



DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL

JOANA MARIA BRAZÃO DE SOUSA FREITAS TEIXEIRA
Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CIRCULAÇÃO DO METROPOLITANO

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2024

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CIRCULAÇÃO DO METROPOLITANO

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

JOANA MARIA BRAZÃO DE SOUSA FREITAS TEIXEIRA

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Orientadora: Professora Doutora Simona Fontul,
Professora Auxiliar Convidada, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Mário Jorge Vicente da Silva,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Arguente: Professor Doutor José Nuno Varandas da Silva Ferreira,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Orientador: Professora Doutora Simona Fontul,
Professora Auxiliar Convidada, Universidade NOVA de Lisboa

Avaliação das condições de circulação do metropolitano

Copyright © Joana Maria Brazão de Sousa Freitas Teixeira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus filhos, nunca é tarde, nada é impossível.

AGRADECIMENTOS

Sem me querer alongar, mas precisando realmente de exprimir toda a emoção e agradecimento que trago comigo depois de um percurso menos convencional.

Primeiro à minha corajosa orientadora que, mesmo sabendo dos meus obstáculos extra e falta de tempo, sempre me aceitou, nunca duvidou de mim e foi sem dúvida a força motivadora que me fez finalmente acabar a tese e o mestrado. Por toda a paciência, ajuda, motivação e por toda a generosa partilha de conhecimento, obrigada.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia por me ter aceite de volta de braços abertos, sem perguntas e julgamentos, mesmo depois de todo este tempo.

Ao LNEC e ao Metropolitano de Lisboa, que ao partilharem dados e informações, me permitiram fazer este estudo e realizar o sonho de finalizar o curso mesmo com a minha idade e iniciar uma nova carreira.

A todos os professores que nestes últimos anos, partilharam o seu tempo e conhecimento, que não me trataram de maneira diferente dos demais, que me apoiaram nas dúvidas e me fizeram acreditar que era possível.

Ao meu marido, pai dos meus filhos, companheiro e namorado de faculdade, Ricardo Teixeira, pela paciência, pela partilha e compreensão nos meus momentos de maior nervosismo e drama. Por estar sempre presente, no bom e no mau.

Aos meus filhos, Samuel, Raquel e Daniel, pela mãe muitas vezes sem paciência e por vezes ausente para estudar. Que vos fique na memória a importância de estudar e de nos esforçarmos ao máximo das nossas capacidades para atingir os objetivos. O importante não é sermos os melhores, mas sim não desistir e voltar a tentar. Ao Samuel pelas palavras de encorajamento, à Raquel pelos mimos e ao Daniel por ter me acompanhado, mesmo só com meses de vida, três horas em transportes, todos os dias à faculdade. Por vocês que a mamã fez tantos sacrifícios, e espero, no entanto, que com o meu exemplo, façam melhor no vosso futuro.

Aos meus pais por todo o apoio dado todos estes anos, desde a primeira vez que me inscrevi na faculdade, ao meu casamento, aos netos, até esta segunda tentativa de vida académica.

Aos meus sogros, pelos muitos jantares e fins de semana dados à criança, para que eu pudesse ter tempo de estudar.

E a Deus, que olhando para trás, vejo como só com as minhas forças não teria conseguido.

“Investir em conhecimento rende sempre os melhores juros.” (Benjamim Franklin).

RESUMO

Este estudo teve como motivação a falta de clareza na distinção entre vias férreas convencionais e vias férreas do metropolitano e a consequente falta de documentação específica disponível para o traçado de via férrea de metropolitanos.

O principal objetivo consistiu em identificar as normas existentes, ao nível nacional e internacional, e a documentação da via férrea convencional e compara-las, assim como compilar informação de traçado e analisar a velocidade de circulação máxima na rede do metropolitano, em condições de segurança e conforto.

Para isso, no âmbito da colaboração do Laboratório Nacional de Engenharia Civil com o Metropolitano de Lisboa foram realizadas análises detalhadas dos dados fornecidos para a definição das condições limite de circulação com vista à futura instalação do sistema Communications-Based Train Control (CBTC). Esse caso de estudo conta com o levantamento da geometria da via e o cálculo da velocidade de circulação máxima numa linha existente e a sua congruência com os elementos de traçado de projeto.

