitir serem fixadas às travessas. Os carris teriam 95 mm de largura e 30 mm de espessura. Mais tarde, as descrições referem-se também a trilhos com 914 mm de comprimento e apenas 50 mm de largura [26].

## 2.4. O DESENVOLVIMENTO DAS VIAS FÉRREAS POSTERIORMENTE AO SÉCULO XVII

É em 1789 que surgem as primeiras aplicações de trilhos de metal sem borda (em ferro fundido muito curtos - 0,91 metros), em busca de soluções para evitar o rápido desgaste dos trilhos e rodas. Mais tarde, também o ferro fundido se mostrou pouco eficaz e duradouro devido ao rápido desgaste, tendo sido substituído por aço [45]. No final do século XVIII, a GB contava com uma rede de cerca de 2000 km de vias, completas com viadutos, pontes e aterros. Dado que as empresas de mineração se mostravam incapazes de adquirir todos os terrenos por onde passavam as suas vias, o Parlamento britânico emitiu uma lei dos direitos de servidão, por parte dos proprietários em relação às empresas que pretendiam construir as vias. A primeira linha a aproveitar este ato foi a linha ferroviária entre Middleton e Leeds, em 1758, que estava autorizada a efetuar o transporte privado de carvão.

A primeira linha de transporte público de mercadorias [33] era operada com *WW* e recurso à força de cavalos, pela *Middleton Railway*. Já em 1799, esta começou a substituir os trilhos de madeira por trilhos de ferro com 1,245 mm. Mais tarde, a *Middleton Railway* tornou-se no primeiro CF comercial a usar locomotivas a vapor [46]. Até ao século XVIII, os *WW* já estavam espalhados por várias áreas. Ralph Allen, por exemplo, construiu uma linha com *WW* para transportar pedra de uma pedreira, para colmatar a necessidade dos construtores dos terraços georgianos de Bath. A batalha de Prestonpans, na rebelião jacobina de 1745, foi travada montada num *WW* [47]. Este tipo de transporte espalhou-se rapidamente por toda a região carbonífera de Tyneside, criando, assim, um cais de madeira para que fosse possível a entrega do carvão transportado por este meio e enviado para Londres por via marítima. Com a evolução do transporte e o aumento do desgaste dos cavalos utilizado neste tipo de tração, aparece um novo conceito de transporte férreo: o *dandy wagon*, que permitia que o cavalo pudesse descansar nas descidas [48].

No que respeita à via-férrea pública, Lake Lock terá sido a primeira a nível mundial. A *Lake Lock Rail Road Company* foi fundada em 1796, repartida por 128 pessoas. A via era de bitola estreita, pois era a mais adequada para o terreno local, que era de elevado declive, tendo sido inaugurada em 1798. Sendo de bitola estreita, a sua construção tornava-se mais barata e mais fácil para o transporte. A linha começava em Lake Lock em direção a Outwood, tendo como objetivo primordial o transporte de carvão ao longo de 3 milhas, até

Aire e Calder, perto de Wakefield. Para este trajeto feito com três vagões, era usada a força de um cavalo [49].

A primeira linha de transporte público de mercadorias, assente em VF com vagões, foi a *Surrey Iron Railway*, autorizada em 1799 após lei do Parlamento em 1801 e inaugurada em 1803, ligando Wandsworth e Croydon, na Inglaterra. Era puxada com recurso à força animal também a cavalos, era assente em trilhos de ferro e tinha como principais bens transportados carvão, materiais de construção, cal, adubo, milho e sementes [33][50]. Mais tarde foi construída uma extensão desta, a VF de Croydon, Merstham e Godstone, construída por uma empresa separada, tendo sido inaugurada em 1805 e encerrada em 1838. A via de Surrey foi, comercialmente, das mais bem-sucedidas vias férreas com vagões. O seu sucesso foi efémero devido à abertura do canal fluvial entre Croydon e Londres em 1809. A VF de Surrey foi fechada em 1846, devido à falta de modernização e manutenção [50]. Numa fase inicial, a ideia original para a ligação de transporte entre Wandsworth, no rio Tamisa e as indústrias de Wandle Vale era a ligação fluvial através do canal Croydon, apresentada em 1799. Contudo, a disponibilidade de caudal levou à adoção do transporte através de vagões. A construção da via de Surrey começou de imediato após autorização, por William Jessop e George Leather como engenheiros e Benjamin Outram, como contratado. A linha teve o seu início num cais do rio Tamisa, em Wandsworth e subia através de Tooting e Mitcham de Pitt Lake Mead, em Croydon [51]. O capital social inicial era de £50.000, ao qual foi adicionado mais £10.000 em 1805-1806. O custo final, incluindo a doca em Wandsworth, foi entre £54,700 e £60,000 [52][53].

Com uma nova rede de transporte o país podia melhorar o fornecimento de carvão para as indústrias e para a sua população; graças ao aumento do fornecimento de carvão, registou-se um aumento de dez vezes o seu consumo, tanto para uso doméstico, como para uso industrial. A maior disponibilidade de carvão reduziu o custo da produção de energia, estimulando o setor industrial e comercial, a importação e processamento de matérias-primas. Consequentemente reconheceu-se uma melhoria no nível de vida da população, graças ao crescimento da produtividade, beneficiando de mais recursos de trabalho. Na mudança do século XVII é registada uma primeira alteração no que respeita à tração deste transporte. Foi realizada a substituição da força animal por uma força mecânica, aplicada às rodas, com recurso à energia gerada pelo vapor, o princípio físico observado por Denis Papin, tornando-se numa solução comercial, graças ao motor concebido por James Watt no

final do século. Mas antes de ser utilizado nos trilhos, as tentativas do uso de tração a vapor foram realizadas nas estradas. Francês Nicholas Cugnot construiu um modelo para transportar as peças de artilharia na estrada; o protótipo alcançou os 4 km, mas terminou contra uma parede, tendo sido banido pelas autoridades locais que as reconheceram como um veículo perigoso [33][54] . Podemos afirmar que as ferrovias nasceram antes dos carros, pelo que as novas técnicas introduzidas na pavimentação de estradas e a utilização do asfalto, deram um impulso para os testes automóvel. Assim, graças à indústria de mineração, a tração a vapor impôs-se na VF, dada a sua capacidade para suportar o peso do transporte sem falhas. No setor de mineração, o poder do vapor não era novo, uma vez que era utilizado desde 1698 para bombear água das minas com o sistema projetado por Thomas Savery e aperfeiçoado por Thomas Newcomen ou, ainda, para a extração de carvão das minas com recurso a motores fixos, já com as melhorias feitas por James Watt em 1765. A forte procura pelo carvão e ferro estimulou a investigação e a experimentação de novos materiais e mecanismos, resultando na substituição da tração animal pela tração mecânica de vapor. A invenção dos trilhos, do motor de vapor e da locomotiva, aportaram, para a época, uma revolução no sistema de transporte, já que o transporte se operava com recurso à tração animal. Toda esta conjuntura fez com que a GB fosse considerada a pátria da ferrovia [33].

#### **2.4.1. A ERA DO VAPOR**

As experiências mais significativas de transportes ferroviários foram realizadas na GB, por um engenheiro mecânico especialista em mineração, Richard Trevithick. Depois de construir, em 1796, a primeira locomotiva a vapor em miniatura conseguiu alcançar o tamanho real em 1801: *The Puffing Devil* (“o sopro do Diabo”) (figura 8).

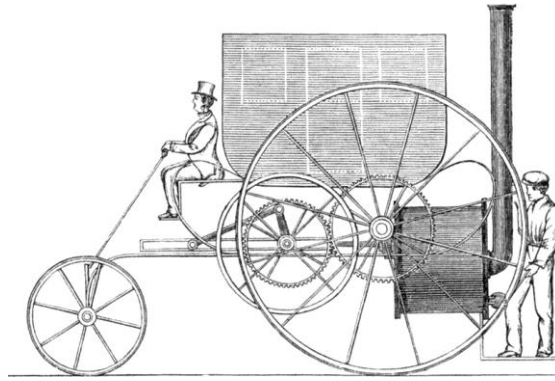
Esta máquina foi apelidada desta forma pois dava “sopros” de vapor violentos, o que gerava medo nos espectadores. A autonomia da locomotiva era limitada, podendo apenas viajar distâncias curtas, pois ainda não tinha sido encontrada uma maneira de manter a pressão do vapor exigida por tempo suficiente.



**Figura 8 – *The Puffing Devil* [55]**

Contudo, o ceticismo de alguns era também um entrave, assim como as dúvidas dos estudiosos, incluindo James Watt, que acreditava tratar-se de uma tecnologia arriscada pelo facto de o vapor, a altas temperaturas, poder causar explosões perigosas. Estes entraves e dúvidas, alicerçados numa cultura pouco tolerante na época, tiveram uma grande influência nas escolhas políticas do governo, tendo levado à promulgação, pelo Parlamento britânico, de uma lei que proibia a condução de experiências com locomotivas a vapor. No entanto, foi graças a um financiamento das empresas de mineração, interessadas na construção de uma locomotiva para substituir a tração animal, que Trevithick retomou as suas experiências em 1803 [33], tendo construído um outro veículo a vapor, intitulado “*London Steam Carriage*” (figura 9) que, de um ponto de vista simples, era uma carruagem para tração com um motor a vapor associado. Esta máquina atraiu bastante a atenção do público e da imprensa, mas não teve sucesso devido ao seu custo ser muito superior ao das tradicionais carruagens puxadas por cavalos [56].

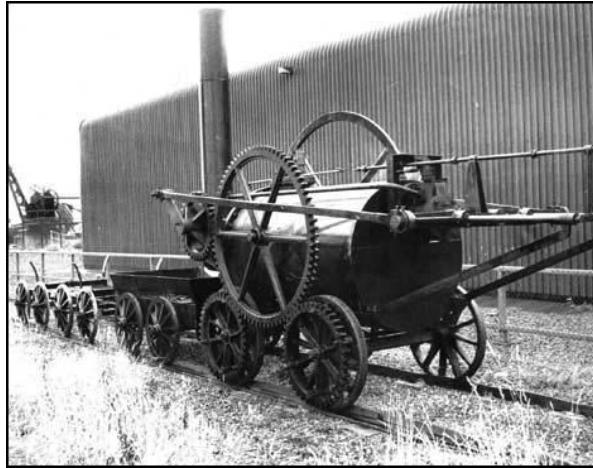
Em 1804, Trevithick foi capaz de acionar um motor a vapor com um cilindro, fazendo-o circular nos trilhos de ferro fundido, ao longo de um percurso de 16 km, a uma velocidade de cerca de 4 km/h, transportando até 10 toneladas de ferro, 70 passageiros e 5 vagões [33][57].



**Figura 9 – London Steam Carriage [56]**

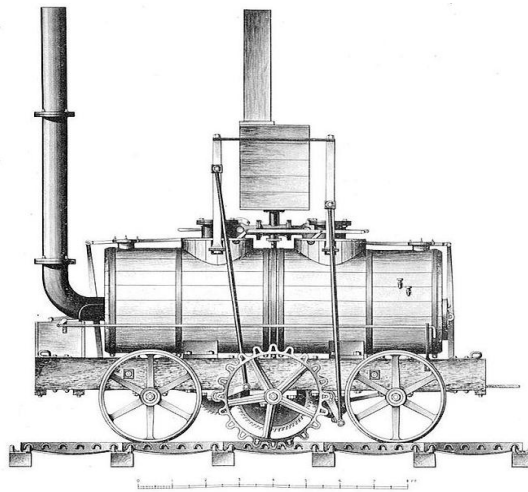
Esta máquina é conhecida como *Penydarren* (figura 10), pois Trevithick tinha sido contratado por Samuel Homfray, o proprietário das minas *Ironworks Penydarren* em Merthyr Tydfil, que lhe pediu para produzir uma locomotiva cuja finalidade seria transportar ferro da referida mina para o cais fluvial mais próximo. Esta era constituída por um cilindro vertical único, um volante de 8 pés e um longo pistão de haste, tornando-se, assim, no primeiro motor a vapor a circular com êxito em trilhos. A locomotiva empregava o princípio importante de funcionamento de transformar o vapor de escape, produzindo a concentração dos gases quentes libertados pelo fogo mais poderoso, através da caldeira [58]. O motor desta, no entanto, era muito pesado, levando à rutura do cilindro depois de algumas viagens, três no seu total, anulando a competitividade do investimento feito. Assim, Trevithick, perdeu alguns financiadores e teve que parar com o projeto. No entanto, a pesquisa nesta área foi continuada por outros estudiosos [33] [58].

Em 1807, entra em funcionamento a primeira ferrovia para o transporte de passageiros, ainda que com tração de cavalos. Este serviço foi estabelecido na VF de Oystermouth, em Gales, no qual já existia uma taxa de utilização para passageiros. Contudo, Trevithick não teria dado como encerrada a sua aventura no vapor e dedicou-se ao aperfeiçoamento das suas máquinas. Surgiu, em 1808, a quarta e última locomotiva desenvolvida por ele, tendo sido designada de *Catch Me Who Can*. Contudo, não seria a época ideal para o lançamento de uma máquina tão avançada num serviço desta natureza, caindo por terra o seu potencial e levando Trevithick a deixar a Inglaterra.



**Figura 10 – Penydarren [58]**

Trevitick emigrou para a Costa Rica, onde fez fortuna com a instalação de motores a vapor em minas [45] [46]. Em 1812, John Blenkinsop e Matthew Murray construíram a Salamanca (figura 11), primeira locomotiva a vapor a singrar comercialmente: com a exploração do sistema de Trevitick, foi alcançado um veículo com dois cilindros, de maior dimensão, cujo peso era distribuído por três eixos [33].



**Figura 11 – Salamanca [59]**

Estas primeiras experiências não tiveram um sucesso imediato. Desta forma, foram encetadas uma série de experiências e inovações que culminam em 1814, por intermédio de George Stephenson, com a sua primeira locomotiva apelidada de *Blucher*, que tinha como destino o transporte de carvão, capaz de rebocar uma única carga de 30 toneladas de material [60]. Nos anos seguintes, Stephenson, um especialista em mecânica e originário da localidade onde Trevithick teria efetuado a sua última experiência, aperfeiçoou a tecnologia já existente criando novos modelos de locomotivas [54].

## 2.5. A CORRIDA AO CAMINHO DE FERRO

Nos primeiros anos de operação das locomotivas a vapor, estas apenas eram utilizadas como força motriz em superfícies planas e em subidas, enquanto para descidas era explorada a inércia [54]. Em setembro de 1825, foi inaugurada a VF entre Stockton-on-Tees e Darlington, com cerca de 40 km de linha única, construída a partir de um prolongamento da VF de mineração já existente. Esta foi inteiramente financiada por capitais privados, tendo sido, numa primeira instância, a sua utilização com tração animal, sendo posteriormente revisto o projeto por Stephenson, que aplicou algumas modificações. Após a obtenção de permissão junto das autoridades, este projetou uma locomotiva capaz de transportar passageiros, *The Locomotion*, puxando os vagões das minas onde estes eram transportados, tendo para tal adquirido bilhetes. Nesta altura já se observava a classificação dos passageiros, uma vez que alguns destes eram figuras notáveis, que seguiam num vagão apelidado de “*The experiment*”, feito com tábuas de madeira, tendo este sido considerado o primeiro modelo de carruagem de passageiros. A velocidade média da viagem foi cerca de 16 a 19 km/h (10 a 12 milhas/h) [54]. A distância entre as arestas interiores dos carris (designada por bitola), era determinada de acordo com a distância axial dos veículos ferroviários da altura anteriores às locomotivas. Para a construção da VF Stockton-Tees-Darlington, foi estabelecida a bitola de 4 pés e  $8\frac{1}{2}$  polegadas (1435 mm), de acordo com o comprimento dos eixos da locomotiva concebida por Stephenson que, possivelmente, se referenciou na largura dos eixos das carruagens e vagões existentes [57]. Tendo em conta que as primeiras locomotivas foram produzidas por Stephenson, a distância axial assumida por este tornou-se num valor de referência. Na construção das vias férreas surge a oportunidade de corrigir questões relacionadas com a inclinação dos trilhos, reduzindo, assim, a inclinação que potenciava o abrandamento da locomotiva e as descidas que aumentavam o uso prolongado dos freios. Para superar o terreno irregular, como pântanos, canais e montanhas, as técnicas para construção fizeram uso de exemplos já utilizados nas estradas e canais, com a construção de pontes, túneis e viadutos, impondo à medida que iam sendo construídas, a transformação paisagística e da vida social. Em pouco tempo, concretiza-se a construção de uma nova linha de ligação ferroviária, com 48 km de extensão, entre duas das grandes cidades industriais da GB: Liverpool e Manchester, tendo sido aberta em 1830. A necessidade de transporte de mercadorias era uma das principais razões para a construção desta VF. Liverpool era um porto em plena expansão, ponto de chegada e armazenamento de mercadorias provenientes das colónias inglesas, como era o

caso do algodão, rum, açúcar, tabaco e ainda carvão proveniente do noroeste da ilha inglesa. Já Manchester era o ponto de concentração de inúmeras fábricas, onde as matérias-primas eram trabalhadas e transformadas. As estradas pouco desenvolvidas e a inércia das ligações marítimas diminuiriam a necessidade de alimentar o crescimento desta indústria, levando a problemas de mobilidade não só de bens, mas também de pessoas. Na edição de maio 1826 do *Annals of Statistics Universal*, no artigo *sobre vantagens das estradas de ferro em Inglaterra*, é referenciado que estas tiveram um impacto positivo na economia do país, que não produziu a exportação de capital, mas foi estimulada a produção comercial doméstica e industrial.

*“...Meios de transporte entre Liverpool e Manchester sendo insuficiente e caro, a Comissão foi convidada a fazer experiências para reconhecer a diferença dos benefícios da utilização da mesma força motriz empregue: 1º numa estrada ordinária; 2º numa estrada de ferro; 3º num canal; quando a velocidade aumenta, a vantagem aponta para a estrada de ferro. Como consequência destes resultados, a empresa fez um fundo... para estabelecer entre Liverpool e Manchester uma estrada de ferro... Outra empresa estabelecerá uma comunicação semelhante entre a parte oriental da Escócia e a sua costa ocidental e, um terceiro, ligando Londres e Wolwich... A distância entre a capital e a cidade principal de Inglaterra será reduzida... O correio da capital chegará em 12 horas a Manchester, a Liverpool e a Leiden, e em menos de 24 horas a Glasgow e Edimburgo... Acredita-se que os produtos podem gerar crise financeira, não serão graves obstáculos para a implementação de tais empresas e é muito mais credível que a construção de estradas de ferro não sofrerá interrupção porque não requerem a exportação de dinheiro do estrangeiro e de facto serve grandiosamente para operações comerciais internas do reino, objeto que neste momento são os principais objetivos do governo [61]*

Este pedido foi entreposto pelos comerciantes das duas cidades que tinham formado, em 1823, a companhia ferroviária *Liverpool-Manchester Railway* (L&M Railway, figura 12) [33].



**Figura 12 – *L&M Railway* [62]**

Apesar de um anterior pedido ter tido um parecer negativo, este novo pedido foi aprovado em 1825. A sua construção foi encomendada por George Stephenson. A escolha da locomotiva foi feita com base na velocidade e não por concurso. George Stephenson e o seu filho Robert, que seguiu os passos do pai na construção de locomotivas, concordaram com a utilização da locomotiva *Rocket* (figura 13), que derrotou as concorrentes, impressionando o público de tal forma, que ficou conhecida como a máquina mais popular do mundo [33][57].



**Figura 13 – *Locomotiva Rocket* [63]**

O *design* da linha era muito avançado, para aquela época: com dois eixos, com a bitola determinada por Stephenson, utilização de uma só tração a vapor, carregando bens e viajantes das duas grandes cidades. Se a experiência anterior tinha servido as necessidades de transporte de materiais extraídos das minas, principalmente carvão, em pontos com possibilidade de expedição marítima, a nova linha teve um batismo diferente. Como existia

falta de vagões para transporte de mercadorias, o dia de abertura foi apenas dedicado ao transporte de passageiros. Apesar da ocorrência da morte de um espectador, na primeira viagem, a adesão foi tão grande e eufórica que, devido aos lucros gerados, a empresa pagou substanciais dividendos aos seus acionistas e ainda cobriu os custos de construção da linha. Desde então, o serviço foi lançado e o transporte de mercadorias e animais expandiu-se. Contudo, o incidente ocorrido com o espectador levantou o problema da segurança neste tipo de transporte; o apito clássico foi substituído pelo som de um sino que foi instalado em cada locomotiva [33].

Uma das dificuldades encontradas na construção desta ferrovia foi o processo burocrático para a obtenção de autorizações necessárias. Os territórios que serviam a ferrovia apresentavam situações de abordagem complexa (declives, cursos de água, estradas, zonas húmidas), colocando também uma pressão, dada a falta de experiência nestes problemas, sobre a capacidade dos engenheiros para identificar soluções de *design* mais adequadas. A inauguração da via Liverpool-Manchester contou com numerosos observadores estrangeiros, incluindo holandeses, americanos e russos, atraídos pela curiosidade da novidade, mas, ao mesmo tempo, com apetite voraz de absorver toda a informação possível para replicar os mesmos ensaios nos seus países. A sensibilização para os benefícios das vias ferroviárias tinha-se espalhado para além da ilha britânica, tendo já atravessado o Atlântico e conquistando a atenção geral. O fenómeno das ferrovias já se tinha espalhado a uma velocidade surpreendente na América e na Europa. Já sendo suficientemente surpreendente a novidade da ferrovia, no mesmo ano de inauguração, a via Liverpool-Manchester é utilizada para transporte de reforços militares, para embarcarem em navios na Irlanda [64]. O resultado foi o nascimento de uma combinação entre a ferrovia, estratégia militar e políticas públicas, o que levou a alterar a localização dos responsáveis e a especializar a arte militar na ferrovia e vice-versa [33].

### **2.5.1. MASSIFICAÇÃO DO CAMINHO DE FERRO PELO MUNDO NO SÉCULO XIX**

O *boom* da VF começa a ocorrer um pouco por todo o mundo. Na Europa continental, a primeira via-férrea é construída e aberta à exploração, em Junho de 1827. Em França, entre Saint-Etienne e Andrézieux, ainda se observava uma versão de carruagem puxada a cavalos [65]. Nos EUA, a companhia *Baltimore and Ohio (B&O)* inicia a construção de uma VF, tendo sido aberta em 1830. Esta VF era puxada com recurso a cavalos e contava com 37 km, cuja via era em madeira com reforço em ferro. A primeira locomotiva a vapor

americana, a *Tom Thumb*, foi projetada e construída por Peter Cooper para a *B&O* [46]. Em 1830, o primeiro trecho da via Saint-Etienne-Lyon é aberta entre Givors e Rive-de-Gier, sendo que o restante trecho foi colocado à exploração, dois anos mais tarde, em 1832, mas somente para transporte de passageiros. Esta via caracterizava-se por ter 58 km de comprimento em trilhos de ferro assentes em pedras quadradas e podia atingir uma altitude de 375 metros, com 112 pontes e três túneis [66]. Já noutros continentes, como o caso da Austrália, surge em 1831 pela *Australian Agricultural Company*, a introdução do ferro fundido em forma de “barriga de peixe” gravitacional (figura 14), ao serviço de uma mina de carvão, a *Pit*. Mais tarde, por volta de 1854, em Vitória, é aberta a primeira linha com tração de locomotiva a vapor [67].



**Figura 14 – Fishbelly (“barriga de peixe”) gravitational railways [68]**

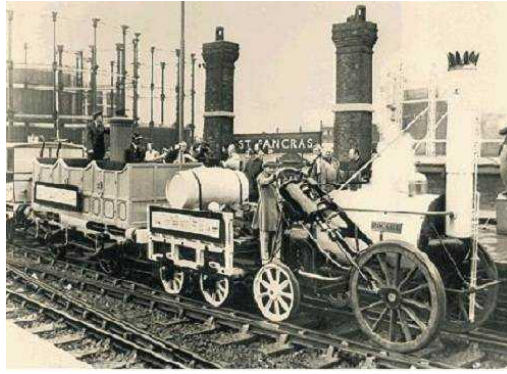
Mas foi na GB que se fez sentir mais o desenvolvimento da VF e dos comboios, no seu geral. Assim, em 1831, são emitidos os primeiros bilhetes para passageiros na linha Canterbury-Whitstable, que foi aberta, em Kent na Inglaterra, e projetada por George Stephenson em 1830, com aproximadamente 9 km entre Canterbury e um pequeno porto na cidade piscatória de Whitstable. A tração era feita por três motores, com configuração axial de *0-4-0* [69]. Ainda na GB, em 1832, é aberta a primeira linha na região central da Inglaterra, com um comboio puxado com recurso da locomotiva a vapor, na linha Leicester-Swannington. Mas era inegável que a GB estava, na época em questão, na linha da frente no que respeita aos CF. Assim Charles Fox, um dos engenheiros que trabalhou com Robert Stephenson, desenvolveu, pela primeira vez, em 1832, o sistema de mudança de vias, ou agulhas, o que permitia mudar de direção ou via, assegurando, assim, a continuidade da viagem, sem necessidade de mudança de comboio [70].

# 3. A DISSEMINAÇÃO DOS CAMINHOS DE FERRO

A evolução dos CF reconheceu rapidamente a sua disseminação, um pouco por toda a parte, nomeadamente pela Europa e pelos Estados Unidos da América (EUA), sendo que o seu desenvolvimento potenciou a emergência da RI e assumiu-se como crucial nos períodos de guerra, para auxílio militar.

## **3.1. A REVOLUÇÃO INDUSTRIAL E O CAMINHO DE FERRO NA GRÃ BRETANHA**

O desenvolvimento e a transformação da rede ferroviária britânica evidenciavam uma situação favorável: a presença de minas de ferro ao lado dos depósitos de carvão [33]. Esta circunstância permitiu que a GB se tornasse autossuficiente na produção de ferro, não dependendo mais de madeira que, na época, era importada da Suécia. O nascimento de complexas siderurgias e metalurgias que fabricavam ferro laminado em quantidades inimagináveis e com elevada qualidade, permitiu um rápido desenvolvimento da indústria mecânica, em particular no que diz respeito a máquinas com recurso à madeira, como é o caso do tear têxtil. Assim, o desenvolvimento geral da construção ferroviária é um dos motores de condução para a RI (figura 15).



**Figura 15 – Locomotiva a vapor na RI [71]**

A explosão do fenómeno das ferrovias, no entanto, não era tão óbvio e fácil como pode parecer à primeira vista. Apesar da sede de inovação, não se faziam esperar as manifestações de oposição à introdução de novas tecnologias. Muitos pensavam que tal desenvolvimento iria trazer intranquilidade aos campos e meios rurais; outros alegavam que devido à passagem da locomotiva e à turbulência associada, as vacas produziram menos leite; outros ainda reivindicavam que as ovelhas perderiam a cor da sua lã e; outros ainda, que os passageiros não conseguiriam respirar com as altas velocidades da locomotiva. Para muitos cétricos, esta não era uma oportunidade de progresso e de desenvolvimento, mas antes uma ameaça aos empregos, aos ritmos e modos de vida. Contudo, tais manifestações não surtiram efeitos relevantes. O baixo custo do novo sistema de transporte permitiu o crescimento económico generalizado, estimulando a produção e o fornecimento de mercados, quer internos quer externos. Dez anos após a inauguração do Liverpool-Manchester, a locomotiva a vapor transpôs fronteiras e popularizou-se na Europa continental, América do Norte, América Latina, Norte de África e Ásia [33].

O alto nível de industrialização que a GB alcançou permitiu-lhe explorar todo o potencial desta nova tecnologia, ocupando, economicamente, a liderança europeia. Durante várias décadas, a capital inglesa contribuiu para o financiamento de projetos nas colónias britânicas que se encontravam espalhadas pelo mundo. A tecnologia britânica foi tornada num modelo; materiais para construção de VF e locomotivas inglesas eram usados e precisos um pouco por todo o mundo. A bitola projetada por Stephenson desde 1825 foi aceite e aprovada pela maioria dos estados tornando-se, possivelmente, numa unidade de medida padrão. Ainda que de forma involuntária, sem que se percebesse numa primeira instância, a bitola padrão provaria, mais tarde, que seria o elemento que iria permitir a

união física das redes ferroviárias abrindo, desta forma, portas para perspectivas mais amplas de intercâmbio nos domínios económico, político, social e cultural [33].

Os primeiros CF britânicos que foram construídos tiveram como objetivo a satisfação das necessidades existentes, suportados pelos proprietários das minas. Assim, o próprio mercado impulsionou a procura de soluções inovadoras. Com esta nova tecnologia, foi possível o alcance de maiores distâncias, ligando áreas anteriormente consideradas longínquas, potencializando o transporte de pessoas. De salientar que, sempre que existia interesse das comunidades e não existiam fundos de financiamento suficientes por parte dos proprietários das minas, era realizada uma subscrição pública. Por conseguinte, a escolha dos percursos das VF deixa de se encontrar associada a questões e critérios de planeamento, ampliando-se para uma participação regional, que envolvia interesses privados, corporativos e eleitorais. Assim, a obtenção de autorizações dependia não apenas das necessidades locais, mas também das pressões dos próprios empresários. Quem os representava elaborava uma proposta, procurava financiamento e transmitia ao Parlamento, fazendo uma forte pressão sobre os representantes políticos. Ao Governo competia apenas a promulgação em função com aquilo que era indicado pelos parlamentares. Estes interesses, muitas vezes desprovidos de perspectiva e colidentes entre si, faziam crescer as resistências às mudanças e a implementação da tecnologia, nomeadamente por parte dos agricultores e proprietários das terras, que se mostravam relutantes em ceder as terras ou mesmo em permitir a passagem dos CF nelas. Tendo em linha de conta que a venda forçada de terra só era possível com a aprovação do Parlamento, a sua adoção protegeu principalmente o interesse dos proprietários que, por diversas vezes recorriam a essa ação no sentido de obterem uma compensação maior do que o valor de mercado. A falta de planeamento coordenado levou, inclusivamente, à duplicação de linhas, tendo mesmo ocorrido situações de construção paralela de linhas, enquanto outras áreas ficavam desprovidas de qualquer ligação [33].

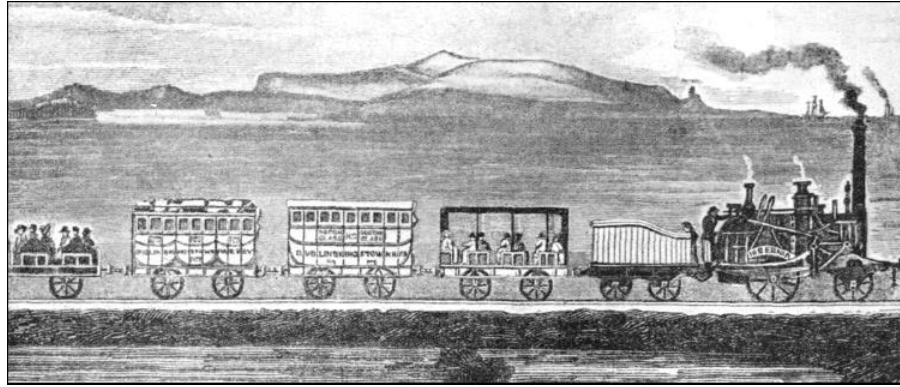
### **3.2. A EXPORTAÇÃO DA VIA-FÉRREA PARA AS COLÓNIAS INGLESAS**

A rede ferroviária da GB rapidamente se espalhou pelas suas colónias da América, Ásia, África, Austrália e em áreas de influência algo-saxónica como os EUA, bem como em toda a Europa, incluindo a península italiana, o que representava um emblema de RI, sendo dos maiores investimentos financeiros em terras públicas, mas sobretudo privada, permitindo a criação de grandes fortunas pelo mundo fora [33].

Na GB, o sucesso ferroviário não dependia apenas da sua força económica, mas também se devia a uma maior estabilidade política, alcançada pelo país. Construções escassas feitas nas décadas de trinta, no continente europeu, são um testemunho disso. No entanto, os protestos organizados, a agitação social, os tumultos e as revoluções e guerras que se assistiram um pouco por toda a parte, viriam perturbar o desenvolvimento desta tecnologia, impedindo que o continente europeu tivesse um ambiente favorável para mergulhar na aventura financeira e no investimento privado a longo prazo, necessário à construção da VF. Nesta linha de pensamento, foram os governos continentais que impulsionaram o reconhecimento e utilidade das VF no transporte de tropas militares e na aproximação de territórios e populações, permitindo uma maior proximidade e ligação entre todos [33].

Naquela época, o financiamento não era totalmente privado, sendo apoiado por ações públicas, recorrendo a vários meios diretos e indiretos. Apesar do estado britânico não colocar restrições especiais para projetar as VF, as empresas britânicas tinham sido beneficiadas pelo seu acesso privilegiado nas suas colónias, com especial incidência na Índia. Com esta condição, a GB é, até 1870, a maior referência mundial em transporte ferroviário, tanto para exportação de materiais e *know-how* em vários países, em especial na América Latina e na Ásia, como na produção e comercialização de produtos manufaturados. A capital britânica assume, assim, uma importância vital para muitas redes ferroviárias em outros países [33].

As regras do mercado livre aplicadas no país não foram, no entanto, aplicadas nas colónias, tendo sido mantida uma economia controlada pelo Estado. A Irlanda, na época uma colónia britânica, foi dos primeiros países a implementar uma linha ferroviária, com um investimento avultado. Tal é comprovado com o facto de, em 1853, já existirem 1300 km de VF construída que ligava as principais cidades. O primeiro trecho foi inaugurado em 1834, ligando Dublin ao porto marítimo de Kingstown (figura 16). Apesar das fortes relações com a GB no que toca à construção, verifica-se uma diferenciação na escolha da bitola [33].



**Figura 16 – Ligação Dublin-Kingstown [72]**

Para a primeira linha construída, a distância adotada foi a axial, proposta por Stephenson, mas apenas para esta linha. As subsequentes foram construídas com uma bitola maior e em concordância com tal, a distância entre o binário também era diferente, possivelmente por questões de conforto, dependendo do material circulante disponível. Para as linhas principais, a ilha adotou a bitola de 1600 mm, medida adotada, também, pela Austrália, Nova Zelândia e Brasil [57]. Tais escolhas tiveram resultados práticos nos portos, possibilitando o carregamento de vagões de mercadorias. Mesmo na Irlanda, as primeiras construções encontraram oposição daqueles que acreditavam que esta tecnologia teria impacto negativo sobre o mercado local e tinham a mesma opinião quanto às compensações dos proprietários das terras expropriadas. Ao contrário do que se tinha passado na GB, aqui o estado britânico participou no financiamento das construções de VF, concedendo linhas de crédito e subsídios para os empresários privados, devido à fraca economia vivida na época. No panorama colonial do Canadá, do ponto de vista ferroviário, este representava um exemplo de como a ferrovia tinha contribuído para dar uma identidade e unidade ao um vasto território, federado em 1867 e gradualmente alargado com a entrada de novos estados [33]. A razão é vista no apoio prestado pelo governo colonial, na construção da rede ferroviária para fins políticos, sobretudo para ligar as províncias distantes, mas também para maximizar o comércio interno. Desta forma, minimizavam o comércio com os EUA, evitando tornarem-se dependentes, economicamente. O Canadá enfrentava um atraso no panorama ferroviário e em 1849 tinha pouco mais de 100 km de linhas construídas, ligando essencialmente vias navegáveis [33]. Tendo em consideração as dificuldades sentidas no arranque do sistema ferroviário, o Parlamento da província do Canadá aprovou uma lei que reconheceu o interesse económico no investimento privado em novas linhas [73]. Recorrendo a uma segurança financeira do Governo, em 1853 uma ferrovia transnacional, a *Grand Trunk Railway*, criou

ligações de Montreal a Toronto e de Sarnia a Maine, em Portland, ponto de contacto com a rede ferroviária norte-americana. Ao longo de mais de uma década esta rede foi reforçada. Na viragem do século, três linhas transcontinentais permitiram ao Canadá definir as suas próprias fronteiras e evitar que a sua economia fosse absorvida pelos EUA. A ideia de ligar o Atlântico ao Pacífico tinha sido equacionada pelo governo colonial britânico em 1844, mas não foi consolidada. A proposta surgiu em 1871, quando o estado da Colômbia Britânica (para apoiar a sua economia e ganhar a concorrência com o Alasca, tomada recentemente pelos EUA) exigiu a construção de uma linha que atingisse o Pacífico, como condição para entrar na Confederação Canadiana. Em 1872, sob a pressão política, o governo colonial aprovou o pedido de financiamento e concessões de terras para a empresa contratante, a *Canadian Pacific Railway*. Esta pressão devia-se ao aspeto militar pois, com a ferrovia, a implantação de forças para travar qualquer revolta interna ou responder a ataques vindos dos EUA era efetiva. A linha entrou em funcionamento em 1876 [57]. Conforme tinha ocorrido na Irlanda, a escolha feita pelo governo britânico para fornecer apoio financeiro e outras concessões de operação ferroviária, anulava os princípios do mercado livre pois respondiam claramente às necessidades políticas coloniais. Tal levou à consolidação das várias províncias em torno de uma única entidade governamental, superando uma rivalidade entre comunidades francófonas e anglófonas. No caso da Irlanda, Canadá e Índia, bem como noutras colónias do império, o governo britânico adotou as mesmas medidas para o desenvolvimento do sistema ferroviário. No caso da Índia, o transporte ferroviário aportou um impacto significativo sobre a produção, recolha e tratamento de algodão, uma vez que o impacto nos custos dos produtos e matérias-primas que dependiam do algodão também se faziam sentir no fabrico britânico. Nas colónias, os CF deveriam ser encarados não como empresas privadas, mas sim como obras nacionais, em que o governo tinha o direito e o dever de exercer um rigoroso e benéfico controlo [33].

Se, na GB, a construção já tinha assumido um desenvolvimento caótico, a rede ferroviária nas colónias foi criada de acordo com um planeamento estratégico centralizado, ligado a metas financeiras. Na GB, a construção desenfreada de ferrovias tinha inundado o Parlamento com pedidos de novas vias, de tal forma que a Comissão Parlamentar britânica tentou, entre 1844 e 1845, restaurar a ordem na situação caótica que se fazia sentir, sem grande sucesso. A maioria das linhas ferroviárias tinha sido construída com acordos especiais entre empresas estatais e privadas, onde os direitos e deveres múltiplos eram estabelecidos. Era cada vez mais claro que, com a assinatura de tais acordos, o Estado agiu

como um suporte financeiro: por um lado, garantiu a cobertura do investimento necessário, uma vez que a dificuldade em arranjar capitais no mercado estava patente [33]. Graças à construção das redes coloniais, a indústria metalúrgica e siderúrgica funcionou em grande ritmo. Desta forma, o mundo financeiro movimentava enormes quantidades de capital, aumentando os negócios com ações de interesse e dividendos de ações. Apesar das consequências do desenvolvimentos destes países ser claramente positivas, as ferrovias da época só se tornaram possíveis com o apoio do Estado [33].

### **3.3. O CONTRIBUTO ANGLO-SAXÓNICO E A EXPORTAÇÃO PARA OS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA**

A ferrovia exerceu uma grande influência quer na consolidação da identidade nacional, quer no desenvolvimento económico nos EUA, pelo que a opção em chamar "caminho de ferro" (*railways*) em vez de "estradas de ferro" (*railroads*), acaba por sublinhar a importância e grandiosidade deste transporte na consolidação do sentimento patriótico do estado norte-americano (figura 17). No início de 1800, numerosos CF foram construídos nos territórios entre a costa do Atlântico, os grandes lagos e as montanhas de Allegheny. De comprimento modesto, estes ligavam áreas de mineração aos portos marítimos, sendo que a tração era animal ou através de motores estacionários. As comunicações e transportes no país contavam com estradas já implementadas e uma rede crescente de canais navegáveis, funcionando estes como elemento-chave para o crescimento económico. Em 1827, teve lugar em Boston, uma exposição de locomotivas britânicas, percebendo-se, claramente, que todas as forças políticas e económicas estavam cientes da necessidade em criar ligações entre as cidades e os territórios, através destas máquinas. Apesar disso, as primeiras tentativas de empreendedores americanos no setor ferroviário, não foram bem-sucedidas, sendo que foi a autorização de três projetos financiados com capital privado, que permitiram o avanço da construção ferroviária [33].



**Figura 17 – “Railroad” privada nos EUA [74]**

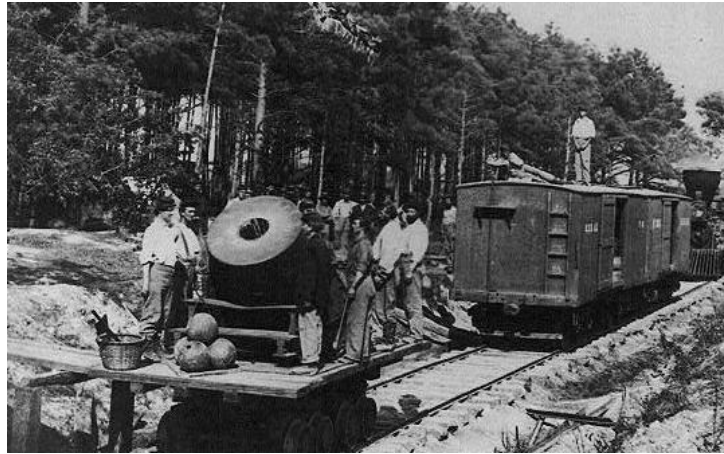
A partir daqui, é tomada a decisão de um investimento avultado com recurso a capital privado, para a construção de uma linha ferroviária de 600 km em via dupla, de modo a ligar as quatro principais cidades portuárias do país: Nova Iorque, Filadélfia, Washington e Baltimore, com as áreas de mineração das montanhas Allegheny, integrando a travessia do canal. Esta construção começou em 1828, tendo sido concluída 25 anos mais tarde. Entretanto, já tinham sido feitas várias ramificações a partir da linha principal, espalhadas pela costa leste, entrando ao serviço antes desta. Em alguns casos, o próprio governo, de forma a incentivar o investimento e a expansão de linhas, concedia o direito de monopólio. Apesar de o financiamento para a construção destas ramificações concorrerem com o governo, o compromisso e os princípios de mercado livre estavam assegurados. Em 1830, na Carolina do Sul, assistiu-se ao crescimento da produção agrícola e à necessidade de um transporte mais rápido e barato que a carroça de tração animal. Para o efeito e dada a importância do escoamento da produção, é lançada a primeira exploração comercial ferroviária da costa leste, por intermédio da *South Carolina Canal and Rail Road Company (SCC&RR)*. A linha contava com 9,7 km de extensão, a oeste de Charleston. Em 1833, iniciou-se, nesta mesma linha, contando agora com 219 km, o serviço entre Charleston e Hamburgo. A SCC&RR foi historicamente assumida como a primeira *railroad* do Norte da América.

Os comerciantes e os proprietários de mineração reconheceram as mais-valias no CF e começaram a apoiar a causa, uma vez que viam no CF uma forma de transporte rápida e acessível aos seus produtos, nomeadamente legumes, frutas ou frescos no seu geral, e no caso da mineração, o carvão e o ouro. Desta forma, os proprietários e comerciantes conseguiam rapidamente colocá-los nos mercados da cidade. Embora o país fosse pouco

povoado, a expansão dos CF ocorreu de forma tão célere que, no final dos anos 30, existiam já 4800 km de vias contra os 1800 km existentes na Europa [57]. Tal feito foi histórico e só foi possível devido ao menor custo de construção das vias, bem como ao grande impulso dado pelo país em busca de uma revolução e um novo paradigma nos sistemas de transportes. Com tal iniciativa, ocorreram novas possibilidades para fixação das populações em outras terras, bem como para a liberdade de pensamento que os tornou menos suscetíveis a restrições convencionais ou laços culturais. No início da década de 40, a extensão dos CF tinha atingido tal dimensão que se equiparava à extensão dos cursos e canais de água. Contudo, tal não foi motivo para que houvesse um desinvestimento nos canais pois, inclusivamente, foi mantida uma taxa de crescimento similar à dos CF. Mesmo nos EUA, as ferrovias conduziram à expansão da RI, contribuindo para o alcance da imagem de desenvolvimento económico. Estes aspetos aliados à grande disponibilidade de recursos naturais e de matéria-prima, fez com que os EUA fossem encarados como a primeira potência mundial. Em pouco anos e apoiado no investimento privado, nasceram as primeiras empresas ferroviárias privadas, fazendo com que em 1850 o país fosse atravessado por 15.000 km de vias em plena exploração. Já na década de 50, os CF foram consensualmente assumidos como um dos meios de transporte mais eficiente. Naqueles anos era clara e urgente a necessidade de unificar e padronizar as redes de CF, pelo que o governo federal, com o intuito de cobrir a área do Atlântico e desenvolver uma rede organizada no pacífico, apoiou e financiou a construção de uma rede transnacional para a ligação das duas costas [33].

Vinculados na ideologia de que onde chegasse o comboio, chegariam as pessoas e as atividades produtivas, começa a intensificar-se a intenção de cultivar e de habitar nas áreas intermináveis do oeste, bem como uma corrida desenfreada ao ouro, fazendo com que, lentamente, desaparecessem os povos indígenas que eram arrancados das suas terras e confinados a reservas degradantes e apertadas. Só com a Guerra Civil, é que se assiste a um abrandamento na construção das redes de CF. Em termos militares a Guerra Civil permitiu igualmente o rápido movimento de tropas e de armamento, com recurso ao CF. Tal sufraga a ideia de que a chave para o sucesso passa pela capacidade de gestão do setor ferroviário e submissão perante o controlo militar. Nesta ótica, observou-se uma tendência dos exércitos construírem separadamente novas linhas para que conseguissem obter vantagem e rapidez na colocação de material bélico e tropas no campo de batalha ou, por outro lado, para sabotarem as tropas opostas de modo a conseguirem o resultado contrário.

Esta toada militar alcança igualmente inovações para o campo de batalha, surgindo um vagão com um canhão de artilharia, um protótipo da mais recente artilharia móvel [33] (figura 18).



**Figura 18 – “Ditactor” na Virginia, em 1865 [75]**

De entre alguns dos observadores deste desenvolvimento dos CF encontravam-se oficiais prussianos que, mais tarde, com a eclosão da guerra contra a Áustria (nomeadamente na batalha de Sadowa), reconheceram a sua utilização na movimentação rápida das suas tropas. No entanto, importa sublinhar que o recurso aos CF teve, sob o ponto de vista militar, uma série de implicações negativas [57]. O campo de batalha, devido à rápida mobilidade de pessoas e dos veículos que a VF conferia, foi proliferando para mais e novas frentes, pelo que as VF eram facilmente sabotadas, sendo necessário um grande destacamento de soldados para o controlo da mesma [33].