Com base nos resultados obtidos, foi elaborada uma proposta de norma específica para o metropolitano, contendo os valores-limite e expressões mais adequadas ao seu uso particular.

Palavas chave: Velocidade máxima, CBTC, Linha de Metropolitano, Geometria da Via, Via férrea

ABSTRACT

This study was motivated by the lack of clarity in distinguishing between conventional railways and metro railways, as well as the consequent lack of specific documentation available for metro railway design. The primary objective was to identify the existing standards, both nationally and internationally, and the standards related to conventional railways, compare them, compile relevant design information, and analyze the maximum operating speed in the metro network, ensuring safety and comfort conditions.

To achieve this, in collaboration with the National Laboratory for Civil Engineering (*LNEC*) and the Lisbon Metropolitan, detailed analyses of the data provided were conducted to define the operational limits in preparation for the future installation of the Communications-Based Train Control (*CBTC*) system. This case study included the survey of the track geometry and the calculation of the maximum operating speed on an existing line, ensuring its consistency with the design layout elements.

Based on the results obtained, a specific standard proposal for the metro was developed, incorporating the most appropriate limit values and formulas for its particular use.

Keywords: maximum speed, *CBTC*, Metropolitan line, track geometry, Railway

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento geral	1
1.2	Contexto e motivação.....	3
1.3	Objetivos do trabalho.....	3
1.4	Organização da dissertação	4
2	A VIA FÉRREA: CONSTITUIÇÃO E SISTEMAS.....	5
2.1	Via-Férrea Balastrada.....	5
2.1.1	Carril.....	6
2.1.2	Travessa	7
2.1.3	Camada de balastro.....	9
2.1.4	Camada de sub-balastro	10
2.1.5	Fundação e leito de via ou coroamento.....	10
2.2	Via-Férrea Não Balastrada	10
2.2.1	Via não balastrada em mistura betuminosa	11
2.2.2	Via não balastrada em laje.....	12
2.3	Via em apoio misto.....	14
2.4	Aparelhos de mudança de via	14
3	SINALIZAÇÃO.....	17
3.1	Importância da sinalização	17
3.2	Sinalização por blocos.....	18
3.3	Sinalização baseada em comunicação	19

3.3.1	Conceito Geral.....	19
3.3.2	Modelo Típico de Frenagem Segura	21
3.4	Considerações finais.....	26
4	ELEMENTOS DO TRAÇADO E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	27
4.1	Traçado em planta.....	27
4.1.1	Alinhamento reto.....	28
4.1.2	Curva circular	28
4.1.3	Curva de transição.....	28
4.2	Traçado em perfil longitudinal.....	29
4.2.1	Declives	30
4.2.2	Curvas de concordâncias verticais	30
4.3	Parâmetros Geométricos.....	31
4.3.1	Bitola.....	31
4.3.2	Escala.....	32
4.3.3	Empeno	37
4.3.4	Nivelamento longitudinal	37
4.3.5	Alinhamento.....	38
4.3.6	Nivelamento transversal	38
5	DIFERENÇAS ENTRE FERROVIA CONVENCIONAL E METROPOLITANO	41
5.1	Introdução	41
5.2	Infraestruturas	41
5.2.1	Carris e Vias	41
5.2.2	Estações.....	42
5.3	Operação	42
5.3.1	Capacidade e frequência.....	42
5.3.2	Velocidade	42
5.3.3	Material circulante.....	43
5.3.4	Impacto ambiental.....	43
5.4	Materiais da Via-Férrea no Metropolitano de Lisboa	44