A ferrovia provou, uma vez mais, ser um elemento essencial no desenvolvimento do país. Um dos defensores acérrimos do sistema ferroviário foi Abraham Lincoln, que acreditava numa VF transcontinental que percorresse o país de este a oeste, que teria como impacto positivo o preenchimento, a pacificação e a unificação. Terminada a Guerra Civil, a linha transnacional tornou-se uma realidade em 1869, ligando as duas costas através de um sistema de redes territoriais cada vez mais extenso. Em 1890, os EUA contavam com uma rede ferroviária de 270.000 km contra os 216.000 km em exploração na Europa. Esta diferença confirma o centro propulsor da economia mundial, que se tinha deslocado para o outro lado do Atlântico [76]. Ao se contextualizarem as origens das VF, as vias americanas apresentavam mais semelhanças com as dos britânicos, do que com as da Europa Continental. Apenas a linha transcontinental foi centralmente planeada, sendo que

as restantes, graças ao mercado livre de construção impulsionado pela livre concorrência, não tiveram uma coordenação central. Foi decidido, no entanto, permitir que as empresas ferroviárias fornecessem serviços integrados aos seus passageiros, como: serviço de restauração e serviço de bagagem, passando pela manutenção das VF. Tornou-se, igualmente claro, que as primeiras linhas foram construídas de acordo com o modelo e a tecnologia produzida na GB. Após a introdução necessária no continente, a tecnologia foi alterada, recorrendo-se a diferentes soluções para responder a diferentes situações ambientais. O custo mais reduzido das terras permitiu a extensão das vias, vencendo as distâncias e os obstáculos à construção das mesmas. As locomotivas produzidas nos EUA eram mais potentes e mais rápidas, contudo, não eram capazes de percorrer distâncias longas. Com o passar do tempo foram testadas cabines fechadas para o maquinista e para o seu ajudante (que colocava carvão na fornalha), como resposta ao rigor do clima, surgindo igualmente o conceito de chaminé (que reduzia as faíscas produzidas) e a introdução de vagões de transporte na frente da locomotiva. Estas melhorias foram, mais tarde, implementadas com sucesso na Europa [33].

Na maior parte dos comboios americanos era possível embarcar sem bilhete e adquiri-lo a bordo, contrariamente àquilo que acontecia na Europa, onde era necessário adquirir previamente e com bastante antecedência antes da hora de partida. Os comboios não seguiam um horário bem definido. Era especificada a hora de partida, mas não a hora de chegada, devido aos imprevistos que poderiam surgir durante a viagem, sendo que o maior perigo eram as colisões frontais. Devido aos tempos da viagem, quando se tratavam de longas distâncias (realizadas de dia e de noite), introduziu-se o conceito de carruagens com assentos por dia e não divididos por compartimento [57]. O controlo prévio das linhas era impossível de ser realizado, nomeadamente em longas distâncias. Para se poder enfrentar obstáculos inesperados, recorreu-se a alguns truques, como acoplar um vagão na parte frontal da locomotiva, com o intuito de evitar colisões frontais e imprevistos na linha. Para as viagens noturnas, as locomotivas eram dotadas de lâmpadas de querosene que emitiam um forte feixe de luz sobre a linha, através de um sistema de espelhos [57].

O serviço postal foi um outro aspeto que reconheceu rapidamente grandes benefícios. Assim, o Departamento Federal viu uma enorme oportunidade nos CF, para acelerar o transporte de correio e de encomendas. Em 1869, era oficialmente inaugurado o primeiro serviço de correio por VF. Desta forma, foram concebidos e construídos vagões próprios

para esse tipo de transporte, possibilitando, de forma simples e fácil, a classificação e distribuição do correio pelas cidades onde o comboio passava. Com o tempo, foi desenvolvido um sistema de direitos de viagem, que aportou a possibilidade das empresas ferroviárias não proprietárias da via poderem também circular nas mesmas, efetuando, para o efeito, um pagamento de cargas, sendo que a obrigação de transportar alguém ou bens era cobrada de acordo com certas taxas de regulamentos impostos [57].

Durante vários anos, a VF era apenas de via única, quase sempre sem sinalização de apoio aos maquinistas na sua tarefa [33]. A sinalização ou a comunicação até ao destino era feita através de uma linha elétrica que corria a par da VF [77]. Com o aparecimento dos primeiros conceitos, conhecimentos e experiências na área do eletromagnetismo, Hans Christian Oersted, em 1820, demonstrou a relação entre a eletricidade e o magnetismo, desviando uma agulha magnética com uma corrente elétrica. Pelo mundo fora, as experiências com os princípios do eletromagnetismo multiplicavam-se, com o intuito de desenvolver algum tipo de sistema de comunicação. Contudo, os créditos da invenção do telégrafo (ou os seus princípios) são atribuídos a dois conjuntos de inventores: William Cooke e Charles Wheatstone, em Inglaterra, e Samuel Morse, Leonard Gale e Alfred Vail, nos EUA. Na década de 30, os britânicos desenvolveram um sistema de telégrafo com recurso a agulhas magnéticas, utilizando uma corrente elétrica, tendo sido introduzido para a sinalização ferroviária na GB [78]. O primeiro sistema de telégrafo ligava as estações ferroviárias de Euston e Camden Town, na GB, a partir de onde se espalhou por toda a rede ferroviária, sendo utilizado para a comunicação de mensagens, bem como para o controlo da sinalização ferroviária [77]. Durante este período, Morse trabalhou no desenvolvimento de um telégrafo elétrico mais robusto, da sua autoria [78].

A primeira sinalização fixa ferroviária, ficou associada a Joseph James Stevens, foi o semáforo de “braço” articulado que surgiu em 1840, sendo que através da sua inclinação, exibia diferentes indicações aos maquinistas (figura 19). A sua configuração sofreu várias alterações de *design* ao longo dos anos, sendo depois substituído por semáforos luminosos de cor em alguns países. O primeiro semáforo foi construído por Charles Hutton Gregory e aplicado na linha *London and Croydon Railway* em New Cross, no sudeste de Londres, por volta de 1842, com o *layout* conhecido de “braço” articulado. Posteriormente, foi também aplicado na *South Eastern Railway* [79]. O semáforo foi rapidamente adotado como um

sinal fixo na GB, substituindo todos os outros tipos de sinalética existente em 1870. Estes sinais foram amplamente adotados nos EUA depois de 1908 [80].



**Figura 19 – Sinalização “braço” articulado, atualmente [80]**

A introdução da prática de sinalização ou comunicação através do esboço do telégrafo, aumentou consideravelmente a eficiência das ferrovias de linha única, uma vez que permitiu que dois comboios viajassem em sentidos opostos, usando a mesma linha e ao mesmo tempo, simplificando o cruzamento entre ambos. Com uma maior aceitação deste sistema, entre 1860 e 1870, os operadores de telegrafia foram fixados, estrategicamente, em entrepostos ao longo da VF, com o intuito de receberem instruções do *dispatcher* ou regulador ferroviário, centralmente localizado que reportava a circulação dos comboios. O *dispatcher* era a pessoa que recebia a comunicação por mensagem e realizava uma espécie de controlo do tráfego ferroviário. Neste controlo, uma das tarefas era a designação de um dos comboios como “superior”, dando-lhe a prioridade de passagem sobre o comboio “inferior”, sendo necessário desviar este último para um pequeno trecho de via secundária, para possibilitar o cruzamento. O entreposto dos operadores de telégrafo servia para controlar os tempos de passagem do comboio em cada estação e passar a informação para outros operadores, bem como para o *dispatcher*. Este servia, ainda, para configurar os desvios entre as linhas secundárias e primárias aquando do cruzamento dos dois comboios. A função dos operadores foi de extrema importância, no que respeita ao controlo do tempo real de circulação dos comboios, antes de serem estabelecidos os fusos horários, pois a regulação pelo Sol diferia de estação para estação, nos EUA. Um erro no cálculo do tempo de circulação poderia significar um desastre. Assim, os operadores de telégrafo desempenharam um papel similar ao dos controladores aéreos de hoje, o que permitiu que

a circulação ferroviária, da época, ocorresse em segurança e em cumprimento dos horários [81].

Contudo, numa época conturbada como a Guerra Civil nos EUA, esta passagem de informação entre os entrepostos era deturpada, propositadamente, por uma das partes envolvidas, de forma a gerar confusão na comunicação e, assim, provocar acidentes, ganhando alguma vantagem sobre o opositor [33]. O uso do telégrafo permitiu uma maior segurança na circulação ferroviária, pelo que a associação do telégrafo ao mundo ferroviário populariza-o, antecipando algumas funcionalidades do mesmo. Em 1866, foi criado e explorado o primeiro cabo de telégrafo transatlântico do mundo, possibilitando a comunicação transcontinental entre a Europa e a América do Norte [33].

Quanto às motivações que levaram à construção dos CF, observa-se que, na Europa, a necessidade de ligar as cidades e as suas populações entre si foram a alavanca desta revolução, enquanto nos EUA, a finalidade foi a construção de cidades em locais inexplorados e desabitados, disseminando, assim, a cultura, estilos de vida e, desenvolvimento económico e social ao longo do país. Desta forma, os CF tiveram um papel preponderante no desenvolvimento de comunidades nos EUA num período curto de tempo, comparativamente com a Europa. A enorme área de território atravessado, o tamanho da linha de ferro e a riqueza de matérias-primas disponíveis para o processamento e a transformação industrial, fez com que os EUA tivessem todas as condições reunidas para se tornarem numa potência mundial [33].

Numa ótica de mercado livre, e em pleno apogeu das necessidades de transporte, muitas das VF construídas foram claramente para concorrer com o transporte fluvial através dos canais existentes, que no século XIX, tinha patenteado um aumento significativo. Nem sempre foi fácil, principalmente no início das construções, encontrar capital ou investidores dispostos a apostar neste transporte inovador para a época. O investimento vinha, na sua maioria, da disponibilidade de investimento individual e com baixa participação do sistema bancário e financeiro. Nas primeiras linhas ferroviárias, o apoio financeiro, no que concerne à construção, decorria diretamente dos interessados no progresso económico: os agricultores e comerciantes. Os agricultores e comerciantes financiavam este transporte inovador pelo facto de vislumbrarem oportunidades de negócio, prosperidade e valorização dos seus terrenos. A VF é vista como algo capaz de

afetar profundamente a redução dos custos de transporte, bem como de impulsionar o desenvolvimento económico [33].

No final do investimento ferroviário dos anos 30, assistiu-se a uma vantagem sobre os céticos e resistentes. Era travada uma luta com os proprietários dos canais, dotados com maquinaria a vapor. Mas a resistência foi curta, pois após os opositores perceberem a potencialidade do meio de transporte, também eles financiaram o seu investimento, prosseguindo com uma política de integração entre os vários sistemas de transporte. Para que a resistência fosse quebrada ou o financiamento fosse alcançado, não raras vezes eram contratados jornalistas para escreverem em prol da nova linha pretendida. Assim, também o jornalismo foi instrumento de publicidade da VF. Com os apoios governamentais e a aprovação de projetos de estímulo à construção de VF, torna-se clara a ligação estreita entre a política e os negócios. Contudo, conceder autorização para construção nem sempre era uma tarefa fácil, sob o ponto de vista do proprietário, já que às companhias férreas era reconhecido o princípio da expropriação para utilidade pública, significando que os proprietários eram obrigados a vender, de forma forçada, os seus terrenos. A febre da ferrovia que se viveu na época fez com que projetos e autorizações no âmbito ferroviário, de empresários forasteiros, avançassem de modo alheio aos poderes governativos. Desta forma, não raras vezes, assistiu-se a uma especulação dos preços dos terrenos e dos trabalhos de construção da mesma. Em alguns estados, o processo de financiamento desta operação era feito com recurso a quotas mínimas bem como, várias vezes, eram disponibilizados, em particular para áreas ainda inexploradas, mapas topográficos fornecidos pelos militares. Noutros casos, os terrenos onde se construiriam as VF eram cedidos e, posteriormente, concedidas reduções ou isenção de impostos como incentivo, ocasionando uma gestão monopolista de certos traçados. A concessão às companhias ferroviárias dos terrenos para financiar a construção de linhas transcontinentais permitiu a venda de terra aos colonos para retornar o investimento, assegurando lucros rentabilizados. Assim, assistiu-se à povoação de terras por onde a via atravessava, fixando populações e criando desenvolvimento onde outrora não existia [33].

Um pouco por toda a parte, com o aparecimento do comboio, assistiu-se a uma mudança de mentalidade, convertendo céticos, pessimistas, proprietários ou mesmo cocheiros, que viam, com este transporte, a sua sobrevivência em risco. Contudo, as empresas ferroviárias encontraram hostilidade nas populações que os acusavam de monopólio e posição

dominante, visto imporem preços inoportáveis dos bilhetes ou taxas incompreensíveis. Posteriormente, com a concorrência entre as várias linhas existentes, os protestos diminuíram. No entanto, na ausência de concorrência, as empresas impunham os preços mais convenientes, apesar da situação social ou dos ganhos obtidos [33].

O aparecimento e o sucesso do sistema ferroviário nos EUA não foram mais do que a evidência da vontade de um Estado na dotação de infraestruturas para a mobilidade, contribuindo para o desenvolvimento do país. Muitas vezes, esta evidência foi também politicamente conotada como uma ferramenta de autopromoção [33].

### **3.4. O DESENVOLVIMENTO DA VIA-FÉRREA NA EUROPA**

À semelhança do que aconteceu nos EUA, também na Europa, ainda mesmo na Idade Média, o transporte ferroviário estava presente nas minas e ao dispor das necessidades da mineração, bem como o uso para transporte centralizado. O incentivo para a procura de soluções inovadoras era evidente, pelo que os primeiros sistemas ferroviários significativos apareceram em França, por volta de 1832, seguido pela Bélgica e Alemanha (Baviera) em 1835, pela Saxónia, no Imperio austríaco, em 1838 e no Reino das duas Sicílias, Itália, e na Holanda, em 1839.

O aparecimento das redes europeias é claramente assente na experiência britânica, cujo *know-how* era altamente evoluído. A reputação dos britânicos no campo ferroviário era tão elevada que trabalhadores, *designers*, engenheiros, motoristas e até escavadoras eram requisitados no estrangeiro para a construção de vias férreas, venda de locomotivas ou gestão de serviço, prestada pelas empresas britânicas. A tecnologia britânica era tida como modelo, tendo por isso influenciado questões como a bitola ou a condução à esquerda, bem como a sinalização e ferrovias transcontinentais, apesar de haver algumas características distintas de país para país. Uma das razões da diferenciação pode estar relacionada com o peso político e estratégico, quanto ao desenvolvimento continental. A aquisição de locomotivas, vagões ou outros materiais e o aconselhamento dos engenheiros ferroviários britânicos, como George Stephenson e seu filho Robert, condicionaram os investidores da época nas suas preferências, tal como a bitola proposta por Stephenson, geralmente por questões políticas e militares impostas pelos respetivos governos. Essas escolhas, incluindo a Rússia, Finlândia, Espanha e Portugal, mostraram-se, ao longo do tempo, como um elemento-chave para permitir a ligação das redes entre os vários estados. Tal acaba por

potenciar inclusive, o aparecimento de iniciativas conjuntas europeias, após a Primeira Guerra Mundial [33].

A escolha da bitola mais larga foi outro elemento distintivo. Tal escolha foi fundamentada como sendo mais vantajosa quanto ao conforto dos passageiros, bem como o aumento da capacidade de carga dos vagões, apesar do maior custo de produção de material circulante. Mais tarde, estas mostrar-se-iam benéficas para potenciar investidores e uniformizar opções técnicas ferroviárias. É na década de 80 que surge o primeiro protocolo entre estados que uniformiza as normas técnicas para a construção de VF, criado em 1887, revisto e aprovado em Berna em 1907, na Conferência Internacional de Berna. A principal diferença entre o modelo britânico e os demais corresponde ao licenciamento de construção. Os britânicos e norte-americanos tinham princípios económicos que deram espaço para que a iniciativa privada agisse de forma livre na construção da VF, sem interferência do estado. No caso europeu, a concessão de licenças era um processo que requeria uma submissão prévia, para a apreciação e aprovação, tendo o estado o controlo das rotas, bem como a forma de o fazer. Os governos rapidamente perceberam que por detrás da introdução desta tecnologia estava um forte impulso revolucionário. Assim, de forma positiva ou negativa, o CF tinha uma importância nacional na qual o governo estava necessariamente envolvido. Planificando as escolhas, planeando a construção, escolhendo as ligações mais apropriadas entre cidades, os governos tentavam evitar o erro de duplicação de linhas, validando os objetivos estratégicos, não apenas económicos, sociais ou políticos, mas também militares e de serviços públicos. A realidade continental era de contínua turbulência, marcada por revoltas e protestos, influenciando qualquer investimento. De forma a garantir a manutenção dos governos em exercício, o CF, antes dos objetivos económicos, teve de ter em consideração os objetivos militares. Era entendido pelos governos que o CF, além de ser uma importante força motriz da economia, era algo que ajudaria a criar a unidade de um país, criando coesão entre as comunidades culturalmente diferentes. Desta forma, o CF era entendido como uma espécie de “cola” de uma nação dividida em questão étnicas, recuperando tradições coletivas e partilhando a mesma história de um país. Mas, também por faltarem investidores privados, direta ou indiretamente, forçava a que o governo entrasse no seu financiamento. Existia um avultado jogo de interesses que o clima de instabilidade política era uma constante, forçando a que os governos tomassem a iniciativa para avançar [33].

Não seria necessário esperar muito tempo para ver este novo modelo de presença e papel do estado na construção do CF a ser importando e implementado na GB. Em 1844, foram registadas 240 licenças, o que levou à nomeação de uma Comissão para fazer o ordenamento das concessões. O país vivia uma espécie de febre do CF pois, no início da década de 50, já existiam 11.000 km de VF [57]. Em 1866, era o estado a perceber o apelo do capital privado. Após uma crise no sistema financeiro, levando ao colapso dos mercados, a sociedade de CF em dificuldade recorreu, embora sem sucesso, à ajuda do governo. Um outro ponto de diferença entre a GB e o resto da Europa foi o de propriedade da terra. No caso da GB, o proprietário da terra por onde passava a VF, passaria a ser a companhia de CF, enquanto no caso da Europa, as terras eram concessionadas por um período específico, após o qual, retornavam à posse do estado. Várias vezes, a concessão das terras por parte do estado era vista como uma forma de financiamento público, pago diretamente ou através de garantias de rentabilidade da quota de obrigações, que seriam recuperadas através de taxas e impostos [33].

Outro aspeto de diferenciação era a questão tarifária. O mundo anglo-saxónico desenvolveu a sua rede de transporte ferroviário num ambiente de capitalismo puro, livre de ingerência estatal, decidindo a tarifa com os critérios da concorrência e tendo em consideração as leis do mercado livre [33].



**Figura 20 – Construção do CF na Europa, século XIX [82]**

Os preços praticados nem sempre eram os mesmos, sendo que a variação dependia da linha, de acordo com a procura desta, bem como da posição monopolista da empresa de CF. Tais variações nunca foram consensuais [57].

Também nas questões tarifárias, os governos do continente Europeu intervieram, tanto no transporte interno como no internacional. A maior parte das vezes, as tarifas eram mantidas baixas, de forma a impulsionar o CF e a sua natureza pública. Assim, os governos intervinham na gestão de serviços, através de ações regulatórias e de controlo. Para todos os empresários, investidores e representantes das forças políticas, era clara a importância do CF ao nível das relações internacionais, sendo fomentada a conectividade entre os vários sistemas ferroviários da Europa. Quando antes, os entraves se prendiam com questões políticas, a dificuldade agora era o acesso aos diversificados sistemas nacionais, que tinham as suas próprias regras de construção e de operação. Este foi o grande entrave para a materialização de uma rede pan-europeia [57].

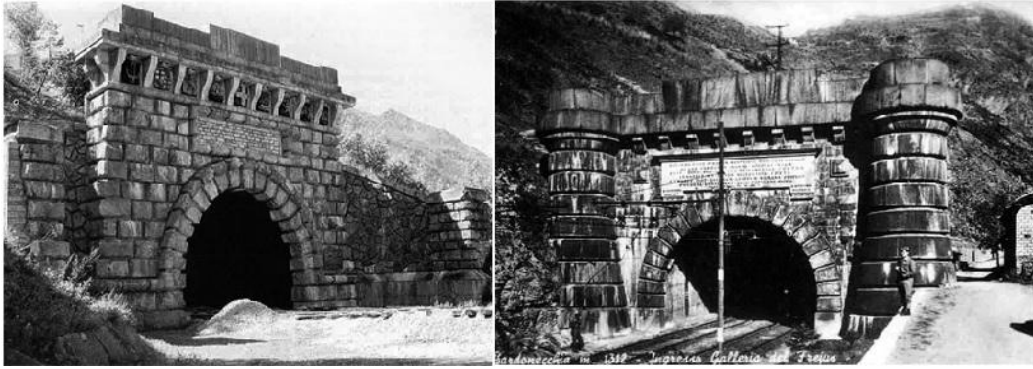
Eram necessários acordos políticos e jurídicos que permitissem a regulamentação técnica e a padronização do CF. Assim, em 1907, é alcançado um marco no que respeita à padronização do CF Europeu: O Protocolo de Berna [57]. Apesar disso, ficava fora do protocolo a questão da sinalização, bem como o tipo de eletrificação, que ainda se encontrava prematura na época, agravando até à data de hoje, a circulação entre as várias VF. Na Europa, a VF passou por várias fases, por vezes de contração, outras de forte impulso. Na fase de contração, os estados, percebendo a importância na economia, tomavam a iniciativa de impulsionar o mesmo com a construção e hábil alteração dos tarifários. As cidades mais povoadas, áreas de maior desenvolvimento comercial e industrial prevaleciam ao nível do impulsionamento, pois tinham mais impacto na economia nacional [33].

Desde os anos 50, o desenvolvimento ferroviário ajudou à mudança de vários climas políticos e revoluções. Estes novos papéis conferiam às ferrovias um novo significado, associado ao aumento da força além das fronteiras dos vários países. Novas exigências económicas emergiam com a necessidade de se reduzirem os custos de transporte das matérias-primas provenientes das minas, bem como da produção das fábricas e aumento da manufatura para venda no mercado interno e externo. A urgência na entrega de mercadorias alimentares que poderiam estimular a produção agrícola foi igualmente alvo de preocupação. Rapidamente, o transporte através dos canais fluviais e portos tornou-se assessorio, passando os terminais ferroviários a ter um papel preponderante e notório, com o objetivo de melhoria do comércio e suas trocas e transportes [33].

O pensamento político, impulsionado pelas forças sociais vê uma forma de impulsionar a RI. Lentamente, foi-se desenvolvendo uma mobilidade mais alargada, no que diz respeito às ligações dos cidadãos, seguida pelas ligações aos grandes centros de produção e comercial de modo a potenciar relação além-fronteira. Contudo, o investimento ferroviário era negativamente afetado quando se tratava de áreas montanhosas, englobando as eventuais relações internacionais e mesmo a própria construção da rede, como foi o caso da Suíça [33].

A Confederação Suíça tinha um sistema industrial fraco e os recursos económicos eram diminutos. Apesar da dificuldade geográfica do terreno e a demora de construção, a Suíça rapidamente percebeu as vantagens de uma linha ao longo dos vales alpinos, ligando os seus grandes polos comerciais. Assim, o núcleo inicial da sua rede ferroviária assentava na ligação fronteiriça com a França e Alemanha, possibilitando também a ligação às respetivas redes internacionais. Com a necessidade de ligar os portos do Norte do Mediterrâneo e do Atlântico, nascem vários e extensos projetos de ligações internacionais, através dos túneis alpinos. Após a finalização, em 1867, da linha ferroviária de Frejus com um túnel de montanha entre França e Itália, também o túnel de Gotthard, na Suíça, foi aprovado pelo parlamento federal em 1871 e aberto ao público em 1882 [33]. Com 13,7 km de extensão, através dos alpes europeus, era o túnel de montanha mais longo do mundo. O tempo de construção tinha sido estimado em 25 anos, contudo, devido ao desenvolvimento de novos métodos de construção, perfuração e ferramentas, este levou apenas 14 anos, sob a responsabilidade de Germain Sommeiller [83]. O primeiro túnel, a nível mundial, foi a passagem de Mont Cenis, que antecedeu ao túnel de Frejus entre 1868 e 1871 (figura 21 e 22). Esta linha contava com 77 km de bitola 1100 mm e com uma inclinação de 9%. Era utilizada para transporte de correio inglês até à Índia. Uma companhia ferroviária inglesa contratou engenheiros e angariou investidores com o intuito de obter permissão do governo britânico e suíço para a construção desta linha. Antes da mesma ser construída, o serviço ferroviário de passageiros nos Alpes, era feito através de uma diligência puxada por cavalos no verão e de trenó no inverno [84].

Abre-se, assim, a possibilidade de desenvolvimento de atividades comerciais e de exploração de novas oportunidades comerciais como Ásia e África, também através do canal Suez. No início de 1900, a tração traz mais fiabilidade ao sistema ferroviário europeu [33].



**Figura 21 – Entrada do túnel Frejus, lado francês (esquerda) e italiano (direita)** [85]

Há muito que existe a ideia de cruzar o canal da Mancha através de túnel, ligando a França e Inglaterra. Esta ideia foi concebida pelo engenheiro francês Albert Mathieu Favier, em 1802. Desde um túnel por onde atravessariam os passageiros em carruagens puxadas por cavalos e iluminado por lanternas a óleo, até um “túnel” de aço flutuando sobre o canal, todas as hipóteses foram exploradas. Contudo, a pressão política e as questões levantadas sobre a segurança nacional deitaram por terra durante vários anos a sua construção [57]. Ao longo do tempo, os CF foram-se revelando uma enorme fonte de poder, com os estados e os seus governos envolvidos. Com o aumento da procura, tornou-se evidente a necessidade de modernização da tecnologia e da segurança, contemplando a modernização do material circulante, introdução de novos sistemas de tráfego, o que levou a um aumento dos custos operacionais. Dada a necessidade de reaver o investimento, ocorreu um desinvestimento nos troços secundários, por não serem rentáveis. As necessidades dos estados tinham mudado; a questão militar, a preocupação do domínio económico, a procura de mobilidade, integração de territórios, perspectiva de reconhecimento de identidade nacional eram as novas premissas. Também a Espanha tentou, entre 1860 e 1870, um túnel que permitisse a ligação a África, com o apoio de empresários franceses, devido às colónias francesas, mas sem sucesso devido à falta de tecnologia que o permitisse [57].

As empresas privadas escolhidas para investir na ferrovia viraram a sua atenção para a questão económica, tentando conseguir o maior lucro possível, aplicando taxas favoráveis para um retorno mais rápido e distribuição aos acionistas, o que criaria bastantes embaraços à mobilidade social pretendida. Tal era o monopólio destas empresas, que mal suportavam a concorrência ou a intromissão tarifária por parte dos governos. Mesmo assim, estas faziam de tudo para garantir os seus direitos, mesmo contra protestos populares, não abdicando dos seus lucros, reinvestindo depois em novos traçados, de

acordo com a imposição dos governos. Estas situações viriam a causar especulações políticas, produzindo casos de propaganda eleitoral em detrimento da sociedade [33].

O sistema de empresas ferroviárias apoiadas por capital privado, já limitadas nas regras impostas pelos estados, não foi capaz de responder à procura social, contudo não desistiram da sua posição monopolista. Por conseguinte, sugeriram sistemas bancários e financeiros que, de alguma forma, apoiavam e suportavam as empresas ferroviárias, desencadeando uma corrida frenética ao CF. Uma vez mais, outras menos, o lucro que tanto se procurava com tal investimento, tornou-se algo inalcançável devido a erros de avaliação económica e planos de investimento mal dimensionados. Com tais erros acumulados ao longo do tempo, a crise foi-se instalando nas empresas, pelo que a intervenção dos Estados foi inevitável. Percebeu-se que a gestão dos CF não podia ser puramente privada, e no início do século XX, os Estados europeus reclamaram para si a tutela dos CF. Como resultado, verificou-se um enorme impulso para o investimento. Para o Estado, o aumento da infraestrutura ferroviária significava dispor de serviços a um preço mais baixo, que alimentava a produção industrial. Seriam criados postos de trabalho para a indústria pesada que produzia material de guerra e material ferroviário. Significava ainda o favorecimento de tráfego comercial interno e externo. O incremento de produção e de produtividade foi enorme. Graças ao CF, o crescimento comercial na Europa teve um aumento exponencial entre 1860 e 1890, com um aumento muito significativo de mercadorias transportadas, de 340 para 1750 milhões de toneladas [33] [76]. À semelhança da GB e dos EUA, na Europa a revolução dos CF fez-se paralelamente à RI, não sendo a sua influência apenas tecnológica ou económica, mas também política, social, cultural, ambiental e de urbanização das cidades [33].

### **3.5. AS REDES FERROVIÁRIAS NA EUROPA**

Em França, o desenvolvimento da indústria metalúrgica fez aumentar a necessidade de consumo de carvão. Em 1823, manifesta-se uma enorme necessidade de modernização da infraestrutura para transporte de minério devido aos estragos recorrentes das várias batalhas travadas na época. Assim, o rei Luís XVIII autorizou, com recurso a fundos privados, a construção de 18 km de VF entre Saint Etienne e Andrézieux, sendo estendida mais tarde de Saint Etienne até Lyon, em 1828, com tração animal. Mais tarde, esta seria equipada com locomotivas a vapor da autoria do engenheiro francês Marc Seguin, que esteve presente na construção da linha Stockton-Darlington, juntamente com George

Stephenson. Esta linha já utilizava carris assentes em travessas de madeira, contrariamente ao que se usava na época, no transporte do minério. A França torna-se num ponto de referência para investimento ferroviário, competindo com a GB na produção de materiais e serviços ferroviários [57]. Apesar da potência ferroviária que a GB se tornara, a França demonstrava uma capacidade para produção de tração e de construção de carruagens de passageiros fora do comum, com um *design* novo e diferente dos da GB. Após a abertura da linha Saint Etienne-Lyon ocorreu uma verdadeira febre dos CF: projetos de construção de linhas começaram a ser apresentados de forma abrupta, por parte de empresários e representantes de comunidades, por toda a França [33]. Em 1832, com base em pressupostos como a intensificação do intercâmbio entre pessoas e o transporte de mercadorias, é aprovado, pelo parlamento francês, o estudo de uma rede nacional ferroviária. Apesar da euforia, o crescimento do sistema ferroviário francês mostrou-se lento, pois existia muita resistência à nova tecnologia. Muitos destes resistentes viam no CF uma ameaça à tranquilidade do meio ambiente e outros, uma ameaça às suas profissões. Um outro fator motivador de resistência eram os obstáculos económicos. Tal devia-se ao facto de a França possuir uma extensa rede de estradas e canais, rede essa superior à da GB, o que deixava de ser um argumento para o financiamento [33]. Já em 1837, era inaugurada a terceira linha, entre Paris e Le Pecq, que contava com 18 km e era destinada ao transporte de passageiros e não apenas de carvão. Este investimento foi maioritariamente assegurado pelo grupo de banqueiros Rothschild [57]. Em 1842 um grave acidente, que vitimou 50 pessoas originou o primeiro retrocesso no progresso do CF em França. É então que o estado francês assume o planeamento e financiamento, em conjunto com privados, das linhas principais, assumindo um enorme encargo com as expropriações, obras para a colocação dos carris e material circulante, estes dois últimos a cargo das empresas ferroviárias [33]. No plano de desenvolvimento, Paris era o centro de uma rede que percorreria todas as regiões até ao Canal com Inglaterra, ligando toda a Europa e explorando novas oportunidades deste intercâmbio. Com base neste pressuposto, surgem várias linhas entre 1846 e 1849 como o caso da linha Orleans-Bordeaux, com ligação direta à fronteira espanhola, a linha Paris-Lille-Valenciennes com ligações ao canal inglês e fronteira belga, a linha Paris-Rouen-Le Havre e a projetada linha Avignon-Marselha que previa a ligação do porto francês no mediterrâneo, que servia de eixo para o comércio com as colónias do norte de África e Oriente através do Canal do Suez [86]. Como resultado, o desenvolvimento da rede sofre uma enorme evolução na década: entre 40 e 51, passando de 550 km de rede ferroviária dispersa a 3600 km de rede conectada entre si [76]. Na

década de 60, surgem novas políticas e ideologias que permitiram o apoio estatal a linhas secundárias. Com a especulação e novas necessidades sociais, são colocadas a descoberto as perdas orçamentais de muitas empresas que se vêm forçadas a operações de fusão. Em 1878, era reclamado, pelo estado francês, uma melhor e mais ágil gestão da sua rede ferroviária que jamais os privados conseguiriam fazer, assumindo a sua pretensão em criar uma rede nacional ferroviária. Esta foi, na verdade, uma antevisão de algo que aconteceria em 1938: a nacionalização dos CF franceses e a criação da *Société Nationale des Chemins de fer Français* (SNCF) [33].

Na Bélgica, contrariamente ao que aconteceu na França, o estado sempre esteve ligado ao planeamento, construção e financiamento do CF. Na sequência da independência adquirida à Holanda em 1830, o estado terá percebido que a ferrovia seria um enorme estímulo para o sentimento de identidade nacional. A rede ferroviária, inicializada em 1834, terá sido vista como alternativa à falta de sistemas de transporte e ao crescendo de necessidades da indústria belga. Surgiu, em 1835, a primeira linha que ligava Bruxelas–Mechelen, com a contribuição, ao nível das locomotivas e conseqüente escolha da bitola, de George Stephenson. Mas como aconteceu noutros países, também aqui os proprietários das terras, por onde passava a via, foram um impedimento. Assim, onde o estado não construía, concedia licenças plurianuais (por vinte anos, por norma) aos privados, mantendo a verificação do projeto e as demais validações da linha proposta. Em 1840, a VF chega a Ghent, Bruges, Ostend, Antuérpia e Lovaina. Em 1843, as empresas privadas são autorizadas a construir e gerir as linhas secundárias, de modo a estimular o sistema de produção, chegando a Aachen, em 1846, para fazer a ligação à rede alemã. Assim, era notório o esforço no desenvolvimento do CF na Bélgica, com um total de 1500 km de rede, em 1850 [76].

Na Holanda, o aparecimento e desenvolvimento do CF é realizado de forma diferente. Uma economia mercantilista como a holandesa, teve o seu arranque mais tardio, devido à forte presença de canais fluviais e de um tecido industrial menos desenvolvido que o belga. Por este motivo, levantaram-se sérias dúvidas e entraves quanto à necessidade de um novo meio de transporte. Surge, nos anos 20, o primeiro projeto de origem militar, fazendo a ligação Amesterdão-Colônia. A captação de capital era dificultada pelo enorme *lobby* de proprietários das indústrias e dos canais que influenciavam a opinião pública. Mais tarde, os investidores anteviram a necessidade de criar atalhos e a competitividade com os portos

marítimos, pelo que em 1839 é iniciado o funcionamento da linha entre Amsterdão e Haarlem [57]. Para a primeira linha, a Holanda escolheu uma bitola baseada em questões militares, de caráter defensivo. Após vários episódios de resistência dos proprietários das terras, a ligação a Haia é alcançada em 1843 e a Roterdão, em 1847. Com características de transporte de passageiros, o CF assume-se como concorrente direto das vias fluviais. Mais tarde, a linha chega a Reno. Quando é percebida a necessidade e importância da ligação a outras redes estrangeiras, é modificada a bitola, em 1866, para medidas padrão dos outros países [57].

Em 1860, tendo em conta a baixa quantidade de linhas construídas até a altura, o governo holandês tomou a iniciativa de construir e financiar via-férrea, como forma de estimular a expansão do CF no país, assente em rendimentos provenientes das colónias nas Índias Orientais. Mas, a forte oposição sentida nesta área, forçou o governo a assumir o compromisso de impor juros ao capital cedido aos privados e ainda à construção das pontes necessárias para cruzar os vários canais fluviais; já a gestão da linha seria assegurada por uma empresa estatal [57]. O estado interveio várias vezes no CF, quer ao nível da gestão quer do financiamento, por questões de estímulo da economia ou por razões militares, invocando necessidades relacionadas à defesa nacional. A rede nacional de CF é finalizada no início do século XX, estando pronta para a interligação com a rede alemã [33].

O desenvolvimento ferroviário na Alemanha toma um rumo diferente. Com a formação de uma confederação de estados soberanos mas unidos economicamente, através da celebração do Tratado de Zollverein, a Alemanha encara as oportunidades do CF de forma convergente, ao longo de todo o *Reich* alemão. Até 1880, a tomada de decisões sobre a construção e exploração do CF não era centralizada, sendo da responsabilidade de cada estado do reino. Ao contrário do que aconteceu nos restantes países Europeus, não houve um entendimento da importância do CF na criação de identidade nacional. Friedrich List terá sido das primeiras personalidades a perceber essa importância, percebendo que um país deveria desenvolver-se apoiado no comércio e na indústria [57]. Desta forma, bens e alimentos poderiam circular de forma fácil e livre, ajudando à unificação. O centro do sistema ferroviário foi centralizado em Berlim, ramificando depois para todos os estados unificados. Era inequívoco que ter bens disponíveis a preços acessíveis e em maior quantidade, devido à velocidade e custos reduzidos do transporte ferroviário, poderia aumentar o bem-estar da classe trabalhadora, aumentar a população, contribuir para o

desenvolvimento industrial, reduzir custos de construção das casas, incentivando também o setor da construção. Ainda antes de 1830, foram enviados técnicos para estudar o CF britânico e francês, o que levaria, em 1835, ao lançamento da primeira via-férrea alemã, de 8 km, de Nuremberg a Fürth. A decisão do estudo de tais vias férreas deveu-se à intenção de adoção da bitola de Stephenson. Era imperioso o fornecimento a baixo custo de matérias-primas e carvão, às mais de 200 indústrias existentes nessa época. Como tal, o investimento nesta tecnologia foi avultado e com disponibilização imediata de capital. De salientar que a tecnologia utilizada, os trabalhadores e motores eram britânicos [33].

Entre 1834 e 1840, as novas linhas já não obedeciam a uma geografia delimitada pelas fronteiras dos estados. O pedido de abertura de novas linhas era quase epidémico, liderando a Prússia nessa extensa lista. Com a abertura da linha Leipzig-Dresden, assiste-se a um desenvolvimento industrial da Saxônia, criando uma rede de ligações entre estados da Confederação. Com o tratado e o transporte ferroviário, tornam-se claras as vantagens destes nas relações comerciais, redução de direitos aduaneiros e simplificação de processos burocráticos. Em 1843, o CF na Alemanha passa a fronteira e estabelece ligação internacional com Antuérpia, na Bélgica. Com a concorrência entre estados e o abaixamento das taxas de transporte, foram definidas taxas fixas e firmados acordos sobre os direitos de trânsito dos comboios nas várias linhas, entre estados. Numa tentativa falhada, em 1854, o estado tentou comprar a primeira linha alemã Leipzig-Dresden. Contudo, foram impostas apertadas regras para que continuasse a funcionar, sendo uma delas a transformação dos trabalhadores em funcionários públicos [57]. Apesar da tecnologia utilizada no arranque ser britânica, não impediu que a indústria alemã evoluísse e assim, em 1850, se tornasse autossuficiente na produção de equipamentos e materiais ferroviários. Nesse mesmo ano, era comprovado o desenvolvimento do CF na Alemanha com os espantosos 6.500 km de rede contra os 10.600 km da GB, 3.000 km da França, 1.500 km da Bélgica e os 15.500 km dos EUA [76]. Em 1861, torna-se possível a ligação Paris-Viena através das linhas de Frankfurt, Dresden e Praga. A ação do estado, na tentativa de controlo e nacionalização das empresas ferroviárias privadas, era notória. Como noutros países, o CF tinha um papel estratégico. A Prússia também utilizou o CF nos conflitos com a França e Áustria [33]. Em 1871, a Alemanha percebeu que, no meio de tanto desenvolvimento ferroviário, era importante uniformizar e unificar as 66 empresas ferroviárias privadas, de modo a criar um modelo único de sistema ferroviário que implicaria regras, tarifas e gestão de toda a rede da Confederação [57]. Contudo, esta

postura não reuniu muitos consensos, criando até conflitos de interesse estaduais. O estado assume os custos da inevitável duplicação de linhas, devido a diferendos no âmbito do controlo da rede. Em 1880 as ferrovias do Reich somavam 21.000 km, o que superava largamente a GB. Em 1912, a quantidade de linhas já ascendia a 58.000 km, enquanto as empresas privadas ficavam apenas com as linhas secundárias [33].

O Império Austríaco era vítima da sua posição geográfica, com área montanhosa nas zonas fronteiriças alemãs. Para agravar a sua posição, foi imposta uma economia protecionista, sendo forçados a pagar preços avultados para ter acesso a produtos ferroviários importados [33]. Também a Áustria percebeu a importância do CF no campo da estabilidade e da segurança do seu império. Desde cedo tentou regular e conter o fenómeno de manipulação no setor com a imposição de regras à criação de empresas ferroviárias privadas. Define linhas de interesse nacional, como o caso da ligação de Viena a Praga-Dresden, centralizando competências num único organismo, a Câmara Áulica, que tinha uma grande influência militar e política [33]. Foi notório que os austríacos tiveram um planeamento, diretrizes e intervenções no desenvolvimento do CF e que apontaram sempre para o interesse primário do estado. Tal postura refletiu um desinvestimento privado. Apesar das várias diferenças étnicas que sempre existiram na Áustria e das várias contradições quanto ao investimento do CF, a necessidade para o desenvolvimento do mesmo prendeu-se com a mineração [33]. Em 1810, em Stiria, são criados 22 km de CF para transporte de minério, puxado com a força animal. Mais tarde, em 1825, uma sociedade ferroviária obtém o privilégio imperial para ligar Linz e Budweis e, mais tarde, a Gmunden, onde se situavam as principais extrações de sal [33]. Este percurso foi aberto em fases, em que a primeira, em 1832, tinha 128 km e, a segunda, em 1836, contava com 270 km. Só mais tarde a linha foi modernizada para tração a vapor, em 1855 [57]. Esta teve ainda uma característica interestadual, visto ligar os vários pontos de produção espalhados pelos diferentes estados do Império [33].

A linha Praga-Plzen, uma outra linha com tração animal, obtém autorização imperial para construção em 1828. Na realidade, a sua construção foi feita à volta da floresta de Lana, na Bohemia que, após um período de atividade com passageiros, foi utilizada como pista de floresta. Autorizada em 1836, a primeira linha com tração a vapor com tecnologia britânica, foi construída com capital fornecido pela casa austríaca de Rothschild. A

construção da linha Kaiser Ferdinands-Nordbahn obteve rapidamente autorização, numa altura em que o governo tinha falhado na regulação do setor ferroviário [33].

A linha Viena-Trieste tinha, na época, um interesse estratégico. O banqueiro e empresário Georgios Sinas, obteve autorização para a sua construção, atingindo a fronteira em Győr, chegando à Hungria e Eslováquia. Mais tarde, é proposta a utilização de parte desta linha para ligar Semmering. Em 1842, é ligada Gloggnitz. A concessão da linha foi, na época, confiada à sociedade Sudbahn [33]. A passagem de Semmering para chegar a Trieste foi, para aquela data, uma solução de engenharia bastante complexa e ousada. Ainda assim, Ljubljana é ligada em 1854 e Trieste em 1857 [87]. Esta linha foi também de importância vital para os objetivos militares, pois permitiu estabelecer uma ligação Lombardy-Venetia, tendo sido influente também na política da região istriano-dálmata. Com a passagem por Brenner, foi também motivo de desenvolvimento do Adriático, cuja supervisão passou pela *Imperial Royal State Railway*, criada com capital do estado [33]. Foi com estas linhas e extensões que se criou a oportunidade de ligação aos portos mediterrânicos da Europa Central. Desta forma, é notório que na Áustria o investimento privado era pouco no setor ferroviário, sendo em grande parte subsidiado pelo governo, o que levou a falências e crises de várias empresas do setor [33]. Com estas crises, tornou-se inevitável a fome e dificuldades financeiras, bem como o desemprego. Para combater e apoiar estes flagelos, o governo austríaco criou incentivos fiscais, bolsas, prémios de juro e compras de ações destas empresas. Contudo, foi nos inícios da década de 50 que o governo decide comprar a empresa gestora das linhas como sendo de interesse nacional. Assim, apenas a Nordbahn e a Raaberbahn permaneceram em mãos de privados [88].

Em Itália, a evolução dos CF deu-se com a reunião dos vários ducados de Parma e Piacenza, o ducado de Modena e o Grão-Ducado da Toscana para a criação da Company Limited, com a necessidade de ligar Tirreno às localidades da Itália Central, e criar uma base naval para a sua frota [33]. No início da década de 50, o estado italiano detinha 994 km de rede construída em 1843. A forma de gestão das linhas mostrou-se eficaz devido ao facto de ser dirigida por uma única entidade, contudo, foi muito contestada; a falta de rentabilidade das operações ferroviárias e a falta de fundos devido à crise nas finanças imperiais levou ao bloqueio de projetos e iniciativas de construção. Motivada por nova crise, anos mais tarde, é aprovada uma lei que visava a regulação do setor no sentido que as VF seriam construídas por investimento privado, em 1854, passando o controlo para

mãos de empresas privadas [33]. A venda da rede a capital privado arrasta para Itália não só investidores italianos mas também franceses [87]. Em 1856, em Itália, os grupos financeiros referenciados a Salomon Rothschild, Bastogi e Talabot, assumiram o controlo das linhas Lombardo-Veneto e da Itália Central. Estas linhas estavam entregues à empresa *Imperial Regia Privilegiata Società delle ferrovie del Lombardo-Veneto e dell'Italia Centrale*, com o compromisso de desenvolverem mais as linhas secundárias. Em 1859, mais uma fusão entre um grupo de bancários e a recente empresa ferroviária criada, dá origem à *Imperial Regia Privilegiata Società delle ferrovie meridionali dello Stato, del Lombardo-Veneto e dell'Italia Centrale*, que absorve as linhas Viena-Trieste e as linhas ainda em construção Steinbruck-Zagabria-Sisak, Innsbruck-Verona e Villach-Marburgo [87]. Reconquistado o controlo do setor, o capital privado voltou a centrar as operações e fundamentos de construção de novos troços em torno da rentabilidade, não arriscando em linhas, à partida, menos lucrativas ou com pouco retorno, como foi o caso da linha de Arlberg, que interligava as redes entre a Suíça e a Áustria. Continuava a ser claro que as concessões salvaguardavam as conveniências do estado, tendo assim, uma grande influência económica e político-imperial [33]. Uma nova crise económica e financeira, relacionada com a Bolsa de Valores de Viena, em 1873, reverte novamente as políticas sobre a VF. O estado interveio novamente nas empresas privadas, apoiando-as financeiramente. É retomada, também, a política de nacionalização da VF, tomando o controlo de várias empresas férreas privadas. Os investimentos apoiados tinham como objetivo completar a ligação da rede entre os pontos nevrálgicos do Império, incluindo a ligação do porto de Pula até à rede de Sudbahn [87]. Em 1919, a rede foi dividida entre os novos estados, após a fragmentação do Império Austro-Húngaro. Este foi o último suspiro de uma rede desmembrada que tinha visto o seu início na Itália, a partir de 1859, com a cedência de territórios para o estado de Saboia [33]. Quanto à Suíça, a Confederação Helvética tinha-se tornado um estado neutro, após o Congresso de Viena, tendo sofrido ampliação após a adição do cantão de Valais, Neuchatel e Genebra. A constituição federativa, interestadual e a política da Suíça entre cantões nunca foram interferência na construção da rede ferroviária. Para além da dificuldade de coordenação política da rede partilhada, também a característica geográfica montanhosa constituía um obstáculo para aqueles que investiram no CF [33]. A novidade da tecnologia e a resistência dos proprietários na expropriação das terras foram fatores bloqueadores da evolução do CF, condicionando, também, a escolha dos melhores trajetos [33].