5.4.1	Carris	44
5.4.2	Travessas.....	45
5.4.3	Balastro.....	46
5.4.4	Placas de betão	46
5.4.5	Sistemas de fixação.....	46
5.4.6	Aparelhos de mudança de via	47
5.5	Síntese.....	47
6	ANÁLISE COMPARATIVA DAS NORMAS DE TRAÇADO.....	49
6.1	Cálculo da velocidade de circulação.....	50
6.1.1	Definição de valores limite.....	50
6.1.2	Categorias de tráfego	51
6.1.3	Raio de curva horizontal	52
6.1.4	Escala.....	55
6.1.5	Insuficiência de escala.....	59
6.1.6	Excesso de escala	63
6.1.7	Variação da escala em função do tempo	64
6.1.8	Variação da escala em função do comprimento.....	69
6.1.9	Variação da insuficiência de escala em função do tempo.....	72
6.1.10	Comprimento dos elementos do traçado	76
6.1.11	Comprimento das curvas de transição no plano horizontal	78
6.1.12	Raio de curva vertical	82
6.1.13	Aceleração vertical	87
6.1.14	Inclinação de traineis	88
6.1.15	Variação instantânea de inclinações	89
6.1.16	Aparelhos de mudança de via	90
6.2	Considerações finais.....	90
7	ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO.....	91
7.1	Introdução	91
7.2	Curvas	92

7.2.1	Raio de curvatura	92
7.2.2	Escala (Sobreelevação)	93
7.3	Rampas e Inclinações	93
7.3.1	Gradientes Longitudinais	93
7.3.2	Curvas em rampas	93
7.4	Estações	93
7.4.1	Distância entre estações	93
7.4.2	Tempo de paragem	94
7.5	Sinalização e Controle de Tráfego	94
7.5.1	Sistemas de Sinalização	94
7.5.2	Controle Automático de Velocidade	94
7.6	Sumário dos fatores a considerar	95
7.7	Cálculo da velocidade máxima de circulação	95
7.7.1	Traçado em planta	95
7.7.2	Traçado em perfil longitudinal - curvas de concordância	96
7.7.3	Aparelhos de Mudança de Via	96
8	PROPOSTA DE NORMA DE TRAÇADO DE METROPOLITANO	97
8.1	Raio curva horizontal	98
8.2	Escala	99
8.3	Insuficiência de escala	101
8.4	Excesso de escala	103
8.5	Variação da escala em função do tempo	103
8.6	Variação da escala em função do comprimento	106
8.7	Variação da insuficiência de escala em função do tempo	108
8.8	Comprimento dos elementos do traçado	110
8.9	Comprimento das curvas de transição no plano horizontal	111
8.10	Raio de curva vertical	111
8.11	Aceleração vertical	113
8.12	Aparelhos de mudanças de via	115

8.13	Inclinação de traneis	116
8.14	Variação instantânea de inclinações	116
9	CASO DE ESTUDO E TRATAMENTO DE DADOS	119
9.1	Dados fornecidos	120
9.2	Cálculos da velocidade máxima segundo a norma proposta para o metropolitano 123	
9.2.1	Alinhamento em planta	123
9.2.2	Alinhamento vertical.....	127
9.2.3	Resultados finais para os cálculos segundo a norma proposta para o metropolitano.....	128
9.3	Cálculos da velocidade máxima segundo a Norma 2007	134
9.3.1	Alinhamento em planta	134
9.3.2	Alinhamento vertical.....	139
9.3.3	Resultados finais para os cálculos segundo a Norma 2007	141
9.4	Comparações finais dos cálculos baseados nas diferentes normas	146
10	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	149
	BIBLIOGRAFIA.....	151