Na Suíça, o primeiro contacto com o CF foi em 1844, cujo capital angariado para a construção foi francês, com a abertura da linha com 2 km que ligava Basel-Mulhouse, ponto de ligação com a linha ferroviária francesa em Estrasburgo [57]. Em 1847, é inaugurada a linha Zurique-Baden, que contava com 16 km. A construção e projeto desta linha foi, desde cedo, muito controversa e encontrou uma enorme resistência por parte dos proprietários das terras forçando, mais tarde, o governo a impor a expropriação para utilidade pública. Em 1849, é confiada a Robert Stephenson a tarefa de elaborar um projeto de rede ferroviária federativa. Este propôs uma rede com 645 km, ao longo dos vales de passagens alpinas [57]. A política ferroviária adotada foi a descentralização, conferindo assim, em 1852, a responsabilidade da gestão da construção e operação do CF de cada cantão, incluindo licenças, coordenação das linhas, características técnicas e preços de exploração. O padrão de bitola adotado foi a medida de Stephenson. Com a formação de sociedades de responsabilidade limitada, e apesar da forte rivalidade entre cantões, rapidamente a rede ferroviária idêntica à proposta por Stephenson nasceu e ampliou o seu tamanho. Tal proliferação deveu-se ao investimento feito por banqueiros suíços e capital estrangeiro, como o francês, atraídos pelo potencial comercial na transposição das montanhas e ligações a outras redes internacionais. Em 1860, a rede ligava as regiões ocidentais com o nordeste da fronteira com a França e a Áustria [33].

Entre 1870 e 1872, ocorreram várias falências de empresas do setor, seguidas de greves e efeitos da guerra Franco-Prussiana onde, mais uma vez, foi realçado o papel estratégico do CF em questões de foro militar. Rapidamente a nacionalização da rede ferroviária tornou-se uma prioridade política, apesar da forte oposição das empresas privadas [33]. Com a criação de um Ministério dos Correios e Caminho de Ferro, era dado o primeiro passo, em 1879. Contudo, apenas entre 1900 e 1909 são compradas pelo governo, cinco empresas privadas ligadas ao setor, bem como a linha de navegação do Lago Constance, dando origem à SBB (*Swiss Federal Railways*) [33]. No que respeita às ligações, em 1882 são transpostos os Alpes através do túnel de Gotthard (figura 22), com 15 km, cujo financiamento contou com a participação em mais de metade da Itália, sendo o restante da Alemanha e Suíça. Desta forma, foi possível a extensão da rede para territórios alemães, criando, também, para a Europa e Suíça uma importante ligação a Itália, mas especialmente a ligação ao mediterrâneo e Extremo Oriente, com a abertura do canal Suez.



**Figura 22 – Inauguração do Túnel Gotthard, 1882 [89]**

Contudo, nem todos os países europeus adotaram a mesma bitola, o que produziu, a longo prazo, efeitos negativos. Foi o caso da Espanha e da Rússia. Apesar da presença de George Stephenson na conceção da primeira linha espanhola, a motivação da Espanha prendia-se com questões militares. Assim, julga-se que terá sido reduzido o risco de hipotéticas invasões militares estrangeiras. Os primeiros pedidos, apesar de negados, para a construção de linha, remontam a 1830 [33]. De modo a diminuir as vulnerabilidades militares, a Espanha adotou uma bitola mais larga que a *standard* para as linhas principais, o que se revelou mais dispendioso, ocupando mais terrenos e uma bitola menor para as linhas secundárias. A dificuldade de ligação às redes ferroviárias internacionais e ligação da própria rede interna, foi muito elevada [57].

No aparecimento e desenvolvimento da rede espanhola também pesou a morfologia do terreno, que se caracterizava como montanhosa e cheia de irregularidades. Para agravar as dificuldades, a pouca viabilidade económica do país, recentemente industrializado, era patente, com uma economia a depender dos recursos das suas colónias [33]. A primeira linha construída e aberta data de 1848, contava com 28 km de extensão e ligava Barcelona a Mataro. Só em 1850, após aprovação do investimento privado e capital estrangeiro na construção de VF, é que o setor ferroviário arranca em larga escala [33]. Em 1858, a linha Madrid-Alicante torna-se uma realidade; em 1860, é ligada a Barcelona; entre 1863-1864 são atingidas as fronteiras com Portugal e com França; em 1866, era possível a ligação de Madrid a Cadiz e Lisboa. A esta velocidade, em 1870, a rede ferroviária espanhola contava já com 3.000 km de VF completa [90]. A escolha da bitola espanhola condiciona a bitola portuguesa, sendo a única fronteira desta a sul. Assim, Portugal é induzido a utilizar a mesma bitola, de modo a adaptar-se [57]. A rede foi ampliada gradualmente para sul em direção à fronteira com Portugal (alcançada em 1863) e para norte, em direção a fronteira com França, alcançada em 1887. A propriedade das linhas, permanece, em grande parte,

nas mãos de particulares. Contudo, a rede foi submetida a regulamentação pelo estado, ditando um princípio de cooperação com o mesmo [33].

A motivação da Rússia quanto à escolha da bitola foi de natureza meramente militar. Dotada de várias VF para indústria e mineração, com tração animal, toda a economia russa se centrava na agricultura, estando ainda, no que respeita à manufatura, na sua fase inicial. Assim, em 1836, foi atribuída a concessão de construção e operação, por um período de 20 anos, da linha entre S. Petersburgo e Moscovo, com uma extensão de 632 km [57]. Apesar da desconfiança dos mais céticos que, com o aparecimento da VF, anteviam danos nas florestas e na criação de animais, a resistência foi vencida com a demonstração do desenvolvimento económico e eficácia no transporte de recursos militares. Colocada em funcionamento em 1837, esta linha foi construída com material e tecnologia ocidental e terminada em 1851.

Na Escandinávia, o CF chegou mais tarde [33]. Na Dinamarca, as primeiras linhas entraram em operação em 1847, na Noruega em 1854 e em 1856 na Suécia e Finlândia, em 1862. Exceto a Finlândia, que adotou a bitola russa, as outras nações optaram pela bitola padrão de Stephenson. De todos estes países, a Suécia realizou rapidamente uma linha entre Estocolmo e Gotemburgo, com mais de 400 km. A Finlândia ligava, em 1870, Helsínquia a São Petersburgo [57]. As vias férreas europeias, da primeira metade do século, apesar de projetadas e implementadas com o intuito de ligar os territórios mais interiores, demonstraram a maior potencialidade nas suas ligações internacionais, de integração. Se, inicialmente, a motivação radicava num meio de transporte mais rápido e barato de mercadorias ou a melhoria de mobilidade das pessoas, as convulsões provocadas tornaram-se a força que alavancava a transformação económica, social e política dos estados [33].

Os governos, devido ao elevado impacto na vida do país, alternavam de acordo com as conveniências o incentivo à construção privada ou o financiamento e suporte total do setor ferroviário, sempre com o controlo do planeamento estratégico das linhas. Enquanto tal acontecia, a dependência do mercado britânico decaía [33].

### **3.6. O IMPACTO FERROVIÁRIO NAS DUAS GUERRAS MUNDIAIS**

No virar do século XX, o CF dominava o transporte terrestre visto que os veículos automóveis ainda não eram uma ameaça séria, pois apenas no transporte local, o carro

suplantava o comboio. Enquanto isso, a aviação estava na sua fase de desenvolvimento [91].

A Europa vivia dias de grande agitação e a Primeira Guerra Mundial instalara-se em julho de 1914. Os estados mais combativos da Europa estudavam planos para mobilizar e apoiar as suas tropas na guerra, primariamente, em torno das VF. Cada estado tinha concentrações de tropas agendadas e equipamentos em depósitos-chave, para posteriormente enviar estes para posições estratégicas nas suas fronteiras [91]. Em mais nenhum outro estado o planeamento militar era tão desenvolvido como na Alemanha e na França. Do lado alemão, o *Plano Schlieffen* previa a concentração militar rápida, através da VF, ao longo das suas fronteiras orientais e ocidentais. Todos esperavam que o exército russo demorasse muito tempo para se mobilizar, pelo que a estratégia seria varrer o terreno rapidamente através da Bélgica e do Luxemburgo, invadir o norte da França, cercando Paris. Assim, após a rendição francesa, as forças poderiam enfrentar os russos. A forte resistência belga e uma extensa destruição da infraestrutura ferroviária atrasaram o avanço das tropas e o uso da rede que servia para abastecerem as tropas alemãs [91]. Após um mês de ocupação da Bélgica, apenas 15% da rede ferroviária estava operacional, apesar de terem sido necessários 26.000 trabalhadores para tal acontecer. O rápido avanço das tropas alemãs ultrapassou as suas linhas de abastecimento, após a entrada em França. Os alemães avançaram 80 milhas até à estação ferroviária mais próxima onde, num transporte puxado por cavalos, tornou-se notória uma lacuna ao nível do transporte. As tropas alemãs estavam cada vez mais cansadas, com falta de comida e munições. Enfrentavam ainda a resistência forte com que os franceses, usando a sua rede ferroviária bem desenvolvida em torno de Paris, montavam um novo exército [91]. Enquanto isso, as tropas britânicas atravessavam apressadamente o Canal da Mancha, juntando-se às tropas belgas e francesas [91]. O CF era a única maneira e mais sofisticada forma de transporte das grandes quantidades de mantimentos e munições para as várias frentes de batalha, considerando que a quantidade de tropas era algo preponderante já que, por exemplo, na frente ocidental estavam a servir quase 2 milhões de homens [91].

Em 1918, cada divisão de 12.000 homens necessitava de 1.000 toneladas de mantimentos, por dia. Tal era equivalente a dois comboios de 50 vagões, para abastecimento. Quando a ofensiva estava a ser pensada, tinha de ser equacionada a quantidade de mantimento e a concentração em depósitos da mesma, pois tais ofensivas poderiam durar meses. Desta

forma, a VF era a única maneira de enviar tais volumes de mantimentos, algo muito sofisticado, após uma grande reorganização em 1916 [91].

Para os britânicos, a travessia do Canal da Mancha apresentou uma dificuldade inesperada pois todo o material de guerra tinha de ser transportado em vagões até à entrada do canal, para depois serem enviados em barcaças especiais. Após isso, eram descarregados e acoplados a comboios franceses para transporte até às frentes de batalha inglesa. Até perto da frente, o processo era relativamente simples. Contudo, tornava-se complicado quando se atingia o raio de 7 milhas anteriores à frente, pois o comboio ficava ao alcance da artilharia de longa distância. Todos os pontos de descarga e estações ferroviárias tinham de ficar atrás desta zona de perigo. Mas uma nova dificuldade emergia: a ligação entre os pontos de descarga e as tropas que precisavam de mantimentos. A distância era muito grande para ser feita com veículos puxados a cavalo, pois estes não aguentavam uma viagem ida/volta diária desta distância [91].

Os franceses e alemães tinham uma solução imediata, pois já tinham percebido antes da guerra, a importância que teria a VF estreita de bitola 0,6 metros. Isto porque a sua movimentação e aplicação em localizações mais convenientes era algo simples de fazer e de aplicar. Desta forma, facilmente conseguiram redes de ligação entre os pontos de abastecimento e as baterias de artilharia, bem como depois o alcance de pequenos depósitos onde as linhas da frente podiam abastecer [91].

Os britânicos tinham planeado uma guerra mais móvel e basearam-se no transporte automóvel, incentivando a compra de veículos com especificações do departamento de guerra. Após a campanha de Somme, em julho de 1916, verificou-se a inadequação do transporte automóvel. Tal deveu-se às chuvas torrenciais que assolaram o campo de batalha, criando extremas dificuldades à mobilidade dos camiões por causa das fortes lamas e, conseqüentemente, dificuldades no abastecimento das linhas da frente [91].

Desta forma, os britânicos perceberam a importância dos sistemas ferroviários ligeiros e prontamente alteraram a sua estratégia. A indústria ferroviária britânica já estava sobrecarregada com as encomendas francesas pelo que só a indústria americana poderia fornecer material em tão grande quantidade e num curto espaço de tempo de forma a aumentar a capacidade britânica [91]. Entre janeiro e setembro de 1917, a capacidade de transporte férreo ligeiro operado por forças britânicas aumentou largamente, tendo esta

rede ferroviária cerca de 2.000 milhas. No entanto, também o sistema ferroviário ligeiro era vulnerável à artilharia inimiga, quando chegavam à linha da frente. Em várias situações, eram os próprios soldados a carregar os seus próprios mantimentos, durante a noite [91]. Apenas em 1918, os problemas de abastecimento foram ultrapassados, permitindo ofensivas de forma sustentada. A importância do transporte nos últimos meses de guerra era tão grande que, apesar da falta de tropas na linha da frente, homens com experiência ferroviária eram transferidos da infantaria para companhias ferroviárias [91].

Neste contexto, em 1914, as VF tiveram a sua primeira aplicação no transporte de 120.000 homens e equipamento em 670 comboios especiais, até ao porto de Southampton. Com a necessidade de transporte a aumentar, também a procura de locomotivas capazes de tal tarefa aumentou, bem como o restante material circulante e infraestrutura. Em 1916, torna-se evidente para a indústria britânica (que aumentou massivamente a sua capacidade de produção de armamento) a necessidade de uma locomotiva de mercadorias. Esta foi projetada para a *Great Central Railway* em 1917 [91]. Foi consensual que o foco das VF era a ligação aos portos do Canal da Mancha, mas também, outras necessidades emergiram como a ligação de minas de carvão para o fornecimento do mesmo. Até ao final da guerra, 5 milhões de toneladas foram transportadas para fornecimento [91].

Com o fim da guerra, as redes e os equipamentos assumiram uma nova funcionalidade, cuja finalidade era o apoio à reconstrução. Algumas redes de sistemas ferroviários ligeiros e equipamento mantiveram-se em funcionamento durante vários anos, apesar do equipamento ter sido vendido mais tarde.

O automóvel ganhou notoriedade e tornou-se um concorrente a ter em conta na guerra, apesar das suas fraquezas. No entanto, a era do transporte puxado a cavalo tinha terminado [91].

Apesar da concorrência do automóvel, a importância do CF e do comboio na Segunda Guerra Mundial foi incontornável. Das deportações ao transporte para os campos de concentração, o CF foi peça fundamental, interveniente e marcante nesta guerra.

No meio de uma convulsão social, antes de 1939, a primeira deportação em massa de judeus da Alemanha nazi ocorre a menos de um ano do início da guerra. A expulsão forçada de judeus alemães, de nacionalidade polaca, é potenciada pela *Kristallnacht* (um

movimento Antissemitismo). Assim, 30.000 judeus foram reunidos e enviados através de comboio para vários campos de refugiados [92] [93].

Em julho de 1938, após a Conferência de Evian, tanto os EUA como a GB recusam-se a aceitar quaisquer emigrantes judeus [94]. Contudo, o governo britânico concordou em ajudar no transporte de crianças, organizado por Nicholas Winton, em Praga. Assim, este conseguiu enviar 669 crianças, organizadas em oito comboios, para Londres. Quando um nono comboio estava a ser planeado, em setembro 1939, a GB entra na Segunda Guerra Mundial. Desta forma, o comboio nunca chegou a sair de Praga com as 250 crianças, que nunca mais foram vistas. Todos os judeus europeus presos sob o regime nazi se tornaram alvo da “*Final Solution to the Jewish Question*”<sup>1</sup> [92] [93].

Durante o Holocausto, o CF foi utilizado para diferentes funcionalidades. Ora foi utilizado para levar os judeus para os campos de concentração ou para os campos de trabalhos forçados; ora foi utilizado para transportar os presos para os campos de extermínio. A dimensão de tal massacre só foi possível graças à grande capacidade do CF para transporte. Para a implementação da “Solução Final”, os nazis precisavam de um sistema que garantisse o extermínio em massa. Com os comboios, e apesar destes serem um transporte valioso e estratégico na guerra, conseguiram acelerar o processo de transporte para os campos, reduzindo o número de tropas necessárias para este encaminhamento, devido ao facto do transporte ser feito em vagões. Desta forma, permitiu que os nazis construíssem e operassem os campos de extermínio em larga escala. Muitos dos judeus assassinados eram provenientes do leste, onde existiam vários comboios já utilizados para transporte de mantimentos militares russos e que regressavam vazios aquando do retorno à Alemanha, não fosse o transporte dos judeus, para o Holocausto [95] [96].

Em janeiro de 1942, os nazis deram início ao massacre em escala de judeus [95] [96]. As deportações, nesta altura, tinham escala e para tal era necessária a coordenação de vários ministros e organizações estatais do governo alemão, incluindo o Escritório Central de

---

<sup>1</sup> *Final Solution to the Jewish Question - Solução Final para a Questão Judaica*

Segurança do Reich (RSHA<sup>2</sup>), o Ministério dos Transportes e o Ministério dos Assuntos Externos. Por conseguinte, o RSHA organizou as deportações; o Ministério dos Transportes organizou o horário dos comboios e o Ministério dos Assuntos Externos negociaram com os estados aliados da Alemanha a deportação dos judeus [95]. O destino dos comboios foram os campos de extermínio na Polónia, que estavam ocupados pelos nazis, camuflando, desta forma, a “Solução Final” como “repovoação do oeste”. Os presos foram informados que iriam para campos de trabalho forçado mas, a partir de 1942, o seu destino seria os campos de extermínio. Gradualmente, com o avanço do Exército Vermelho e a invasão da Normandia, a cadência dos comboios decaiu, dando origem às Marchas da Morte, deslocação a pé dos presos por meio terrestre para locais com maior resistência nazi, e que ao mesmo tempo contribuía, de forma forçada durante a sua deslocação, para a construção de defesas nazis. Outro objetivo destas marchas foi a promoção da morte durante o percurso, sem que fossem necessárias quaisquer valas comuns. [95] [96].

Um acontecimento ferroviário destaca-se, em abril de 1944, por razões ainda hoje desconhecidas: o comboio de Kastner. Oficiais nazis ofereceram ao Comitê de Auxílio e Regate Sionista (*Vaada*), liderado por Rudolph Kastner, vistos de saída a 600 judeus que tinham consigo certificados de imigração palestinos, em troca de largos milhares de dólares. O Comitê organizou uma lista de dez categorias de indivíduos que pretendiam resgatar. Esta lista contemplou 388 moradores de Cluj, cidade natal de Kastner [97]. Após o respetivo pagamento, o comboio de Kastner transportou 1.684 judeus da Hungria até à Suíça. Apesar de Kastner ter sido criticado por colocar a sua família a bordo, justificou mais tarde que foi uma forma de provar aos demais passageiros a fiabilidade do transporte, desmistificando a ideia de Auschwitz como destino final [96] [98] [99] [100].

Em 1945, os nazis transportaram uma parte dos sobreviventes dos campos para o interior do Terceiro *Reich* ou para locais fronteiriços onde acreditavam poder negociar a libertação de prisioneiros de guerra alemães. Muitos dos presos foram deslocados através das Marchas da Morte, mas outros meios foram utilizados como é o exemplo dos três comboios que partiram, em abril de 1945, de Bergen-Belsen, mas que acabaram por ser

---

<sup>2</sup> RSHA - Reichssicherheitshauptamt

intercetados e os seus passageiros libertados [101]. O último registo de transporte de prisioneiros utilizando um comboio foi em março de 1945, onde foram transportadas 1.000 mulheres para o campo de Theresienstadt, tendo estas sido agrupadas de forma comprimida, em vagões de gado. Apenas 200 sobreviveram à viagem Bergen-Belsen [98] [99] [100] [101].

### **3.7. A REVOLUÇÃO DO CAMINHO DE FERRO NO SÉCULO XX**

Com a entrada do novo século, a evolução do comboio ocorre de forma natural. Numa altura em que a locomotiva a vapor estava no seu auge, surge o conceito de motor a *diesel* e elétrico, que veio substituir gradualmente o vapor em meados de 1960, como forma de incrementar a velocidade ao transporte [102]. Contudo, a velocidade já se tinha tornado num fator preponderante para o CF.

Ao longo dos anos, ocorrem várias tentativas e experiências com transporte ferroviário de grande velocidade, como foi o caso da Alemanha em 1903, numa linha militar eletrificada e cuja marca alcançada, num veículo adaptado, foi de 210,2 km/h. Contudo, o sonho da exploração comercial de um comboio a alta velocidade (AV) teria que esperar mais alguns anos [103].

No Japão, a AV sempre foi algo almejado. A utilização do primeiro *Shinkansen* (AV em japonês) foi feita em 1940, usando linhas eletrificadas e também locomotivas a vapor, cujas velocidades atingiam 200 km/h [104]. Todavia, tais projetos terão sido parcialmente abandonados devido ao enfraquecimento japonês na Segunda Guerra Mundial, tendo sido recuperados após a Guerra [104]. A primeira operação comercial de um comboio de AV data de 1964, no Japão, com o lançamento do comboio “*Bala*”, ligando Tóquio a Osaka, atingindo a marca de 210 km/h [105]. Mas a grande revolução deste novo tipo de transporte foi a oferta de um serviço de AV às massas, que no início contava com 12 carruagens e, mais tarde, a última versão atingiu 16 carruagens de dois andares [106][107]. O *Shinkansen* é, nos dias atuais, um dos sistemas ferroviários mais movimentados do mundo, tendo transportado 7.289 bilhões de passageiros entre 2013-2014 [108]. De salientar que o Japão opera com 4 bitolas distintas devido ao desenvolvimento do CF no país ao longo dos anos (tabela 2). Já no que respeita à alimentação das VF, o Japão conta com uma multifacetada rede de alimentação (tabela 3), que funciona com diferentes frequências elétricas: 50 Hz na parte oriental e 60 Hz na parte ocidental [104] [108].

**Tabela 2 – Bitolas utilizadas no Japão [104]**

<b>Bitola (em mm)</b>	<b>Rede construída (em km)</b>	<b>Eletrificação</b>
1.067	22.301	3/4 da rede
1.435	4.251	Rede total
1.372	96	Rede total
762	48	Rede total

**Tabela 3 – Eletrificação das linhas no Japão [104]**

<b>Tensão/Tipo Linhas</b>	<b>Linhas Convencionais</b>	<b>Linhas Shinkansen</b>	<b>Linhas Privadas</b>
0,6kV DC	-	-	S
0,75kV DC	-	-	S
1.5kV DC	S	-	-
20kV AC	S	-	-
25kV AC	-	S	-

Em França, em 1981, o TGV (*Train à Grande Vitesse*) é inaugurado pela *Société Nationale des Chemins de fer Français* (SNCF). O projeto inicial previa que fosse movido a gás, contudo, a crise petrolífera de 1973 ditou que fossem elétricos [109] [110]. A rede desde cedo foi centrada em Paris, como acontecera outrora no início do CF em França, expandindo-se, internamente para sul, oeste, norte e leste, e internacionalmente para a Alemanha, Espanha e Itália e Bélgica. O TGV, nas linhas mais recentes, permite atingir os 377 km/h, enquanto em abril de 2007, atingiu a velocidade record de 547 km/h na linha Paris-Estrasburgo. Esta marca é ainda hoje um record mundial de velocidade sobre carris. Toda a rede eletrificada de alimentação funciona a 25kV AC, a 50 Hz [111].

Com a chegada do ano de 1994, é concretizado um sonho ferroviário antigo, com mais de 190 anos: a ligação ferroviária, através do túnel subaquático entre a GB e a França. Assim, nasce o Eurotúnel (*Eurochannel*). Com uma extensão de 50,5 km, aproximadamente, este atravessa o Canal da Mancha, em túnel a 60 metros de profundidade, ligando Folkestone, na GB, a Pas-de-Calais, em França [112]. Com este feito, surge também o primeiro CF de AV: o *Eurostar*, sendo utilizado em serviço doméstico de passageiros, à velocidade de 225 km/h e serviço internacional de passageiros a 300 km/h [113]. A alimentação elétrica do *Eurostar* é de 25kV AC, a 50 Hz [111].

A AV na Alemanha conheceu o seu início pouco após o lançamento do TGV. Contudo, em Auschwitz batalhas legais ditaram um atraso de 10 anos no lançamento do *IntercityExpress* (ICE). O primeiro serviço comercial de AV alemão data de junho de 1991 e foi realizado entre Hamburgo e as principais localidades empresariais [114][115]. Devido à diferente infraestrutura existente na Alemanha, fruto da falta de ordenação do CF no passado, a rede de AV está mais integrada com linhas já antigas e existentes, tendo sido a sua evolução mais lenta. Após o seu lançamento, o facto de rapidamente chegar à Áustria e Suíça comprovou-se como sendo uma vantagem ao nível da tensão de alimentação. A terceira geração do ICE trouxe mais velocidade, sendo a sua velocidade máxima de serviço 330 km/h, podendo atingir os 363 km/h. A ligação do ICE através das linhas do TGV foi possível em 2001, passando assim a haver um intercâmbio bidirecional ferroviário no centro europeu. Isto porque o comboio francês *Thayls*, um dos comboios da geração TGV para ligações internacionais, começou a fazer a ligação entre a França e a Alemanha, em 1997. Apesar de operar com velocidades diferentes, a Alemanha possui uma vasta rede de AV, pelo que liga as 32 principais cidades alemãs, contando ainda com vastas ligações internacionais [114][115][116].

O primeiro comboio europeu a ser desenvolvido na Europa era italiano: o *Direttissima* que ligava Roma a Florença, a uma velocidade cruzeiro de 254 km/h, por volta de 1978 [117]. *Treno Alta Velocità* é a denominação atual dada para a AV em Itália. A introdução deste tipo de comboio prendeu-se com a necessidade de introduzir a concorrência e a competitividade entre os vários meios de transporte, bem como a necessidade de se enquadrar nos padrões europeus, quanto à mobilidade ferroviária [118]. O comboio de AV *Eurostar Itália* equipa estas linhas, contando com dois modelos de comboio, da série ETR 400 (conhecido como *Pendolino*) e ETR 500 [119].

Na Noruega, o conceito de AV é utilizado na ligação do aeroporto de Oslo, como ponto central, às cidades com maior relevo empresarial, como a capital Oslo: o *Flytoget*, lançado em 1992 [120]. O troço principal que liga a capital tem 64 km, sendo o mais extenso o que liga a Drammen com 100 km, conseguindo o *Flytoget* atingir velocidades na ordem dos 210 km/h. O maior desafio que a Noruega enfrentou no setor ferroviário, foi o túnel *Romerike*, devido à geologia altamente instável de Ostmarka decorrente do lago que atravessa [121].

Na vizinha Espanha é inaugurada, em 1992, a linha de AV, conhecida como AVE (*Alta Velocidad Española*). Assim, a AV começa a ser operada com comboios similares ao TGV, da série 100 da Alstom, sob a responsabilidade da *Red Nacional de Ferrocarriles Españoles* (RENFE). A velocidade máxima alcançada neste serviço é da ordem dos 310 km/h, recorrendo à série 100, bem como às modernas Talgo [122]. A rede AV totaliza 3100 km e liga os principais pontos empresariais, abraçando praticamente toda a nação espanhola, com exceção do norte da península.

O serviço de grande velocidade ferroviária em Portugal deu os primeiros passos em 1953, com o *Foguete*. Encomendada pela Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses, esta automotora apresentava uma composição tripla e ligava Porto-Lisboa em pouco mais de 4 horas, com velocidades de 120 km/h. Esta automotora da série 0500, fabricada em Itália e equipada com motores a *diesel* da Fiat, foi uma revolução ferroviária para a época; foi o primeiro comboio a ter ar condicionado, a servir refeições no lugar, com cadeiras reclináveis e a não necessitar de mudar de máquina em Gaia, para a travessia da Ponte D. Luís. Contudo, a sua utilização cessou por volta dos anos 70 [123] [124] [125].

O aparecimento da AV em Portugal acontece em 1999, com o aparecimento do Alfa Pendular. Portugal foi o país que mais tarde aderiu à nova ideologia ferroviária, há muito implantada na Europa. Apesar de Portugal não contar com uma linha de cariz AV, o Alfa Pendular adapta-se ao conceito e atinge, apenas em alguns pontos do troço, os 220 km/h. A frota é composta por um total de dez comboios, da série 4000 de *design* do *Pendolino* ETR 460, da Fiat. A sua tração é feita com recurso aos 25 kV transferidos pelo pantógrafo e tem uma potência de 4,0 MW. A tecnologia pendular permite que este comboio consiga efetuar curvas a velocidades mais elevadas que as composições convencionais. Para a sua adaptação à bitola ibérica, os *bogies* tiveram de sofrer uma remodelação. Em termos de montagem, estes comboios foram montados pela Alstom, na fábrica da Sorefame. O Alfa Pendular veio substituir o antigo serviço Alfa que era feito com recurso ao conjunto locomotiva-carruagens, que apenas ligava Lisboa-Santa Apolónia a Porto-Campanhã. Atualmente, este serviço efetua a ligação entre Porto e Lisboa, com extensibilidade a Braga e Faro. O Alfa Pendular oferece, no seu dia-a-dia, serviços diferenciadores das demais ligações como por exemplo: oferta de bebidas (na classe Conforto), refeições no lugar, venda de jornais e revistas, serviço de vídeo e projeção, serviço de áudio e ligação à internet sem fios gratuita (*Wi-Fi*) [126]. Neste momento, a empresa Comboios de Portugal

(CP) decidiu remodelar a frota dos Alfa Pendular, cujo intuito é melhorar os níveis de conforto e de segurança dos passageiros, com a introdução de novos bancos e materiais de revestimento, bem como novos sistemas de iluminação. Os Alfa Pendular estão já a ser alvo das várias alterações mecânicas, hidráulicas e estéticas que passarão também pela mudança de visual exterior [127].

Também igualmente importante no contributo para uma rápida evolução e desenvolvimento ferroviário foram os túneis que quebraram barreiras sociais e fronteiriças. Assim como o Eurotúnel, em 1994, outros feitos alcançados na construção de túneis foram um marco ferroviário. Foi o caso do primeiro túnel ferroviário de Fréju ou do primeiro túnel ferroviário nos alpes suíços, o túnel Gotthard, que em 1882 se tornou uma realidade, com 15 km de extensão. Em junho de 2016 é concluído o novo túnel Gotthard, que se torna no maior túnel ferroviário do mundo com 57 km de extensão, suplantando o antigo e pioneiro túnel de 1882. Este fará a ligação Erstfeld-Bodio, de modo a descongestionar o tráfego automóvel feito neste trajeto, criar sinergias entre Zurique e Milão e ainda potenciar a ligação entre o norte e o sul da Europa [128].

### **3.8. BITOLAS MUNDIAIS**

A bitola é a largura entre as faces interiores das “cabeças” dos carris de uma VF. Com o desenvolvimento da VF e do sistema ferroviário mundial, muitas foram as influências e opções tomadas pelos vários governos, o que levou a uma diversificação de bitolas.

Será inegável dizer que a grande referência e o impulsionador de uma bitola “*standard*” ou padrão foi George Stephenson, pioneiro na locomotiva a vapor, no início do século XIX [54] [60]. Tal deveu-se à distância entre os eixos da primeira locomotiva de utilização comercial, a *Rocket*, com distância entre rodas de 1435 mm. Assim, a VF de Liverpool-Manchester, a primeira comercialmente explorada onde foi aplicada a locomotiva de Stephenson, também foi pioneira na bitola *standard* [54]. Da GB para o mundo, considerando a larga exportação e adoção da locomotiva, a bitola *standard* rapidamente foi utilizada e adotada, pois as locomotivas a vapor usadas eram, na sua maioria, de autoria de Stephenson ou eram desenvolvidas a partir do seu modelo.

Fruto do desenvolvimento descoordenado e, em vários casos, privado do CF, alguns países adotaram outras bitolas; alguns em paralelo com a *standard*; outros adotaram apenas a *standard* e outros ainda adotaram a sua própria bitola, motivados por questões históricas

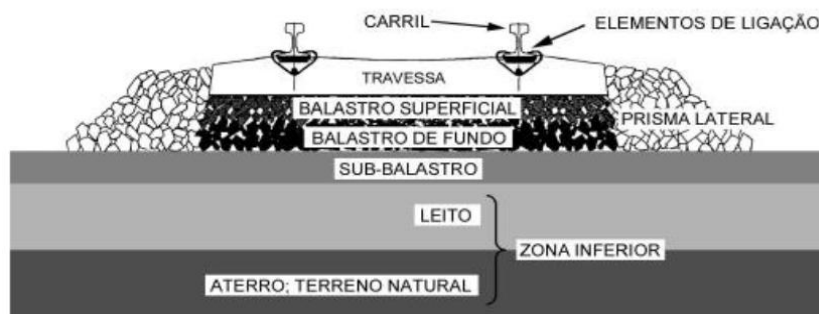
como a estratégia militar, geográfica ou mesmo colonial. Como exemplo do último ponto, temos a bitola ibérica, com 1668 mm, que serve as redes de Portugal e Espanha. Mas existe ainda o caso da bitola Russa, com 1524 mm, ou ainda a maior bitola conhecida e em utilização, a bitola de Brunel com 2140 mm. Esta última foi desenvolvida pelo engenheiro Isambard Kingdom Brunel, com vista a dar mais estabilidade ao transporte, tendo a *Great Western Railway* adotado a mesma [129]. Por conseguinte, é possível observarem-se bitolas largas, nas quais se enquadram não apenas as anteriores, mas também o caso do Brasil, que utiliza uma bitola de 1600 mm [130].

É inegável que a bitola *standard* é a mais utilizada no CF mundial, instituída oficialmente em 1845, quando o parlamento inglês decreta a bitola 1435 mm como obrigatória. Após poucos anos, em 1856, é instituída na Suíça a Organização Federal para os Caminhos de Ferro. Mas foi em 1887, na Conferência Internacional de Berna, que foram criadas regras que, de alguma forma, regulariam o CF no trânsito internacional, tendo sido instituído em 1907 como bitola internacional. De salientar que a utilização desta bitola, a nível mundial, é de 58%. É o caso da Europa (com exceção de Portugal, Espanha e Finlândia), dos EUA e de vários países sul-americanos, o que agiliza a interligação entre estados ou mesmo entre países [130]. É de realçar que estas diferenças eram mais notórias e de uma criticidade elevada quando se tratavam de ligações internacionais. Criando uma rede com uma bitola única, seria sempre uma mais-valia no que respeita às trocas comerciais e de passageiros, pelo que os países ibéricos foram os grandes prejudicados na Europa.

Conforme indicado anteriormente, outras bitolas sobressaem pela sua eficácia e rápida proliferação, como é o caso da bitola *estreita*. Esta é caracterizada como sendo mais barata, ao nível da construção, mais fácil de operar, principalmente em linhas de montanha ou de terreno irregular. Este tipo de linha, com menos custos, era a mais indicada para locais onde não se justificava a construção, como indústrias ou minas, que tinham uma infraestrutura pequena. É o caso da bitola 1067 mm, que conta com um peso mundial, em termos de utilização, na ordem dos 9% e onde alguns dos países onde ela está implementada foram muito bem-sucedidos na evolução do setor ferroviário, como é o caso do Japão e da Austrália [130]. Com igual peso e importância existe ainda a bitola métrica de 1000 mm, utilizada em África, na Ásia, no Brasil e na Índia [130]. Mas estas não são as únicas bitolas *estritas*. Com o aparecimento de metros e transportes ferroviários de superfície, bitolas como 914 mm ou 762 mm ganharam igualmente espaço, implantando-se

pelo mundo fora [130]. Apesar de mais barata, a bitola *estreita* não permite velocidades tão elevadas nem o transporte de maiores cargas como a bitola *standard* [131].

A construção de uma linha ferroviária não é algo simples. A via balastrada é a mais antiga e é, ainda hoje, a solução estrutural para novas linhas ferroviárias. A utilização deste tipo de via possui vantagens, como o facto de possibilitar uma construção rápida e com custos relativamente baixos, uma fácil correção da geometria da via, operações de conservação da via simples, rápidas e a baixo custo, relativa adaptabilidade à redefinição do traçado, assim como o ajuste a eventuais assentamentos da subestrutura [132], conforme ajuda a documentar a figura 23. A sua composição parece ter evoluído muito pouco em mais de duzentos anos, no entanto, a partir dos últimos quarenta tem vindo a ser discutida a eficiência da sua utilização por diversas razões. O aumento progressivo da carga transportada e da velocidade de circulação conduz a uma maior rapidez de degradação da via, causada pela contaminação do balastro por óleos, pela instabilidade do balastro sob efeito das vibrações produzidas pela passagem dos veículos, pela reduzida resistência lateral da via e pelo fenómeno da projecção do balastro [132].



**Figura 23 – Assentamento do carril** [132]

Esta degradação leva, por sua vez, à necessidade de operações de conservação cada vez mais frequentes. A via não balastrada tem sido implementada em vários países, como a Alemanha e o Japão. Atualmente, esta solução consta de uma grande variedade de conceções estruturais [132].

# 4. DESENVOLVIMENTO E EVOLUÇÃO DA REDE FERROVIÁRIA EM PORTUGAL

O desenvolvimento e a evolução da rede ferroviária e do comboio em Portugal foram realizados ao longo dos tempos, sendo que foram diversas as mudanças que ocorreram a este nível, que destacaremos neste ponto.

## 4.1. A CONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO

Com a RI inglesa, indústrias como a extração mineira e a metalurgia ganharam relevo, revolucionando o mundo, no século XIX. Nesta época surge o vapor e o conseqüente comboio e o CF, como vimos anteriormente. Portugal não foi exceção. Todavia, não foi um processo simples pois existia uma grande resistência na aceitação das vantagens que este traria [124]. D. Pedro V e Fontes Pereira de Melo partilhavam da mesma ambição, no que respeita ao desenvolvimento do país. Fontes Pereira de Melo foi, na realidade, o grande impulsionador da VF em Portugal [124]. É por decreto-lei de 6 de maio de 1852

que é aberto um concurso para a construção do troço Carregado-Lisboa, pela mão da *Companhia das Obras Públicas de Portugal*, fundada em 1844. Esta tinha a seu cargo a construção de uma ligação entre Lisboa e a fronteira espanhola. Contudo, o projeto gorou e a Companhia extinguiu-se, mas a urgência imposta pelos governantes era grande, quanto à construção da VF. Várias resoluções foram lançadas para impulsionar a construção [124] e em 1852, a *Companhia Peninsular dos Caminhos de Ferro de Portugal (CPCFP)* foi constituída e aceite, tendo como representante o inglês Hardy Bishop. Em 1853 é dada a concessão à empresa a título definitivo, bem como definido o seu estatuto. Deu-se, assim, início aos trabalhos de forma muito lenta, devido à burocracia do governo bem como à inexperiência dos trabalhadores envolvidos [124]. O lançamento do comboio em Portugal surge, oficialmente, com a abertura de VF entre Carregado e Lisboa, após vários projetos fracassados, com 37 km de extensão. A primeira viagem ocorreu em 28 de outubro de 1856 [133].

Em 1857, a CPCFP debatia-se com sérios problemas financeiros, não conseguindo cumprir os projetos assumidos, nem o prolongamento da linha do Carregado, rescindindo, assim, contrato com o governo. Posto isto, o governo assina novo contrato com um outro inglês, Sir Morton Peto, mas também este não consegue financeiramente resistir, obrigando o governo a lançar novo concurso [124]. Em 1859, é oficializada a concessão à nova companhia, a *Companhia Real dos Caminhos de Ferro Portugueses (CRCFP)*, com D. José de Salamanca no comando da companhia, alguém com experiência na área das finanças e empreiteiro [124]. A experiência como empreiteiro fora adquirida na construção do CF na vizinha Espanha. A sua dedicação e profissionalismo mereceram-lhe apoios financeiros por parte de capital francês e espanhol [134]. Após estudos encomendados a engenheiros experientes da época, de modo a obter os melhores traçados para as futuras linhas, conclui-se que a falta de documentação demográfica e geológica levaria a uma escolha dos traçados em função das exigências técnicas e dos custos de construção [124]. Outras companhias nasceram e viram atribuídas concessões de troços secundários. Foi o exemplo da *Companhia dos Caminhos de Ferro da Beira Alta (CCFBA)*, uma sociedade francesa; a *Direção dos Caminhos de Ferro do Douro e Minho (DCFDM)*; a *Companhia dos Caminhos de Ferro do Norte de Portugal (CCFNP)* e a *Companhia do Carril de Ferro de Lisboa, do Porto à Foz e Matosinhos (CCFLPZM)* [124]. Em 1892, surge os *Caminhos de Ferro do Estado (CFE)*, que iria ser veículo de atribuição de concessões a companhias ou a particulares, bastando ter capital para realizar a obra, podendo os concessionários

serem auditados pelo governo. Apesar da maioria dos trabalhadores serem estrangeiros, ingleses, franceses, espanhóis e italianos, também portugueses se evidenciaram no CFE. Tal demanda de trabalhadores estrangeiros deveu-se à falta de experiência e de conhecimento do setor ferroviário [124]. Entre 1871 e 1877, Fontes Pereira de Melo mantém a linha diretora de melhoramento e intensificação da VF, lançando concursos para novas construções. Ao longo de 99 anos de concessão da CRCFP, muitos foram os troços lançados permitindo o desenvolvimento económico [124].

Com a modernização da *Companhia de Caminhos de Ferro Portugueses*, em 1950, ocorreu a eletrificação das linhas urbanas de Lisboa, mais precisamente na Linha de Sintra. Esta será das mais antigas linhas em exploração comercial de passageiros, em Portugal, datada de 1887, a par da Linha de Cascais, datada de 1889 [135][136]. Esta última foi a única VF a ser privatizada em Portugal, em 1976, tendo estado concessionada à empresa privada *Sociedade Estoril*, que investira na eletrificação da via, em 1908. Com a concessão, esta linha terá adotado uma gestão diferente das restantes linhas implantadas em Portugal. Esta adota uma eletrificação de 1500V em corrente contínua (DC), que ainda hoje prevalece. [135][136]. Tal concessão foi cessada em 1976, extinta a *Sociedade Estoril* e os colaboradores desta transitaram para a empresa dos *Caminhos de Ferro Portugueses* [137]. Em 1997, a rede ferroviária é liberalizada, passando a ser gerida por uma entidade independente e partilhada por vários operadores. Desta forma, é criada em 1997 a *Rede Ferroviária Nacional* (REFER), empresa que faria a gestão da infraestrutura, que atualmente se denomina *Infraestruturas de Portugal* (IP). Quanto aos operadores, antes da liberalização, apenas existia a CP (*Comboios de Portugal*) que estava dividida em CP Passageiros e CP Carga. Após a reorganização e recente venda da CP Carga (agora MedRail) é estruturada em:

- Comboios Urbanos de Lisboa, Porto e Coimbra;
- Comboios Alfa Pendular, Intercidades e Internacional;
- Comboios Regionais e InterRegionais.

Após a liberalização, surge a *Fertagus*, em 1997, que se dedica exclusivamente a transporte de passageiros entre Lisboa e a margem sul. Em 2006, fruto da diversificação de negócio da Mota-Engil, é fundada a *Takargo*, que se dedica exclusivamente ao transporte de carga, a nível nacional. Mais tarde, surge a *Comsa*, empresa espanhola, com vários

negócios internacionais no setor ferroviário, que viu oportunidade na área do transporte de carga por VF.

## **4.2. DO VAPOR PARA A ELETRICIDADE**

Também o método de tração foi evoluindo ao longo dos anos em Portugal, começando pelo vapor até à eletricidade, passando pelo *diesel*.

O princípio de funcionamento da locomotiva a vapor era algo revolucionário, sendo constituída por uma caldeira e do mecanismo a vapor, decorria a locomoção, tal como um recipiente fechado contendo água. Aquando da combustão do material fóssil na fornalha, os gases resultantes são conduzidos para o exterior, passando por tubos de água. Assim, a água é aquecida a uma temperatura muito elevada, sendo transformada em vapor. Este vai ser conduzido para uma câmara que irá ser atuada de acordo com o movimento da roda, alternando a entrada na câmara, constituída por um êmbolo ligado também à roda, tanto de vapor aquecido como de escape de vapor mais arrefecido. O vapor aquecido irá proporcionar uma força tal que irá “empurrar” o êmbolo, arrefecendo e “escapando” para uma segunda chaminé [138].

Entre 1927 e 1928, a CP (*Companhia Portuguesa dos Caminhos de Ferro*, na altura) assume grande parte das linhas pertencentes ao estado e começa a abandonar a locomotiva a vapor na década de 1940. Com o final da II Guerra Mundial, surgem as locomotivas a *diesel*. Apesar de melhores que as de vapor, têm fraco poder de tração tendo sido substituídas pelos modelos *diesel*-elétrico. No entanto, estas também foram sendo substituídas, visto serem extremamente dispendiosas quanto à fonte de energia para a tração, bem como pela sua manutenção.

As primeiras locomotivas elétricas a serem introduzidas em Portugal datam de 1926, com a eletrificação da Linha de Cascais, e em 1948 as locomotivas a *diesel*, de origem americana. Com a I Guerra Mundial, era ditado o declínio da locomotiva a vapor em Portugal pois o carvão, material essencial de combustão das locomotivas a vapor, escasseava, existindo a necessidade de encontrar alternativas [124]. A madeira parecia, em primeira instância, uma excelente alternativa, contudo tinha uma combustão muito rápida, sendo de imediato abandonada a ideia. Na época, as vantagens do *diesel* prevaleciam perante o vapor e a eletricidade, uma vez que a necessidade de abastecimento de água limitava grandes percursos, no caso do vapor, ou o avultado investimento em subestações, centrais,

catenárias, entre outras, esbarrando na captação de investimento para tal. Contudo, nos dias atuais, o custo dos combustíveis revela-se algo extremamente dispendioso, evitando-se a utilização do *diesel*. Após a II Guerra Mundial, surgem as locomotivas *diesel*-elétricas, nos EUA, sendo utilizadas em troços onde a eletrificação das linhas não se revela necessária [124].

A escolha de automotoras ou locomotivas é sempre algo que terá que ser bem ponderado. Uma das vantagens das locomotivas face às automotoras é a facilidade de manutenção, pois, na verdade, é mais fácil isolar um elemento do comboio, de modo a fazer a manutenção. Uma outra vantagem remete-nos para a segurança, principalmente com carruagens de passageiros, sendo mais fácil isolar-se a fonte de energia das restantes carruagens. Também a facilidade de troca da fonte de energia revela-se mais vantajosa, uma vez que é possível proceder-se à substituição das locomotivas, em caso de avaria. Por último, importa ainda referir a eficiência e a obsolescência são dois pontos adicionais que devem ser tidos em consideração, pois os comboios fora de circulação gastam menos e quando a unidade de energia se torna obsoleta, não há necessidade de trocar todo o material circulante [102].

### **4.3. CARATERÍSTICAS DA VIA-FÉRREA**

A evolução da VF em Portugal não diferiu muito da rede europeia, mesmo com a evolução que esta sofreu continuamente.

A VF tem como constituição dois carris, travessas e balastro. Este conjunto constitui um canal de circulação para os vários veículos rebocados, isto é, o comboio [124]. Os carris, aquando da sua montagem, chegam em vigas de ferro ou aço e são assentes paralelamente, mantendo sempre a mesma distância entre as partes interiores das “cabeças” dos carris (*bitola*). As travessas, podendo ser de madeira, metal ou mesmo betão, são assentes na terra, contribuindo para o apoio do peso e velocidade do comboio, quando sobre o carril. O balastro é composto por brita, terra, areia ou outros materiais e é colocado entre as travessas, preenchendo as lacunas entre elas [124]. O seu objetivo é criar um leito uniforme e coeso para o assentamento das travessas [133]. As travessas são unidas ao carril por

intermédio de *tirafonds*<sup>3</sup> e o balastro intercalando com as travessas. A segurança e conservação da via é uma das prioridades e preocupações das empresas concessionárias da VF [124]. Assim, renovações de troços, revisões periódicas e reparações parciais são um foco importantíssimo no sistema ferroviário. Para o projeto de um troço, o estudo do traçado, o custo, bem como a geologia e orografia do terreno irão definir o tipo de via a ser construída: via estreita ou via larga [124].