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Representações de secções de carris desde os primórdios da ferrovia até ao presente (WITF, Inc.).....	2
Figura 2.1 - Constituição da via-férrea balastrada (Fontul, 2024).....	6
Figura 2.2 - Exemplo de carris no ML (Somafel, s.d.).....	7
Figura 2.3 - Exemplo de travessas do ML (Construção, s.d.)	8
Figura 2.4 - Exemplo de balastro no ML (Lisboa, s.d.).....	9
Figura 2.5 - Exemplo de via não balastrada em mistura betuminosa (RAIL.ONE , 2007a)	12
Figura 2.6 - Exemplo de via em laje do ML, São Sebastião - Alameda (Infraestruturas, 2024).....	13
Figura 2.7 - Exemplo de via não balastrada em laje (Paixão & Fortunato, 2009)	13
Figura 2.8 - Exemplo de via em apoio misto (Fontul, 2024)	14
Figura 2.9 - Exemplo de AMV do ML.....	15
Figura 3.1 - Sistema de sinalização por blocos. Adaptado de (Transportation Research Board, 2004).....	18
Figura 3.2 - Modelo de frenagem típico. Adaptado de (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005)	23
Figura 4.1 - Exemplo de traçado em planta (Fontul, 2024).....	27
Figura 4.2 - Elementos do traçado em planta (Fontul, 2024).....	28
Figura 4.3 - Exemplo de traçado em perfil longitudinal (Fontul, 2024).....	29
Figura 4.4 - Curvas de concordância verticais (Fontul, 2024)	31
Figura 4.5 - Exemplo de bitola (Fontul, 2024).....	32
Figura 4.6 - Exemplificação de escala, adaptado (Fontul, 2024)	33
Figura 4.7 - Excesso de escala para os comboios mais lentos (Fontul, 2024).....	34
Figura 4.8 - Insuficiência de escala para os comboios mais rápidos, (Fontul, 2024)	35
Figura 4.9 - Empeno (Fontul, 2024)	37
Figura 4.10 - Nivelamento longitudinal (IP, S.A. IT. VIA. 018, 2009).....	37
Figura 4.11 - Alinhamento (IP, S.A. IT. VIA. 018, 2009)	38

Figura 4.12 - Nivelamento transversal (IP, S.A. IT. VIA. 018, 2009)	38
Figura 5.1 - Carril 50 E6	45
Figura 6.1 - Comparação da escala das diferentes normas para o caso do <i>ML</i>	58
Figura 9.1 - Traçado em planta de uma secção da linha A que inclui o troço 1	121
Figura 9.2 - Traçado longitudinal de uma secção da linha A que inclui o troço 1	121
Figura 9.3 - Comparação dos limites normal e excecional da velocidade segundo a norma proposta para o metropolitano e a Norma 2007	146
Figura 9.4 Comparação das velocidades no <i>ML</i> antes e após a instalação do sistema CBTC para a norma proposta metropolitano e para a Norma Metropolitano.....	147

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Diferentes designações para escala.....	33
Tabela 4.2 - Diferentes designações para escala teórica.....	34
Tabela 4.3 - Resumo dos significados de escala.....	35
Tabela 6.1 - Categorias de tráfego da Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007).....	51
Tabela 6.2 - Resumo comparação das categorias de tráfego.....	52
Tabela 6.3 - Valor limite inferior para raios de curvas horizontais R_{lim} , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	54
Tabela 6.4 - Resumo da comparação do Valor limite inferior para raios de curvas horizontais.....	54
Tabela 6.5 - Escala D_{lim} , adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007).....	55
Tabela 6.6 - Limites superiores da Escala D_{lim} , adaptado da Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	56
Tabela 6.7 - Limite superior da escala DR_{lim} , em função do raio de curva horizontal R , adaptado da Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	56
Tabela 6.8 - Resumo da comparação das escalas das diferentes normas.....	58
Tabela 6.9 - Insuficiência de escala limite I_{lim} , adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007).....	59
Tabela 6.10 - Limites superiores para insuficiência de escala I_{lim} , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	61
Tabela 6.11 - Comparação da insuficiência de escala limite das diferentes normas.....	62
Tabela 6.12 - Limites superiores para excesso de escala E_{lim} , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	64
Tabela 6.13 - Resumo da comparação dos limites de excesso de escala das diferentes normas.....	64
Tabela 6.14 - Variação da escala em função do tempo dD_{dtlim} , (variação da escala com declive uniforme), adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007).....	65

Tabela 6.15 - Variação da escala em função do tempo dDdtlim , (variação da escala com declive variável), adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007).....	65
Tabela 6.16 - Limites superiores para variação de escala dDdtlim para declive uniforme, adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	66
Tabela 6.17 - Limite superior para variação de escala dDdtlim para declive variável, adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	66
Tabela 6.18 - Comparação dos limites para variação de escala em função do tempo para declive uniforme das diferentes normas.....	68
Tabela 6.19 - Comparação dos limites para variação de escala em função do tempo para declive variável das diferentes normas.....	68
Tabela 6.20 - Valores limites da variação da escala em função do comprimento, adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)	70
Tabela 6.21 - Limites superiores da variação da escala dDdslim, adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)	70
Tabela 6.22 - Comparação da variação da escala em função do comprimento das diferentes normas.....	71
Tabela 6.23 - Variação da insuficiência de escala em função do tempo dIdtlim (os valores aplicam-se a todas as formas de curvas de transição), adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007).....	73
Tabela 6.24 - Limites superiores para a variação da insuficiência de escala em função do tempo dIdtlim para clotoides, variação linear , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	73
Tabela 6.25 - Limites superiores para variação da insuficiência de escala em função do tempo dIdtlim para curvas de transição com variação não linear, adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	74
Tabela 6.26 - Comparação dos limites para a variação da insuficiência de escala em função do tempo para clotoides de variação linear	75
Tabela 6.27 - Comparação dos limites para a variação da insuficiência de escala em função do tempo para clotoides de variação não linear	75
Tabela 6.28 - Comprimento mínimo dos elementos do traçado Li (curvas circulares e alinhamentos retos), adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007).....	76
Tabela 6.29 - Limites inferiores para o comprimento dos elementos do traçado Li (curvas circulares e alinhamentos retos), adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)	77
Tabela 6.30 - Limites inferiores para o comprimento dos elementos do traçado Li (curvas circulares e alinhamentos retos), adaptado do anexo L da Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)	77

Tabela 6.31 - Valores limite de variação instantânea de insuficiência de escala Δl_{lim} , adaptado da Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)	79
Tabela 6.32 - Determinados limites inferiores para o comprimento entre duas variações instantâneas da curvatura no plano horizontal L_c, lim , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	80
Tabela 6.33 - Valores limite do fator q_s, lim que define o comprimento mínimo do elemento de traçado entre dois pontos de tangência com variação instantânea de curvatura L_s, lim , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	81
Tabela 6.34 - Raio das curvas verticais R_{Vlim} , adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007).....	82
Tabela 6.35 - Limites inferiores para raios verticais R_V, lim , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	83
Tabela 6.36 - Limite inferior para o fator do raio vertical q_R, lim , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)	83
Tabela 6.37 - Valores do raio da curvatura no vértice R_0 para curvas convexas e côncavas, adaptado Norma Metropolitano (Metropolitano de Lisboa, s.d.)	84
Tabela 6.38 - Comparação dos raios de curva verticais mínimos admissíveis para as diferentes normas.....	86
Tabela 6.39 - Aceleração vertical a_{Vlim} , adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)	87
Tabela 6.40 - Limites inferiores para comprimentos de inclinações de traineis L_g, lim , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017).....	89
Tabela 6.41 - limites superiores para variação instantânea de inclinações em plena via Δp_{lim} , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)	89
Tabela 8.1 - Escala D_{lim} , adaptado da Norma Metropolitano e Norma 2007, para a norma proposta de metropolitano.....	100
Tabela 8.2 - Valores limite normal e excecional de a_q , adaptados da Norma Metropolitano e do Estudio Informativo de la Nueva Red Ferroviaria del País Vasco. Corredor de Acceso y Estación de Bilbao-Abando. Fase B, Anexo 5, para a proposta de norma de metropolitano	102
Tabela 8.3 - Insuficiência de escala limite l_{lim} , adaptado da Norma Metropolitano e Norma 2017, para a proposta de norma de traçado de metropolitano	102
Tabela 8.4 - Valores limite para variação da escala em função do tempo $dDdt$, com declive uniforme, para a proposta de norma de metropolitano, adaptado da Norma Metropolitano e Norma 2007	105
Tabela 8.5 - Valores limites da variação da escala em função do comprimento, adaptado da Norma Metropolitano e Norma 2007, para a proposta de norma de metropolitano	107