Foi igualmente criada uma sinalização muito específica deste transporte, com a finalidade de maximizar a segurança nestas vias. Assim, são tidas como sinalização fixa o uso de bandeiras, petardos e lanternas, verificando-se uma incidência maior destas nas estações. Com a evolução das velocidades e tráfego de comboios, torna-se necessário aumentar a sinalização de modo a garantir a segurança. O processo de controlo da entrada e saída de comboios numa estação estava dependente de um funcionário para alterar as agulhas<sup>4</sup>, por intermédio de uma chave que abria o cadeado que permitia a manobra. O sistema *Bouré* foi o primeiro sistema mecânico adotado em Portugal [124].

O sistema bloco foi um grande passo na modernização da sinalização ferroviária. Para além de se economizar em mão-de-obra, permite ser manobrado automaticamente, pelos próprios comboios. Os aparelhos elétricos instalados na linha são acionados pela passagem do comboio, para articularem de forma adequada a sinalização [124].

Os sinais fixos da via, já incorporados na locomotiva, como é exemplo a lanterna vermelha na última carruagem do comboio, também designado sinal de abrigo, tinham como função a sinalização da circulação à noite [124]. Mais tarde, são introduzidos os semáforos de três posições, ainda utilizado: vermelho, que indica paragem; verde que indica via livre; laranja, que indica precaução e abrandamento do comboio. Com o aparecimento de novas tecnologias, as tarefas de segurança que eram feitas manualmente, passaram a ser asseguradas por computadores e sistemas elétricos automatizados, facilitando assim as

---

<sup>3</sup> *Tirafundos* - Parafuso especial para madeira, destinado a fixar o carril às travessas e também as cunhas ou os cochins.

<sup>4</sup> *Agulhas* - Equipamento usado para permitir que o material circulante transite de uma linha para outra, dando continuidade para uma determinada via ou caminho.

operações mais demoradas. Desta forma, é perdida uma grande parte da componente humana, sendo quase tudo automático [124].

No que concerne às VF existentes a nível mundial, podemos categorizá-las quanto ao tipo de tração, quanto ao tipo de comboio que nela circula. Assim, a VF normal tem circulação assente na tração mecânica de uma locomotiva ou automotora<sup>5</sup> *diesel* ou *diesel*-elétrica [139]; a via eletrificada, é provida de uma linha de alimentação elétrica, aérea ou térrea, para que a locomotiva ou automotora elétrica possa ser alimentada através de pantógrafo<sup>6</sup>, ligado a uma catenária<sup>7</sup>; através de um terceiro carril, mais no caso dos metropolitanos subterrâneos [124][139]. As referidas locomotivas, irão aplicar a força de tração para puxar os vagões a ela ligados, podendo ser de passageiros, carga ou misto. Em Portugal, é possível encontrar ambas as categorias indicadas.

Quanto à categorização por tipo de comboio que circula na via, podemos ter monocarril, via de AV e *Maglev* [139]. O monocarril é mais vulgarmente encontrado em sistemas de transportes de ligação a aeroportos, especialmente metros. A deslocação do veículo de transporte é assente num único carril, que pode ser de passageiros ou de carga. Na maior parte dos casos, o carril encontra-se elevado, mas pode ser assente ao nível térreo ou mesmo em túneis [140]. Quanto ao tipo de deslocação, o veículo pode circular suspenso no carril ou circular em cima do carril, sendo os veículos mais largos que o carril. Por vezes estes podem ser confundidos com veículos leves sobre carris, podendo estes ser veículos individuais rígidos, unidades individuais articuladas ou várias unidades acopladas. A deslocação pode ser acionada por motores de indução lineares. Como acontece nos comboios convencionais, as carroçarias podem ser ligadas ao carril através das *bogies*<sup>8</sup>, permitindo uma adaptabilidade maior às curvas [140]. É comum vermos o monocarril em

---

<sup>5</sup> *Automotora* - veículo ferroviário constituído por um posto de condução em cada extremidade da unidade de material circulante único, normalmente de pequena dimensão ferroviária.

<sup>6</sup> *Pantógrafo* - Dispositivo no topo das locomotivas ou automotoras elétricas que serve de contacto entre o sistema elétrico destas e a catenária.

<sup>7</sup> *Catenária* - Sistema de distribuição e alimentação elétrica aérea.

<sup>8</sup> *Bogie* - Parte integrante do comboio que é constituído por um conjunto de rodas, sapatas de freio, rolamentos, molas, eixos, cilindros de freio, barras estabilizadoras entre outras coisas.

espaços como metros ligeiros, parques de diversões ou transportes de curta distância, devido à rápida ligação deste.

O monocarril, em Portugal, teve a sua aparição em 2004, em Oeiras, com o Sistema de Transportes Automáticos de Oeiras (*SATU*). Este monocarril distinguia-se pelo facto de não ser tripulado, isto é, não ter condutor. A sua velocidade máxima era 40 km/h e tinha um trajeto com uma extensão de 1,2 km [141], entre Paço de Arcos e o Centro Comercial de Oeiras. Com capacidade para 88 pessoas, esta ligação tinha a duração de três minutos [142]. Contudo, a sua sustentabilidade fora subestimada e a fraca adesão da população, o processo de financiamento e a falta de apoios comunitários ditaram o fim do *SATU* em 2014, tendo sido abandonado o projeto [141].

A via de AV, caracteriza-se por um traçado cuidadosamente projetado, quer em termos de segurança, sinalização, viabilidade económica e sustentabilidade da ligação, quer ao nível das curvas devido à adaptabilidade necessária. Uma outra característica é a velocidade quase constante ao longo de todo o percurso, sempre acima de 200 km/h. Para tal, esta requer traçados o mais reto possível e sinalização evoluída adaptada à velocidade e segurança necessária. Em Portugal, a linha existente de ligação Braga-Porto-Lisboa-Faro feita em Alfa Pendular não é, na realidade, uma linha de AV, apesar de assim ser conhecida, pois não cumpre os requisitos principais para a AV, entre os quais as curvas, localização das estações e sinalização. É sim, na realidade, uma linha de grande velocidade, visto suportar, mas apenas em poucos troços, velocidades que rondam os 220 km/h, mas cuja velocidade média é de 140 km/h.

Existe ainda o *Magnetic Levitation Transport - Maglev*<sup>9</sup> - que será abordado mais à frente com pormenor, que é também ele um veículo monocarril, contudo com características muito específicas. Não existe, ainda, em Portugal, qualquer estudo para o desenvolvimento e implementação deste tipo de transporte.

---

<sup>9</sup> *Maglev – Veículo de transporte semelhante ao comboio, cuja propulsão é feita com base em forças magnéticas atrativas e repulsivas, recorrendo para tal a supercondutores, sem contacto nem fricção com chão ou carris.*

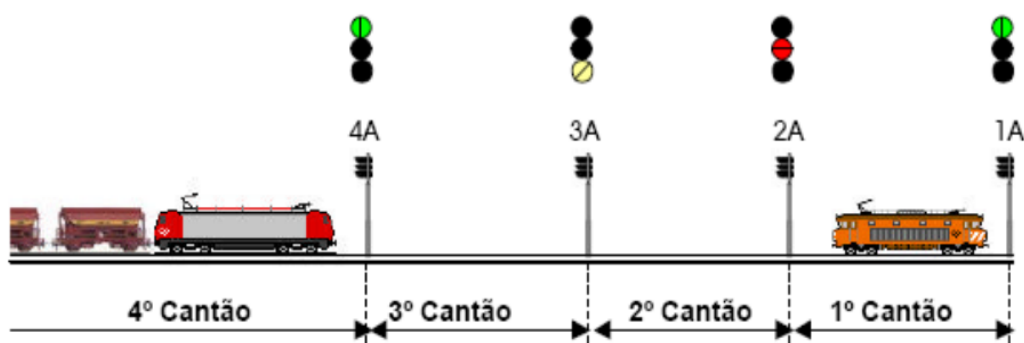
#### **4.4. SISTEMAS DE SEGURANÇA**

No que respeita à segurança, a VF está seccionada em cantonamentos. A gestão de operações ferroviárias baseia-se, fundamentalmente na segurança da circulação de comboios que exige o cumprimento rigoroso da regulamentação ferroviária e dos procedimentos que se encontram determinados nela. Um cantão é um troço de linha onde, em condições normais de exploração, só pode circular um comboio em cada momento. O sistema de cantonamento é um sistema de exploração que garante que, a cada momento, cada cantão só é ocupado por um único comboio [143].

O cantonamento é um processo que permite aumentar a segurança e fiabilidade do transporte. Consiste num sistema de exploração que garante, em cada momento, que cada cantão só é ocupado por um único comboio, para garantir a segurança na circulação. No início, o cantonamento era feito com recurso ao telégrafo. Com o aparecimento do telefone, este foi substituindo progressivamente o telégrafo, dando origem ao chamado cantonamento telefónico, que manteve, na sua essência, os mesmos princípios de atuação [143]. A circulação dos comboios efetua-se por avanços entre estações - troca de despachos telefónicos entre os chefes de estação, que pedem ou autorizam a ocupação do único cantão existente entre as suas dependências. A expedição de um comboio da estação A para B só é possível desde que não se encontre a circular outro comboio, entre as duas estações, no mesmo sentido ou em sentido oposto, nem tenha sido concedido avanço para outro comboio de B para A. O posto de comando, elabora manualmente um gráfico de circulação com a informação da hora de passagem dos comboios prestada pelas estações, ficando com uma visão global que lhe permite regular a circulação, estabelecendo prioridades na marcha dos comboios [143]. Toda a segurança depende do fator humano e baseia-se no cumprimento escrupuloso da regulamentação ferroviária havendo a necessidade de criar redundâncias ao sistema (prevenir que uma única falha não dê origem a um acidente/incidente). Os maquinistas passam a dispor de uma folha com a marcha do comboio (composição, velocidade permitida horas de chegada e partida de estações e indicação das estações onde ocorrem cruzamentos/ultrapassagens). Numa estação com cruzamento marcado, mesmo que o chefe de estação lhe dê partida, o maquinista, caso não se efetue esse cruzamento, não prossegue a marcha sem antes lhe ser entregue um documento escrito que o informa que o cruzamento é alterado para outra estação, definindo qual. As alterações de cruzamento e as ultrapassagens de comboios são determinadas pelo regulador, no posto de comando [143].

O sucesso do CF conduz a uma crescente necessidade de mobilidade das populações. A procura sobe rapidamente originando os primeiros problemas de capacidade das linhas. Nasce a via dupla nos troços/linhas com maior tráfego. Mantêm-se os procedimentos de pedido/concessão de avanços, mas elimina-se a necessidade de efetuar cruzamentos de comboios apenas em estações. Em circunstâncias normais, cada linha só permite a circulação num sentido. Mas o contínuo crescimento da procura pressiona o sistema ferroviário na busca de novas soluções que permitam aumentar a capacidade das linhas e proporcionar melhores condições de segurança. O transporte ferroviário aproveita a enorme evolução tecnológica ocorrida no século XX, sendo, simultaneamente, percussor dessa mesma evolução [143].

O cantonamento automático é realizado através do movimento dos próprios comboios que provocam alterações sequenciais nos aspetos dos sinais (luminosos) à sua retaguarda, garantindo a segurança da circulação pela existência de uma distância mínima entre comboios (figura 24). As estações dispõem de aparelhos elétricos ou eletromecânicos para comando de agulhas e sinais, e são dotadas de sinais principais que lhes permitem comandar a circulação dos comboios. O posto de comando continua a regular a circulação em tempo diferido, de acordo com as informações que recebe das estações sobre a hora de passagem dos comboios [143].



**Figura 24 – Cantonamento Automático, Refer [143]**

O cantonamento automático através de bloco orientável caracteriza-se pela existência de cantonamento automático em ambos os sentidos de circulação (normal e contra via). O sentido de circulação de qualquer uma das vias pode ser alterado, sem outras medidas excepcionais, desde que no momento da inversão do Bloco não exista qualquer circulação na via que se pretende inverter. O *software* do próprio sistema é concebido de forma a impedir que dois itinerários incompatíveis possam ser realizados simultaneamente. A

segurança, no que respeita ao estabelecimento de itinerários e/ou abertura de sinais, deixa de estar dependente do erro humano [143]. Este regime está associado ao aparecimento dos Comando de Tráfego Centralizado (CTC). Pela primeira vez, o posto de comando comanda efetivamente a circulação. O posto de comando conhece, em tempo real, a localização dos comboios, os itinerários estabelecidos e controla remotamente a posição das agulhas e as informações dos sinais, estabelecendo os itinerários de circulação dos comboios. Comunica com os comboios através do rádio solo-comboio, dando instruções aos maquinistas em caso de necessidade. Todas as comunicações de circulação ficam registadas e gravadas. O sistema permite a gestão, supervisão e controlo automático, assinalando os atrasos verificados e prevendo eventuais conflitos entre comboios, facilitando as decisões relativas à prioridade dos comboios e à sua imediata execução [143].

O cantonamento por *Bastão Piloto* é um tipo de cantonamento aplicado em ramais ou secções de via única de pequenas dimensões, com dificuldade de estabelecer comunicações entre dependências. Caracteriza-se pela utilização de um objeto de forma cilíndrica, com a seguinte inscrição a preto “*Bastão-Piloto. Troço de\_a\_.*” A posse do Bastão-Piloto autoriza o comboio a circular no troço por ele abrangido. Para dar a partida de um comboio para o troço onde funcione o *Bastão Piloto*, o chefe de estação tem de o entregar ao maquinista que, ao chegar à estação onde termina este regime de cantonamento o entrega ao respetivo chefe de estação. Nessa altura, só esse chefe de estação pode expedir comboios, entregando o *Bastão Piloto* ao maquinista do comboio a expedir [143].

Contudo, e sempre com o objetivo de melhorar a segurança, existem ainda meios complementares de segurança, visto esta assentar principalmente no fator humano. Com o cantonamento automático, o principal ator passa a ser o maquinista. Desta forma, surgem novos instrumentos e sistemas de segurança como é o caso do sistema de *Homem Morto*, que obriga o maquinista do comboio a executar uma operação qualquer a cada 30 segundos. Se o maquinista não executar nenhuma ação, ocorre uma série de acontecimentos numa ordem e temporização precisa, com vista a salvaguardar a integridade, em primeiro, das pessoas e do material. Se o maquinista, ao fim de 24 segundos, não executar nenhuma ação, aparecerá uma luz avisadora no painel de bordo; se este não reagir, ao fim de 3 segundos tocará um besouro de alerta; se o maquinista continuar sem reagir, ao fim de novos 3 segundos o sistema irá parar automaticamente o comboio aplicando uma frenagem de emergência [143].

Uma vez mais, o recurso à tecnologia de sinalização (elétrica) mostra-se fundamental para fazer frente ao elevadíssimo nível de segurança exigido. Assim, é aplicado o Controlo Automático de Velocidade (*CONVEL*), parte integrante do sistema Europeu de controlo de comboios, um subsistema do *European Train Control System – ETCS* e uma função da *European Rail Traffic Management System – ERTMS*, sobre o controlo da *European Union Agency for Railways (ERA)*. O *CONVEL* permite assegurar elevadíssimos níveis de segurança de circulação, garantindo o cumprimento da sinalização e da velocidade autorizada de circulação pelos comboios. Apoia a atividade de condução do maquinista, avisando-o das condições de circulação e atuando no sistema de frenagem sempre que não for cumprido algum requisito de segurança [143]. O sistema é de simples compreensão contudo de complexa aplicação. Este sistema é constituído por “balizas”, nome dado aos emissores *wireless*<sup>10</sup> que funcionam por radiofrequência, localizados no centro da via, sobre as travessas. Estes funcionam bidireccionalmente, isto é, existe comunicação do comboio para *baliza*, e vice-versa. O seu grande objetivo é evitar que o comboio supere a velocidade máxima estabelecida para uma determinada via ou ultrapasse sinais de paragem. Estas *balizas* encontram-se ligadas a uma rede de *balizas* na via, que por sua vez se encontra ligado a um *mainframe*<sup>11</sup> que controla a sinalização e a posição dos comboios, em tempo real [144]. Os emissores são do sistema *EBICAB*, da série *EBICAB 700*, com especificações *ERTMS* requeridas pela *ERA*, respeitando a certificação *UNISIG* [145]. De salientar que este sistema foi originalmente desenvolvido pela Ericsson mas, atualmente, a Bombardier é proprietária da marca *EBICAB* [146], cuja implementação se encontra presente em cinco países: Portugal, Bulgária, Noruega e Suécia (com equipamentos de sistema *EBICAB 700*) e na Finlândia (com equipamentos de sistema *EBICAB 900*) [146]. Estas *balizas* não precisam de alimentação, pois são alimentadas com a transferência de energia aquando da transmissão de radiofrequência com o módulo de transmissão instalado no comboio [147]. Como concorrente destes equipamentos existe ainda o *ATC-2* da empresa Ansaldo.

Existem três tipos de *balizas*: Baliza Fixa, Baliza Transparente e *Euroloop*. A Baliza Fixa é programada, através de um equipamento *wireless* para transmitir a mesma informação para

---

<sup>10</sup> *Wireless* - Tipo de comunicação sem fios entre dois terminais.

<sup>11</sup> *Mainframe* – Computador central de controlo de velocidade e sinalização.

todos os comboios, que inclui a geometria da linha, as curvas e gradientes, e os limites de velocidade. Desta forma, esta pode notificar o comboio da sua localização, e da distância do próximo sinal, bem como alertar quanto aos limites de velocidade [148].

A Baliza Transparente ou Comutável, está ligada ao *Lineside Electronics Unit (LEU)*, equipamento que está entre a *baliza* e a restante interligação ao sistema [148][149]. As *balizas* encontram-se identificadas internamente e numeradas. Desta forma, com a passagem do comboio e respetiva transmissão, o comboio saberá em que sentido circula. Por norma, as *balizas* estão espaçadas em pares de duas travessas. No sistema *ETCS*, estas encontram-se espaçadas por três metros. As *balizas* também podem estar isoladas, mas tal apenas acontece quando estão interligadas a um grupo de *balizas* ou quando a função destas é apenas fornecer a localização. Podem ser ligadas até oito *balizas* num único grupo [147]. A *baliza* transmite para o comboio dados como indicações sobre sinalização. Este tipo de *balizas* faz parte do sistema de sinalização *ETCS*, de nível 1, abordados mais à frente. O *LEU* interliga o sistema de sinalização convencional aos demais, ligando a torre de coordenação ao restante sistema. A *baliza* instalada na via transmite informação para o comboio (UL - *uplink*<sup>12</sup>) e da mesma forma o comboio transmite informação relevante para a *baliza* (DL - *downlink*<sup>13</sup>). A velocidade de transmissão é suficiente para que, pelo menos, três mensagens sejam recebidas por um comboio a circular a uma velocidade até 500 km/h [147].

O *Euroloop* permite a transmissão contínua de telegramas, através de um cabo do tipo coaxial de alimentação das *balizas*, até 1000 metros. O cabo *Euroloop* tem sempre ligado, no término deste, uma *baliza* que serve como marcador de fim do *loop* (*End Of Loop Marker – EOLM*). A estrutura do telegrama é a mesma para todas as *balizas*. O *Euroloop*, originalmente, tinha a mesma frequência que as *balizas* europeias ou *Eurobalizas* mas, após a mudança para a especificação 2.0.1 em 2004, deixou de ter [147].

---

<sup>12</sup> *Uplink – Envio de informação da baliza para o comboio*

<sup>13</sup> *Downlink – Receção de informação na baliza do comboio*

Em termos de modulação, as *balizas* utilizam modulação em amplitude (*AM*) com frequência de 27,095 Megahertz (MHz), no DL, e modulação encriptada em frequência (*FSK*) com frequência de 3,951 MHz (para o “0” lógico) ou 4,516 MHz (para o “1” lógico) no UL. A taxa de transferência de transmissão é da ordem dos 564,48 kBit/s, suficiente para transmissão de três cópias de um telegrama, de modo a ser recebido por um comboio de passageiros que passa até 500 km/h. Já a frequência do *Euroloop* é da ordem dos 13,54750 MHz, metade da frequência da *Eurobaliza* [147][144].



**Figura 25 – Baliza EBICAB** [147]

O sistema *ERTMS* é dividido em três níveis: nível 1, 2 e 3. O nível 1 surge com a necessidade de incrementar o sistema convencional já existente de deteção e sinalização. A comunicação entre a via e o comboio é assegurada por *balizas* dedicadas para o efeito, no solo e lateral da via, ligadas ao centro de controlo de comboios. Ao receber a informação das *balizas*, o equipamento *ETCS* calcula automaticamente a velocidade a que circula o comboio e aplica a ação na próxima *baliza*, por exemplo a frenagem do mesmo. Esta informação é mostrada ao maquinista através de um ecrã dedicado para este sistema. A velocidade é controlada constantemente pelo equipamento *ETCS*. O principal benefício é a interoperabilidade, que ainda não é possível em Portugal, devido à diferença de sistemas implementados nos restantes países europeus [150].

O nível 2 do sistema *ERTMS* utiliza, para sinalizar o movimento do comboio, o *Radio Block Centre (RBC)*, a bordo da unidade usando o *Global System for Mobile Communications - Railway (GSM-R)* e não utilizando *balizas* laterais. Aqui, as *balizas* são fixas, transmitindo apenas a localização, gradiente, limite de velocidade, entre outros. O fluxo contínuo de dados, através do *GSM-R*, informa o maquinista da sinalização e estado da via antecipadamente, permitindo que o comboio atinja a velocidade máxima ou ideal, assegurando sempre a distância de travagem de segurança. O grande benefício é o custo mais reduzido quanto à manutenção pois não utiliza *balizas* laterais. Este nível também

representa a possibilidade de um aumento substancial da capacidade da via por permitir velocidades comerciais mais elevadas [150].

O *ERTMS* nível 3, ainda numa fase conceptual, permite a introdução de tecnologia “bloco em movimento”. Nos anteriores níveis, a determinação do movimento é feito usando “blocos fixos” – parte das vias entre dois pontos fixos que não podem ser usados por dois comboios ao mesmo tempo. Com o nível 3, informação precisa e contínua da posição é pedida diretamente pelo centro de controlo ao comboio, contrariamente ao que acontecia antes em que eram as *balizas* que forneciam esses dados. Com o comboio a monitorizar continuamente a sua posição, não são precisos “blocos fixos”. Assim, o próprio comboio será considerado um “bloco em movimento” [150].

Em Portugal, existe ainda o sistema de rádio solo-comboio. O rádio solo-comboio (sistema partilhado entre os Operadores de Transportes Ferroviários - OTF - e o Gestor de Infraestrutura - GI -) permite a comunicação por voz e dados entre os maquinistas dos vários operadores e os responsáveis pela regulação de tráfego do GI. Assim, as comunicações permitidas são Posto de Comando-Maquinista, Estações-Maquinista e Maquinista-Maquinista. Também em Portugal, de forma a uniformizar os sistemas com os restantes países europeus, as diretivas comunitárias determinam a progressiva implementação do *GSM-R*, de modo a adequar ao *ERTMS* nível 2, que prevê a eliminação da sinalização fixa lateral e a ativação do conceito de cantão móvel [143]. A tabela 4 mostra alguns dados sobre o estado atual do CF em Portugal.

**Tabela 4 – Dados ferroviários das linhas e sistemas de segurança, em Portugal [143]**

<b>Linhas e Ramais</b>		<b>Extensão de linha (km)</b>
<i>Em Exploração</i>		2.794
<i>Eletrificados</i>		1.629
<i>Rede Principal</i>		1.117
<i>Rede Complementar</i>		940
<i>Rede Secundária ou Regional</i>		737
<i>Sistemas de Segurança Comando e Controlo</i>	<i>CONVEL EBICAB 700</i>	1.637
	<i>Rádio Solo-Comboio</i>	1.531
<i>Sinalização</i>	<i>Elétrica/Elétronica</i>	1.649
	<i>Mecânica</i>	1.137

## 4.5. MATERIAL CIRCULANTE

Por material circulante entende-se todo o material e maquinaria que é rebocado e circula nos carris, com recurso à força de tração como locomotivas ou automotoras. Assim, locomotivas, automotoras, carruagens de passageiros e vagões são considerados material circulante [124]. As carruagens conforme as conhecemos hoje, sofreram enormes transformações ao longo dos tempos. Os vagões (*wagon*) são provenientes do modelo existente nas minas, no primórdio dos séculos.

No começo do CF, ainda com a tração animal, os vagões tinham a finalidade de transportar o minério recolhido mas, posteriormente, foram adaptados ao transporte de outros materiais e mesmo passageiros. Já referenciado anteriormente, o *dandy wagon* era um vagão utilizado para transportar cavalos em comboios de gravidade [151]. Foram amplamente utilizados na via de bitola estreita da *Ffestiniog Railway*, em Gales, entre 1836 e 1863. A *Ffestiniog Railway* foi fundada em 1832 por Henry Archer em Dublin. Já a conceção e construção desta VF foi obra de James Spooner de Worcestershire e tinha como objetivo a movimentação de ardósia de um local elevado para o cais de embarque, mais propriamente de Blaenau Ffestiniog para Porthmadog, em Gales. A via terá sido criada considerando a gravidade da descida para que os cavalos que puxavam, no regresso, os vagões vazios, pudessem entrar, comer e descansar no vagão *dandy* (figura 26). A bitola de 597 mm (23,5 polegadas), correspondendo ao tamanho que era utilizado na via para as pedreiras de onde era extraída a ardósia, era grande suficiente para permitir que os cavalos trabalhassem de forma eficiente quando puxassem os vagões e, ao mesmo tempo, estreita suficiente para permitir à VF adaptar-se às curvas necessárias para vencer os 19 km de terreno montanhoso onde se inseria [152].

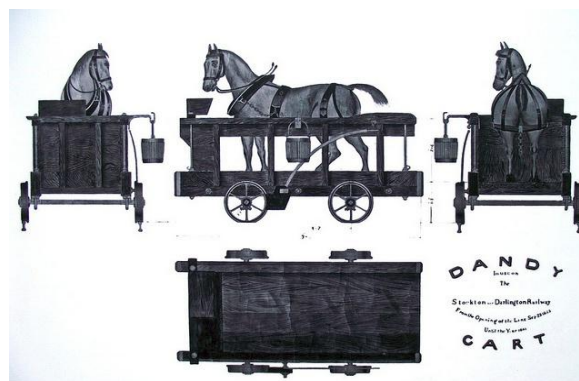


Figura 26 – *Dandy Wagon* [153]

Após alguns anos de evolução, é adaptado o mesmo vagão de transporte de minério ao transporte de passageiros, na inauguração da linha Liverpool-Manchester, sendo introduzidas várias melhorias na qualidade de transporte dos passageiros, como o caso do ar condicionado. Também no transporte de cargas, a evolução foi considerável, potenciando as trocas comerciais, tornando-as mais acessíveis e de rápida disponibilização.

Quanto à caracterização, os vagões podem ser abertos ou fechados, de líquidos ou sólidos, dependendo da finalidade a que se destinam. Os vagões tiveram uma enorme revolução quando o comboio surgiu em Portugal, o que levou a que as cidades em redor melhorassem os acessos às estações ferroviárias, contrariamente ao que acontecia com os acessos aos portos marítimos. Contudo, e apesar de ser lançado um ano após inauguração do CF, a adesão e desenvolvimento do serviço de carga não foi imediato, tendo estado repleto de obstáculos, em particular devido ao tempo que se perdia na carga e descarga e à falta de estradas que ligassem as estações às populações [124].

As carruagens de passageiros, tinham a sua origem nos vagões abertos de mineração. Como tal, conforto e organização não existiam. Desta forma, as carruagens eram vagões abertos sem bancos para os passageiros. Ao longo do tempo, surgem as carruagens cobertas e com assentos, evoluindo de forma a contemplar o conforto dos passageiros e peso da própria carruagem. Primeiramente, os assentos em madeira não primavam pela comodidade. Com o aparecimento de novos materiais, os assentos passam a ser de alumínio, cobre e aço. O aquecimento das carruagens é também introduzido para fazer frente ao frio sentido no transporte em época de Inverno, numa primeira instância pelo vapor da locomotiva e, mais tarde, pelo ar condicionado [124]. Em pleno século XX, na década de 40, chegam as primeiras automotoras a Portugal, fazendo pequenos percursos, como por exemplo na periferia de Lisboa. Mas, no fim do século, estas sofrem uma transformação, tendo em vista a comodidade e capacidade de transporte, e são criadas as primeiras automotoras de dois pisos. Com a modernização e desenvolvimento do CF em Portugal, tornava-se evidente a necessidade de manutenção do material circulante. Assim surgem, oficinas e empresas altamente especializadas na manutenção, conservação, reparação e vigilância do estado geral deste material.

Foi o caso da empresa portuguesa *Sociedades Reunidas de Fabricações Metálicas* (SOREFAME) que era especializada na construção de componentes elétricos e mecânicos pesados. Fundada por Ângelo Forte, em 1943, afirmou-se no setor na década de 1950

como importante fabricante de material circulante ferroviário. Integrou a *holding* nacional *Sistemas de Energia, Transportes e Equipamentos* (SENETE) em 1991, tendo sido inserida no universo da ABB, em 1994, que se fundiu em 1996 com a Daimler, dando origem ao grupo Adtranz. Em 2001, a Adtranz foi adquirida pela Bombardier [154].

O percurso da Sorefame, no seio ferroviário, foi repleto de sucessos e reconhecimentos do setor. No início da sua atividade, com vista ao desenvolvimento do conhecimento e do produto, esta firma um contrato-licença com a empresa americana *Budd Company* para a transferência de tecnologia e processos de engenharia, visto esta ter sido pioneira na tecnologia do aço inoxidável na década de 1920. Tal estratégia traduziu-se, ao longo dos primeiros vinte anos de atividade ferroviária, no projeto e fabrico, por parte da Sorefame, de vários e diferentes tipos de veículos em aço inoxidável para a CP. Entre carruagens, bares, compartimentos, restaurantes, locomotivas, unidades múltiplas elétricas e a *diesel*, totalizam quase 1200 veículos [154].

Era importante, para a Sorefame estar presente em mais áreas ferroviárias. Assim, para a área da engenharia de *bogies* e veículos do Metropolitano de Lisboa, são celebrados, respetivamente, contratos-licença com a suíça *Schindler Wagons* e com a alemã *Linke Hofmann Bush*. Na área de integração elétrica e mecânica, é estabelecido um consórcio cujos impulsionadores foram a AEG, a Alstom e a Siemens [154].

Com a eletrificação da Linha de Sintra, a Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses reitera a intenção de continuar a utilizar veículos com caixas metálicas, dando oportunidade à Sorefame de fornecer essas carruagens, visto ter estabelecido um consórcio respeitante à construção metálica [154]. Com a modernização e com a celebração de novos consórcios com empresas internacionais no setor ferroviário, a Sorefame capta para si todo o fornecimento de material ferroviário aos Caminhos de Ferro Portugueses. Desta forma, instalou uma unidade de produção na Amadora [154].

Para além dos dois grandes clientes em Portugal, CP e Metropolitano de Lisboa, esta também exportava. Assim, nos EUA, torna-se uma realidade o desenvolvimento de carruagens para o Metropolitano de Chicago, em conjunto com a *Boeing*; a conceção de unidades para o *South-Eastern Pennsylvania Transportation Authority* (SEPTA), em Filadélfia, e o Metro de Los Angeles; o desenvolvimento de Unidades Múltiplas Elétricas

para os suburbanos de S. Paulo, um projeto da *Ferrovias Paulista S.A* (FEPASA), no Brasil. Todos estes exemplos ilustram a sua capacidade de exportação [154].

Em Portugal, alguns casos de sucesso foram o Metropolitano de Lisboa e do Porto, este último pela Bombardier; a Unidade Quadrupla Elétrica da linha de Sintra e a Unidade Múltipla Elétrica (figura 27), ambas para a CP, que integraram a modernização dos comboios suburbanos [154].



**Figura 27 – Unidades Múltiplas Elétricas da Bombardier, Estação S. Bento [155]**

No que respeita à manutenção do material circulante, é importante realçar a *Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário* (EMEF), cuja atividade da metalomecânica ferroviária se centra na reparação, modernização e reabilitação de material circulante. Do seu longo historial, salienta-se a responsabilidade da manutenção do material circulante da CP, a manutenção do material circulante do Metro do Porto, bem como a internacionalização para mercados como Argentina, Suíça ou Perú. A empresa assegura ainda a manutenção do material circulante dos vários operadores em Portugal. A EMEF está organizada em quatro grandes polos oficiais: Parque Oficial Norte (*PON*), Parque Oficial Centro (*POC*), Parque Oficial Sul (*POS*) e Unidade de Manutenção de Alta Velocidade (*UMAV*). O *PON* fica situado em Guifões, Matosinhos, e garante a manutenção de toda a zona norte. O *POC* fica situado no Entroncamento e assegura toda a manutenção da zona centro; O *POS* fica situado no Barreiro e tem como compromisso toda a manutenção da zona de Lisboa e sul do país. A *UMAV* está situada em Contumil, no Porto, e assegura toda a manutenção especializada da frota Alfa Pendular. A EMEF é também responsável pela atual remodelação dos Alfa Pendulares [156].

#### **4.6. SUPERVISÃO DA INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA**

No que respeita à infraestrutura, esta é partilhada pelos vários operadores e gerida pela *Infraestruturas de Portugal* (IP). Assim, todos os sistemas de segurança, regras, deveres e direitos são comuns a todos. Cabe ao Gestor da Infraestrutura (GI) assegurar que estas são cumpridas, implementadas e supervisionadas, quer em termos processuais, quer em termos de qualidade [143]. É da competência do GI, no âmbito do sistema de gestão de segurança, elaborar uma avaliação de risco, consistindo esta num levantamento de pontos na rede ferroviária de acordo com o nível de risco associado devido a variados motivos (riscos associados a entidades externas ao sistema ferroviário, alterações na infraestrutura, atividades do GI, entre outros). O GI tem ainda a seu cargo, o Plano de Emergência que, em articulação com as empresas de transporte ferroviário e os serviços públicos de socorro, garantem uma resposta adequada para cada situação, em toda a rede ferroviária nacional e nas instalações que suportam a atividade da empresa. O Plano de Emergência tem como objetivo regulamentar e orientar a atuação dos meios humanos e materiais em situações de emergência [143].

De modo a supervisionar toda a infraestrutura, foram criados Centros de Comando Operacionais (CCO), que vieram complementar e modernizar os antigos CTC. Com esta modernização, era pretendido:

- Adequação do comando às exigências de exploração ferroviária no seu todo;
- Integração, nos novos Centros de Comando, de todas as funcionalidades que permitam uma rápida resposta dos diversos sistemas que contribuem para a disponibilidade e fiabilidade da infraestrutura;
- Transformação dos antigos Postos de Comando/CTC em verdadeiros CCO;
- Definição dos limites geográficos dos Centros de Comando que devem dimensionar-se de forma a integrar todas as linhas da respetiva área geográfica [143].

Desta forma, com a implementação dos CCO, foram integradas nestas funções como regulação de tráfego (para troços ainda sem sinalização eletrónica), CTC (para troços com controlo e comando da circulação eletrónica), supervisão da circulação, telecomando da

catenária, Sistema de Informação ao Público (SIP), videovigilância, função infraestrutura e telecomunicações [143].

Os CCO implementados em Portugal, pioneiros numa nova forma de gestão ferroviária (integração numa mesma sala de comando de todas as funcionalidades e competências do gestor da infraestrutura que contribuem para a exploração ferroviária), representam o que de mais avançado existe a nível mundial. São alvo de *benchmarking* internacional e têm servido de referência a empresas ferroviárias de todo o mundo. Devido às novas tecnologias implementadas nos CCO, todo o acompanhamento informático é virtualizado, podendo ser deslocalizado em qualquer momento [143].

Em termos de CCO, existem dois a nível nacional: Porto e Lisboa estando em estudo a modernização do CTC de Setúbal. O tráfego e a área de intervenção pode ser verificado na tabela 5.

**Tabela 5 – Dados sobre os CCO [143]**

<b>CCO</b>	<b>Localização</b>	<b>Quantid. comboios</b>	<b>% comboios</b>	<b>Extensão Superv. (km)</b>	<b>Área Interv. (km<sup>2</sup>)</b>
Porto	Contumil	530	23%	470	10388
Lisboa	Braço de Prata	1650	70%	1250	6950
Setúbal	-	170	7%	910	-

Dos vários equipamentos utilizados na supervisão e monitorização da infraestrutura nestes CCO são de destacar os mais importantes, no que concerne aos equipamentos eletrónicos nas vias e estações:

- *Balizas*;
- Contador de eixos;
- Circuitos de via.

No que respeita às aplicações informáticas, o CCO conta com:

- Gráficos Automática de Comboios (GAC);
- Programação Informatizada de Itinerários (PII);
- Seguimento Automático de Comboios (SAC);
- Sistema Auxiliar de Exploração (SAE).

Estas aplicações têm por base um ficheiro horário dos comboios que é diariamente importado. O acompanhamento, nas aplicações pode ser feito através do monitor do computador colaborador do CCO ou através do *videowall* presente no CCO, para uma visão mais periférica e abrangente.

Apesar de grande parte da infraestrutura já contar com um elevado nível de automatização, devido ao planeamento que é feito, é sempre possível a intervenção humana nas aplicações envolvidas.

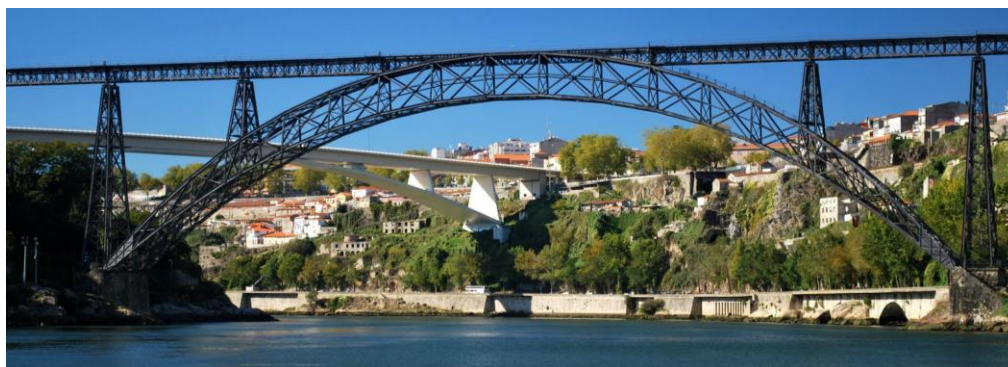
#### **4.7. MONUMENTOS E MARCOS FERROVIÁRIOS**

A arquitetura das estações, em Portugal, depende muito da região onde se localizam. Por exemplo, nas estações do Alentejo, o edifício inserido na estação tem uma configuração muito simples, com janelas e portas pequenas. Já nas estações da linha do Norte, a linha Porto-Lisboa, os edifícios são constituídos por dois pisos, integrados na paisagem. Em estações como Viana do Castelo, a antiga estação de Braga e Valença, a construção é feita com placas de granito. Nas estações do Douro e Minho, os edifícios mostram ainda a grande influência dos tempos dos Caminhos de Ferro do Estado, que se pautam por linhas estreitas, estações mais pequenas e mais simples. No Centro, a construção da estação dependia da importância da localidade onde esta se inseria [124].

De entre algumas das mais belas, três construções são incontornáveis como é o caso da estação de São Bento, de Santa Apolónia e a Gare do Oriente pelas suas arquiteturas arrojadas ou grandiosidade representativa no setor ferroviário em Portugal. A estação de São Bento, considerada das mais belas mundialmente [157], teve, durante a sua construção, influências francesas, tendo sido delineada pelo arquiteto José Marques da Silva. A estação nasceu no local do Mosteiro de São Bento de Avé-Maria, tendo sido esta uma obra ferroviária prioritária, devido à sua importância no setor. O Mosteiro, no final do século XIX encontrava-se em mau estado de conservação e terá sido a melhor localização para a estação. Apesar de degradado, a demolição do Mosteiro foi contestada pela Irmandade de São Bento da Avé-Maria. Com a abertura do Túnel Avé-Maria, mais tarde rebatizado como Túnel D. Carlos, e a construção da estação, foi inaugurada em 1896 a estação provisória de São Bento com grande pompa e circunstância. Mas foi em 1888 que foi reanalisada a necessidade de um terminal de maior envergadura de modo a oferecer qualidade aos passageiros de São Bento. Assim, em 1916, é inaugurado o novo e definitivo

edifício da Estação de São Bento. Ao longo dos anos, a estação foi sofrendo pequenas alterações de modo a acompanhar os tempos e tendências de tráfego. Das mais relevantes foi a instalação da catenária para possibilitar o tráfego de tração elétrica, em 1965 [158].

No que respeita à construção de pontes e túneis, estas revelaram-se verdadeiras obras de arte e de engenharia e demonstraram ser a solução para ultrapassar obstáculos que surgiam na construção da VF. Em Portugal, inicialmente, para a construção das pontes, o material usado era alvenaria [124]. Mas rapidamente ocorre a evolução para as pontes metálicas, pois ajustavam-se à paisagem e tornavam-se mais leve [124]. Posteriormente deu lugar à utilização de ferro fundido e aço [124]. Mas o material metálico usado para suportar toneladas ao longo dos anos, não se mostrara a melhor opção, devido à rápida degradação e elevada manutenção. Foi o caso da ponte D. Maria Pia (figura 28), no Porto, que ligava a margem norte à margem sul do rio Douro, inserida na linha do Norte. Esta foi desenhada e construída pela casa Eiffel [124]. Foi em 1876 que começou a ser construída, tendo sido terminada a construção em outubro de 1877. Aberta ao tráfego ferroviário um mês depois, com uma única via, esta foi considerada como uma das maiores obras-primas de Gustave Eiffel. Ao fim de quase 114 anos, a ponte foi desativa por questões de segurança, fruto da falta de manutenção adequada. Em junho de 1991, foi substituída por uma moderna ponte com via dupla, a Ponte S. João.



**Figura 28 – Ponte D. Maria Pia, Porto [159]**

Os túneis foram também de uma importância vital cujo objetivo e contributo era o mesmo que o das pontes: ultrapassar obstáculos na construção da VF, diminuindo custos que de outra forma disparariam. Com a mesma importância que o túnel de Frejus, Gotthard ou Eurotúnel tiveram na ferrovia europeia, também o túnel do Rossio, D. Carlos e de Albergaria dos Doze, contribuíram para a expansibilidade da VF, encurtando distâncias e ultrapassando obstáculos. Outros nomes foram marcos na história ferroviária portuguesa.

Foi o caso do arquiteto e ferroviário Cottinelli Telmo que projetou várias estações, armazéns de abastecimento, bairros e colónias de férias, destinados aos ferroviários e suas famílias [124].

Também na arte decorativa, o azulejo sobressaiu na decoração das estações, ao longo de Portugal. Este tipo de decoração foi inicializado no reinado de D. João V, no século XVIII, de modo a promover o sentido patriótico, incentivando, também, a produção artística nacional [124].

# 5. O PRESENTE E O FUTURO DO COMBOIO

A evolução observada no CF e no comboio apontam para um desenvolvimento futuro promissor, com mudanças inimagináveis. Pelo facto de o transporte público ter adquirido uma grande importância nas sociedades atuais, novas tendências futuras emergiram, com o intuito de proporcionar um transporte rápido e seguro, como é o caso do *Maglev* e do *Hyperloop* que se apresentam neste ponto.

## 5.1. MAGLEV

Novas necessidades emergiram durante o século XX. Seja a nível populacional, residencial, de serviços e de transportes, a mudança sempre foi constante e imperiosa. O transporte público ganhou uma redobrada importância nas sociedades, com novas tendências energéticas a surgirem. A exigência no transporte público, no que respeita à comodidade e rapidez, foi cada vez maior e cada vez mais importante. Assim, com o desenvolvimento da alta velocidade surgem novas tecnologias e oportunidades.

Em 1911, o físico holandês Heike Kamerlingh Onnes, descobriu a supercondutividade, propriedade física intrínseca a certos materiais [160]. Kamerlingh observou que a resistência elétrica de alguns materiais como o mercúrio, estanho e chumbo desapareciam

completamente quando eram submetidos a muito baixas temperaturas, ou temperaturas críticas [160]. Após esta descoberta, uma nova era tecnológica dos condutores e eletricidade surgiu. Em 1986, a International Business Machines (IBM), em Zurich, encetou experiências com supercondutores que levaram à descoberta de aplicações sem precedentes em áreas como transportes, optoeletrônica, militar, aviação e aeroespacial [160].

Os supercondutores possuem propriedades únicas que os distinguem dos demais materiais condutores. Estes materiais são conhecidos pela sua enorme condutividade e baixa resistividade elétrica. Estes são capazes de manter uma corrente elétrica, mesmo sem aplicação de nenhuma tensão de manutenção. Várias experiências demonstraram que estas correntes podem permanecer no supercondutor, sem qualquer perda, durante longos anos [160]. No caso de um condutor normal, a corrente elétrica é um fluxo de um conjunto de elétrons livres que se movem de um ponto para outro. O constante choque com outros elétrons e átomos do material percorrido origina a por resistência elétrica, isto é, a dificuldade de movimentação dos elétrons, que se traduz em perda de energia. Contudo, nos supercondutores, este fluxo é diferente. Num supercondutor, o fluxo é feito com pares de elétrons, conhecidos como Pares de Cooper. A associação destes pares é causada por forças atrativas entre elétrons por interação de *fônons*. Desta forma, o fluxo não é espalhado e livre como nos condutores normais, criando um superfluxo conduzindo e orientando os elétrons, sem perda de energia. Com esta descoberta, e de acordo com o já referido, surgem oportunidades e necessidades importantes na área dos transportes, cujo recurso aos supercondutores começa a ser estudado e explorado ainda no século XX [160].

No presente, a economia desenvolve-se de forma muito rápida e os transportes são um foco para o desenvolvimento social e económico. Com o aumento do padrão de vida, as pessoas tendem a viajar mais, tornando as necessidades dos transportes cada vez mais prementes [160]. Para servir adequadamente uma nova geração de transportes públicos é importante atender a alguns requisitos como rapidez, fiabilidade e segurança. Estes, devem ainda ser amigos do ambiente, com baixa manutenção, e de forma compacta e leve [161]. Postas as premissas, o *Maglev* é um forte candidato para satisfazer todas estas condições. O *Maglev* é um transporte de alta tecnologia que tem por base de funcionamento a atração e repulsão de campos magnéticos [160]. Na sua conceção mais atual e moderna, o *Maglev* circula numa via especialmente concebida para este tipo de veículo. Não apresenta carris e pode assemelhar-se a uma pista/corredor, constituída por painéis laterais (figura 29) [160].