Tabela 8.6 - Variação da insuficiência de escala em função do tempo d_{ldtlim} adaptado Norma 2017, para a proposta de norma de metropolitano.....	109
Tabela 8.7- Valores limite de d_{aqdt} , adaptado da Norma 2007, para $s=0,4$	109
Tabela 8.8 - Valores limite de d_{aqdt} , adaptado da Norma 2007 e Norma Metropolitano, para $s=0,4$, para a proposta de norma de metropolitano.....	109
Tabela 8.9 - Comprimento mínimo dos elementos do traçado L_i (curvas circulares e alinhamentos retos), adaptado Norma 2007, para a proposta de norma para metropolitano	110
Tabela 8.10 - Valores do raio da curvatura no vértice R_0 para curvas convexas e côncavas, adaptado Norma Metropolitano	112
Tabela 8.11 - Raio das curvas verticais R_{Vlim} , adaptado Norma 2007 , para a proposta de norma de metropolitano	113
Tabela 8.12 - Aceleração vertical a_{Vlim} , adaptado Norma 2007 , para a proposta de norma de metropolitano.....	115
Tabela 8.13 - Limites inferiores para comprimentos de inclinações de traineis $L_{g, lim}$, adaptado Norma 2017, para a proposta de norma de metropolitano	116
Tabela 8.14 - Limites superiores para variação instantânea de inclinações em plena via Δp_{lim} ,adaptado Norma 2017, para a proposta de norma de metropolitano.....	116
Tabela 9.1 - Dados sobre alinhamento em planta e vertical, fornecidos do troço 1 da linha A	120
Tabela 9.2 - Dados fornecidos para o cálculo da velocidade, para a linha A, troço 1.....	122
Tabela 9.3 - Resultados dos cálculos para limites normais e excepcionais para a velocidade máxima no traçado em planta para a linha A, troço 1, segundo a norma proposta para metropolitano.....	130
Tabela 9.4 - Resultados dos cálculos para limites normais e excepcionais para a velocidade máxima no traçado longitudinal para a linha A, troço 1, segundo a norma proposta para metropolitano.....	132
Tabela 9.5 - Resultados finais para a linha A, troço 1, segundo a norma proposta para o metropolitano.....	133
Tabela 9.6 - Insuficiência de escala limite para o caso do <i>ML</i> , adaptado Norma 2007.....	134
Tabela 9.7 - Valores limite normal e excepcional de a_q , adaptados da NP ISO 2631-1 e do Estudio Informativo de la Nueva Red Ferroviaria del País Vasco. Corredor de Acceso y Estación de Bilbao-Abando. Fase B, Anexo 5, para o caso do <i>ML</i>	135
Tabela 9.8 - Valores limite para variação da escala em função do tempo D_{ddt} , com declive uniforme, para o caso do <i>ML</i> , adaptado Norma 2007.....	137
Tabela 9.9 -Insuficiência de escala limite para o caso do <i>ML</i> , adaptado Norma 2017	138

Tabela 9.10 - Resultados dos cálculos para limites normais e excepcionais para a velocidade máxima no traçado em planta para a linha A, trecho 1, segundo a Norma 2007.....	142
Tabela 9.11 - Resultados dos cálculos para limites normais e excepcionais para a velocidade máxima no traçado longitudinal para a linha A, trecho 1, segundo a Norma 2007	144
Tabela 9.12 - Resultados finais para a linha A, trecho 1, segundo a Norma 2007	145
Tabela 0.1 - Tabela comparativa dos termos das diferentes normas.....	155

GLOSSÁRIO

De forma a propiciar uma leitura desta tese de forma mais orgânica, é apresentado um glossário por ordem alfabética das definições mais pertinentes. Estas definições foram retiradas da terminologia fornecida pela Infraestruturas de Portugal.