**Figura 29 – Maglev na via de circulação [162]**

O comboio é equipado com eletroímãs e no corredor de circulação deste, são instaladas bobinas eletromagnéticas. Quando a corrente é ligada, o campo magnético produzido pelas bobinas e pelos eletroímãs no comboio permanece sempre igual, produzindo um efeito de repulsão entre dois polos iguais, fazendo com que o veículo levite ao longo do seu movimento [160]. Também são instaladas, nos painéis laterais, bobinas eletromagnéticas, que produzem forças atrativas em conjunto com eletroímãs instalados no comboio, produzindo um movimento que impele o veículo para a frente [160]. O *Maglev* pode ser datado de 1934, quando Hermann Kemper, na Alemanha, o patenteou. Assim, o desenvolvimento do *Maglev* viu uma aceleração acentuada na década de 1960, que resultou em testes com protótipos na década de 1990, para ser implementado, como transporte de uso público, em 2003 em Xangai [161]. Por ser um meio de transporte tão promissor, muita pesquisa tem sido feita para o desenvolvimento de modelação e análise de máquinas elétricas lineares, supercondutividade e ímãs permanentes [161]. O *Maglev* oferece inúmeras vantagens face ao comboio tradicional, como por exemplo a eliminação de rodas e o contacto com o carril, que implica também uma redução nos custos com a manutenção da via; uma distribuição de peso de carga que reduz os custos de construção da via, visto o *Maglev* ser mais leve dada a sua construção em fibra; devido à pista/corredor onde circula, o *Maglev* não poderá descarrilar; redução de ruído e vibração devido à ausência de contacto com os carris; a ausência de contacto com carris leva a que este não tenha escorregamento ou deslize; permite rápidas acelerações e desacelerações; elimina a necessidade de engrenagens, acoplamento, eixos, rolamentos, etc.; alcança maiores graus de curvatura num raio menor e é menos suscetível a condições climáticas [161]. Contudo, existem algumas considerações que devem ser tidas em conta no que respeita à sua implementação. Os motores que geram a propulsão ao *Maglev*, deverão

também fornecer força de travagem através de interação eletromagnética; quanto maior o peso, maior é a energia necessária para gerar forças de levitação; devido ao facto do *Maglev* circular numa pista/corredor específico, é difícil a ramificação ou comutação da via; não se pode ainda ignorar o efeito dos campos eletromagnéticos gerados na levitação, propulsão e travagem sobre os passageiros, sendo para isso necessário dotar as carruagens de blindagem eletromagnética. Esta blindagem pode ser realizada através da aplicação de ferro entre os espaços, utilizando para tal a matriz eletromagnética de Halbach [161]. Conhecendo um pouco mais os conceitos envolvidos neste tipo de transporte, é possível dividir em quatro temas pertinentes: levitação, propulsão, direção e transferência de energia para o veículo [161].

### 5.1.1. LEVITAÇÃO

No que concerne à levitação, existem três tipos de sistemas:

- I. Suspensão eletromagnética (*Electromagnetic Suspension - EMS*);
- II. Suspensão eletrodinâmica (*Electrodynamic Suspension - EDS*);
- III. Suspensão eletromagnética híbrida (*Hybrid Electromagnetic Suspension - HEMS*).

Na EMS, a levitação ocorre com base na força de atração magnética entre a via e os eletroímãs do comboio. A esta metodologia está associada instabilidade magnética devido à característica do circuito magnético. Desta forma, é necessário um controlo preciso do intervalo de ar entre comboio e via (*air-gap*) de modo a manter uma distância uniforme. O EMS é, geralmente, utilizado para levitações da ordem dos 10 mm de *air-gap*. À medida que a velocidade aumenta, o controlo torna-se mais difícil. No entanto, o EMS é mais simples, tecnicamente, do que o EDS, sendo capaz de levitar sozinho a velocidades muito baixa ou mesmo zero (o que é impossível com tipo EDS) [161]. O sistema EMS permite duas possibilidades: levitação e direção integradas (utilizado na Coreia e no Japão) e levitação e direção separadas (utilizado na Alemanha) [161]. Das particularidades de cada um destes sistemas, o primeiro é mais orientado a um tipo de operação *low-cost*, pois o número de eletroímãs envolvidos e controlos é muito menor que no segundo sistema. A força criada para a direção é gerada automaticamente pela diferença da relutância. O segundo tipo de sistema é mais orientado a uma operação de AV pois a levitação e a direção não interferem entre si mas o número de controladores aumenta. Em termos de consumo energético, o sistema integrado consome menos que o sistema separado, contudo, com o aumento da velocidade no caso do sistema integrado, as interferências magnéticas

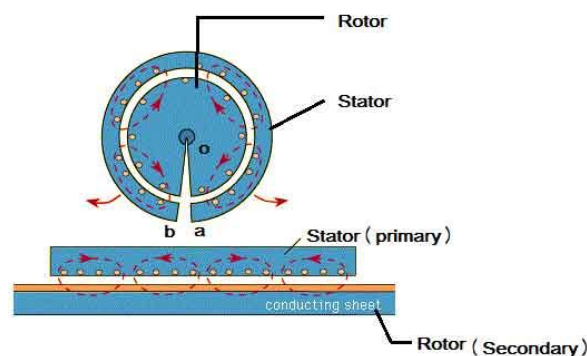
também aumentam entre o circuito de levitação, *air-gap*, e o circuito de direção, tornando-se extremamente difícil o seu controlo[161]. Existem estudos que apresentam, para o funcionamento do sistema EMS, a possibilidade de criação de supercondutores a alta temperatura, desenvolvendo eletroímãs mais económicos comercialmente. O único entrave, ainda em estudo, é a questão do arrefecimento [161].

Na EDS, o sistema utiliza repulsão entre os eletroímãs do comboio e as bobinas da via para a levitação, o que produz o movimento do comboio. Por ser um método estável, do ponto de vista eletromagnético, não necessita de controlo de *air-gap*. Este sistema é indicado para operação de alta velocidade [161], contudo precisa de velocidade suficiente para gerar correntes induzidas para a levitação. Assim uma espécie de roda, como um pneu de borracha, é utilizada abaixo de certas velocidades [161]. No que respeita aos ímãs, podem dividir-se em ímãs permanentes ou supercondutores magnéticos. Novos ímãs permanentes, como o ímã de Halbach (*Halbach Array*) estão a ser introduzidos e considerados nos *Maglev (Inductrack)*, nos EUA). A utilização dos supercondutores magnéticos, é uma aplicação complexa que implica um controlo apertado do hélio líquido [161].

Por fim, a HEMS é um sistema que, no seu geral, combina o EMS e os ímãs permanentes, tendo estes a função de sustentação do comboio. Este sistema requer uma variação muito grande de corrente [161].

### 5.1.2. PROPULSÃO

O sistema de propulsão é, na sua essência, simples de entender quando comparado com um motor rotativo elétrico. Os motores utilizados no *Maglev* são motores lineares com rotor e estator mas com particularidades diferentes, conforme se pode verificar na figura 30 [161].



**Figura 30 – Motor linear [163]**

Existem dois tipos de motores lineares que são utilizados nos *Maglev*:

- I. Motor linear de indução (*Linear Induction Motor – LIM*)
- II. Motor linear síncrono (*Linear Synchronous Motor – LSM*)

O LIM é um motor assíncrono, com o mesmo princípio de funcionamento do motor de indução, que é tipicamente desenhado para produzir movimento em linha reta. Tem um primário e secundário com comprimento finito, o qual gera o efeito final, ao contrário do motor convencional que tem um efeito contínuo. Para o *Maglev*, são utilizados dois tipos de primários: curtos ou longos. No caso dos primários curtos, as bobinas do estator estão alojadas no comboio, e tornam a conceção mais barata; no caso dos primários longos, as bobinas do estator estão alojadas na via, e adequam-se mais à AV [161].

O LSM é um motor cuja parte mecânica que se movimenta, está em sincronismo com o campo magnético gerado, ou seja, a sua velocidade é a mesma que a velocidade do campo magnético. O conceito utilizado para este motor distingue-se do motor linear de indução, isto é, os termos primário e secundário deixam de ser utilizados. Passam a ser denominados por armadura, para a parte geradora da onda magnética, e excitação, responsável pelo fornecimento do fluxo magnético [164].

### **5.1.3. DIREÇÃO**

O *Maglev* é um sistema sem contacto com a via, pelo que requer uma força orientadora para o deslocamento lateral. Da mesma forma que a levitação, a direção é realizada de forma eletromecânica, com recurso a forças de repulsão ou atração magnética. Desta forma podemos então distinguir [161]:

- I. Uso de forças magnéticas de repulsão (para AV);
- II. Uso de forças magnéticas de atração (para velocidades baixas-médias).

A constituição do sistema conta com bobinas localizadas na parte lateral da pista/corredor, designadas de bobinas de levitação, cuja configuração é em forma de "8", de acordo com a figura 31, fazendo com que, quando o *Maglev* se aproxima da lateral do corredor, seja induzida nas bobinas uma corrente elétrica, o que levará à repulsão do comboio por parte das bobinas de levitação mais próximas e à força de atração das bobinas que se encontram mais afastadas [165].



**Figura 31 – Bobinas e corredor de um Maglev eletrodinâmico [165]**

#### **5.1.4. TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA**

Mesmo que todos os *Maglev* tivessem baterias a bordo, o fornecimento de energia seria sempre necessário para levitação, propulsão, equipamentos elétricos, recarga de baterias, etc. A transferência de energia ao longo de toda a pista/corredor envolve o uso de um gerador linear ou um contacto mecânico baseado na velocidade de operação [161].

No caso de operações de pequena e média velocidade (até 100 km/h), o *Maglev* utiliza um contacto mecânico tal como o pantógrafo. Deste modo, o modelo LIM de primário curto é usado em operações de baixa-média velocidade [161]. No caso de operações de alta velocidade, já não é possível a utilização de um contacto mecânico. Assim, têm a sua própria forma de fornecer a potência ao veículo a partir do solo. A transferência de energia ocorre durante o movimento do veículo, sendo fornecida pelo gerador linear, a partir do campo eletromagnético gerado [161].

O *Maglev* é sem dúvida uma excelente opção de futuro, contudo, é de referir o avultado custo de implementação necessário. [160]. Uma alternativa é a utilização de supercondutores a baixa temperatura. Isso fará com que as bobinas recebam correntes elétricas mais fortes com a finalidade de produzir campos eletromagnéticos mais fortes, necessários para a levitação e propulsão [160]. Devido ao facto de ser necessário hélio líquido para arrefecer o condutor até uma temperatura em que este se torne supercondutor, os custos são muito elevados [160]. Além deste entrave, outra questão do foro ambiental se levanta: a tecnologia de supercondutores a baixa temperatura implica um maior consumo de energia elétrica que os condutores magnéticos normais. Os fortes campos magnéticos

gerados são outros fatores que levantam preocupação para o ser humano e para o meu ambiente [160]. Se se considerar que o *Maglev* com supercondutores a baixa temperatura poderia ver as dificuldades ultrapassadas com a investigação na área, pode aceitar-se que seria uma excelente solução e seu uso para o transporte urbano [160]. Mas, apesar dos avultados custos que esta construção implica, quer a Alemanha, com o *Transrapid* (figura 32), quer o Japão, com o *MLX01* (na figura 33) inovaram com o lançamento deste revolucionário meio de transporte.



**Figura 32 – *Transrapid*, Alemanha [166]**



**Figura 33 – *MLX01*, Japão [167]**

## **5.2. HYPERLOOP**

Ainda é escassa a informação sobre este novo avanço de transporte de alta velocidade, pois ainda se encontra em fase de testes e não se prevê a exploração pública do mesmo. Contudo, é inequívoco: o *Hyperloop* está a revolucionar a AV.

Idealizado por Elon Musk [168], criador de marcas como a Tesla Motors, o *Hyperloop One* é um projeto que, caso seja bem-sucedido, fará viagens de 480 km em apenas 30 minutos, cerca de 3 segundos por km [169]. O sistema utiliza a propulsão elétrica para acelerar um veículo de carga através de um tubo num ambiente de baixa pressão. O veículo autónomo levita ligeiramente acima da base e desliza a uma velocidade elevada. Com este sistema alegadamente evitam-se as emissões diretas de poluentes, o ruído, o atraso, as preocupações climáticas e o erro do condutor [170]. Já em 2016, será aberta uma fábrica de produção do *Hyperloop* que ficará localizada no Nevada, EUA. A fábrica irá construir e testar vários componentes para o *DevLoop*, um protótipo do sistema completo (figura 34), que será testado em 2017 [169].



**Figura 34 – Hyperloop, EUA [171]**

É inclusivamente, equacionada a hipótese do *Hyperloop* ser implementado comercialmente na Europa. Depois dos testes no Nevada, EUA, em maio de 2016, várias são as empresas e países que dizem já estar a trabalhar nas suas próprias versões de sistemas de transporte super rápido. Um pré-estudo de viabilidade feito pela KPMG, com referência ao *Hyperloop*, propõe tornar uma viagem de 300 milhas com duração de 17 horas, entre Helsínquia e Estocolmo, numa viagem de 28 minutos. A apresentação indica que o investimento seria na ordem dos 19 biliões de euros, com velocidades a rondar os 1000 km/h. Deste investimento, 3 biliões seriam para construir um túnel através das ilhas Aland, um arquipélago entre a Suécia e Finlândia, no Mar Báltico [172]



## 6. A MATEMÁTICA E O CAMINHO DE FERRO

Neste capítulo procurou-se utilizar a matemática para explicar os sistemas ferroviários, mais concretamente o caminho de ferro. Na verdade, a implementação de fractais neste contexto de sistemas de transportes tem sido uma realidade, pois o recurso à geometria fractal tem permitido ampliar o conhecimento e o desenvolvimento nesta área específica do conhecimento.

### 6.1. O FRACTAL E A SUA DIMENSÃO

Foi, em 1975, que Benoit Mandelbrot utilizou, pela primeira vez, o fractal [173]. Os fractais são formas geométricas que colocam problemas para serem classificadas nos moldes da Geometria Euclidiana devido, principalmente, a três características fundamentais que os definem e distinguem de outras formas: auto-similaridade em diferentes níveis de escala, dimensão fractal e complexidade [174]. A sua auto-similaridade leva a que tenham sucessivamente configurações similares à configuração inicial do objeto analisado.

Existem, contudo, fractais que são igualmente formados por minicópias, mas estas são anisotrópicas<sup>14</sup>, isto é, não são mantidas fixas às proporções originais em todas as direções. Ao se passar de uma escala para outra, observa-se que o tamanho destas cópias não varia uniformemente em todas as direções do espaço. Neste caso, os fractais são chamados de auto-afins, pois caracterizam-se pelas configurações com auto-afinidade. Como exemplo destes fractais encontrados na natureza, podem referir-se as células tumorais [173].

Quanto à sua caracterização, caso o fractal apresente uma auto-similaridade exata, pode dizer-se que é um fractal determinístico. Entende-se a auto-similaridade exata como a invariância da estrutura após uma transformação isotrópica<sup>15</sup>, com a mesma intensidade em todas as direções [173].

Várias formas e eventos encontrados na natureza não conseguem ser explicados através da matemática convencional. Desta forma, a necessidade de se recorrer a uma matemática mais específica, que explique tais eventos e formas, torna-se evidente. Esta é denominada como Matemática dos Fractais. Quer o padrão de formação de nuvens, quer o padrão de crescimento e disposição dos ramos e folhas de uma árvore, podem ser recriados através de simples regras geométricas, mas que ao serem implementadas, geram estruturas de uma complexidade admirável [174].

Atualmente, a Geometria Fractal, tem sido utilizada em diversas áreas do conhecimento, como o estudo de sistemas caóticos (padrão de formações de nuvens, por exemplo); caracterização de objetos; análise e reconhecimento de padrões em imagens; análise de texturas e medição de comprimento de curvas e, no estudo de redes de transportes. Devido às diversas aplicações dos fractais, vários são os métodos encontrados na literatura [174].

Das características de um fractal, a que mais relevo e importância tem é a dimensão fractal. Enquanto na Geometria Euclidiana o valor da dimensão representa a dimensão do espaço onde um dado objeto está inserido, a dimensão fractal simboliza o nível de irregularidade de um dado fractal. Assim, esta diferença faz com que a dimensão fractal assumia valores

---

<sup>14</sup> *Anisotrópica – Característica que um objeto possui, em que uma certa propriedade física varia com a direção.*

<sup>15</sup> *Transformação Isotrópica – Transformação das propriedades físicas independentemente da direção considerada.*

fracionários, algo antagónico à geometria euclidiana, que utiliza somente valores inteiros. Tal valor fracionário deve-se ao facto deste representar o valor de ocupação do espaço pela forma em estudo e não o espaço em si, onde a forma está inserida. Assim, quanto maior a irregularidade de uma forma, maior a sua dimensão fractal. Esta característica torna a dimensão fractal numa ferramenta muito útil, quando se pretende comparar duas formas fractais [174].

Um exemplo de cálculo da dimensão fractal é a curva de Koch. A partir de um segmento de reta, é dividido em três partes iguais. Substitui-se depois pelo terço médio por um triângulo equilátero, retirando a sua base. Iterativamente, repete-se o processo a cada segmento de reta resultante. Desta maneira, facilmente se percebe que se substitui três segmentos por quatro de igual comprimento, ou seja, o comprimento total é multiplicado por  $\frac{4}{3}$ . Assim, a sucessão geométrica com razão  $\frac{4}{3}$  tem-se como infinita. A curva de Koch será dada pela sucessão da expressão (1) [173]:

$$S_n = S_{n-1} + \frac{S_n}{3} = \left(\frac{4}{3}\right)^n. \quad (1)$$

A literatura sugere diversas abordagens para se estimar a dimensão fractal de um objeto ou imagem. Contudo, a maior parte delas baseia-se na Dimensão de Hausdorff. De modo a compreender a Dimensão de Hausdorff, considera-se uma linha com o comprimento  $L$  e outra com comprimento  $u$ , de forma que  $L > u$ . Sobrepondo  $u$  sobre  $L$  até cobrir totalmente esta última, encontra-se um valor  $N = \frac{L}{u}$ , que é a medida da linha. Do mesmo modo que é feito para as linhas, pode-se medir um quadrado de lado  $L$  cobrindo-o com pequenos quadrados de lado  $u$ , obtendo-se a mesma relação  $N = \left(\frac{L}{u}\right)^2$  [174]. Assim, transpondo para uma relação geral, obtemos uma relação do tipo  $N = \left(\frac{L}{u}\right)^D$  ou ainda, se aplicarmos um logaritmo em ambos os membros  $D = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{L}{u}\right)}$ , onde  $D$  é a dimensão fractal de Hausdorff do objeto em análise. Se se tratar de um objeto compacto e uniforme,  $D$  é um número inteiro igual à dimensão topológica. Mas, como referido anteriormente, um fractal é um número fracionário [174]. Para estimar a dimensão fractal, existem vários métodos, encontrados na literatura atual. No entanto, nem todos são aplicáveis a qualquer tipo de estrutura. Tal acontece porque cada método se baseia numa medição diferente para o objeto analisado, obtendo-se diferentes resultados para cada método, com o mesmo objeto.

### 6.1.1. MASSA-RAIO

O método de cálculo de Massa-Raio baseia-se na sobreposição de círculos sobre o objeto a estudar, para de seguida se contar a quantidade de pontos desse objeto presentes dentro do interior do círculo. Esse método assenta na equação (2), que se evidencia de seguida:

$$M_r(A) = \mu \cdot r^D, \quad (2)$$

onde  $M_r(A)$  é o número de pontos de um objeto  $A$  existentes no círculo de raio  $r$ , sendo  $\mu$  um elemento constante. A partir desta, é obtida a dimensão fractal  $D$ , na equação (3), como sendo

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln(M_r(A))}{\ln(r)}. \quad (3)$$

Para se obter o cálculo de  $D$ , podem ser utilizados um ou mais círculos. Caso a opção seja utilizar apenas um círculo, é interessante escolher o centro do círculo como sendo o centro de massa da forma em análise. Já se a opção for utilizar vários círculos, pode ser utilizado um mecanismo de escolha aleatória para se escolher os vários centros dos círculos, considerando, então, a massa média dos vários círculos. Outro detalhe a ter em consideração é o raio máximo ( $r_{max}$ ) a ser utilizado na expansão dos círculos. Apesar de este poder ser definido pelo programador, é comum ser utilizado o raio de giro da imagem. Assim, o raio irá variar entre  $1 < r < r_{max}$ , sendo que existe o incremento de um em cada iteração, recalculando também a massa [174]. Traçando o gráfico *log-log* entre  $M_r(A)$ , a massa acumulada para um raio  $r$ , e o raio  $r$  do círculo utilizado, é obtida a aproximação de uma reta com coeficiente angular  $\alpha$ , cujo  $D = \alpha$  não é mais que a dimensão fractal de  $A$  [174].

### 6.1.2. ANÁLISE DE INTERSEÇÃO ACUMULATIVA

Outro método conhecido e abordado na literatura é o método da interseção acumulativa. Foi desenvolvido por Schierwagen, baseado no trabalho de Sholl [174]. Trata-se de um método idêntico ao método Massa-Raio, contudo, ao invés de calcular a massa de uma região, este método calcula o número de interseções ou subdivisões existentes nessa mesma região. Este método baseia-se na relação demonstrada na equação (1), onde  $M_r(A)$  é o número de interseções existentes no objeto  $A$  quando sobreposto por um círculo de raio  $r$ , e  $\mu$  um elemento constante. A partir desta, é obtida a dimensão fractal  $D$ , similar à

equação (2). Como no método de Massa-Raio, também aqui se pode utilizar um ou mais círculos, tendo em atenção que devem ser consideradas as mesmas restrições impostas no método de Massa-Raio. Quanto ao raio máximo, os pressupostos são idênticos ao método Massa-Raio [174].

A contagem de interseções é realizada ordenando os pontos pertencentes à forma e à borda do círculo através do valor do ângulo que fazem com o centro do círculo. Após esta verificação, é contabilizada a adjacência de pontos consecutivos. Traçando o gráfico *log-log* entre  $M_r(A)$ , o número de interseções para um raio  $r$ , e o raio  $r$  do círculo utilizado, é obtida uma aproximação em reta com coeficiente angular  $\alpha$ , cujo  $D = \alpha$  não é mais que a dimensão fractal de  $A$  [174].

### 6.1.3. BOX-COUNTING

Outro método encontrado é o *Box-counting*, que é um dos métodos mais populares e utilizados para calcular a dimensão fractal de uma forma ou imagem. Tal deve-se à sua simplicidade e facilidade de implementação. O método consiste em sobrepor à imagem uma malha de quadrados e fazer a contagem do número de quadrados necessários para cobrir todo o objeto [175]. Este baseia-se na relação dada pela equação (4):

$$N_r(A) = \mu \cdot r^{-D}, \quad (4)$$

onde  $N_r(A)$  é o número de caixas de lado  $r$  que contenham parte do objeto  $A$ . A partir desta, é obtida a dimensão fractal  $D$ , na equação (5), como sendo:

$$D = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln(N_r(A))}{\ln(r)}. \quad (5)$$

Para a implementação deste método, é necessário definir um conjunto  $B$  com os tamanhos dos lados  $r$  a serem utilizados nas diversas iterações deste método. Para  $B$  é utilizado o cálculo padrão, tendo por base as dimensões do objeto, conforme expressão (6), apesar de poder ser definido pelo utilizador:

$$\forall r_i \in B \left\{ \begin{array}{l} r_0 = \max(\text{altura}, \text{largura}) \\ r_{i+1} = \frac{r_i}{2} \end{array} \right. . \quad (6)$$

Traçando o gráfico  $\log\text{-}\log$  de  $N_r(A)$  (número de caixas ocupadas) por  $r$  (tamanho do lado da caixa) é obtida a aproximação de uma reta com coeficiente angular  $\alpha$ . Desta maneira,  $D = -\alpha$  é a dimensão fractal de  $A$  [174].

#### 6.1.4. DIVIDERS

O método *Dividers* [176], também conhecido como *Compass*, é um outro método, dos mais simples, para calcular a dimensão fractal de curvas e objetos que tenham um contorno definido, por exemplo, a membrana de uma célula (figura 35). Trata-se de um método exato apenas aplicável para casos de curvas autossemelhantes [174] [177].

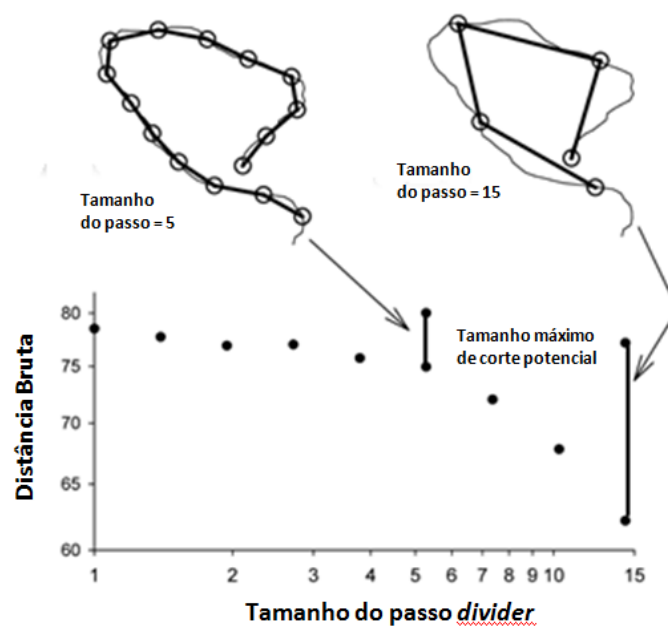


Figura 35 – Método Dividers [177]

Este método baseia-se na proporcionalidade do perímetro de um fractal relativamente ao tamanho de uma reta  $r$  utilizada para medir o seu contorno. O comprimento do contorno é medido um par de *dividers* de um determinado tamanho, ao longo do contorno. Se tal for feito por *dividers* cada vez maiores, o declive do gráfico do logaritmo do comprimento do trajeto *versus* o logaritmo do tamanho do passo é  $1 - D$ , obtendo-se uma estimativa global para  $D$  ao longo de uma gama de escalas (Mandelbrot, 1967). Existem dois potenciais problemas com esta técnica, para estimar a dimensão fractal: o primeiro afeta a precisão (ou seja, a proximidade com o valor verdadeiro); o segundo é que o passo do *divider* raramente cai diretamente na extremidade da trajetória; se o comprimento de percurso é estimado usando unidades discretas dos passos do *divider*, então comprimento do percurso é subestimado.

Assim, a partir da relação patente na equação (7), obtém-se a relação:

$$l(r) = \mu \cdot r^{1-D}, \quad (7)$$

onde  $l(r)$  é o comprimento do perímetro de um objeto medido utilizando-se uma reta de tamanho  $r$ . A partir desta, é obtida a dimensão fractal  $D$ , na equação (8), como sendo:

$$D = 1 - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln(l(r))}{\ln(r)}. \quad (8)$$

Se se traçar o gráfico *log-log* de  $l(r)$  (comprimento do perímetro para uma reta  $r$ ) por  $r$  (tamanho da reta) é obtida a aproximação de uma reta com coeficiente angular  $\alpha$ . Assim,  $D = 1 - \alpha$  é a dimensão fractal de  $P$  [174].

### 6.1.5. MINKOWSKI-BOULIGAND

Por fim, o método de *Minkowski-Bouligand* ou dimensão de *Minkowski* (figura 36) é o método que produz resultados mais consistentes e assertivos para a dimensão fractal [174]. A sua elevada sensibilidade a pequenas variações estruturais do objeto analisado faz com que este método seja mais preciso. Este método tem por base o estudo da área de influência criada pela dilatação do objeto em questão, por um círculo ou disco de raio  $r$ .



**Figura 36 – Dimensão Minkowski-Bouligand [178]**

Variações no objeto, por mais pequenas que sejam, geram alterações na área de influência calculada [174]. A área de influencia de  $A$ ,  $A(r)$ , pode ser obtida através da aplicação de dilatações em  $A$ , considerando a equação (9), abaixo descrita:

$$A(r) = \bigcup_{x \in A} B_r(x), \quad (9)$$

onde  $B_r(x)$  é o disco de raio  $r$ .

Para cálculo da Dimensão de *Minkowski*, o disco de raio  $r$  é percorrido ao longo da extremidade do objeto, sendo que os centros dos discos correspondem às coordenadas da extremidade do objeto. Os pontos limitados pelo disco/círculo são depois somados, obtendo-se a área dilatada  $A(r)$ , para um raio  $r$  [174]. A partir dos dados obtidos da área dilatada,  $A(r)$ , e do raio,  $r$ , é possível estabelecer a relação demonstrada na equação (10):

$$A(r) = \mu \cdot r^{2-D}. \quad (10)$$

A partir desta, é obtida a dimensão fractal  $D$ , pelo método de *Minkowski*, na equação (11), como sendo:

$$D = 2 - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln(A(r))}{\ln(r)}. \quad (11)$$

Com a construção do gráfico *log-log* de  $A(r)$  (área de influência para um raio  $r$ ) por  $r$  (tamanho do raio de influência), é obtida a aproximação de uma reta com coeficiente angular  $\alpha$ , cujo  $D = 2 - \alpha$  é a dimensão fractal de  $A$  [174].

É ainda possível, através deste método, calcular a dimensão fractal recorrendo à análise da Derivada da curva *log-log* que se obtém. Contudo, nesse caso, é necessário realizar a normalização da curva, através da convolução com uma curva Gaussiana [174].

De acordo com o referido anteriormente, os fractais possuem, como propriedade, uma infinita complexidade, abrindo a possibilidade de explorar campos matemáticos que até há vários anos atrás não eram explicáveis. Assim, os fractais têm propriedades que são importantes realçar [173].

### 6.1.6. CONJUNTO DE CANTOR

Cantor<sup>16</sup> destacou-se por apresentar ideias inovadoras no campo do infinito, propondo a construção de um objeto que ficou denominado de conjunto de Cantor (figura 37). A sua construção começa com um segmento de reta de comprimento unitário, dividindo-se depois em ternários, retirando-se em seguida o seu terço médio. Este é o primeiro nível. No segundo nível, retira-se o terço médio de cada segmento restante da primeira etapa, no total de dois.



**Figura 37 – Conjunto de Cantor [179]**

O processo repete-se num número infindável de níveis  $N$  que, no caso do conjunto de Cantor, segue uma tendência  $N \rightarrow \infty$ . Se analisarmos o número de segmentos  $n_N$ , o comprimento de cada segmento  $C_N$ , bem como o comprimento total do conjunto  $C_{tN}$  (soma dos comprimentos dos segmentos do conjunto), verificamos a evolução do conjunto. Quando  $N = 0$ , o primeiro nível, é obtido um segmento  $n_0 = 1$ , sendo no segundo nível obtido um segmento  $n_1 = 2$ . Assim, pode ser deduzido que quando  $N \rightarrow \infty$ , o conjunto de Cantor segue a evolução dada pela expressão (12) [173]:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} n_N = 2^N = \infty, \quad (12)$$

depreendendo-se que o número de segmentos tende para o infinito.

Mas quando é analisado o comprimento total do conjunto de Cantor, é importante primeiro analisar o comprimento de cada segmento. Assim, no primeiro nível em que  $N = 0$ , o

---

<sup>16</sup> Georg Cantor – Matemático alemão inventor da teoria do conjunto com o seu nome. Viveu entre 1845-1918.

comprimento  $C_N=1$ , sendo no segundo nível  $C_N = \frac{1}{3}$ . Desta forma, facilmente se chega à relação seguinte, com a expressão (13) [173]:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} C_N = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{3}\right)^N = 0. \quad (13)$$

Já no caso da análise do comprimento do conjunto de Cantor é possível obter-se a partir da seguinte equação (14):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} C_{tN} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{2}{3}\right)^N = 0. \quad (14)$$

Assim, percebe-se que o conjunto de Cantor tende para zero [173]. Quando  $N \rightarrow \infty$ , então  $r \rightarrow 0$ . Para se calcular a dimensão fractal do conjunto, é possível calcular através da expressão (15):

$$D = \frac{\ln(N(A, r) - \ln(C))}{\ln\left(\frac{1}{r}\right)}, \quad (15)$$

obtendo-se assim  $D = \frac{\log(2)}{\log(3)} = 0,630\dots$ [173]

### 6.1.7. ILHA DE KOCH

Outro processo de formação é a conhecida Ilha de Koch, que consiste em iniciar-se com uma linha fechada denominada “ilha”, que tem como figura inicial um triângulo equilátero (figura 38).

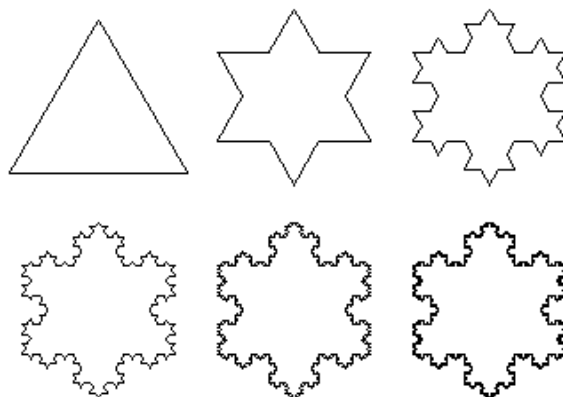


Figura 38 – Ilha de Koch [180]

Após esta inicialização, substitui-se o terço central de cada um dos lados, por outros dois segmentos de comprimento  $\frac{1}{3}$ , formando-se, assim, uma estrutura triangular, sem a base que corresponderia à parte removida [173]. Obtém-se, desta maneira, uma estrutura com comprimento total de quatro unidades (três conjuntos de quatro partes cada um, cada parte com comprimento  $\frac{1}{3}$ ). O processo é repetido para cada segmento, de forma sucessiva, até infinitos níveis. No nível inicial  $N = 0$ , obtém-se a área, através da expressão (16) [173]:

$$S_0 = \frac{l^2\sqrt{3}}{4}. \quad (16)$$

No segundo nível  $N = 1$ , é acrescentada à área do triângulo original três triângulos de lado  $\frac{l}{3}$ , com a expressão (17):

$$S_1 = S_0 + 3\left(\frac{l}{3}\right)^2 \frac{\sqrt{3}}{4}. \quad (17)$$

No  $n$ -ésimo nível tem-se pela expressão (18):

$$S_N = S_0 + l^2 \frac{\sqrt{3}}{12} \sum_{i=1}^N \left(\frac{4}{9}\right)^{i-1}. \quad (18)$$

Generalizando a evolução, quando  $N = \infty$ , é possível obter-se o resultado através da expressão (19):

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{4}{9}\right)^{i-1} = \frac{9}{5}. \quad (19)$$

O limite da área  $S_N$ , para um número infinito de níveis, será dada pela expressão (20):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S_N = \frac{2}{5} \sqrt{3} l^2. \quad (20)$$

Tendo-se que cada lado do triângulo equilátero original  $N = 0$  corresponde um segmento gerador da curva de Koch, o perímetro da construção da ilha  $T_N$ , quando  $N \rightarrow \infty$ , é dado pela expressão (21) [173]:

$$T_N = 3 \left(\frac{4}{3}\right)^N . \quad (21)$$

A dimensão fractal da ilha de Koch é determinada de modo que, para o nível  $N$ , o número de segmentos de comprimento  $\left(\frac{1}{3}\right)^N$  que cobrem a curva, é dado por  $4^N$ . Assim, recorrendo à expressão 15, é obtido o valor  $D = \frac{\log(4)}{\log(3)} = 1,26\dots$ [173]

### 6.1.8. TRIÂNGULO DE SIERPINSKI

Este método é também conhecido como Graxeta de Sierpinski. Este parte de um triângulo equilátero no nível inicial, isto é, totalmente preenchido ( $N = 0$ ). De seguida determinam-se os pontos médios dos três segmentos de delimitam o triângulo, de tal forma que ligando-se os pontos médios originam quatro triângulos, onde os lados correspondem a metade do original. Retirando-se o triângulo central, obtém-se a segunda configuração correspondente ao segundo nível ( $N = 1$ ) [173]. O processo é repetido sequencialmente para cada um dos restantes triângulos, bem como para cada triângulo equilátero formado por esta sequência [173]. Assim, para a determinação da área do Triângulo de Sierpinski, é considerado um triângulo equilátero de lado 1, cuja área inicial, é dada pela expressão (22):

$$S_0 = \frac{l^2\sqrt{3}}{4} . \quad (22)$$

Em cada nível  $N$ , é subtraída a área de  $n_N$  triângulos com lado  $l_N$ . Desta forma, para  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 3$ ,  $n_3 = 9$ , chegando-se à expressão geral  $n_N = 3^{N-1}$  sequência [173]. Os lados  $l_N$  são obtidos a partir da redução dos lados do triângulo original pelo fator  $\frac{1}{2}$ , resultado da expressão (23):

$$l_N = \left(\frac{1}{2}\right)^N l . \quad (23)$$

Deste modo, a área do nível 1 será dada pela expressão (24):

$$S_1 = S_0 - \left(\frac{l}{2}\right)^2 \frac{\sqrt{3}}{4} . \quad (24)$$

Assim, a área do nível 2 será dada pela equação (25):

$$S_2 = S_0 - \left(\frac{l}{2}\right)^2 \frac{\sqrt{3}}{4} - 3 \left(\frac{l}{4}\right)^2 \frac{\sqrt{3}}{4}. \quad (25)$$

Desta maneira, quando  $N \rightarrow \infty$ , é possível obter-se a área dada pela expressão (26):

$$S_N = S_0 - l^2 \frac{\sqrt{3}}{12} \sum_{N=1}^{\infty} \left(\frac{3}{4}\right)^N = 0. \quad (26)$$

A soma do perímetro  $3^N$  triângulos no nível  $N$  pode obter-se verificando o perímetro de cada um dos triângulos obtidos em cada nível [173]. Assim, determina-se o perímetro de cada triângulo para um nível específico. Para o nível  $N = 0$ , tem-se o perímetro do triângulo original de lado  $l$  ou então  $T_0 = 3l$ . Já para o nível  $N = 1$ , o lado obtido será  $\frac{l}{2}$  o que faz com que o perímetro  $T_1 = \frac{3l}{2}$ . Conseqüentemente, para o nível  $N = 2$ , o lado obtido será  $\frac{l}{4}$  o que faz com que  $T_2 = \frac{3l}{4}$ . Dada esta evolução, obtêm-se a equação (27) geral para o perímetro de cada triângulo [173]:

$$T_N = \frac{3l}{2^N}. \quad (27)$$

Dado que o número adicional de triângulos removidos do nível  $N$  é  $3^N$ , a soma total dos perímetros  $P_N$  dos triângulos do nível  $N$  é conseguida com recurso à expressão (28):

$$P_N = 3 \left(\frac{3}{2}\right)^N \cdot l. \quad (28)$$

Quando  $N \rightarrow \infty$ , então para o Triângulo de Sierpinski tem-se a expressão (29):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P_N = \infty. \quad (29)$$

Pode deduzir-se que o perímetro do Triângulo (figura 39) aumenta indefinidamente à medida que o nível aumenta. Para determinarmos a dimensão fractal deste Triângulo considerando que tal estrutura é formada por três cópias do triângulo original, cada uma destas reduzida por um fator de  $\frac{1}{2}$ . Assim, recorrendo à equação (15), substituindo os círculos de raio  $r$  por triângulos equiláteros de lado  $\frac{l}{2^N}$ , é obtido o valor  $D = \frac{\log(3)}{\log(2)} = 1,58\dots$ [173]

### 6.1.9. ESPONJA DE MENJER

Este método assenta no mesmo princípio utilizado para a construção do Triângulo de Sierpinski. Mas apesar de idêntico, o processo iterativo é feito com um cubo, tratando-se de um objeto tri-dimensional [173] (figura 40). Não será aprofundado este método pois apenas é aplicado a figuras tridimensionais, conforme referido anteriormente.

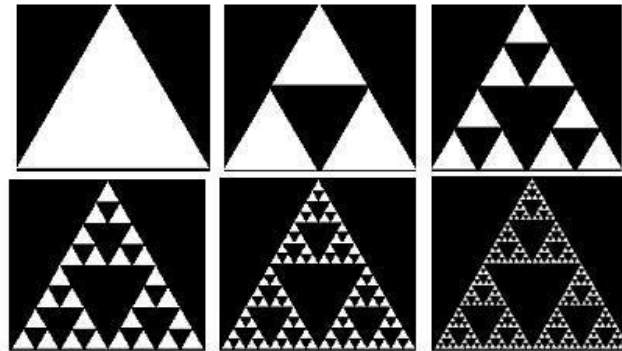


Figura 39 – *Triângulo de Sierpinski* [181]

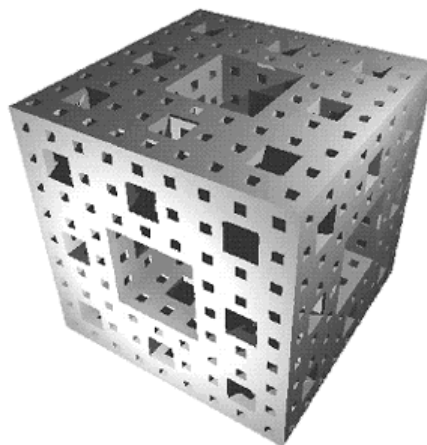


Figura 40 – *Espunja de Menger* [182]

## 6.2. FRACTAL NO CONTEXTO FERROVIÁRIO: CONTRIBUTO MATEMÁTICO

Ao longo dos tempos, tem-se assistido à implementação de fractais em diversas áreas. Em contextos de sistemas de transportes, o foco neste documento são os sistemas ferroviários, o seu desenvolvimento e contributo dos fractais. Em 1977, Mandelbrot foi quem, pela primeira vez, inseriu a geometria fractal na área de análise dos objetos de alta complexidade [183].

Através do trabalho preconizado pelo físico Lucien Benguigui [184], pode ser estudada a aplicação em análise e comparação de redes ferroviárias como, no exemplo prático, na

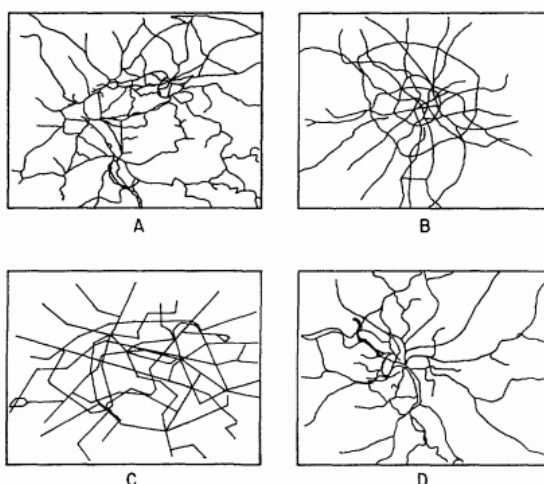
Alemanha, na Rússia e em França. Para a conceção do modelo, as redes analisadas são estudadas como objetos no plano, isto é, em 2D [185].

De forma a perceber quais as características das redes estudadas, importa detalhar as mesmas. Assim, foi estudado o sistema de interligação ferroviária de Rhine, na Alemanha. Esta linha tem um largo complexo industrial e urbano desenvolvido, que inclui cidades como Essen, Dortmund, Dusseldorf, Bonn, Koln e Aachen. A dimensão métrica da rede pode ser comparada a um quadrado de 130x130 km<sup>2</sup> [185].

No caso da Rússia, foi analisado o sistema ferroviário da cidade de Moscovo. Assim, a rede estudada pode ser abrangida por um círculo de raio de 15 km. Como a funcionalidade e estrutura era similar, foram incluídas as redes de metro e ferroviária de Moscovo [185], de acordo com os mapas das redes (figura 41).

No caso de Paris, foram analisadas duas vertentes:

- a) Uma que incide no sistema de metro no centro da cidade de Paris. A rede cobre o centro urbano da cidade e funciona apenas dentro da cidade. É uma rede relativamente densa. A rede estende-se num círculo de 6 km.
- b) Uma que incide na rede ferroviária suburbana na área urbana parisiense. A função desta é ligar Paris às cidades mais pequenas que fazem parte da área urbana da cidade, mas em áreas limítrofes. Esta cobre uma área com um raio de 50 km [185].



**Figura 41 – Mapa das redes analisadas: A) Rhine, B) Moscovo, C) Paris e D) Subúrbios de Paris. [185]**

O modelo é feito a partir de um mapa digitalizado (figura 41), para o tratamento em computador, para que a partir das imagens, seja feito o cálculo da dimensão do fractal. Assim, é medido o comprimento total  $L$  das linhas ferroviárias dentro do círculo de raio  $r$ , centrado num ponto da rede. A relação entre  $L$  e  $R$  é obtida pela variação de  $R$  [185].

Como resultado deste estudo de L. Benguigui, foi possível perceber, após o cálculo do gráfico *log-log*, as dimensões dos raios  $r$  e dos valores da dimensão fractal de cada situação analisada, sendo que, nos casos de Rhine e Moscovo, os valores são  $D = 1,7$ ; No sistema de metro de Paris, os valores são  $D = 1,8$ ; enquanto na avaliação da rede urbana parisiense, o valor foi  $D = 1,5$ . Estes valores podem ter ocorrido pelo facto de não ter sido considerado que a exatidão iria ser afetada com o tamanho demasiado pequeno das figuras. Assim, é perceptível compreender a proximidade dos valores da dimensão fractal, para Paris e Rhine, pois a rede cobre as regiões sem um centro definido, enquanto Moscovo é menos claro. Já no último caso, cujo valor é  $D = 1,5$ , é aceitável, apenas porque a função da rede é transportar as pessoas de ou para o centro urbano da cidade de Paris, o que torna menos denso [185].

Contudo, outras publicações podem ser acompanhadas e analisadas, deste mesmo físico em conjunto com M. Daoud [186], como é o caso de uma outra investigação sobre a temática Fractal e o sistema ferroviário suburbano, que incide uma vez mais sobre a cidade de Paris [186].

A motivação para tal estudo advém da descrição visual de uma existência de uma semelhança entre algumas agregações geradas computacionalmente na ciência dos polímeros e o sistema ferroviário na grande área de Paris. Já a escolha da cidade de Paris deveu-se ao facto do sistema ferroviário poder ser todo inserido num círculo e sem qualquer facto geográfico perturbador do estudo (mar, etc.). O rio Sena parece, neste caso, ser o eixo de crescimento destas redes, sendo a cidade simétrica em redor do centro [186].

Para este estudo, foram utilizadas as variáveis  $N(R)$ , o número de estações em função da distância  $R$  até ao centro da cidade. Assim, fica perceptível que, enquanto o sistema de metro é denso com  $N(R)$  proporcional a  $r^2$ , o sistema férreo da grande área de Paris  $N(R)$  é proporcional a  $R^{1/2}$ . Analisado o mapa e o problema, foi perceptível perceber o cruzamento das duas linhas correspondes aos limites atuais da cidade e ainda que o tamanho total de linhas  $L(R)$  varia com  $R^{1.5}$  [186].

A cidade de Paris compreende a própria cidade e um enorme número de cidades vizinhas. Contudo, uma estrada circula à volta da cidade separa estas duas regiões. De modo a realçar essa distinção, foi feito um quadro de população cumulativa  $P(R)$  dentro do um círculo  $r$ , para de seguida ser feita a derivada  $\frac{dP(R)}{dR}$  em função de  $r$ . Com esta derivada foi possível enfatizar a quantidade de população espalhada em coroas de 1 km à volta do centro de Paris. Conclui-se que o aglomerado centrava-se nos 5,5 km, que era o raio da cidade de Paris [186].

A estrutura ferroviária montada em Paris pode descrever-se da seguinte forma:

- Rede de Metro, a cargo da *Régie Autonome des Transports Parisiens* (R.A.T.P.)
- Rede ferroviária, a cargo da *Société Nationale des Chemins de fer Français* (S.C.N.F.) e da *Réseau Express Régional* (R.E.R.)

Para o estudo, foi considerado apenas o conjunto de estações de ambos os sistemas, visto ser de difícil a obtenção exata do tamanho da rede.

O início do processo de estudo ocorre com a contagem do número de estações  $N(R)$ , localizadas no interior do círculo de raio  $R$ , centrado na estação de Chatelet. Para que seja perceptível o resultado final,  $N(R)$  será proporcional a  $R$ , caso as estações estejam uniformemente distribuídas. Já caso o espaço de distribuição de linhas seja compacto ou, ou por outras palavras, a densidade seja constante, então  $N(R)$  será proporcional a  $R^2$  [186].

O calculo da dimensão fractal no estudo segue um  $N(R)$  proporcional a  $R^D$ , onde o  $D$  é a Dimensão fractal do conjunto de estações. Para a análise deste documento, foi tido que  $D < 2$ , visto que existe uma proporcionalidade inversa entre estações e raio. Isto é, à medida o raio  $R$  aumenta, a densidade de estações diminui. Pode entender-se por densidade de estações como o número de estações por área [186].

Assim, assume-se que a densidade  $\rho(R)$  segue a expressão (30):

$$\rho(R) \sim \frac{N(R)}{R^2} \sim R^{D-2}, \quad (30)$$

onde o sinal  $\sim$  é indicativo de proporcionalidade.

Analisando o problema, foi entendido que perto do centro existe uma densidade constante de estações devido a  $N(R)$  ser proporcional a  $R^2$ . Foi visto, também, que para o raio da cidade de Paris  $R_0$ , distâncias até 6.5 km, o comportamento é  $N(R) \sim R^{0.47}$ . Quando é referida a palavra “Paris”, é indexada à cidade administrativa de Paris bem como a outros bairros limítrofes. Corresponde aproximadamente a uma área com raio  $R$ , cerca de cinquenta quilômetros. Desde que  $R < R_0$ , a R.A.T.P. é a rede dominante, sendo que o sistema metropolitano é compacta, para a área abrangida, devido à densidade constante de estações [186]. Caso  $R > R_0$ , as estações do consórcio S.C.N.F.-R.E.R. formam um fractal com dimensão  $D = \frac{1}{2}$ . Assim, assume-se que, embora a rede seja muito eficiente, esta tem uma fraca densidade. Na realidade, se calculada a densidade de estações em função da distância, a resultante será  $\rho(R) \sim R^{-1.5}$ , tal demonstra que os subúrbios mais distantes têm uma fraca e pobre distribuição de estações [186].

Quando se trata da comparação de modelos, existe uma grande quantidade de modelos de fractais. Contudo, nem todos são aplicáveis a cidades, reduzindo, assim, as hipóteses de utilização. No caso de a análise recair sobre a cidade de Paris deve-se ao facto das redes se terem desenvolvido em torno dela, tendo-a como centro. Desta forma, para a escolha de um modelo, tem que ser levado em conta o objeto a analisar. Tal já foi preconizado por Batty [187] com a utilização do modelo “Agregação por Difusão Limitada” (*Diffusion-Limited Aggregation - D.L.A.*) [188] na sua análise à cidade de Taunton, Inglaterra.

Este modelo é obtido com recurso à simulação computacional que simula o crescimento irreversível de agregações coloidais e dendritos [186]. No modelo convencional *D.L.A.*, é usada uma “semente” para ser fixada no centro da rede quadrada [189]. As partículas são lançadas, uma de cada vez, a partir de um ponto selecionado aleatoriamente num círculo, que está centrado na semente. A partícula selecionada sofre depois um trajeto aleatório na rede até que ela atinja um local desocupado na rede vizinha ao conjunto em crescimento ou desvia-se uma tal distância da rede que acaba por ficar fora do perímetro [189]. Nestes modelos, as simulações são frequentemente testados numa rede discreta e finita. Assim, os locais de lançamento de partículas na fronteira circular não são locais iguais a eventos. Estes têm diferentes distâncias da semente. A medida quantitativa deste atributo fractal num modelo *D.L.A.* está geralmente representado por um índice crítico, que é definido pela relação massa-comprimento da expressão (31):

$$M(aL) = a^D M(L), \quad (31)$$

onde  $D$  é a dimensão fractal e é sempre menor que a dimensão Euclidiana,  $d$  [189].

Quando o processo de lançamento de partículas atinge um largo número de iterações, é obtida a estrutura fractal que se assemelha com um dendrito [186]. Assim, a medidas cuidadosas da dimensão fractal  $D_c$  do conjunto do *D.L.A.* é  $D_c = 1,7$ , o que contraste com o valor obtido anteriormente com a distância  $L(R)$ ,  $D = 1,5$ . Esta diferença é possível ser explicada pelo facto do carácter fractal da rede interface *S.C.N.F-R.E.R.*, ter pelo menos, duas origens. Todas as linhas ferroviárias têm bifurcações, onde existe divisão em dois; depois existem pontos de retorno que asseguram a ligação das diferentes saídas e permitem uma permuta transversal. Os grupos *D.L.A.* não existem apenas como grandes pontos de retorno e, como tal, pode não estar apenas relacionado com a estrutura ferroviária de permuta [186].

O modelo fractal, relativo ao perímetro para escala, pode ser baseado na expressão (32):

$$P(\Delta x) = a\Delta x^{-\beta}, \quad (32)$$

onde  $a$  e  $\beta$  são constantes de escala. Mandelbrot demonstrou que  $\beta$  estava relacionado com a dimensão fractal como  $D = 1 + \beta$  [187]. O modelo utilizado por Witten [188] segue uma metodologia similar ao que Benguigui [185] e Daoud [186] desenvolveram. De forma simples, um modelo descreve o crescimento de um aglomerado de partículas como modelo de rede. Estas partículas são adicionadas uma a uma, de forma aleatória, em locais adjacentes aos locais já ocupados [190], cujo crescimento é irreversível, formando grupos de partículas. Estas partículas adicionadas têm uma restrição similar de colagem irreversível ao grupo anterior, quando visita um local vizinho de um dos locais existentes no grupo [186]. Por analogia, imagine-se o processo no qual uma cidade cresce em torno de um ponto ou local central. Ao longo do tempo, a cidade cresce por novos indivíduos localizados ao lado ou perto de indivíduos já agrupados em torno de um ponto central. Se a cidade crescesse de forma irreversível e se os indivíduos estivessem a ocupar todo o espaço disponível adjacente ao grupo crescente, a área da cidade iria expandir em proporção com o quadrado do raio do aglomerado. No entanto, é improvável que todo o espaço disponível fosse ocupado, à medida que a cidade crescesse. Algum espaço sempre ficaria vago devido a obstáculos físicos para o desenvolvimento [191].

Numa cidade real, a população nunca é estável. O que está ocupado hoje por um indivíduo, amanhã estará desocupado, com as pessoas a moverem-se de acordo com as suas necessidades. Contudo, podemos idealizar que um indivíduo ocupe sempre o mesmo local. Este tipo de irreversibilidade é consistente com um processo quem que os indivíduos podem mover-se dentro da cidade [191]. A variável que descreve este crescimento é  $N(r)$ , o número acumulado de locais num raio  $r$  a partir do centro e  $A(r)$  a área total ocupada e desocupada num raio  $r$  a partir do centro. Ambas as variáveis aumentam com  $r$  [191]. A equação que daqui deriva pode ser associada ao que foi feito posteriormente por Benguigui [185] e Daoud [186], em ordem a  $r$ , similar à equação (33) mas generalizando:

$$\rho(r) = \frac{N(r)}{A(r)} \propto r^{D-d}, \quad (33)$$

onde  $D$  pode ser interpretado como parâmetro ou expoente de escala que relaciona a população com a distância e  $d$  como parâmetro que relaciona a área com a distância [191].

A mudança na população e na área, as primeiras derivadas das equações em relação a  $r$ , são dadas pelas expressões (34) e (35):

$$\frac{dN(r)}{dr} \propto r^{D-1}, \quad (34)$$

$$\frac{dA(r)}{dr} \propto r^{d-1}. \quad (35)$$

A razão entre as equações anteriores também define a densidade na margem, de acordo com a expressão (36), como:

$$\frac{\frac{dN(r)}{dr}}{\frac{dA(r)}{dr}} = \frac{dN(r)}{dA(r)} \propto r^{D-d}. \quad (36)$$

Por último, a alteração da densidade relativamente à distância é dada pela expressão (37):

$$\frac{d\rho(r)}{dr} \propto r^{D-d-1}. \quad (37)$$

A dimensão física de  $d$  pode ser similar a uma linha, área ou volume. Assim, desta maneira, é geralmente assumido  $d = 2$ , pois a análise é feita em duas dimensões. Contudo, é possível definir  $d = 3$ , caso se pretende trabalhar em três dimensões [191]. Neste estudo desenvolvido por Benguigui [185] e Daoud [186], foi assumido que  $1 < D < 2$  pois a população não ocupa todo o espaço  $A(r)$ , o que implicaria  $D = 2$  e uma densidade uniforme. Por outro lado, a população varia simplesmente com o raio  $r$ , o que implicaria que fosse uma cidade linear.

Para se perceber um pouco dos estudos de Benguigui [185], Witten [191] e Daoud [186], é importante simplificar e sintetizar a geometria fractal. Assim, a determinação da dimensão de um objeto pode ser alcançada pelas relações (38) e (39):

$$N(r) = Kr^{-D}, \quad (38)$$

$$L(r) = N(r)r = Kr^{1-D}, \quad (39)$$

onde  $N(r)$  é a quantidade de partes que compõem o objeto,  $L(r)$  o comprimento do objeto e  $K$  uma constante de proporcionalidade. Se são obtidas um intervalo de observações de  $N(r)$  e  $L(r)$  em diferentes escalas  $r$ , é possível obter a derivada da Dimensão fractal, transformando as equações (43) e (44) em expressões logarítmicas. Com estas expressões, é possível obter posteriormente a regressão linear entre as mesmas [192].

Para determinar a dimensão fractal de um objeto, através de regressão linear, é necessária a medida de comprimento do objeto e a resolução espacial. Para tal, utiliza-se a expressão (40):

$$\log L(r) = \log K + (1 - D)\log r, \quad (40)$$

onde  $(1 - D)$  é o declive da reta da regressão.

De modo a derivar a dimensão de um conjunto de objetos de diferentes dimensões e medidos na mesma escala  $r$ , com razão escalar  $\frac{1}{r}$ , é possível utilizar-se diretamente o tamanho de  $R$  (tamanho do objeto) [192]. Assim, a expressão (41) é a seguinte:

$$L(r) = K\left(\frac{R}{r}\right)^D \cdot r = KR^D r^{1-D}. \quad (41)$$

Quando a escala é fixa,  $r(1-D)$  é constante, e o tamanho do objeto variar, a transformação dos componentes, em logaritmos é dada pela expressão (42):

$$\log L_i = \log G + \frac{D}{2} \log A_i. \quad (42)$$

A dimensão fractal de cidades e objetos evidencia partes ou fragmentos distribuídos num plano. Este pode ser calculado a partir de dois conjuntos de relações de divisão de fronteiras ou de limites. Qualquer delimitação ou divisão de fronteira está baseado nas relações de quatro parâmetros:  $N(r)$ ,  $L(r)$ ,  $A(r)$  e  $\rho(r)$ , sendo utilizado na forma de  $N(R)$  e  $\rho(R)$  nas relações perímetro-área [192].

A mensuração da dimensão fractal do aglomerado urbano pode também ser obtida a partir da relação perímetro-área utilizando-se, para isso, outros parâmetros [192].

Na geometria Euclidiana, a medida de tamanho numa dimensão, é delimitada com uma medida noutra dimensão. Considerando a área e o volume, respetivamente com duas e três dimensões, obtém-se o tamanho calculado como o quadrado da medida da linha  $L$  ( $L^2$ ), enquanto o volume será  $L^3$  [192]. Se se derivar a área a partir do volume, este pode ser dada como  $A \propto V^{2/3}$ , enquanto que se for pedido que a linha  $L$  seja derivado a partir da área  $A$ , então, de acordo com a expressão (43):

$$L \propto A^{1/2}. \quad (43)$$

Esta expressão mostra que o tamanho numa dimensão pode ser delimitado caso seja conhecida a medida do objeto numa dimensão superior ou inferior [192].

Desta forma, se a área do círculo de raio  $r$  é  $\pi r^2$ , será considerado que  $L \propto rL$  sofre uma variação de forma regular [192]. Com esta relação, é possível o estudo do crescimento relativo. Assim, obtém-se a uma condição isométrica quando a relação entre uma linha e uma área ocorre conforme a equação (42). Para derivar  $L$  a partir de  $A$ , a área está elevada a um parâmetro, compreendido entre 1 e 2, conforme a expressão (44):

$$L \propto (A^{1/2})^D = A^{D/2}. \quad (44)$$

Seja  $D = 2$ , então o perímetro é delimitado para a área, implicando que a área seria uma curva de espaço preenchido, e se  $D = 1$ , o perímetro não seria delimitado mais que a

unidade base de medida (a linha), o que implica na inexistência dos efeitos da resolução [192]. O coeficiente  $D$  é a dimensão fractal, que no contexto da equação (43) representa uma medida empírica para estimar quanto a curva se distânciava de uma linha reta, indicando assim o quão fragmentado é o limite ao longo do espaço. A medida do limite de objetos simples, é restrita a uma simples relação geométrica definida pela relação entre resolução da unidade  $r$  e um perímetro  $L$  [192]. A relação é dada pela expressão (45):

$$L(r) = N(r)r = \alpha r^{1-D}, \quad (45)$$

onde  $N(r)$  é o número de segmentos na resolução  $r$ , que se aproximam do perímetro  $L(r)$ .

Combinando as duas expressões obtidas a partir do perímetro  $L(r)$ , uma em termos de área, outra em termos de resolução, obtemos a expressão (46):

$$L(r) \propto A^{D/2} \propto r^{1-D}. \quad (46)$$

A partir desta última, é obtida a relação perímetro-área através da expressão (47):

$$\log L = \log \gamma + f(D)\log A, \quad (47)$$

onde  $\log \gamma$  é a interceção e  $f(D) = \frac{D}{2}$  é o declive da reta da regressão linear do  $\log$  do perímetro sobre o  $\log$  da área [192]. O declive  $f(D)$  pode refletir diferentes formas funcionais a partir das quais  $D$  pode ser sempre derivado por uma estimativa de declive [192]. A relação do perímetro-resolução pode ser descrita pela equação (48):

$$\log L = \log \alpha + g(D)\log r, \quad (48)$$

onde  $\alpha$  é a interceção e  $g(D) = (1 - D)$  é o declive da reta da regressão linear do  $\log$  do perímetro sobre o  $\log$  do comprimento de  $r$  [192].

Uma outra abordagem é o modelo Estrela de Polímero Ramificado (*Star Branched Polymer - S.B.P.*). É um modelo em tudo idêntico aos apresentados anteriormente. Começa-se por considerar uma estrela uniforme constituída por  $f$  ramos. Cada ramo tem  $N$  unidades estatísticas de comprimento  $l$ . Usando coordenadas esféricas, o centro da

molécula está no centro da origem. É esperada que a concentração local de monômero<sup>17</sup>  $\varphi$  seja dependente da distância  $r$  ao centro da molécula. De notar que  $\varphi$  é a melhor função de correlação entre o centro da estrela e um monômero num ramo [193]. Por analogia das moléculas lineares [194], é possível dizer-se que um ramo da estrela tem, localmente, em torno de um ponto situado a uma distância  $r$  do centro, um comportamento único da cadeia de desenvolvimento na região de tamanho  $\varepsilon(r)$  denominado “bolha” [193]. O tamanho depende da concentração local  $\varphi(r)$ . Conforme se esperava, este último aumenta com a diminuição dos valores de  $r$ . Assim, podemos concluir que o utilizador define as “bolhas” cujo tamanho vai aumentando do centro da molécula para o exterior [193]. Em seguida, é sugerido o cálculo de  $\varphi(r)$  e  $\varepsilon(r)$ . O próximo passo será definir o parâmetro de dilatação local  $\alpha(r)$  a uma distância  $r$ , de acordo com a expressão (49):

$$\alpha(r) = \frac{\varepsilon(r)}{\varepsilon_0(r)}, \quad (49)$$

onde  $\varepsilon_0$  é o tamanho imperturbável, caso a cadeia de desenvolvimento seja ideal, conforme expressão (50):

$$\varepsilon_0 \sim n^{1/2}(r)l, \quad (50)$$

e  $n(r)$  é o número de unidades estatísticas na “bolha” à distância  $r$ .

De realçar que a principal diferença entre este e outros modelos é que, enquanto era geralmente suposto existir uma dilatação uniforme, neste modelo é suposto que a “bolha” seja muito maior no exterior do que no interior  $\alpha$  é também um parâmetro local que depende da distância ao centro [193].

Assim, este modelo pode ser associado, numa versão simplista, a incursões aleatórias iniciadas a partir do centro da estrela. Aproximando à realidade, deve-se ter em conta a interação estérica entre monómeros, que evita que duas delas estejam sobrepostas [186]. Assim, os polímeros repelem-se mutuamente e a sua disposição fará com que a

---

<sup>17</sup> Monômero – Pequena molécula que, ligando-se a outros, pode formar moléculas maiores denominada polímeros.

configuração varie do centro da estrela para o exterior. Tais configurações têm dimensões fractais inferiores aos conjuntos do *D.L.A.* Contudo, estes não incluem pontos de retorno nem ramificação, nem podem ser utilizados diretamente para casos de crescimento de cidades [186].



# 7. METODOLOGIA DO ESTUDO DE INVESTIGAÇÃO

Devido à vasta aplicação dos fractais, como na medicina (para diagnóstico quantitativo de patologias), na eletrónica (no desenho de antenas e no fabrico de fibras óticas) ou na área financeira (para a análise das variações), o cálculo e a análise da dimensão fractal assume uma enorme preponderância no nosso dia-a-dia [195]. Desta forma, ao longo dos anos, foi desenvolvido *software* especificamente para a análise fractal e sua dimensão. Ao longo deste capítulo, será apresentado algum do *software* disponível no mercado, bem como o *software* utilizado neste estudo.

## 7.1. CRITÉRIOS DE ESCOLHA DAS IMAGENS

Uma aplicação importante da análise fractal é feita com recurso à análise da textura de imagens. O principal aspeto da geometria fractal usado neste campo é a dimensão fractal para caracterizar a complexidade de uma textura. Uma imagem digitalizada é um padrão armazenado como uma matriz de dados retangular. Pode separar-se em imagem binária, imagem cinza, ou preto e branco e imagens a cores. O objetivo da análise da imagem é a identificação de uma cena e todos os objetos contidos na mesma.

Desta forma, para que este tipo de análise seja fidedigna e com o mínimo de erros, a imagem a analisar deverá ter a melhor resolução gráfica, ausência de ruído (pontos, riscos, sombras, etc.) e deverá apenas conter duas cores: preto e branco.

## **7.2. SOFTWARE PARA TRATAMENTO DE IMAGEM E ANÁLISE FRACTAL**

Existe muito *software* no mercado capaz de fazer tratamento de imagem. Apesar de largamente em menor escala, existem outros capazes de realizar a análise fractal. Contudo, tanto ao nível do tratamento como da análise, a escolha incide sobre aqueles que mais se adaptam às necessidades, tendo em consideração vários fatores preponderantes à finalidade.

### ***Benoit*™**

Este *software* de análise fractal está disponível apenas numa versão para sistemas operativos *Windows*. Tem ainda uma versão *toolbox* para Matlab. O *Benoit* permite medir a dimensão fractal e o *Hurst Exponent* dos conjuntos de dados, usando a escolha do método para a análise de padrões auto-similares e traços auto-afim. Possui, incorporado, um filtro de ruído branco (*Fourier* ou *Wavelet*) e um gerador de traço de auto-afim. Este *software* afigura-se útil no que respeita à aprendizagem sobre os métodos de fractais e é uma ferramenta de análise para investigadores e estudantes que analisam os dados em economia, ciências da terra, física, química, biologia e outras disciplinas [196]. Permite executar métodos de cálculo de dimensão fractal através do *box-counting*, dimensão de Massa, dimensão da Informação, dimensão Área de Perímetro. Porém, é um *software* cuja licença é paga, podendo esta ser bastante dispendiosa.

### ***FracLab***

O *FracLab* é uma *toolbox*, que tem por base uma programação C e rotinas em Matlab, específica de análise fractal para sinais e processamento de imagem. Assenta em métodos de análise fractal e multifractal, possibilitando dois tipos de abordagens: análise fractal e processamento de sinal. Na abordagem da análise fractal, um grande número de procedimentos permite processar várias quantidades de fractais associados a sinais 1D ou 2D, tais como dimensões, expoentes de Hölder ou espectros multifractal. No caso do processamento de sinal, o *FracLab* pode ser usado diretamente para executar muitas tarefas básicas no processamento de sinais, incluindo estimativa, deteção, remoção de ruído,

modelagem, segmentação, classificação e síntese. O FracLab aplica ferramentas de fractais ao estudo do sinal irregular, de forma arbitrária. A sua interface gráfica torna-o intuitivo e de fácil uso. Dispõe, ainda, de várias ferramentas baseadas no método *wavelet*.

O FracLab é um *software* livre, sem qualquer custo de licenciamento, cujo desenvolvimento pertence à equipa Anja do Inria Rennes/Laboratório Jean Leray, da universidade de Nantes, França.

Baseia-se principalmente em rotinas desenvolvidas em Matlab ou código C interligadas com Matlab e Scilab (um *software* científico livre para cálculos numéricos do Inria). Esta *toolbox* está disponível para sistemas Windows, Mac OSX e Linux [197].

### ***Fractalyse***

Esta aplicação de análise fractal é também uma ferramenta *freeware* com a possibilidade de utilização em ambiente Windows e Linux. Foi desenvolvido por um grupo de investigação “Mobilidades, cidade e transporte” do centro de investigação ThéMA, proveniente de atividades de investigação de Pierre Frankhauser e Cécile Tannier.

Este *software* foi inicialmente desenvolvido para medir a dimensão fractal das áreas das cidades. É usado, vulgarmente, para calcular a dimensão fractal de imagens a preto e branco, curva e rede. Este contém várias ferramentas de processamento de imagem, baseando a sua análise num sistema de funções iteradas para a análise fractal, aceitando formatos de imagem do tipo *TIFF* ou *BMP*, a preto e branco.

É possível, com o Fractalyse, efetuar análises de dimensão fractal com recurso a vários métodos: massa raio, *box-counting*, correlação, dilatação e convolução gaussiana de curvas. É possível, ainda, obter dados como comportamento de curvas de crescimento, extração de padrões de fronteira, contagem de número de *clusters* e lacunas [198].

### ***Image Processing Toolbox*™ para Matlab®**

O *Image Processing Toolbox* (IPT) é uma *toolbox* para Matlab, para análise e tratamento de imagem, não sendo mais do que uma ferramenta de apoio à análise fractal. Está apenas disponível numa versão para sistemas operativos *Windows*. O IPT permite processar imagem de modo a que esta cumpra os requisitos para submeter à análise da dimensão fractal (resolução, sem ruído, entre outros). Assim, fornece um conjunto bastante

abrangente de algoritmos referência-padrão, funções e aplicativos para processamento de imagens, análise, visualização e desenvolvimento de algoritmos. Desta maneira, é possível realizar uma análise de imagens, segmentação de imagens, realce de imagem, redução de ruído, transformações geométricas e registo da imagem [199].

### ***Snag It* ®**

Este *software* é um editor de imagem, na sua essência. Captura a imagem e o vídeo do ecrã, bem como o tratamento de imagem com os seus diversos e poderosos filtros, o que torna este *software* um importante aliado no que respeita ao tratamento de imagem. A sua simplicidade e portabilidade (na sua versão *portable*) sem uma licença específica, são uma mais-valia para qualquer utilizador. Possui uma versão para sistemas operativos *Windows* e para *Mac*.

### **7.3. SOFTWARE UTILIZADO NO ESTUDO DA DIMENSÃO FRACTAL**

Na escolha do *software* para este estudo, foi tido em conta o licenciamento das ferramentas, a aplicabilidade destas, bem como a simplicidade e necessidades de utilização.

Desta maneira, para a análise fractal foi utilizado o *Fractalyse*, considerando a simplicidade de utilização, a sua larga aplicabilidade, fiabilidade e possibilidade de funcionamento *standalone*. Isto é, este *software* não necessita de qualquer instalação de aplicação de suporte, ao contrário do *FracLab*, que necessita de instalação do *Matlab*. De salientar, também, que é um *software open source*. O *Fractalyse* é ainda uma aplicação que não requer muitos recursos de *hardware*. Caso fosse necessário, também tem uma versão para Linux, o que o torna mais versátil. O *Fractalyse* tem um *layout* muito intuitivo e *user friendly*, o que o torna um *software* aceitável e de provável escolha.

Para o tratamento de imagem, tendo em conta as numerosas possibilidades disponíveis, foi escolhido o *Snag It 8.2.1* da *TechSmith*. Esta escolha é justificada pelo facto de este *software* ter várias características favoráveis: tem uma versão *free* sem limitações preponderantes, possui uma versão *portable* que não obriga a instalação, possui importantes e incontornáveis filtros para o necessário tratamento de imagem nesta investigação e não necessita de instalação de nenhum *software* adicional para o seu

funcionamento. Possibilita, ainda, a fácil e rápida captura de imagem, em modo panorâmico ou vídeo.

Mas para todo o tratamento de dados e análise estatística, é necessário ainda um programa que faça todo o tratamento dos dados obtidos acerca da dimensão fractal, baseado no *Fractalyse*. Desta forma, é considerado o *Statistica 8.0* da *Statsoft*, devendo-se a escolha ao facto de já possuir o *software* instalado e também licença de utilização. Existem outras alternativas no mercado como o *SPSS (Statistical Package for the Social Sciences)*. Contudo, a fácil utilização do *Statistica*, bem como a interpretação simples dos resultados, foram também tidos em consideração aquando da escolha.

#### 7.4. TIPO DE TRATAMENTO APLICADO À IMAGEM A ANALISAR

No que respeita ao processo de tratamento aplicado às imagens utilizadas para este estudo, todas elas foram tratadas, recortadas e melhoradas com recurso ao *software* de tratamento de imagem *Snag It*. A resolução das imagens é um critério de elevada importância pois, para a análise, pode ser uma fonte de ruído. Outro fator considerado é a cor. Ao nível das cores, é importante que a imagem tenha o menor número de cores possível, preferencialmente preto e branco. Após a seleção das imagens, mediante estes rigorosos critérios, são aplicados filtros que são explicados em seguida.

**Filtro *Blur*:** No processamento de imagem, uma desfocagem de *Gauss* (também assim conhecido) é o resultado de uma desfocagem de uma imagem através de uma função gaussiana. É amplamente usado para reduzir o ruído e o detalhe da imagem, em vários *software* gráficos. O efeito visual produzido é uma imagem suavizada, como se fosse vista através de uma tela translúcida, de forma desfocada ou como se fosse uma sombra de um objeto por baixo de uma iluminação normal. Matematicamente, a aplicação de uma desfocagem gaussiana é uma convolução da imagem com uma função de *Gauss*, também conhecida como uma transformação de *Weierstrass 2D*. Desta forma, é possível expressar através da equação (51):

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (51)$$

em que  $x$  é a distância entre a origem e o eixo dos  $xx$ ;  $y$  é a distância entre a origem e o eixo dos  $yy$ ;  $\sigma$  é o desvio padrão.

**Filtro Contrast:** O contraste de uma imagem é a relação ou diferença entre o valor mais alto (o ponto mais brilhante) e o valor mais baixo (ponto mais escuro) de brilho na imagem.

Se se aumentar esta diferença dos valores mais brilhantes, a sua tendência é para o valor máximo e os valores mais escuros tendem para um valor mínimo. Os valores intermédios não mudam com esta alteração. No caso de uma imagem a preto e branco, se se aumentar o contraste, a tendência é eliminar o “cinzento médio”. Matematicamente é possível expressar este procedimento de acordo com a equação (52):

$$C = \frac{P_{max}}{P_{min}} \quad (52)$$

onde  $P_{max}$  é o ponto mais brilhante e  $P_{min}$  é o ponto mais escuro, na imagem.

**Filtro Gamma Correction:** é um coeficiente usado para corrigir a correspondência entre a intensidade e brilho da cor, que depende do dispositivo usado para criar a imagem (câmara, monitor). As imagens devem ser visíveis nas áreas pretas e brancas. O filtro *gamma* permite ter uma imagem melhor quando as condições de luminosidade não são boas.

Em contexto matemático, é possível definir este processo de acordo com a equação (53):

$$V_{out} = V_{in}^{\gamma} \quad (53)$$

em que o  $\gamma$  é um número não negativo que está compreendido entre 0 e 1. Se  $\gamma < 1$  é conhecido como *gamma* codificador, em que o processo de codificação é conhecido como compressão *gamma*. Se  $\gamma > 1$  é conhecido como *gamma* descodificador, em que o processo de descodificação é conhecido como expansão *gamma* [200].

## 7.5. SELEÇÃO E CARATERIZAÇÃO DAS IMAGENS

Relativamente ao critério de seleção dos países, o pretendido com esta investigação é comparar três diferentes meios de transporte: rodoviário, ferroviário e fluvial.

A escolha do transporte fluvial deveu-se ao facto de ser um transporte histórico, concebido antes do transporte ferroviário e rodoviário. Outro motivo é o facto deste transporte apenas necessitar de rios navegáveis, considerados como principais. O transporte fluvial impulsionou, durante vários anos, a economia de muitas cidades, como é o caso de

Londres e Paris. Já no século XIX, a rede ferroviária e rodoviária foi sendo construída paralelamente, ganhando assim primazia sobre os rios, uma vez que, no caso do comboio, este precisava de água para a locomotiva a vapor. Com a introdução da locomotiva *diesel* e elétrica, esta característica deixou de se verificar.

No que respeita à escolha da rede rodoviária, esta teve como principal motivo de seleção a competição com a rede ferroviária. Para que a similaridade com o comboio fosse equiparável, foram consideradas as redes de autoestradas, pois são as vias rodoviárias que mais rapidamente ligam os principais polos económicos e financeiros.

Quanto ao critério de escolha dos países a analisar, foram considerados:

- Países pioneiros e inovadores, no setor ferroviário;
- Países impulsionadores do setor ferroviário;
- Países europeus que diferem na bitola adotada.

Quanto à seleção dos mapas, é necessário ter em conta que existem diferentes universos na rede ferroviária e na rede fluvial.

Assim, no que respeita à rede ferroviária, importa considerar um mapa contendo toda a rede de via-férrea. Importa realçar o facto de todas as vias duplas de circulação, são consideradas como sendo vias únicas. Isto porque a análise teria de ser posta de uma forma diferente, com a pesquisa e análise de vários mapas com e sem via dupla. Contudo, como o motivo é comparar as rápidas ligações, é considerado um mapa apenas com a rede dedicada à AV. Desta forma, é possível contrastar e tornar mais abrangente a análise.

Considerando o pressuposto acima, o critério escolhido para os rios segue a mesma linha de pensamento, contando com um mapa com toda a rede fluvial existente e um outro com os rios principais de cada país. Isto porque, em questões de navegabilidade, nem todos os rios são navegáveis pelas várias embarcações. Desta forma, foram considerados os mapas de toda a rede fluvial e os rios principais de cada país.

No que concerne aos países pioneiros e inovadores foram considerados os EUA, o Japão e o Reino Unido. No que diz respeito aos EUA, e devido ao facto de se tratar de um país com um extensa rede ferroviária, bem como uma grande quantidade de estados a analisar,

foi considerado apenas o estado da Carolina do Sul. Esta escolha teve por base o facto de ter sido a primeira exploração comercial ferroviária da costa leste dos EUA, em 1830.

Ao nível dos países impulsionadores, foram considerados a França, a Alemanha e a Itália. Esta escolha é natural, pois a França aposta largamente nas ligações de AV. Já a Alemanha construiu o primeiro *Maglev* na Europa, enquanto a Itália aposta na construção de comboios para rede de AV, como é o caso do conhecido Alfa Pendular (*Pendolino*) e o *Fecciarossa 1000*. De salientar que, no caso de Itália, a Sardenha não foi incluída nas análises fractais devido ao facto desta ser a única região desprovida de autoestradas e de rede ferroviária muito reduzida ou inexistente.

Por fim, no contexto dos países europeus que diferem na bitola adotada, foram considerados Portugal e Espanha. Poder-se-á conjecturar, caso a bitola adotada fosse a europeia (ou padrão), que se poderia criar uma maior e mais rápida sinergia europeia, no plano económico.

## **7.6. TIPO DE ESTUDO E ESCOLHA DO MÉTODO PARA A ANÁLISE**

Para analisar as referidas imagens, existem vários métodos que são aplicáveis: *box-counting*, raio massa, correlação e dilatação.

O *box-counting* é o método mais utilizado para a análise fractal e cálculo da dimensão fractal. Consiste no preenchimento das imagens com uma grelha quadrada e com uma grelha de distância  $\varepsilon$ , que depois irá variar. Para cada valor  $\varepsilon$ , é contabilizada a quantidade de quadrados  $N(\varepsilon)$  que contêm pontos ocupados. Normalmente, o conjunto de valores de  $\varepsilon$  é uma potência de 2. Tem como parâmetros o centro e a dimensão da zona do quadrado.

No caso do método raio massa, este incide num ponto específico conhecido como centro de contagem, de onde resulta a lei da distribuição das partes ocupadas em torno desse ponto. Um círculo é criado em torno desse ponto e o raio  $r$  é gradualmente aumentado. Em cada incremento, é contabilizado o número total de pontos ocupados  $N(\varepsilon)$  dentro do círculo. Neste método, valor  $\varepsilon$  é igual a  $2r + 1$ . Como parâmetros tem o centro de contagem e a forma do círculo.

No método de correlação, cada ponto da imagem é rodeado por uma janela quadrada. O número de pontos ocupados dentro de cada janela são inumerados. Isto permite que a

média dos pontos por janela seja calculada. A mesma operação é aplicada para janelas que, gradualmente sejam aumentadas. Quando aplicada esta análise, o eixo dos  $xx$  no gráfico de análise representa o tamanho do lado da janela de contagem  $\varepsilon = (2i + 1)$  e o eixo dos  $yy$  representa a média do número de pontos contabilizados por janela. O princípio pressupõe a escolha da forma de janela, como por exemplo círculo, hexágono ou outra forma. Contudo, desde que os *pixéis* sejam quadrados, a opção de uma forma quadrada ajuda a evitar erros. O parâmetro é o tamanho máximo da janela ( $\varepsilon$ ).

Por último, o método da dilatação baseia-se no algoritmo de *Minkowski-Bouligand* para estabelecer a dimensão de um objeto, usando uma aproximação teórica de medição. Este método já foi referido no ponto 6.1.5.



# 8. ESTUDO EMPÍRICO

Neste capítulo é apresentado o estudo empírico realizado ao nível da análise fractal com os casos de estudo, bem como apresentados os principais resultados e a sua discussão.

## 8.1. ANÁLISE FRACTAL COM OS CASOS DE ESTUDO

Para que houvesse uma maior assertividade, no que respeita a análise, foi importante testar o programa e o método escolhido (*box-counting*) com casos já conhecidos e estudados ao longo dos anos. Após a seleção das figuras e seu tratamento, foi realizada uma breve análise conjunta aos valores obtidos e comparados com os dados obtidos de estudos anteriores.

Assim, foram escolhidas figuras conhecidas, como é o caso da Ilha de Koch (figura 38) e do Triângulo de Sierpinski (figura 39)<sup>18</sup>. Ambas são figuras geométricas obtidas a partir de processos recursivos. Estas são formas elementares da geometria fractal, devido ao facto de apresentarem propriedades únicas como a auto-semelhança (uma das suas partes é idêntica

---

<sup>18</sup> Nas páginas 116 e 120 deste trabalho, respetivamente.

ao todo), não perderem a sua definição inicial à medida que são ampliadas, possuírem uma área igual a zero e com tantos pontos como o do conjunto dos números reais.

Após a escolha, as imagens foram tratadas com o *Snag It*, de forma a obter uma imagem mais definida, livre de ruído e apenas com a área estritamente necessária para a análise. Foi aplicada a filtragem *average blur* e, em seguida foi feita a correção do contraste, bem como aplicado o filtro de correção *gamma* entre valores 0,02 e 0,3.

Após análise fractal das figuras em questão, com o *fractalyse*, obtiveram-se os valores de  $D = 1,313$  e  $D = 1,559$ , respetivamente.

Vários países e as suas costas marítimas foram alvo de estudos, ao longo dos tempos, no que respeita à análise fractal. Com esta mesma finalidade, foram obtidos os mapas das costas marítimas de países como África do Sul, Noruega, Reino Unido, Austrália e Grécia. Assim, foram tratadas e recortadas as imagens dos países referidos, mantendo apenas os limites marítimos, de acordo com a figura 42. Após a análise com o *fractalyse*, foram obtidos os valores,  $D = 1,023$ ;  $D = 1,274$ ;  $D = 1,347$ ;  $D = 1,146$ ;  $D = 1,320$ , respetivamente.



**Figura 42 – Análise fractal da costa dos vários países**

**a) África do Sul; b) Noruega; c) Reino Unido; d) Austrália; e) Grécia [201][202][203][204][205]**

Os valores obtidos podem ser observados na tabela 6, em que é possível validar a variação desses mesmos valores. O valor delta ( $\Delta$ ) corresponderá à relação  $\Delta = \frac{\text{Valor Obtido}}{\text{Valor Publicado}}$ , que dará uma perspectiva da fiabilidade dos resultados.

**Tabela 6 – Resultados obtidos vs. Resultados publicados**

<b>Fractal/Valores</b>	<b>Obtido</b>	<b>Publicado</b>	<b><math>\Delta</math></b>	<b>Tipo de figura</b>
Triângulo de Sierpinski	1,559	1,585	0,984	Geométrica
Ilha de Koch	1,313	1,262	1,040	Geométrica
África do Sul	1,023	1,050	0,974	Costa Marítima
Noruega	1,274	1,520	0,838	Costa Marítima
Reino Unido	1,347	1,250	1,078	Costa Marítima
Austrália	1,146	1,130	1,014	Costa Marítima
Grécia	1,320	1,250	1,056	Costa Marítima

No fim da análise fractal, são recolhidos os valores e tratados, estatisticamente, através do *Statistica* e comparados com o *t-test* de dupla cauda (*Two-Tailed*). Este é um teste estatístico de tipo paramétrico que tem o propósito de verificar se o valor médio de uma distribuição é significativamente diferente de um valor de referência. Já a variância  $\sigma^2$  não é conhecida. Para verificar a hipótese de um valor médio em relação à média da população, é necessário substituir a variância geral por uma estimação  $S^2$ . Esta estimação é obtida de uma variância correta pela amostra, passando a seguir para uma distribuição *t* de Student.

O resultado obtido foi  $t(12) = -0,095$ ;  $p = 0,925$ . Este resultado demonstra que o *fractalyse* é fiável, pois não existem diferenças estatisticamente significativas.

Podemos ainda verificar, através do gráfico radar na figura 43, bem como através da regressão linear apenas, na figura 44, que os valores são similares, tendo uma maior discrepância a análise fractal da Noruega.

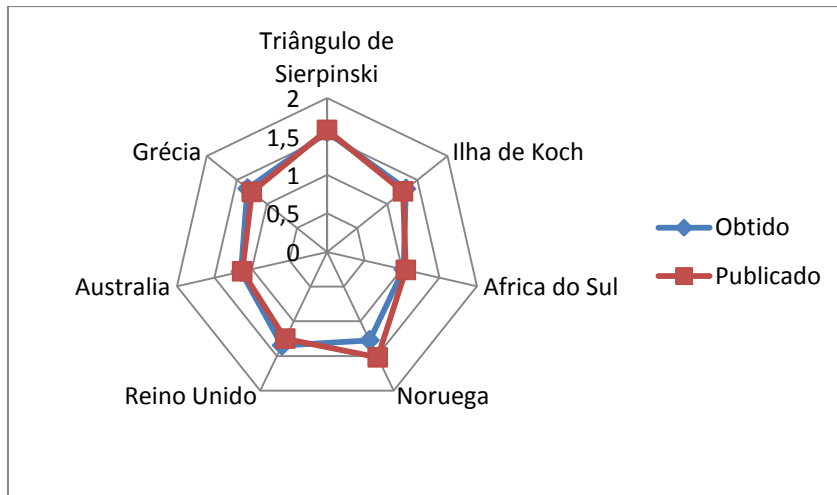


Figura 43 – Gráfico radar da análise fractal

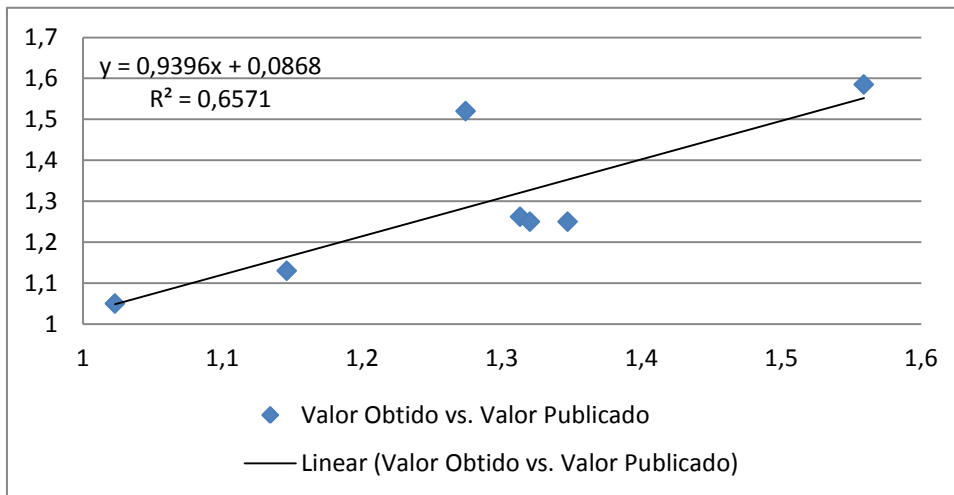


Figura 44 – Regressão linear da análise fractal

## 8.2. ANÁLISE FRACTAL

As redes de transporte são sistemas complexos, quanto à sua análise fractal. A dimensão fractal pode ser definida como uma medida da complexidade dos objetos. Nesta investigação é aplicada a texturas, permitindo quantificar a complexidade da organização dos seus *pixéis*, onde o aspeto visual é diretamente relacionado com a complexidade e homogeneidade da textura [206]. Desta forma, são introduzidas, em seguida, as imagens em análise.

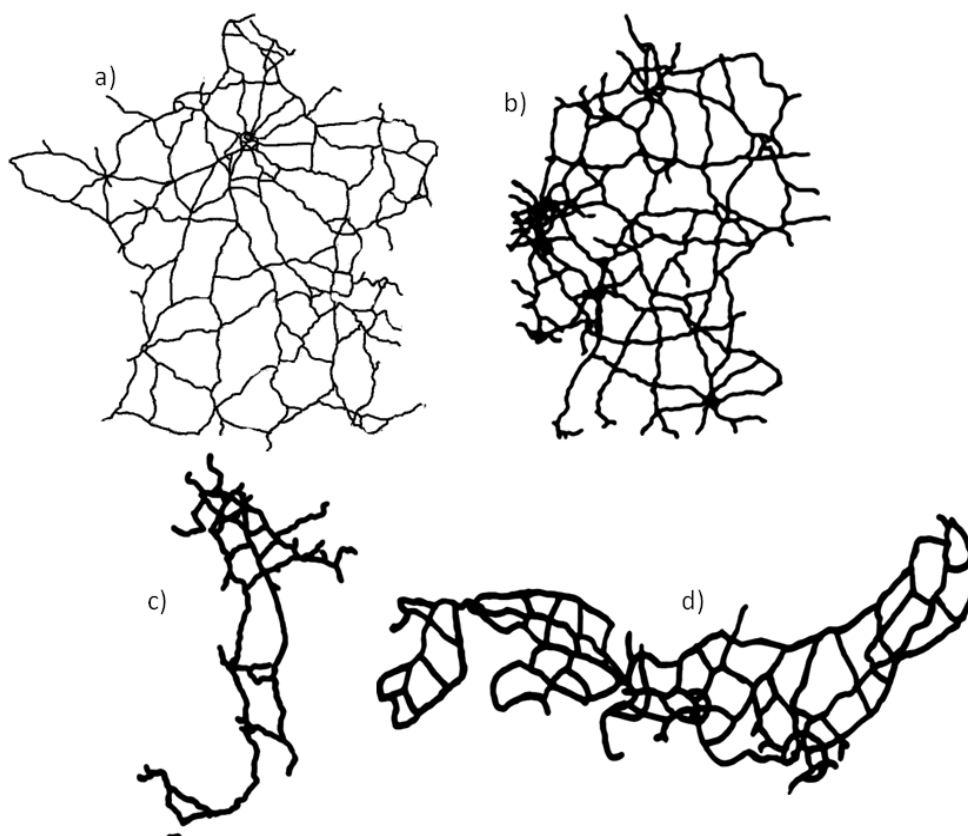
### 8.2.1. AUTOESTRADAS

Para as autoestradas, foram escolhidos todos os percursos destinados ao tráfego de médio e longo curso, com separação física de faixas de rodagem, sem cruzamentos de nível nem acessos a propriedades marginais, com acessos condicionados e sinalizados como tal [207]. As autoestradas proporcionam um fluxo livre de tráfego e sem sinais de trânsito.

Atualmente, a maioria dos países tecnologicamente avançados possui extensas redes de autoestradas, fazendo, muitas delas, parte de um sistema nacional de comunicações viárias.

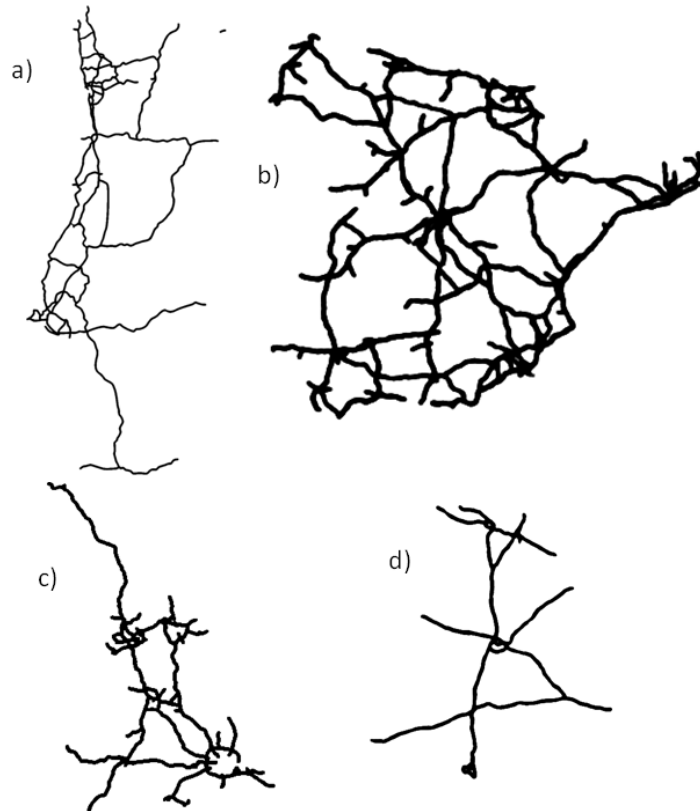
Não foram considerados itinerários principais nem estradas secundárias, de modo a aproximar a velocidade e condições de acesso à VF.

Desta forma, são apresentadas, nas figuras 45 e 46, as autoestradas dos oito países já referenciados no capítulo 7.5, sobre os quais irão recair as análises.



**Figura 45 – Conjunto 1 de mapas das autoestradas analisadas**

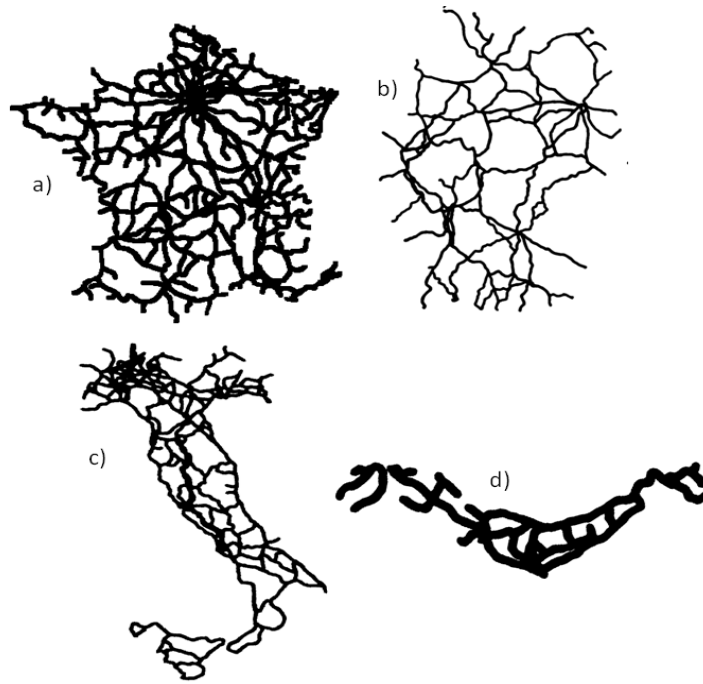
*a) França; b) Alemanha; c) Itália; d) Japão [208][209][210][211]*



**Figura 46 - Conjunto 2 de mapas das autoestradas analisadas**  
*a) Portugal; b) Espanha; c) Reino Unido; d) Carolina do Sul* [212][213][214][215]

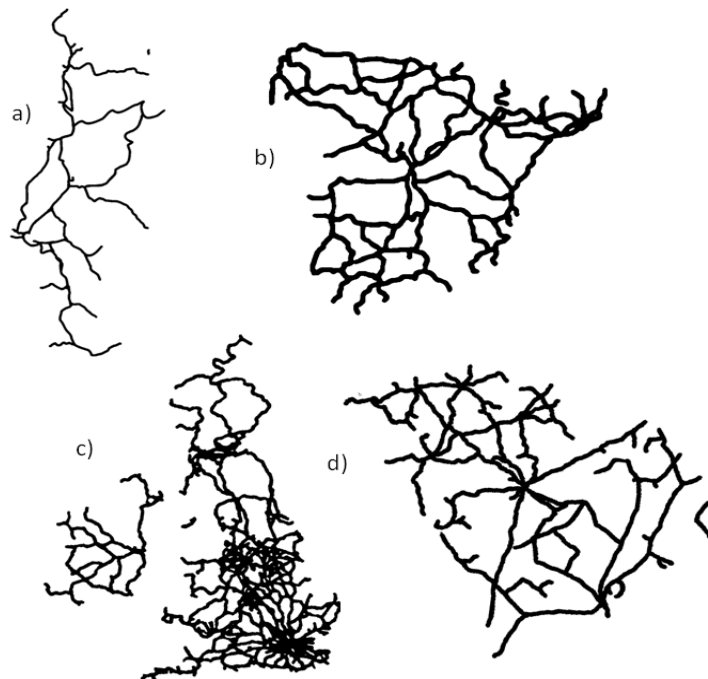
### **8.2.2. REDE FERROVIÁRIA**

De acordo com o princípio da comodidade e mobilidade, a evolução da rede ferroviária percebe e respeita o papel dos demais meios de transporte, ocupa o espaço onde o CF é mais eficiente e competitivo. Assim, a rede ferroviária deverá promover o transporte de mercadorias, potenciando a movimentação de bens de consumo, contribuindo para a competitividade económica, deverá, ainda, reforçar a acessibilidade e a mobilidade urbana, garantindo a articulação com os demais meios de transporte. Nas figuras 47 e 48, é possível ver os exemplos analisados das várias redes ferroviárias, referentes aos oito países referenciados no capítulo 7.5.



**Figura 47 - Conjunto 1 de mapas gerais das redes ferroviárias analisadas**

*a) França; b) Alemanha; c) Itália; d) Japão [216][217][218][219]*



**Figura 48 - Conjunto 2 de mapas gerais das redes ferroviárias analisadas**

*a) Portugal; b) Espanha; c) Reino Unido; d) Carolina do Sul [220][221][222][223]*

### 8.2.3. ALTA VELOCIDADE

O conceito de comboio de AV é abrangente, contudo a definição mais comum indica que o comboio de AV é um transporte que circula sobre carris de ferro, ultrapassando os 250 km/h. Normalmente, estes circulam a velocidades cruzeiro que variam entre 250 e 300 km/h. Nas figuras 49 e 50, estão ilustradas as redes de AV analisadas, referentes aos países referenciados no capítulo 7.5.



**Figura 49 – Conjunto 1 de mapas das redes de AV**

*a) França; b) Alemanha; c) Itália; d) Japão* [224][225][226][227]

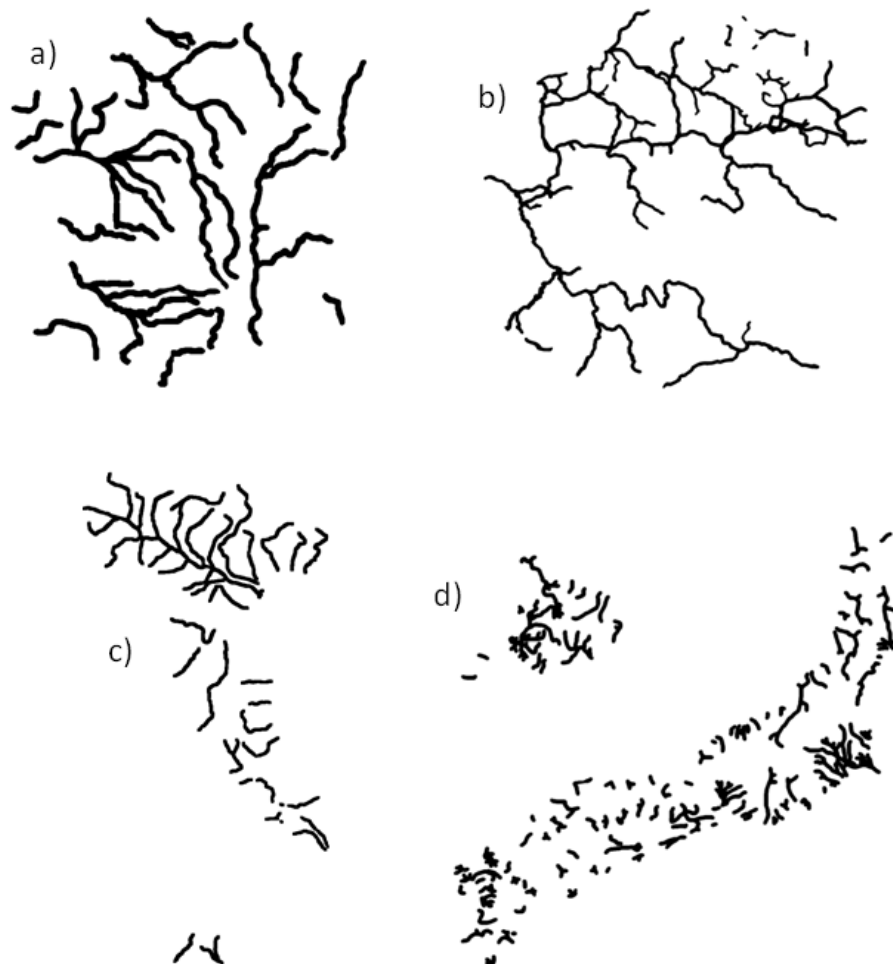


**Figura 50 – Conjunto 2 de mapas das redes de AV**

*a) Portugal; b) Espanha; c) Reino Unido; d) Carolina do Sul* [228][229][230][231]

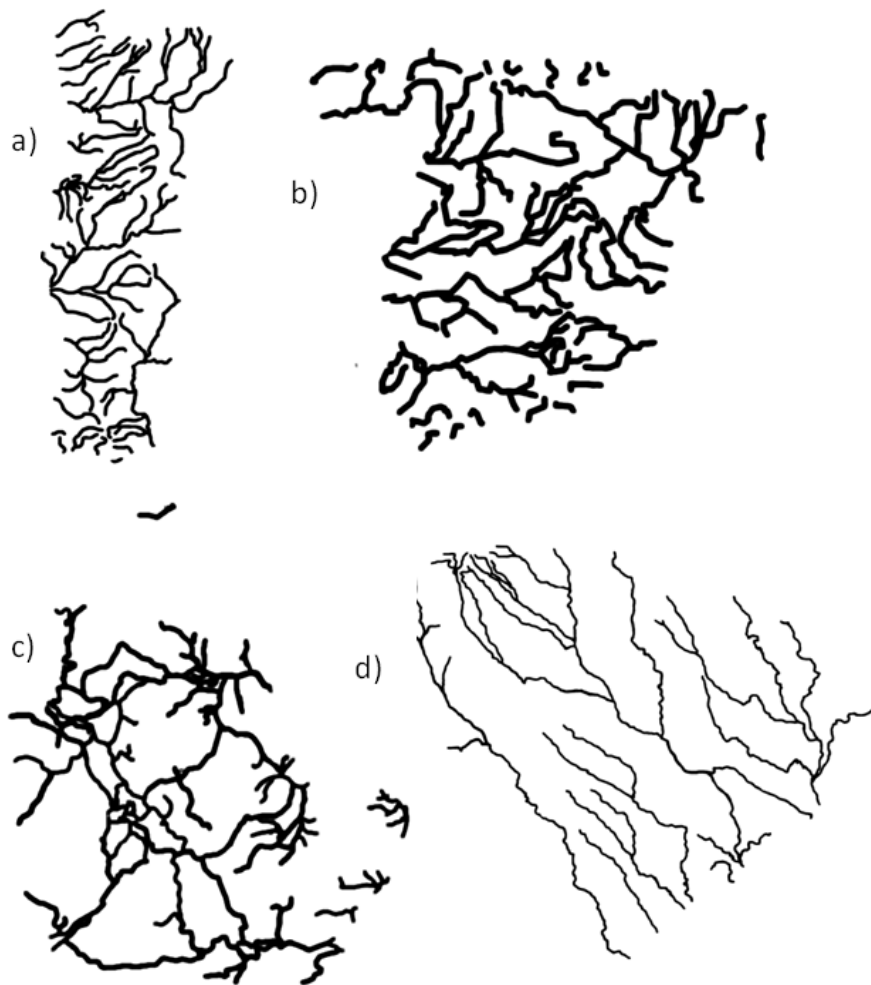
#### 8.2.4. REDES FLUVIAIS OU RIOS

O transporte fluvial é o meio de transporte mais antigo. Ao longo dos anos, pessoas e bens de consumo foram transportados via marítima ou fluvial. É através dos rios ou canais artificiais navegáveis. Apesar de ser o transporte de eleição quanto ao transporte de mercadorias pesadas e volumosas, ele encontra várias condicionantes como caudais, regime dos rios e acidentes de relevo. Como vantagens conta com baixos custos, inexistência de custos para a construção da via, grande capacidade de carga e possibilidade de otimização de rotas. Mas as desvantagens também são conhecidas, é um transporte lento, implica transbordos e possíveis desníveis. Nas figuras 51 e 52, são visíveis os mapas das redes fluviais dos países propostos, no capítulo 7.5 para análise.



**Figura 51 – Conjunto 1 de mapas dos rios e canais**

*a) França; b) Alemanha; c) Itália; d) Japão* [232][233][234][235]



**Figura 52 – Conjunto 2 de mapas dos rios e canais**

*a) Portugal; b) Espanha; c) Reino Unido; d) Carolina do Sul* [236][237][238][239]

### **8.2.5. RIOS PRINCIPAIS**

Em hidrologia, os rios principais são, por definição, os cursos de água principais numa determinada bacia hidrográfica, na qual as correntes afluentes fluem. Em caso de ramificação, o rio principal tem o maior caudal. Em termos de ordem, o rio principal é aquele que tem o maior valor entre as ramificações do sistema. É possível verificar nas figuras 53 e 54 os rios principais, referentes aos países referenciados no capítulo 7.5.



### 8.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise de resultados pode ser dividida em duas partes: demonstração dos valores obtidos e estimação da dimensão fractal e demonstração das diferenças entre os vários tipos de redes.

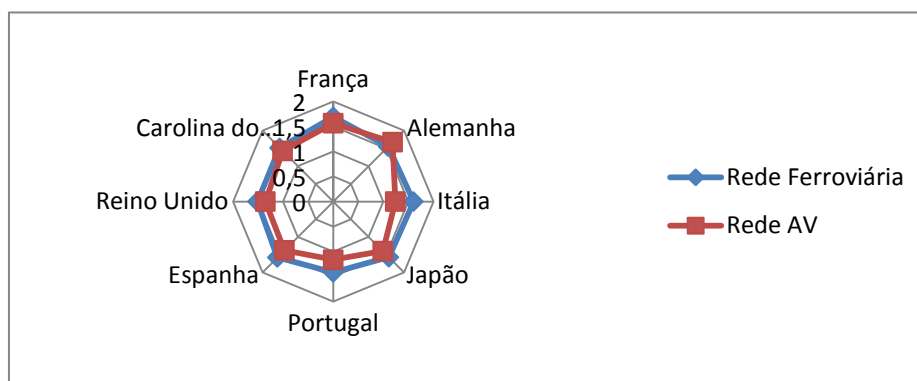
Após a análise fractal das imagens, através do *fractalyse*, foi constituída uma tabela e conseguinte gráfico radar para evidenciar as diferenças entre as redes ferroviárias, bem como os rios dos vários países em análise. Foram ainda realizadas algumas regressões lineares, nos moldes dos pressupostos anteriores, para determinar algumas aproximações da dimensão fractal.

Na tabela 7 são apresentados valores obtidos, respeitante à análise efetuada.

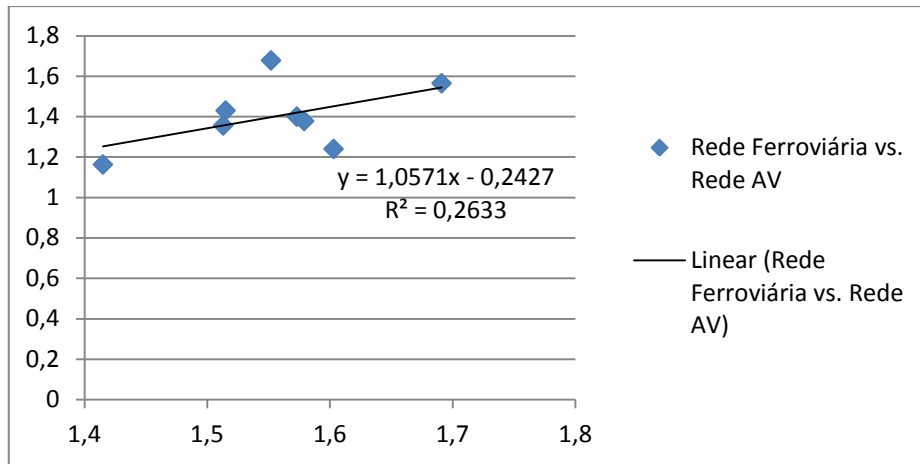
**Tabela 7 – Resultados análise fractal**

<b><i>País/Redes</i></b>	<b><i>Autoestradas</i></b>	<b><i>Rede Ferroviária</i></b>	<b><i>Rede AV</i></b>	<b><i>Rede Fluvial</i></b>	<b><i>Rios Principais</i></b>
França	1,504	1,691	1,565	1,530	1,406
Alemanha	1,484	1,552	1,678	1,497	1,364
Itália	1,435	1,603	1,240	1,338	1,379
Japão	1,531	1,573	1,400	1,427	1,310
Portugal	1,396	1,415	1,163	1,213	1,575
Espanha	1,443	1,579	1,378	1,549	1,432
Reino Unido	1,422	1,513	1,356	1,363	1,360
Carolina do Sul	1,348	1,515	1,430	1,482	1,340

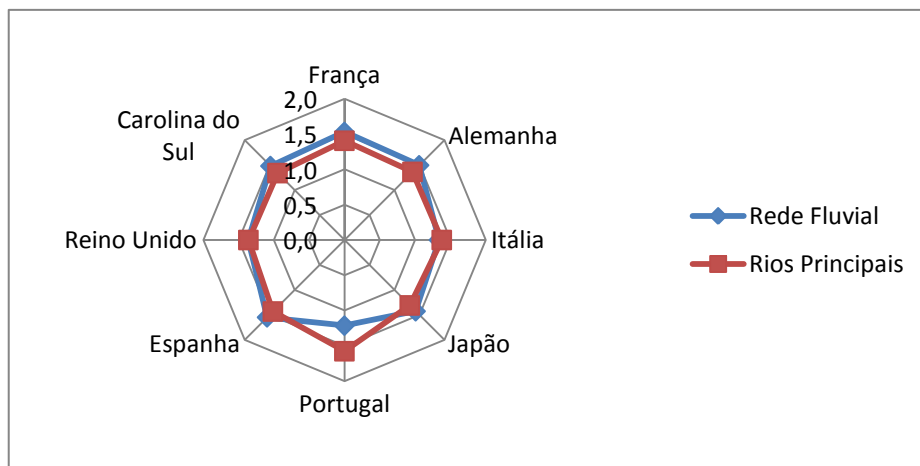
De modo a evidenciar os resultados, na figura 55 são sobrepostos os resultados das redes ferroviárias e de AV, enquanto na figura 57 são sobrepostos os resultados da redes fluviais e dos rios principais. Nas figuras 56 e 58, são demonstradas as aproximações das estimações das dimensões fractais através das regressões lineares.



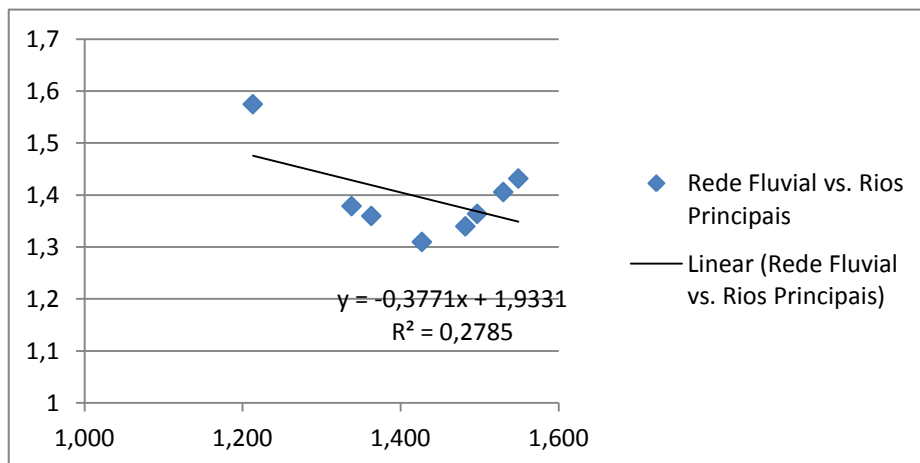
**Figura 55 – Gráfico radar da análise fractal da rede ferroviária comparada com a rede de AV**



**Figura 56 - Regressão linear da análise fractal da rede ferroviária comparada com a rede de AV**



**Figura 57 – Gráfico radar da análise fractal da rede fluvial comparada com os rios principais**



**Figura 58 – Regressão linear da análise fractal da rede fluvial comparada com os rios principais**

Para fazer a comparação e tratamento estatístico dos valores obtidos, provenientes da análise da dimensão fractal das autoestradas, redes ferroviárias, redes de AV, redes fluviais

e rios principais dos oito países visados, foi usado o *t-test* de dupla cauda (*two-tailed*), com recurso ao *Statistica*. Conforme referenciado no capítulo 8.1, este é um teste estatístico de tipo paramétrico que tem o propósito de verificar se o valor médio de uma distribuição é significativamente diferente de um valor de referência.

Os resultados do tratamento estatístico estão indicados na tabela 8, tendo sido encontradas diferenças estatisticamente significativas entre a comparação da rede ferroviária com os rios principais, e a rede ferroviária com todos os rios.

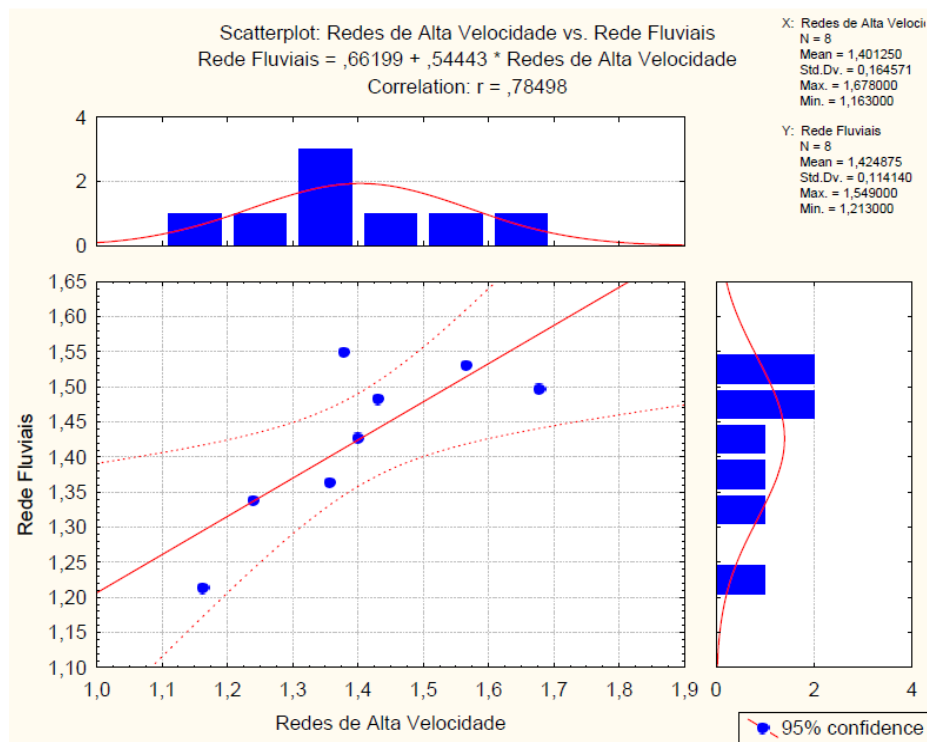
É possível perceber que o desvio padrão das redes ferroviárias varia entre os valores  $0,06 \leq \sigma \leq 0,16$ . Esta análise tem um grau de liberdade calculado com  $N - k$ , onde  $N$  é o número da amostra total com valor 16 e  $k$  é o número do grupo de variáveis com valor 2.

**Tabela 8 - Resultados *t-test* de duas caudas (*two-tailed*)**

<i>Comparações/Valores</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Valor t</i>	<i>Graus Lib.</i>	<i>p</i>
Autoestradas vs. Redes Fluviais	1,45	0,06	1,42	0,11	0,45	14	0,659
Autoestradas vs. Rios Principais	1,45	0,06	1,40	0,08	1,39	14	0,186
<b>Redes Ferroviárias vs. Redes Fluviais</b>	<b>1,56</b>	<b>0,08</b>	<b>1,42</b>	<b>0,11</b>	<b>2,64</b>	<b>14</b>	<b>0,019</b>
<b>Redes Ferroviárias vs. Rios Principais</b>	<b>1,56</b>	<b>0,08</b>	<b>1,40</b>	<b>0,08</b>	<b>3,95</b>	<b>14</b>	<b>0,001</b>
Redes de Alta Velocidade vs. Redes Fluviais	1,40	0,16	1,42	0,11	-0,33	14	0,744
Redes de Alta Velocidade vs. Rios Principais	1,40	0,16	1,40	0,08	0,08	14	0,934
<b>Autoestradas vs. Redes Ferroviárias</b>	<b>1,45</b>	<b>0,06</b>	<b>1,56</b>	<b>0,08</b>	<b>-3,12</b>	<b>14</b>	<b>0,01</b>
Autoestradas vs. Redes de Alta Velocidade	1,45	0,06	1,40	0,16	0,71	14	0,49

De seguida, foi calculada uma correlação linear de *Pearson* para avaliar se existia uma relação entre a complexidade das redes dos vários países analisados, como descrito na figura 59. A correlação entre a rede fluvial e a rede de AV é significativa. Os níveis de confiança desta análise de correlação são de 95%. Na mesma figura, são incluídos os *scatterplot* e os histogramas, com os respetivos níveis de confiança.

Os valores mais altos de complexidade da rede de AV têm uma correspondência direta a valores mais altos de complexidade das redes fluviais.



**Figura 59 - Scatterplot da correlação de Pearson entre redes de AV e os redes fluviais**

Se for tida em consideração a figura 59, é possível verificar que o ponto médio situa-se em 1,40, que é condizente com o valor médio patente na Tabela 8. Já no caso das redes fluviais, o valor médio concentra-se em 1,42, que também está de acordo com a mesma tabela. É possível ainda contrastar, com o histograma, que o intervalo de oscilação, para as redes de AV situa-se entre o mínimo de 1,63 e o máximo de 1,67, enquanto as redes fluviais situa-se entre o mínimo de 1,21 e o máximo de 1,54.

#### 8.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após as análises efetuadas dos casos de estudo e dos mapas das várias redes de transportes, é possível tirar ilações e debater alguns resultados de forma mais crítica.

Desta forma, no que respeita à análise dos casos de estudo, nomeadamente ao valor obtido para o Triângulo de Sierpinski  $D = 1,559$ , indicando uma elevada complexidade da forma geométrica em questão. Já relativamente à figura geométrica da Ilha de Koch, o valor  $D = 1,313$ , é aceitável dizer-se que tem uma complexidade relativamente menor à anterior figura geométrica. Isto relaciona assim, em forma de uma razão  $D$ , a alteração do detalhe da figura com a alteração de escala.

Já relativamente aos mapas geográficos selecionados e analisados como casos de estudo, é possível perceber que o valor mais baixo obtido é África do Sul com  $D = 1,023$  e o valor mais elevado é o do Reino Unido com  $D = 1,347$ , variando os restantes valores entre estes. Tal indicia que a complexidade da costa sul-africana tem uma baixa complexidade. De facto, por comparação visual, poderá antever-se uma complexidade maior do Reino Unido.

Quando à análise estatística dos resultados obtidos dos casos de estudo, contrastando com os valores publicados e já estudados, pode-se constatar que não houve uma diferença estatisticamente significativa entre os valores obtidos e os publicados, assegurando assim a fiabilidade do *fractalyse*.

Relativamente à análise dos mapas dos países em foco nesta investigação, foi feita uma comparação visual, por tópicos, sendo possível paralelizar os valores espectáveis com os obtidos através da análise. Assim, observando o caso das autoestradas nas figuras 45 e 46, é possível verificar que a complexidade das redes da Alemanha e da França é maior que as demais, contrastando com a baixa complexidade da rede portuguesa e americana.

Aplicando a mesma metodologia às redes ferroviárias, patentes nas figuras 47 e 48, é possível verificar que existe maior complexidade na rede ferroviária francesa, com um sistema nodal centrado em Paris, seguida pela Itália, cujo foco é o norte. Em oposição, é possível perceber que Portugal tem o sistema menos complexo, comprovando assim a baixa capilaridade da rede ferroviária.

Usando a mesma linha de pensamento no que respeita à AV, ilustrada nas figuras 49 e 50, rapidamente se percebe que, em termos de complexidade, o maior valor esperado é o da rede alemã, bem como a rede francesa; em oposição a rede italiana e a portuguesa são as que têm menor complexidade. Tal deve-se à dispersão, no caso da rede italiana, e a inexistência de uma rede realmente de AV, no caso da rede portuguesa.

Através das figuras 51 e 52, onde se encontram as redes fluviais, pode visualizar-se que Espanha e França revelam-se mais complexas que Portugal, que apresenta uma rede de menor complexidade.

Por fim, quando analisados os Rios Principais, nas figuras 53 e 54, a Alemanha e Carolina do Sul apresentam uma complexidade inferior aos rios principais em França, Reino Unido e Japão.

Após esta análise visual dos mapas em análise, é contrastado agora com os valores obtidos através do *fractalyse*. Assim, tendo em conta as autoestradas, na realidade a observação feita paraleliza com os dados obtidos, em que a rede alemã tem  $D = 1,484$  e a rede francesa tem  $D = 1,504$ , em que a rede em Portugal tem  $D = 1,396$  e a rede da Carolina do Sul tem  $D = 1,348$ , os valores mais baixos.

No caso das redes ferroviárias, constata-se que o que foi observado é consistente com os resultados obtidos com recurso ao *software* em que a rede francesa e italiana tem valores  $D = 1,691$  e  $D = 1,603$  respetivamente; em oposição com os valores mais baixos vem Portugal com  $D = 1,415$ . No que respeita à rede de AV, também aqui a paralelização foi coerente com a Alemanha e a França com valores, respetivamente,  $D = 1,678$  e  $D = 1,565$ ; do lado oposto, Itália e Portugal com os valores  $D = 1,240$  e  $D = 1,163$ , de acordo com a ordem. Com esta análise, percebe-se que a Alemanha possui uma rede de AV mais densa e complexa, espelhado nas figuras 55 e 56, o que pode indicar um maior investimento e aposta na rede de AV, apesar de a França ser a que mais aposta na rede ferroviária, no seu global.

Quanto às redes fluviais, na realidade das redes mais complexas são a espanhola, com  $D = 1,549$  e a francesa com  $D = 1,530$ , contrastando com a rede fluvial portuguesa com  $D = 1,213$ . Para finalizar a paralelização proposta, na vertente dos rios principais, a análise da complexidade revelou-se relativamente coerente pois a França, o Reino Unido e o Japão mostram ter alguma complexidade adicional nas suas redes com  $D = 1,406$ ,  $D = 1,360$  e  $D = 1,310$ , respetivamente, face à Alemanha e à Carolina do Sul, com  $D = 1,364$  e  $D = 1,340$ . A diferença entre os valores de complexidade do Reino Unido e da Alemanha não é significativa, pelo que é aceitável considerar-se com a mesma complexidade. Já a rede mais complexa é a de Portugal com  $D = 1,575$ , como ilustram as figuras 57 e 58. Assim, é possível concluir que Portugal é o país que terá uma rede mais complexa no que concerne aos rios principais, ao passo que a Espanha possui uma rede mais extensa de rios.

É também aceitável que se, uma rede tem uma determinada complexidade, como por exemplo as redes fluviais ou as redes ferroviárias, então, todas as outras redes têm um nível de complexidade equivalente. Por esta razão, não foram observadas diferenças significativas na comparação das diversas redes analisadas.

Esta investigação debruça-se sobre a relação entre três redes de transportes diferentes, sendo sistemas complexos, que são importantes para maximizar a ligação entre vários sistemas humanos (cidades, trocas comerciais, etc.) com a finalidade principal de desenvolvimento.

Ilustra ainda a capacidade de transporte, do crescimento das cidades e populações em torno dos sistemas de transporte. Assim, existe uma proporcionalidade direta entre a complexidade das redes de transporte com as necessidades humanas das populações em torno destas.

O aparecimento da AV surge como resposta à crescente necessidade humana no que respeita à rapidez de comunicação entre os sistemas complexos que são as cidades. Desta maneira, a dimensão fractal da AV tem uma correlação com a rede fluviais, que são os pontos de expansão das populações e das indústrias. Benguigui e Daoud (1991) consideram que existe um processo comum para construir todos os cenários humanos, como é o caso das infraestruturas. Por esta razão, as infraestruturas não têm diferenças na geometria espacial.

Após esta investigação, é possível aferir que, devido à significância que existe entre redes ferroviárias e rios principais, a construção das redes ferroviárias tem uma relação com os rios principais, devido à necessidade histórica de comprovar a potencialidade das vias ferroviárias e o comboio em relação ao transporte fluvial. Ainda assim, a complexidade da rede ferroviária demonstra ser significativamente maior que a da rede fluvial, os rios. Mas a complexidade das redes de transportes é diferente conforme o país em análise. Um exemplo é a Itália. A Itália é um dos países europeus em análise, com maior complexidade na rede ferroviária com  $D = 1,603$ . Após a revolução industrial, as indústrias cresceram no triângulo industrial que compreendia três cidades do norte: Turim, Milão e Génova. Estas três cidades surgiram perto do rio principal de Itália, o rio Po, que no início da industrialização aumentou as trocas comerciais de matérias-primas. Por esta razão, a rede ferroviária italiana tem uma complexidade maior no noroeste. O mesmo é possível

verificar-se com a ligação rodoviária, cuja complexidade da rede de autoestradas neste triângulo é maior. Esta mesma complexidade, verificada na rede ferroviária e rodoviária, não ocorre no resto do país, pois existem outras indústrias relevantes.

No que respeita a Portugal, a dimensão da industrialização é muito menor em relação aos restantes países europeus. Historicamente, Portugal tem ainda uma maior apetência marítima. Assim, dos países analisados, Portugal é o que tem uma rede ferroviária menos complexa com  $D = 1,415$ . Se se confrontar com os valores da rede de AV e dos rios principais, é possível perceber que Portugal é dos países analisados com menor complexidade na rede de AV (apesar de não ser verdadeiramente de AV), contrariamente à complexidade dos rios principais, cujo valor é o maior dos países considerados com  $D = 1,575$ . Comparativamente com os restantes países, a França tem a rede ferroviária mais complexa com  $D = 1,691$ , atestando, assim, a necessidade, ao longo dos anos, que a França teve de se afirmar como um eixo ferroviário europeu, bem como a necessidade de ligação dos seus vários polos de negócios ou indústrias, que se encontram disseminadas pelo país.

Um caso particular são as redes ferroviárias das ilhas, o Reino Unido e o Japão. O desenvolvimento do Reino Unido e do Japão tem uma dependência da rede fluvial que está concordante com o tráfego marítimo. A complexidade da rede fluvial de ambos os países não é grande, resultando mesmo em valores baixos, mas as redes de AV e de autoestradas têm valores mais altos de complexidade. Uma possível explicação pode ser que as redes de AV e autoestradas podem favorecer os tráfegos marítimos em termos de uma maior eficiência, quanto a trocas comerciais internacionais.

Se forem comparadas todas as redes e todos os países em análise, a França apresenta uma complexidade geral significativamente maior que a do Reino Unido ( $t = 2,471$ ;  $p = 0,038$ ). Esta diferença evidencia a complexidade dos transportes da França que representa uma rede no eixo europeu. Mas, por outro lado, a menor complexidade do Reino Unido reflete-se numa melhor organização e gestão dos transportes.

O cenário é diferente quando se fala em países extra comunitários, no que respeita aos sistemas de transportes, como o Japão e a Carolina do Sul. Esta última foi particularmente importante pois foi o primeiro estado dos EUA a dar vida, comercialmente, a uma linha de CF. O CF na Carolina do Sul apresenta uma complexidade maior do que as autoestradas

( $D = 1,348$ , no caso das autoestradas e  $D = 1,515$ , no caso da rede ferroviária). Na Carolina do Sul, podemos constatar que a rede ferroviária tem uma complexidade similar à dos rios. Nos EUA, provavelmente a rede ferroviária foi desenvolvida em concorrência com os rios para o transporte, mas também no início da construção, as locomotivas precisavam de muita água para funcionar, pois eram a vapor. Por esta razão, surgiam várias linhas ferroviárias junto aos rios. A AV que surgiu nos últimos anos, pode ser integrada num sistema maior, a nível nacional, dos EUA, precisando de ligar cidades de diferentes estados. Assim, a AV, aparenta ter uma complexidade independente dos rios e das autoestradas, mas esta última tem uma complexidade concorrencial com os rios principais.

Por último, no caso do Japão, apresenta muitas trocas comerciais marítimas, muitas das quais iniciaram com a chegada dos portugueses à ilha, em 1543. O Japão tem, historicamente, uma tradição no desenvolvimento dos sistemas ferroviários, bem como se afigura como pioneiro na AV, com o comboio *Bala*, já que se trata de uma ilha, apresentando uma necessidade de garantir a troca de bens e mercadorias por via marítima, de modo a favorecer a indústria tecnológica. Nos anos 60, falou-se do "milagre japonês" que aconteceu com a explosão da economia na exportação, após a sua derrota na II Guerra Mundial e a sua devastação com Hiroxima e Nagasaki. A relação entre as autoestradas e as redes ferroviárias no Japão é muito semelhante à relação que se encontra no Reino Unido, como uma rede ferroviária mais complexa do que as autoestradas. A rede de AV não aparenta ser muito complexa. Mas isso pode depender das dimensões das ilhas do Japão e não ser similar a outras redes de transportes públicos. Contudo, a rede de AV do Japão é uma das mais tecnologicamente desenvolvidas.

A relação entre autoestradas foi também analisada. A comparação entre as autoestradas e toda a rede ferroviária tem uma diferença significativa, em termos de complexidade, com valores mais baixos para as autoestradas. Toda a rede ferroviária compreende a rede de AV e a restante rede. Por esta razão, é possível que os níveis de complexidade da rede ferroviária sejam mais altos. Então, a comparação entre a autoestradas e a rede de AV não apresenta valores significativos, em termos de diferença. Nesse sentido, a rede de AV foi desenvolvida após as autoestradas, melhorando o serviço da rede ferroviária de muitos países. As autoestradas têm a vantagem de permitir o transporte privado sem vínculos de tempo e espaço. Uma outra vantagem é que as autoestradas podem ligar as cidades

principais e os principais polos negociais. A rede rodoviária, com todas as estradas associadas, não foi tida em consideração.

Em toda a Europa, a França tem uma rede de autoestradas mais complexa com  $D = 1,504$ , do que Portugal com  $D = 1,396$ . Esta assimetria reflete-se também na diferença de complexidade entre os dois países, ao nível da rede ferroviária.

Entre a década de 1980-1990, a estratégia para o desenvolvimento económico foi pensada com base na melhoria das redes rodoviárias com alta velocidade. A construção de novas autoestradas pareceu surtir efeitos positivos sobre o desenvolvimento das regiões rurais. A relação entre a complexidade da infraestrutura rodoviária e os interesses económicos está ligada ao desenvolvimento industrial de um país. Estudos económicos, efetuados no passado, focavam-se em três dimensões: diferença nos efeitos das autoestradas de acordo com o tempo; diferenças nos efeitos da indústria sobre as autoestradas; diferenças da região sobre as autoestradas.

Desta forma, é possível contextualizar a complexidade da rede de autoestradas do Japão que conta com valor de  $D = 1,531$ . Isto porque o país conta com uma grande tradição no que respeita a trocas comerciais. Daí também possuir, fora da Europa, a rede ferroviária e a rede de AV mais complexa.



## 9. CONCLUSÕES

O principal objetivo desta investigação foi o estudo e a análise fractal dos sistemas ferroviários e demais sistemas de transporte concorrentes, como as autoestradas e redes fluviais, procurando-se perceber se existia uma correlação entre estes.

A obtenção das dimensões fractais dos mapas dos sistemas de transporte era um dos propósitos, por forma a perceber a complexidade das redes ferroviárias, redes de autoestradas e redes fluviais. Para tal, foi feito o estudo da história da VF, do comboio (o seu estado atual e o seu futuro), bem como toda a pesquisa, tratamento e análise fractal dos referidos mapas. Tal propósito surgiu numa perspetiva de dar a conhecer o desenvolvimento do comboio e da VF, a sua importância no contexto económico-social, com recurso à matemática como uma ferramenta de análise.

A presente investigação estudou a relação entre a complexidade dos meios de transportes públicos com graus diferentes de velocidade, tendo como pano de referência países pioneiros, impulsionadores e de vias com bitolas diferentes, no setor ferroviário. De salientar, também, que a distribuição destes países é geograficamente diferente, as suas condições económico-sociais e seus contextos históricos dispares.

Os países mais impulsionadores como a França, Alemanha ou Itália possuem, no seu geral, redes ferroviárias e redes de AV mais complexas. Apesar destes possuírem uma rede

fluvial e de navegabilidade aceitável, o que fortalece a aposta no transporte ferroviário, alicerçam o seu investimento no setor. Já os países que possuem bitola ibérica, como o caso de Portugal e Espanha, têm redes menos complexas quer ao nível ferroviário geral, quer ao nível da AV. No futuro, com a unificação de todas as redes de AV europeias, a limitação imposta hoje pela diferença de bitola poderá deixar de ser um entrave, podendo potenciar o desenvolvimento económico da península ibérica, principalmente a Espanha.

Quanto ao Japão e ao Reino Unido, estes têm uma dependência dos três sistemas de transporte de mercadorias, que impulsiona as trocas comerciais internacionais, apesar da complexidade da rede fluvial de ambos os países não ser grande. Já as redes de AV e de autoestradas têm valores altos de complexidade. Uma explicação pode ser que as redes de AV e autoestradas podem complementar os tráfegos marítimos obtendo uma maior eficiência, quanto a trocas comerciais internacionais. O modelo das ilhas pode ser aplicado ao continente europeu no que respeita à rede ferroviária, se considerado como península, pois desta forma seria considerada como uma rede única.

O cálculo da dimensão fractal pode ser considerada uma medida fidedigna para avaliar os parâmetros de complexidade e também para fazer uma estimativa do impacto das redes de transporte, num quadro de desenvolvimento económico-social de um país. Por esta razão, os resultados da presente investigação, indiretamente, vão indiciar modelos de redes que poderão ser aplicados nos diversos países, de modo a impulsionar o aspeto comercial.

O difícil acesso a imagens (quer em termos de informação atualizada, quer em termos redes específicas) de todas as redes analisadas, bem como a qualidade e definição das mesmas foram alguns dos constrangimentos enfrentados. O número de amostras limitado dos países analisados foi também uma limitação nesta investigação, pois não permitiu que pudessem ser realizadas comparações mais aprofundadas.

Para futuro, seria interessante aprofundar esta investigação, ampliando o número de países a analisar, que possuam redes ferroviárias, rede de autoestradas e rede fluvial, fazendo também uma comparação entre os níveis económico-sociais dos países e a complexidade dos sistemas de transporte. Seria algo com um interesse abrangente e global, com um impacto nas empresas do setor, como estudos de mercado.

Outra vertente interessante seria a possibilidade de explorar a comparação do sistema ferroviário com o sistema metropolitano, nos países analisados. Tal resultaria na perceção

da complexidade e distribuição das redes em questão, trazendo a debate o estudo de uma adequada expansão das redes ferroviárias e de metropolitanos. De salientar que esta comparação só poderia ser feita no contexto da AV pois, como o metropolitano, este sistema de transporte só efetua serviço de passageiros, sem serviço de mercadoria.



## Referências Documentais

- [1] Freightos, “Largest Freight Planes, Trains, Ships and Trucks Ever,” *freightos.com*, 2016. [Online]. Available: <https://www.freightos.com/largest-freight-planes-trains-ships-trucks-world/>. [Accessed: 30-Sep-2016].
- [2] B.-B. Ltd, “Planes, Trains or Automobiles? – Carbon Emissions Compared for Different Forms of Transport,” *beaglebrown.com*, 2016. [Online]. Available: <http://www.beaglebrown.com/planes-trains-or-automobiles-carbon-emissions-compared-for-different-forms-of-transport/>. [Accessed: 30-Sep-2016].
- [3] Wikipedia.org, “Epidemiology of motor vehicle collisions,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Epidemiology\\_of\\_motor\\_vehicle\\_collisions#/media/File:Road-way\\_vs.\\_railway\\_safety.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Epidemiology_of_motor_vehicle_collisions#/media/File:Road-way_vs._railway_safety.png). [Accessed: 30-Sep-2016].
- [4] M. J. T. Lewis, “Railways in the Greek and Roman World,” *Early Railw. a Sel. Pap. from First Int. Early Railw. Conf.*, pp. 8–19, 2001.
- [5] Wikipedia.org, “Guerra do Peloponeso,” *wiki*. [Online]. Available: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Guerra\\_do\\_Peloponeso](https://pt.wikipedia.org/wiki/Guerra_do_Peloponeso). [Accessed: 29-Mar-2016].
- [6] awesomestories.com, “Ancient Greece - Moving Ships Over Land,” *awesomestories.com*, 2016. [Online]. Available: <https://www.awesomestories.com/asset/view/Ancient-Greece-Moving-Ships-Over-Land->. [Accessed: 29-Mar-2016].
- [7] Wikipedia.org, “Istmo de Corinto,” *Wiki*. [Online]. Available: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Istmo\\_de\\_Corinto](https://pt.wikipedia.org/wiki/Istmo_de_Corinto). [Accessed: 29-Mar-2016].
- [8] M. Cooley, “Rutways,” *liquisearch.com*, 2000. [Online]. Available: [http://www.liquisearch.com/rut\\_roads/rutways](http://www.liquisearch.com/rut_roads/rutways). [Accessed: 29-Mar-2016].
- [9] M. Cooley, “Rut Roads,” *liquisearch.com*, 2000. [Online]. Available: [http://www.liquisearch.com/rut\\_roads](http://www.liquisearch.com/rut_roads). [Accessed: 29-Mar-2016].
- [10] Holylandphotos, “Detail of the Tracks/Ruts Diolkos,” *holylandphotos*. [Online]. Available: <https://holylandphotos.wordpress.com/tag/diolkos/>. [Accessed: 29-Mar-2016].
- [11] J. L. Stoddard, “Sicily - John L. Stoddard’s Lectures,” *StasoSphere.com*, 2016. [Online]. Available: <http://chestofbooks.com/travel/italy/sicily/John-Stoddard-Lectures/Sicily-Part-29.html>. [Accessed: 29-Mar-2016].
- [12] H. Bulle, *Das Theater zu Sparta*. Bayerische Akademie der Wissenschaften, 1937.
- [13] M. Bieber, *The history of the Greek and Roman theatre*. Princeton University Press, 1961.
- [14] C.-E. Ruelle, “Poliorcétique des Grecs,” *Rev. Archéologique*, vol. 26, pp. 270–272, 1873.
- [15] B. Gerster, “L’Isthme de Corinthe: tentatives de percement dans l’antiquité,” *Bull. Corresp. hellénique*, vol. 8, no. 1, pp. 225–232, 1884.
- [16] M. Al-Idrisi, “Geographie d’Édrisi.” P.-A. Joubert (tr.), (Amsterdam: Philo Press, 1975), 1836.
- [17] B. R. MacDonald, “The Diolkos,” *J. Hell. Stud.*, vol. 106, pp. 191–195, 1986.
- [18] Infopedia.pt, “Tucídides,” *infopedia.pt*, 2016. [Online]. Available: [http://www.infopedia.pt/\\$tucidides](http://www.infopedia.pt/$tucidides). [Accessed: 18-Mar-2016].
- [19] wikiwand.com, “Trirreme,” *wiki*. [Online]. Available: <http://www.wikiwand.com/es/Trirreme>. [Accessed: 19-Mar-2016].

- [20] J. F. Coates, J. S. Morrison, and N. B. Rankov, "The Athenian Trireme: The History and Reconstruction of an Ancient Greek Warship," *Cambridge-London-New York*, 1986.
- [21] L. Casson, "Ships and Seamanship in the Ancient World (Princeton, 1971)," *and plates*, vol. 112, pp. 108–112, 1977.
- [22] J. B. Salmon, *Wealthy Corinth: a history of the city to 338 BC*. Oxford University Press, USA, 1984.
- [23] M. Cardozo, *A proposito da lavra do ouro na Provincia de Tras-os-Montes durante a epoca romana*. 1954.
- [24] J. Wahl, "Três Minas: vorbericht über die archäologischen Untersuchungen im Bereich des römischen Goldbergwerks 1986/87," *Madriider Mitteilungen*, no. 29, pp. 221–244, 1988.
- [25] O. Livre, "Complexo Mineiro de Tresminas e Jales iniciam candidatura à UNESCO," *ondalivrefm.net*, 2015. [Online]. Available: <http://ondalivrefm.net/2015/06/10/complexo-mineiro-de-tresminas-e-jales-iniciam-candidatura-a-unesco/>. [Accessed: 23-Mar-2016].
- [26] M. J. T. Lewis, *Early wooden railways*. AM Kelley, 1970.
- [27] Wikimedia.org, "Leitnagel Hund (Mining cart)," *wiki*. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leitnagel\\_Hund\\_\(Mining\\_cart\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leitnagel_Hund_(Mining_cart).png). [Accessed: 02-Mar-2016].
- [28] L. T. White, B. S. Hall, and D. C. West, *On pre-modern technology and science: a volume of studies in honor of Lynn White, jr.*, vol. 1. Udena: published under the auspices of the Center for Medieval and Renaissance Studies, University of California, Los Angeles, 1976.
- [29] S. Vryonis, "The question of the Byzantine mines," *Speculum*, vol. 37, no. 1, pp. 1–17, 1962.
- [30] G. R. Lewis, "The Stannaries: A Study of the Medieval Tin Miners of Cornwall and Devon," 1908.
- [31] M. J. T. Lewis, *Millstone and Hammer: the origins of water power*. University of Hull, 1997.
- [32] B. B. Blaine, "The enigmatic water-mill," in *On pre-modern technology and science: a volume of studies in honor of Lynn White, Jr.*, 1976, pp. 163–176.
- [33] D. Di, S. Umanistici, R. Prof, and P. Brunello, "Le strade ferrate: l' Italia preunitaria e gli elementi dell' identità nazionale," pp. 2012–2013, 2013.
- [34] Pantograph.se, "Der Reiszug Funicular," *funiculars.net*, 2016. [Online]. Available: <http://www.funiculars.net/line.php?id=350>. [Accessed: 02-Apr-2016].
- [35] M. Azéma, "Der Reiszug," *funimag.com*, 1997. [Online]. Available: <http://www.funimag.com/funimag10/RESZUG03.HTM>. [Accessed: 02-Apr-2016].
- [36] S. Hylton, *The Grand Experiment: The Birth of the Railway Age, 1820-1845*. Ian Allan, 2007.
- [37] R. S. Smith, "Huntingdon Beaumont adventurer in coal mines," *Cult. Theory Crit.*, vol. 1, no. 1, pp. 115–153, 1957.
- [38] R. S. Smith, *Early Coal-mining Around Nottingham, 1500-1650*. University of Nottingham, Department of Adult Education, 1989.
- [39] P. Nix, "Huntingdon Beaumont's Wollaton to Strelley Waggonway," *Nottingham Hidden History Team*, 2013. [Online]. Available: <https://nottinghamhiddenhistoryteam.wordpress.com/2013/07/30/huntingdon-beaumonts-wollaton-to-strelley-waggonway/>. [Accessed: 04-Apr-2016].
- [40] G. Boyes and L. University College, *Early Railways 4: Papers from the Fourth International Early Railways Conference*. Six Martlets Pub., 2010.
- [41] Wikipedia.org, "Wagonway," *wiki*. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wagonway>. [Accessed: 05-Apr-2016].
- [42] Wikipedia.org, "Tanfield Railway," *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tanfield\\_Railway](https://en.wikipedia.org/wiki/Tanfield_Railway). [Accessed: 07-Apr-2016].

- [43] M. Duell, "Working replica passenger train travelling one worlds oldest railways County Durham," *dailymail.co.uk*, 2014. [Online]. Available: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2625614/Working-replica-passenger-train-travelling-one-worlds-oldest-railways-County-Durham.html>. [Accessed: 07-Apr-2016].
- [44] G. Herbert, *The Practical Mechanic and Engineer's Magazine*, no. vol. 4. Published at the Mechanic's Magazine Office, 1845.
- [45] G. L. Lapini, "Alle origini della ferrovia," *storiadimilano.it*. [Online]. Available: <http://www.storiadimilano.it/citta/milanotecnica/ferrovie/origini.htm>. [Accessed: 01-Jan-2016].
- [46] Wikipedia.org, "Timeline of railway history," *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline\\_of\\_railway\\_history#1\\_bc](https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_railway_history#1_bc). [Accessed: 07-Apr-2016].
- [47] P. J. G. Ransom, *The archaeology of the transport revolution, 1750-1850*. World's Work, 1984.
- [48] Wikipedia.org, "History of rail transport," *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_rail\\_transport](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_rail_transport). [Accessed: 10-Apr-2016].
- [49] Stanleyhistoryonline.com, "Lake Lock Rail Road," *stanleyhistoryonline.com*. [Online]. Available: <http://www.stanleyhistoryonline.com/Lake-Lock-Rail-Road.html>. [Accessed: 13-Apr-2016].
- [50] C. E. Lee, "Early railways in Surrey," *Trans. Newcom. Soc.*, vol. 21, no. 1, pp. 49–79, 1940.
- [51] J. H. Turner, *The London, Brighton, and South Coast Railway*, vol. 2. David & Charles Publishers, 1978.
- [52] D. Gerhold, "The rise and fall of the Surrey Iron Railway, 1802--46," *Surrey Archaeol. Collect.*, vol. 95, pp. 193–210, 2010.
- [53] T. R. Wandle, S. Croydon, R. Thames, T. Domesday, J. Malcolm, R. Wandle, R. Dodd, and R. Wandle, "CHAPTER 2 THE FORMATION OF THE SURREY," 1800.
- [54] F. Tajani, *Storia delle ferrovie italiane: a 100 anni d'all apertura della prima linea*. Garzanti, 1939.
- [55] F. Classics, "Richard Trevithick's Puffing Devil," *forest-classics.co.uk*. [Online]. Available: [http://www.forest-classics.co.uk/trevithick\\_puffing\\_devil.htm](http://www.forest-classics.co.uk/trevithick_puffing_devil.htm). [Accessed: 18-Apr-2016].
- [56] Wikipedia.org, "Richard Trevithick," *wiki*. [Online]. Available: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Richard\\_Trevithick](https://pt.wikipedia.org/wiki/Richard_Trevithick). [Accessed: 15-Apr-2016].
- [57] C. Wolmar and G. L. Giacone, *Sangue, ferro e oro. Come le ferrovie hanno cambiato il mondo*. EDT, 2011.
- [58] J. Simkin, "Penydarren," *spartacus-educational.com*, 1997. [Online]. Available: <http://spartacus-educational.com/RApenydarren.htm>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [59] Wikipedia.org, "Salamanca," *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Salamanca\\_\(locomotive\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Salamanca_(locomotive)). [Accessed: 01-Jan-2016].
- [60] A. Uk, "George Stephenson," *history.co.uk*, 2015. [Online]. Available: <http://www.history.co.uk/biographies/george-stephenson>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [61] Archive.org, "Annali universali di statistica, economia pubblica, storia, viaggi e commercio," *archive.org*. [Online]. Available: <https://archive.org/stream/annaliuniversal52unkngoog#page/n441/mode/2up>. [Accessed: 19-Apr-2016].
- [62] C. B. H. Encyclopedia, "The Opening of the L&M Railway," *history.parkfieldict.co.uk*. [Online]. Available: <http://history.parkfieldict.co.uk/georgians/railways/the-opening-of-the-liverpool-and-manchester-railway>. [Accessed: 19-Apr-2016].
- [63] N. R. M. / S. & S. P. Library, "The Remains of Stephenson's 'Rocket', 1829," *ssplprints.com*. [Online]. Available: <http://www.ssplprints.com/image/92449/remains-of-stephensons-rocket-1829-the>. [Accessed: 19-Apr-2016].
- [64] M. L. Longarini, *L'arte bellica e le strade ferrate*. Simple, 2011.

- [65] Wikipedia.org, “Ligne de Saint-Étienne à Andrézieux,” *wiki*. [Online]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne\\_de\\_Saint-Étienne\\_à\\_Andrézieux](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_de_Saint-Étienne_à_Andrézieux). [Accessed: 29-May-2016].
- [66] Wikipedia.org, “Ligne de Saint-Étienne à Lyon,” *wiki*. [Online]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne\\_de\\_Saint-Étienne\\_à\\_Lyon](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_de_Saint-Étienne_à_Lyon). [Accessed: 29-May-2016].
- [67] B. Carroll, *Australia’s railway days : milestones in railway history*. South Melbourne, Vic. : Macmillan, 1976.
- [68] Wikipedia.org, “Rail profile,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rail\\_profile](https://en.wikipedia.org/wiki/Rail_profile). [Accessed: 02-May-2016].
- [69] kentfind.co.uk, “History Of Whitstable,” *kentfind.co.uk*. [Online]. Available: <http://www.kentfind.co.uk/about/whitstable/history.php>. [Accessed: 02-May-2016].
- [70] B. Cooper, *Transformation of a valley: the Derbyshire Derwent*. Heinemann Educational Publishers, 1983.
- [71] history.com, “Industrial Revolution,” *history.com*, 2016. [Online]. Available: <http://www.history.com/topics/industrial-revolution>. [Accessed: 19-Apr-2016].
- [72] Mikes.railhistory.railfan.net, “Ireland’s Railway Systems,” *mikes.railhistory.railfan.net*, 2010. [Online]. Available: <http://mikes.railhistory.railfan.net/r051.html>. [Accessed: 21-Apr-2016].
- [73] W. T. Easterbrook and H. G. J. Aitken, *Canadian economic history*. University of Toronto Press, 1988.
- [74] Wikipedia.org, “Rail transportation in the United States,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rail\\_transportation\\_in\\_the\\_United\\_States](https://en.wikipedia.org/wiki/Rail_transportation_in_the_United_States). [Accessed: 02-May-2016].
- [75] Thomaslegion.net, “Civil War Weapons,” *thomaslegion.net*. [Online]. Available: <http://www.thomaslegion.net/americancivilwar/civilwarweaponsfirearmssmallarms.html>. [Accessed: 23-Apr-2016].
- [76] F. Assante, M. de Luca, G. Muto, S. de Majo, and R. Parisi, *Ferrovie e tranvie in Campania-Dalla Napoli-Portici alla Metropolitana regionale*. Giannini, 2006.
- [77] P. Atterbury, “Victorian Technology,” *bbc.co.uk*, 2011. [Online]. Available: [http://www.bbc.co.uk/history/british/victorians/victorian\\_technology\\_01.shtml](http://www.bbc.co.uk/history/british/victorians/victorian_technology_01.shtml). [Accessed: 26-Apr-2016].
- [78] History.com, “Morse Code & The Telegraph,” *history.com*. [Online]. Available: <http://www.history.com/topics/inventions/telegraph>. [Accessed: 30-Apr-2016].
- [79] C. F. D. Marshall, *A history of the Southern Railway*. Southern Railway, 1936.
- [80] Wikipedia.org, “Railway semaphore signal,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Railway\\_semaphore\\_signal#cite\\_note-1](https://en.wikipedia.org/wiki/Railway_semaphore_signal#cite_note-1). [Accessed: 26-Apr-2016].
- [81] Wikipedia.org, “Order of Railroad Telegraphers,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Order\\_of\\_Railroad\\_Telegraphers](https://en.wikipedia.org/wiki/Order_of_Railroad_Telegraphers). [Accessed: 30-Apr-2016].
- [82] History Zone, “Railways: Construction,” *richardjohnbr.wordpress.com*. [Online]. Available: <https://richardjohnbr.wordpress.com/2008/04/22/railways-construction/>. [Accessed: 01-Jan-2016].
- [83] L. Malchair, *Index de la fortification française: 1874-1914*. Autoédition, 2008.
- [84] P. J. G. Ransom, *The Mont Cenis Fell Railway*. Twelveheads Press, 1999.
- [85] Lemog3d, “SUEZ à l’Exposition de Turin ? ou pas,” *lemog3d.blogspot.pt*. [Online]. Available: <http://lemog3d.blogspot.pt/2014/02/suez-lexposition-de-turin-ou-pas.html>. [Accessed: 18-May-2016].
- [86] L. A. du V. Saint-Etienne, “Saint-Etienne, naissance du réseau européen de chemin de fer ?,” *vieux.saint.etienne.perso.sfr.fr*, 2009. [Online]. Available: <http://vieux.saint.etienne.perso.sfr.fr/chemindefer/expo2002.htm>. [Accessed: 23-May-2016].
- [87] Freiherr v. Röhl, “Österreichische Eisenbahnen, Enzyklopädie des Eisenbahnwesens, Berlin Wien 1923.” [Online]. Available: <http://www.zeno.org/Roell-1912/A/%C3%96sterreichische+Eisenbahnen>.

- [88] A. Bernardello, “La prima ferrovia fra Venezia e Milano,” *Stor. della Imp. Privil. Str. ferrata Ferdinandea Lomb. (1835--1852). Ist. Veneto di Sci. Lett. ed Arti, Venice*, 1996.
- [89] N. Marten, “The opening of the railway tunnel through the Gotthard Pass,” *blog.sbb.ch*, 2014. [Online]. Available: <http://blog.sbb.ch/en/2014/06/18/opening-of-the-railway-tunnel-through-the-gotthard-pass/>. [Accessed: 01-Jun-2016].
- [90] M. de Fomento, “Efemérides de la infraestructura y el ferrocarril español,” *fomento.es*. [Online]. Available: [http://www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/FERROCARRILES/E\\_FEMERIDES/](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/FERROCARRILES/E_FEMERIDES/). [Accessed: 01-Jun-2016].
- [91] P. Cornish, “Transport And Supply During The First World War,” *iwm.org.uk*. [Online]. Available: <http://www.iwm.org.uk/history/transport-and-supply-during-the-first-world-war>. [Accessed: 02-Jun-2016].
- [92] L. Bülow, “The Holocaust, Crimes, Heroes and Villains,” *Lest We Forget*, 2010.
- [93] United States Holocaust Memorial Museum, “Nicholas Winton,” *wiki*. [Online]. Available: <http://www.auschwitz.dk/Winton.htm>. [Accessed: 04-Jun-2016].
- [94] Y. Vashem, “The Holocaust: Nazi Germany and the Jews 1933-1939,” *yadvashem.org*. [Online]. Available: [http://www.yadvashem.org/yv/en/holocaust/about/01/crucial\\_year.asp](http://www.yadvashem.org/yv/en/holocaust/about/01/crucial_year.asp). [Accessed: 04-Jun-2016].
- [95] U. S. H. M. Museum, “Hitler llega al poder,” *Ushmm.Org*. [Online]. Available: <http://www.ushmm.org/outreach/es/article.php?ModuleId=10007671> (28/10/2015). [Accessed: 04-Jun-2016].
- [96] A. LeBor, “The Independent,” *www.fpp.co.uk*, 2000. [Online]. Available: <http://www.fpp.co.uk/online/00/08/Independent240800.html>. [Accessed: 20-Jun-2006].
- [97] R. Hilberg, R. Hilberg, P. Historien, and R. Hilberg, *The destruction of the European Jews*, vol. 3. Holmes & Meier New York, 1985.
- [98] R. L. Braham, “Rescue operations in Hungary: myths and realities,” *East Eur. Q.*, vol. 38, no. 2, pp. 173–204, 2004.
- [99] Y. Bauer and H. J. Schmeller, “Jews For Sale? Nazi Jewish Negotiations, 1933--1945,” *Hist. Rev. New Books*, vol. 24, no. 1, pp. 35–36, 1995.
- [100] L. Bilsky, *Transformative justice*. University of Michigan Press, 2004.
- [101] BBC, “The Last Train from Belsen,” *bbc.co.uk*, 2009. [Online]. Available: [http://www.bbc.co.uk/birmingham/content/articles/2005/01/14/last\\_train\\_from\\_belsen1\\_feature.shtml](http://www.bbc.co.uk/birmingham/content/articles/2005/01/14/last_train_from_belsen1_feature.shtml). [Accessed: 04-Jun-2016].
- [102] E. J. de Jesus Coelho, *Brazilian articulated steam locomotives*. Mem{ó}ria do Trem, 2003.
- [103] E. Siemens, “High-speed electric railway experiments on the Marienfelde-Zossen line,” *Electr. Eng. J. Inst.*, vol. 33, no. 168, pp. 894–923, 1904.
- [104] C. P. Hood, *Shinkansen: from bullet train to symbol of modern Japan*. Routledge, 2006.
- [105] J. F. Picard and A. Beltran, “D’où viens tu TGV?,” *Rev. Générale des Chemins Fer*, pp. 7–81, 1994.
- [106] C. J. R. Company, “The Tokaido Shinkansen,” *english.jr-central.co.jp*. [Online]. Available: <http://english.jr-central.co.jp/about/outline.html>. [Accessed: 04-Jun-2016].
- [107] E. J. R. Company, “Shinkansen,” *jreast.co.jp*. [Online]. Available: <http://www.jreast.co.jp/e/routemaps/tohokushinkansen.html>. [Accessed: 04-Jun-2016].
- [108] UIC, “Railway Statistics: Synopsis,” 2014.
- [109] M. Nottara, Yann;Williams, “Early TGV History,” *trainweb.org*. [Online]. Available: <http://www.trainweb.org/tgvpages/history.html>. [Accessed: 05-Jun-2016].

- [110] V. Guigueno, “Building a High-Speed Society: France and the Aerotrain, 1962--1974,” *Technol. Cult.*, vol. 49, no. 1, pp. 21–40, 2008.
- [111] K. Fender, “TGV High Speed Hero,” *Trains Mag.*, vol. 8, p. 70, 2010.
- [112] E. Group, “The Channel Tunnel infrastructure,” *eurotunnelgroup.com*, 2016. [Online]. Available: <http://www.eurotunnelgroup.com/uk/the-channel-tunnel/infrastructure/>. [Accessed: 05-Jun-2016].
- [113] BBC, “High-speed rail plan for Glasgow to Edinburgh line,” *bbc.com*, 2012. [Online]. Available: <http://www.bbc.com/news/uk-scotland-scotland-politics-20296195>. [Accessed: 05-Jun-2016].
- [114] Hochgeschwindigkeitszuege.com, “ICE 2 der Baureihe 402,” *hochgeschwindigkeitszuege.com*. [Online]. Available: <http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/deutschland/ice-2.php?vorgaengerdir=deutschland>. [Accessed: 06-Jun-2016].
- [115] Bloomberg.com, “Deutsche Bahn London Route Delayed to 2015 as Trains Held Up,” *bloomberg.com*. [Online]. Available: <http://www.bloomberg.com/news/articles/2011-12-08/deutsche-bahn-london-route-delayed-to-2015-as-trains-arrive-late>. [Accessed: 06-Jun-2016].
- [116] Hochgeschwindigkeitszuege.com, “ICE-TD der Deutschen Bahn AG,” *hochgeschwindigkeitszuege.com*. [Online]. Available: <http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/deutschland/ice-td.php>. [Accessed: 06-Jun-2016].
- [117] W. Hardmeier and A. Schneider, “Direttissima Bologna-Firenze-Roma,” 1989.
- [118] T. Pallotta and M. Mosca, “Dalla Direttissima all’alta velocita,” *Ponte San Nicolò, Duegi Ed.*, 2007.
- [119] G. Tiberi, “Gli investimenti ferroviari: 150 anni di alta velocità,” *La Tec. Prof.*, 1989.
- [120] Flytoget.no, “Flytoget,” *flytoget.no*. [Online]. Available: [http://www.flytoget.no/flytoget\\_eng](http://www.flytoget.no/flytoget_eng). [Accessed: 07-Jun-2016].
- [121] F. Preface, “Jernbanestatistikk 2007 1,” 2007.
- [122] Lavanguardia, “El AVE Madrid-Barcelona alcanza los 310 Km/h,” *lavanguardia.com*. [Online]. Available: <http://www.lavanguardia.com/viajes/20111024/54235438166/el-ave-madrid-barcelona-alcanza-los-310-km-h.html>. [Accessed: 07-Jun-2016].
- [123] P. A. De, “Horário Verão 1984 ’ Edição online : Renato Guedes e Dario Silva .,” 2006.
- [124] D. Alexandra and T. Carmona, “Contributo Biobibliográfico para o estudo do Daniela Alexandra Tavares Carmona Contributo Biobibliográfico para o estudo do Caminho-de-ferro em Portugal ( 1856 – 2006 ),” 2012.
- [125] Restos de coleção, “O Foguete,” *restosdecolecao.blogspot.pt*. [Online]. Available: <http://restosdecolecao.blogspot.pt/2009/08/o-foguete.html>. [Accessed: 07-Jun-2016].
- [126] CP, “Alfa Pendular,” *cp.pt*, 2016. [Online]. Available: <https://www.cp.pt/passageiros/pt/como-viajar/alfa-pendular>. [Accessed: 03-Aug-2016].
- [127] EMEF, “EMEF apresenta Nova Geração dos Comboios Alfa Pendular da CP,” *emef.pt*, 2016. [Online]. Available: <https://www.emef.pt/emef-apresenta-nova-geracao-dos-comboios-alfa-pendular-da-cp/>. [Accessed: 03-Aug-2016].
- [128] P. Oltermann, “World’s longest rail tunnel to open in Switzerland under Alps,” *theguardian.com*, 2016. [Online]. Available: <http://www.theguardian.com/world/2016/may/31/worlds-longest-tunnel-to-open-in-switzerland>. [Accessed: 07-Jun-2016].
- [129] L. T. C. Rolt, *Isambard Kingdom Brunel: A Biography*. Longmans, Green, 1957.
- [130] D. J. Puffert, “Path Dependence in Spatial Networks: The Standardization of Railway Track Gauge,” *Explor. Econ. Hist.*, vol. 39, no. 3, pp. 282–314, 2002.
- [131] M. V. Q. Cury, “Escolha entre a bitola larga brasileira e a bitola internacional padrão para a linha 4 do metro do Rio de Janeiro,” p. 19, 2011.

- [132] D. R. Tobergte and S. Curtis, “PARÂMETROS FUNDAMENTAIS,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [133] A. Freitas, D. Silva, D. Amorim, F. Cruz, and G. Lopes, “Os comboios de passageiros em Portugal - a evolução e as características,” 2011.
- [134] J. R. da Silva and M. Ribeiro, *Os comboios em Portugal*, no. vol. 3. Terramar, 2007.
- [135] E. de F. Ribeiro, “A Gazeta dos Caminhos de Ferro e a promoção do turismo em Portugal (1888-1940),” 2006.
- [136] C. M. TORRES, “A evolução das linhas portuguesas e o seu significado ferroviário,” *Gaz. dos Caminhos Ferro*, vol. 70, no. 1681, pp. 9–12, 1958.
- [137] Dgsi, “Acórdão do Supremo Tribunal de Justiça - transição Sociedade Estoril,” *dgsi.pt*, 1989. [Online]. Available: <http://www.dgsi.pt/jstj.nsf/954f0ce6ad9dd8b980256b5f003fa814/194aecacb944b0ef802568fc003971e1?OpenDocument>. [Accessed: 11-Jul-2016].
- [138] L. G. D. Oliveira, Wellington Martins de;Rosa, “Locomotivas a Vapor,” *fem.unicamp.br*. [Online]. Available: <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/locom0/locom0.html>. [Accessed: 19-Jul-2016].
- [139] Train History, “Types of Trains, Locomotives and Rails,” *trainhistory.net*. [Online]. Available: <http://www.trainhistory.net/train-facts/train-types/>. [Accessed: 29-Jun-2016].
- [140] Monorails.org, “Definition of Monorail,” *monorails.org*. [Online]. Available: <http://www.monorails.org/tMspages/WhatIs.html>. [Accessed: 02-Jun-2016].
- [141] A. Caetano, Edgar;Pincha, João Pedro;Suspiro, “O ‘comboio fantasma’ de Oeiras. O que correu mal com o SATU?,” *observador.pt*, 2015. [Online]. Available: <http://observador.pt/especiais/comboio-fantasma-oeiras-correu-mal-satu/>. [Accessed: 02-Jul-2016].
- [142] M. de Oeiras, “Satu - Sistema Automático de Transporte Urbano,” *cm-oeiras.pt*, 2013. [Online]. Available: <http://www.cm-oeiras.pt/amunicipal/Sustentabilidade/Transportes/Paginas/Satu.aspx>. [Accessed: 02-Jul-2016].
- [143] F. Portuguesa, “Gestor da infraestrutura ferroviária portuguesa 20120717.”
- [144] UNISIG, “SUBSET-044 2.4.0 FFFIS for Euroloop,” no. 2, pp. 1–102, 2012.
- [145] A. Chiappini, P. Guido, and A. Hougardy, “Ertms Unit Assignment of Values To Etc Variables,” pp. 1–54.
- [146] V. Kregelin, “Bombardier Transportation Rail Control Solutions LST Symposium,” no. May, 2011.
- [147] Revolvly, “Eurobalise,” *Revolvly.com*. [Online]. Available: <http://www.revolvly.com/main/index.php?s=Eurobalise>. [Accessed: 29-Jun-2016].
- [148] Mermec, “Eurobalise Mermec Group,” *Mermec group*. [Online]. Available: <http://www.mermecgroup.com/protect/lineside-equipment/635/eurobalise.php>. [Accessed: 02-Jun-2016].
- [149] L. Beijing Jiaoda Signal Technology Co., “LEU-Lineside Electronic Unit,” *jd-signal.com*. [Online]. Available: <http://www.jd-signal.com/en/plus/view.php?aid=23>. [Accessed: 21-Jun-2016].
- [150] E. Levels, “ERTMS Factsheets ERTMS LEVELS DIFFERENT ERTMS / ETCS APPLICATION LEVELS,” pp. 2–3.
- [151] F. J. Shaw, *Little railways of the world*. Howell-North, 1958.
- [152] Festiniog Railway Company, “Ffestiniog Railway History,” *festrail.co.uk*. [Online]. Available: [http://www.festrail.co.uk/fr\\_history\\_1.htm](http://www.festrail.co.uk/fr_history_1.htm). [Accessed: 10-Apr-2016].
- [153] S. Cotterill, “Dandy wagon, Stockton and Darlington Railway,” *co-curate.ncl.ac.uk*. [Online]. Available: <https://co-curate.ncl.ac.uk/resources/view/41085/>. [Accessed: 11-Apr-2016].
- [154] M. Cruz, “Engenharia e desenvolvimento de produto , uma aplicação ao Material Circulante : a experiência da SOREFAME,” 2004.

- [155] CP, “CP A Empresa,” *cp.pt*, 2016. [Online]. Available: <https://www.cp.pt/institucional/pt/empresa>. [Accessed: 02-Jul-2016].
- [156] EMEF, “EMEF - A Empresa,” *emef.pt*, 2016. [Online]. Available: <https://www.emef.pt/quem-somos/a-empresa/>. [Accessed: 04-Aug-2016].
- [157] A. Funderburg, Lise;Cott, “The World’s Most Beautiful Train Stations,” *architecturaldigest.com*, 2014. [Online]. Available: <http://www.architecturaldigest.com/gallery/best-train-station-architecture-slideshow/all>. [Accessed: 19-Jul-2016].
- [158] G. dos Caminhos de Ferro, “Há quarenta anos.” [Online]. Available: [http://hemerotecadigital.cm-lisboa.pt/OBRAS/GazetaCF/1936/N1174/N1174\\_master/GazetaCFN1174.pdf](http://hemerotecadigital.cm-lisboa.pt/OBRAS/GazetaCF/1936/N1174/N1174_master/GazetaCFN1174.pdf).
- [159] C. e D. Online, “Ponte D. Maria,” *cyberdemocracia.blogspot.pt*. [Online]. Available: <http://cyberdemocracia.blogspot.pt/2011/06/ponte-d-maria-pia-oporto-portugal.html>. [Accessed: 19-Jul-2016].
- [160] J. Ping, L. Hui, and W. Li, “Learning an Application of Superconductivity in Modern Mass Transportation,” vol. 5, no. 4, pp. 148–151, 2012.
- [161] H. W. Lee, K. C. Kim, and J. Lee, “Review of Maglev train technologies,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 7, pp. 1917–1925, 2006.
- [162] M. Magazine, “The Northeast Maglev,” *metro-magazine.com*, 2016. [Online]. Available: <http://www.metro-magazine.com/management-operations/video/250232/the-northeast-maglev>. [Accessed: 30-Jul-2016].
- [163] Electrical4u.com, “Linear Induction Motor,” *electrical4u.com*, 2016. [Online]. Available: <http://www.electrical4u.com/linear-induction-motor/>. [Accessed: 01-Aug-2016].
- [164] M. S. Carvalho, “Contributo para o estudo do Motor Linear Síncrono Supercondutor,” 2012.
- [165] R. F. Chapelo Braga, Bárbara Beatriz;Ribeiro de Miranda, Bruno Alves;Pereira de Melo, Carolina Costa Leite;Pereira de Melo, Joana Costa Leite;Trindade, Miguel Morais;Ferreira Lopes, “Os Motores em Engenharia Mecânica Motores de Comboios,” 2014.
- [166] Wikipedia.org, “Transrapid,” *wiki*. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transrapid>. [Accessed: 02-Aug-2016].
- [167] D. Prindle, “Japan just crushed the high speed rail record with a 366 MPH maglev train,” *digitaltrends.com*, 2015. [Online]. Available: <http://www.digitaltrends.com/cool-tech/japan-breaks-train-record-366-mph/>. [Accessed: 02-Aug-2016].
- [168] Biography.com, “Elon Musk Biography,” *biography.com*. [Online]. Available: <http://www.biography.com/people/elon-musk-20837159#an-earnest-entrepreneur>. [Accessed: 02-Aug-2016].
- [169] ELEgante, “Hyperloop: Transporte Futurista de Musk vai entrar em produção,” *elegante.pt*, 2016. [Online]. Available: <http://elegante.pt/2016/07/28/hyperloop-transporte-futurista-de-musk-vai-entrar-em-producao/>. [Accessed: 02-Aug-2016].
- [170] H. One, “What is Hyperloop?,” *hyperloop-one.com*, 2016. [Online]. Available: <https://hyperloop-one.com/what-is-hyperloop>. [Accessed: 02-Aug-2016].
- [171] BBC, “Early test shows off high-speed Hyperloop transport system,” *bbc.com*, 2016. [Online]. Available: <http://www.bbc.com/news/world-us-canada-36273151>. [Accessed: 02-Aug-2016].
- [172] E. Reynolds, “Is ‘Hyperloop’ really coming to Europe?,” *wired.co.uk*, 2016. [Online]. Available: <http://www.wired.co.uk/article/hyperloop-one-helsinki-stockholm>. [Accessed: 02-Aug-2016].
- [173] T. A. De Assis, J. G. Vivas Miranda, F. D. B. Mota, R. F. S. Andrade, and C. M. C. De Castilho, “Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais,” *Rev. Bras. Ensino Física*, vol. 30, no. 2, p. 2304.1-2304.10, 2008.
- [174] A. R. Backes and O. M. Bruno, “Técnicas de estimativa da dimensão fractal: Um estudo comparativo,” *INFOCOMP J. Comput. Sci.*, vol. 4, no. 3, p. 50, 2005.

- [175] R. C. Coelho and L. da F. Costa, “The box-counting fractal. dimension: Does it provide an accurate subsidy for experimental shape characterization? if so, how to use it,” *An. do Sibgrapi*, vol. 95, pp. 183–191, 1995.
- [176] D. Stoyan and H. Stoyan, “Methods for the empirical determination of fractal dimension,” *Fractals, Random Shapes Point Fields*. Wiley, New York, pp. 39–45, 1994.
- [177] V. O. Nams, “Improving accuracy and precision in estimating fractal dimension of animal movement paths,” *Acta Biotheor.*, vol. 54, no. 1, pp. 1–11, 2006.
- [178] Wikipedia.org, “Minkowski–Bouligand dimension,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Minkowski-Bouligand\\_dimension](https://en.wikipedia.org/wiki/Minkowski-Bouligand_dimension). [Accessed: 04-Aug-2016].
- [179] R. Kubrusly, “Conjuntos de Cantor,” *Instituto Goiano de Matemática*, 2011. [Online]. Available: [http://www.igm.mat.br/aplicativos/index.php?option=com\\_content&view=article&id=564:cantor&catid=85:extr](http://www.igm.mat.br/aplicativos/index.php?option=com_content&view=article&id=564:cantor&catid=85:extr) as. [Accessed: 04-Aug-2016].
- [180] A. E. Schwertner, C. F. Alba, and R. E. Vertuan, “Os Fractais E O Limite De Uma Função : Uma Exploração Com O Geogebra,” pp. 1–18, 2014.
- [181] Mely, “Triângulo de Sierpinski,” *topologia.wordpress.com*. [Online]. Available: <https://topologia.wordpress.com/2008/12/19/el-conjunto-de-cantor-y-el-triangulo-de-sierpinski/>. [Accessed: 04-Aug-2016].
- [182] wikipedia.qwika.com, “Menger Sponge,” *wiki*. [Online]. Available: [http://wikipedia.qwika.com/en2pt/Menger\\_sponge](http://wikipedia.qwika.com/en2pt/Menger_sponge). [Accessed: 04-Aug-2016].
- [183] history.mcs.st-and.ac.uk, “Benoit Mandelbrot,” *history.mcs.st-and.ac.uk*, 1999. [Online]. Available: <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Mandelbrot.html>. [Accessed: 25-Jul-2016].
- [184] Phys.technion.ac.il, “Lucien Benguigui,” *phys.technion.ac.il*. [Online]. Available: <https://phys.technion.ac.il/en/people?view=person&id=19>. [Accessed: 17-Jul-2016].
- [185] L. Benguigui, “The fractal dimension of some railway networks,” *J. Phys. I*, vol. 2, no. 4, pp. 385–388, 1992.
- [186] L. Benguigui and M. Daoud, “Is the suburban railway system a fractal?,” *Geogr. Anal.*, vol. 23, no. 4, pp. 362–368, 1991.
- [187] M. Batty and P. A. Longley, “Urban shapes as fractals,” *Area*, pp. 215–221, 1987.
- [188] T. A. Witten, “Random kinetic aggregation,” in *Physics of Finely Divided Matter*, Springer, 1985, pp. 212–230.
- [189] S.-L. Lee and Y.-L. Luo, “Simulation of diffusion-limited aggregation: effects of launching boundary shape and non-fixed centre,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 195, no. 4, pp. 405–411, 1992.
- [190] T. A. Witten Jr and L. M. Sander, “Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 47, no. 19, p. 1400, 1981.
- [191] M. Batty, P. Longley, and S. Fotheringham, “Urban Growth and Form: Scaling, Fractal Geometry, and Diffusion-Limited Aggregation,” *Environ. Plan. A*, vol. 21, no. 11, pp. 1447–1472, 1989.
- [192] M. L. Marques and M. C. Ferreira, “Morfologia Urbana Da Região Metropolitana,” 2001.
- [193] M. Daoud and J. P. Cotton, “Star shaped polymers : a model for the conformation and its concentration dependence,” *J. Phys.*, vol. 43, no. 3, pp. 531–538, 1982.
- [194] M. Daoud, J. P. Cotton, B. Farnoux, G. Jannink, G. Sarma, H. Benoit, C. Duplessix, C. Picot, and P. G. De Gennes, “Solutions of flexible polymers. Neutron experiments and interpretation,” *Macromolecules*, vol. 8, no. 6, pp. 804–818, 1975.
- [195] “Fractais e a geometria da natureza.” [Online]. Available: <http://cftc.cii.fc.ul.pt/PRISMA/capitulos/capitulo2/modulo4/topico9.php>. [Accessed: 28-Sep-2016].
- [196] “Benoit.” [Online]. Available: <http://www.trusoft-international.com/>. [Accessed: 28-Sep-2016].

- [197] “FracLab.” [Online]. Available: <https://project.inria.fr/fraclab/>. [Accessed: 28-Sep-2016].
- [198] “Fractalyse.” [Online]. Available: <http://www.fractalyse.org/>. [Accessed: 28-Sep-2016].
- [199] “Mathworks.” [Online]. Available: [https://www.mathworks.com/products/image/index.html?s\\_tid=gn\\_loc\\_drop](https://www.mathworks.com/products/image/index.html?s_tid=gn_loc_drop). [Accessed: 28-Sep-2016].
- [200] Wikipedia.org, “Correzione di gamma,” *wiki*. [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Correzione\\_di\\_gamma](https://it.wikipedia.org/wiki/Correzione_di_gamma). [Accessed: 03-Oct-2016].
- [201] Wikipedia.org, “West Coast National Park,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/West\\_Coast\\_National\\_Park#/media/File:South\\_Africa\\_relief\\_location\\_map.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/West_Coast_National_Park#/media/File:South_Africa_relief_location_map.svg). [Accessed: 29-Aug-2016].
- [202] Thenorwayfjords.com, “Norway Fjords,” *thenorwayfjords.com*. [Online]. Available: <http://www.thenorwayfjords.com/Fjords-By-Region.html>. [Accessed: 29-Aug-2016].
- [203] Ukcoastguide, “UK Coast Guide,” *ukcoastguide.co.uk*, 2016. [Online]. Available: [http://www.ukcoastguide.co.uk/about\\_ukcoastguide.htm](http://www.ukcoastguide.co.uk/about_ukcoastguide.htm). [Accessed: 29-Aug-2016].
- [204] C. Best, “Map Australia Outline,” *ClipArt Best*, 2016. [Online]. Available: <http://www.clipartbest.com/map-australia-outline>. [Accessed: 29-Aug-2016].
- [205] K. Chatzidimitriou, “Calculating the fractal dimension of the Greek coastline,” *kyrcha.info*, 2013. [Online]. Available: <http://kyrcha.info/2013/04/18/tutorials-calculating-the-fractal-dimension-of-the-greek-coastline-1-25/>. [Accessed: 29-Aug-2016].
- [206] B. B. Chaudhuri and N. Sarkar, “Texture segmentation using fractal dimension,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 17, no. 1, pp. 72–77, 1995.
- [207] I. D. I.-E. R.- Ip, “Auto-estradas: características técnicas,” p. 10, 2008.
- [208] About-france.com, “Map of the French motorway network,” *about-france.com*, 2016. [Online]. Available: <http://about-france.com/geo/motorways.htm>. [Accessed: 16-Aug-2016].
- [209] German-autobahn.eu, “Highways Germany,” *german-autobahn.eu*. [Online]. Available: <http://www.german-autobahn.eu/index.asp?page=history>. [Accessed: 16-Aug-2016].
- [210] Wikimedia.org, “autostradale italiana.” [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rete\\_autostradale\\_italiana-labeled.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rete_autostradale_italiana-labeled.svg). [Accessed: 16-Aug-2016].
- [211] Blogimg.goo.ne.jp, “Japan Motorway Map,” *blogimg.goo.ne.jp*. [Online]. Available: [http://blogimg.goo.ne.jp/user\\_image/39/d7/b30f421dc97a651835d363e9faffac28.jpg](http://blogimg.goo.ne.jp/user_image/39/d7/b30f421dc97a651835d363e9faffac28.jpg). [Accessed: 16-Aug-2016].
- [212] I. E. de Portugal, “Mapa da Rede,” *infraestruturasdeportugal.pt*, 2016. [Online]. Available: <http://www.infraestruturasdeportugal.pt/rede/rodoviaria/mapa-da-rede>. [Accessed: 16-Aug-2016].
- [213] Motorways-exitlists.com, “Mapa de autovias y autopistas,” *motorways-exitlists.com*. [Online]. Available: [http://motorways-exitlists.com/images/maps/spain\\_6.0.jpg](http://motorways-exitlists.com/images/maps/spain_6.0.jpg). [Accessed: 16-Aug-2016].
- [214] Abparking.co.uk, “Motorways UK,” *abparking.co.uk*. [Online]. Available: <https://www.abparking.co.uk/directions>. [Accessed: 16-Aug-2016].
- [215] Ontheworldmap.com, “South Carolina highway map,” *Ontheworldmap.com*, 2016. [Online]. Available: <http://ontheworldmap.com/usa/state/south-carolina/south-carolina-highway-map.html>. [Accessed: 16-Aug-2016].
- [216] Imgday.com, “Train network in France between 1910 and 2014,” *imgday.com*. [Online]. Available: <http://imgday.com/category/scholastic/maps/page/12/>. [Accessed: 28-Aug-2016].
- [217] Wikipedia.org, “Schienennetz,” *wiki*. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Schienennetz>. [Accessed: 28-Aug-2016].

- [218] Italiarail, “Italy Rail Map,” *italiarail.com*. [Online]. Available: <https://www.italiarail.com/italy-rail-map>. [Accessed: 28-Aug-2016].
- [219] J. R. Society, “Japanese Railway Map.” [Online]. Available: <http://www.japaneserailwaysociety.com/jrs/freight/irmajpp.gif>. [Accessed: 28-Aug-2016].
- [220] Infraestruturas de Portugal S.A., “Directório da Rede IP 2017,” p. 134, 2015.
- [221] Ferropedia.es, “Mapas de ferrocarriles de España y Portugal,” *wiki*. [Online]. Available: [http://ferropedia.es/wiki/Mapas\\_de\\_ferrocarriles\\_de\\_Espa%C3%B1a\\_y\\_Portugal](http://ferropedia.es/wiki/Mapas_de_ferrocarriles_de_Espa%C3%B1a_y_Portugal). [Accessed: 28-Aug-2016].
- [222] Wikipedia.org, “UK Railway Map,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:UK\\_railway\\_map.png#/media/File:UK\\_railway\\_map.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:UK_railway_map.png#/media/File:UK_railway_map.png). [Accessed: 28-Aug-2016].
- [223] S. C. F. Commission, “South Carolina Railroad (Public & Private Lines),” *filmisc.com*. [Online]. Available: <http://www.filmisc.com/filming/pta/rail/default.aspx>. [Accessed: 28-Aug-2016].
- [224] Eurail.com, “TGV high-speed train,” *eurail.com*. [Online]. Available: <http://www.eurail.com/europe-by-train/high-speed-trains/tgv>. [Accessed: 30-Sep-2016].
- [225] Wikipedia.org, “High-speed rail in Germany,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed\\_rail\\_in\\_Germany#/media/File:ICE\\_Network.png](https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_rail_in_Germany#/media/File:ICE_Network.png). [Accessed: 30-Aug-2016].
- [226] Wikipedia.org, “High-speed rail in Italy,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed\\_rail\\_in\\_Italy#/media/File:Italy\\_TAV.png](https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_rail_in_Italy#/media/File:Italy_TAV.png). [Accessed: 30-Aug-2016].
- [227] Ontheworldmap.com, “Japan High Speed Railway Map,” *ontheworldmap.com*. [Online]. Available: <http://ontheworldmap.com/japan/japan-high-speed-railway-map.jpg>. [Accessed: 30-Aug-2016].
- [228] Eurail.com, “Alfa Pendular high-speed train,” *eurail.com*, 2015. [Online]. Available: <http://www.eurail.com/europe-by-train/high-speed-trains/alfa-pendular>. [Accessed: 30-Aug-2016].
- [229] Transportesenegocios.pt, “Mapa AVE España,” *transportesenegocios.pt*. [Online]. Available: <http://www.transportesenegocios.pt/wp-content/uploads/2015/01/MapaAVE.jpg>. [Accessed: 30-Aug-2016].
- [230] Wikipedia.org, “High-speed rail in the United Kingdom,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed\\_rail\\_in\\_the\\_United\\_Kingdom#/media/File:High\\_Speed\\_Railroad\\_Map\\_of\\_the\\_United\\_Kingdom.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_rail_in_the_United_Kingdom#/media/File:High_Speed_Railroad_Map_of_the_United_Kingdom.svg). [Accessed: 30-Aug-2016].
- [231] H. Roads, P. Rail, P. Transportation, H. Roads, H. Roads, H. Roads, H. Roads, P. Rail, F. Environmental, I. Statement, F. Eis, P. Alternative, D. Eis, T. Tier, F. Eis, N. Environmental, P. Act, E. Quality, C. E. Impacts, O. February, F. Register, H. Roads, P. Rail, F. Register, D. Eis, T. Noa, T. I. I. Nepa, H. Roads, P. Rail, C. T. Board, and P. Alternative, “Richmond / Hampton Roads Passenger Rail Project CHAPTER 1 PURPOSE AND NEED,” 2009.
- [232] FWP Ltd., “France River Map,” *france-pub.com*, 2016. [Online]. Available: <http://www.france-pub.com/maps/river-map.html>. [Accessed: 28-Aug-2016].
- [233] Eurocanals.com, “Waterways of Germany,” *eurocanals.com*, 2006. [Online]. Available: <http://www.eurocanals.com/Waterways/germanywaterways.html>. [Accessed: 28-Aug-2016].
- [234] L. E. Schede, D. Della, and M. Mpm, “I fiumi appenninici.”
- [235] mlit.go.jp, “Japan Rivers Map,” *mlit.go.jp*. [Online]. Available: [http://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/jigyoku\\_keikaku/gaiyou/seibi/](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyoku_keikaku/gaiyou/seibi/). [Accessed: 28-Aug-2016].
- [236] T. de Portugal, “Mapa Fluvial Portugal,” *portugalbside.com*, 2016. [Online]. Available: <http://www.portugalbside.com/index.php?lang=pt&s=mapas>. [Accessed: 28-Aug-2016].
- [237] Pixabay, “Spain Rivers Map,” *Pixabay.com*. [Online]. Available: <https://pixabay.com/pt/espanha-geografia-rios-mapa-europa-23586/>. [Accessed: 28-Aug-2016].

- [238] Eurocanals.com, “Waterways of England & Wales,” *eurocanals.com*, 2006. [Online]. Available: <http://www.eurocanals.com/Waterways/england-waleswat.html>. [Accessed: 27-Sep-2016].
- [239] S. C. E. Commission, “Maps - South Carolina | Web Water,” *knowitall.org*. [Online]. Available: <http://www.knowitall.org/content/maps-south-carolina-web-water>. [Accessed: 27-Sep-2016].
- [240] Eurocanals.com, “Waterways of France,” *eurocanals.com*, 2006. [Online]. Available: <http://www.eurocanals.com/Waterways/francewaterwaysm.html>. [Accessed: 27-Sep-2016].
- [241] Stepmap.de, “Fluesse Deutschland,” *stepmap.de*. [Online]. Available: <http://www.stepmap.de/landkarte/fluesse-deutschland-1208325>. [Accessed: 27-Sep-2016].
- [242] Wikipedia.org, “List of rivers of Italy,” *wiki*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_rivers\\_of\\_Italy#/media/File:Italy\\_main\\_rivers\\_location.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_rivers_of_Italy#/media/File:Italy_main_rivers_location.jpg). [Accessed: 27-Sep-2016].
- [243] Hakuchizu.com, “Kasen,” *hakuchizu.com*. [Online]. Available: <http://www.hakuchizu.com/club/nihonmap/kasen.html>. [Accessed: 27-Sep-2016].
- [244] Didactalia, “Rios de España,” *Didactalia*. [Online]. Available: <https://mapasinteractivos.didactalia.net/comunidad/mapasflashinteractivos/recurso/rios-de-espaa/baf5ae9b-b0f9-4476-a05e-8465d60b21a1>. [Accessed: 27-Sep-2016].