Ação estática	Efeito de uma ou mais cargas que não estejam em movimento.
Ações sobre a super-estrutura	Forças estáticas e dinâmicas que se exercem sobre a super-estrutura da via, incluindo as fixações dos carris (material miúdo) e o balastro (leito de balastro). Estas forças, que são provenientes dos veículos em movimento, devem ser transmitidas o mais uniformemente possível à infraestrutura da via.
Aceleração limite	Valor da aceleração máxima admissível por questões de conforto, de segurança da carga transportada ou de segurança da circulação (velocidade de passagem à via desviada).
Aceleração no arranque	Aceleração inicial de um veículo. Está limitada pela potência instalada e, no caso do sistema roda/carril, pela aderência.
Aceleração residual	Aceleração que um veículo pode ainda adquirir depois de atingir a velocidade máxima.
Aceleração transversal	Aceleração perpendicular ao sentido de marcha, devida à força centrífuga em curva ou a defeitos de geometria da via. A aceleração transversal sentida pelos passageiros pode ser reduzida ou mesmo inteiramente compensada pela escala da via.
Aceleração transversal não compensada	Componente da aceleração transversal que atua paralelamente ao piso do veículo e influi no conforto dos passageiros. Em curva, esta aceleração pode ser reduzida através da escala da via ou por um sistema de inclinação ativo da caixa do veículo.

Acendimento à aproximação	Sistema segundo o qual um sinal só acende à aproximação de um comboio.
Acidente ferroviário	Toda a ocorrência verificada num determinado instante, perturbadora do normal desenvolvimento do serviço ferroviário, com implicações na regularidade e segurança da circulação e da qual resultam vítimas e/ou danos materiais nas instalações e material ferroviário, nas mercadorias transportadas ou em bens pertencentes a terceiros.
Atuação do comboio	Ação exercida por um comboio sobre um aparelho de sinalização.
Aderência	Fenómeno que indica em que medida a ação de atrito entre roda e carril pode ser utilizada por um veículo para tração ou frenagem.
Agulha	Aparelho de via constituído por carris, lanças e outras peças mecânicas, que se destina a assegurar a ligação tangencial de duas vias, permitindo a circulação dos comboios quer numa quer noutra via.
Aparelho de Mudança de Via	Abreviadamente designado por <i>AMV</i> , é o dispositivo que se usa para fazer passar o material circulante, tangencialmente, de uma linha para outra, assegurando a continuidade da via para um determinado caminho. É constituído por grades (carris e peças especiais obtidas a partir de carris, maquinando-os ou por fundição, apoiados e solidarizados por travessas de comprimentos variáveis). Os <i>AMV</i> são identificados, para além do seu tipo, pelo valor da tangente do ângulo de abertura entre a via direta e a via desviada, a que corresponde também o ângulo da cróxima. É costume designar um <i>AMV</i> por Agulha.
Armamento da via	Conjunto dos carris, travessas e respetivas fixações.
ATC	Sigla da designação inglesa Automatic Train Control: sistema de proteção de comboios que, através de circuitos ressonantes indutivos colocados na via e de equipamentos de bordo correspondentes, verifica de modo pontual se as velocidades são cumpridas, se as frenagens são efetuadas e se os sinais de paragem são respeitados. Em caso de anomalia, o sistema desencadeia a aplicação automática dos freios.
Avaliação de traçado	Apreciação, através de métodos adequados, de todos os dados técnicos e ecológicos disponíveis em relação a diversas variantes de traçado possíveis, com vista a encontrar o traçado que, sendo menos prejudicial para o ambiente, tenha também em conta, ponderadamente, os correspondentes custos de investimento (traçado ótimo).

Balastro	Leito de brita subjacente à linha e que assenta diretamente na plataforma. Material de granulometria selecionada destinado a suportar e encastrar as travessas, a distribuir as cargas transmitidas pelas travessas à plataforma, a conferir elasticidade à via e a facilitar a drenagem.
Banqueta da via	Faixa lateral do balastro da superestrutura de via, que se desenvolve longitudinalmente e com largura de cerca de 40 cm para um e outro lado das extremidades das travessas, encastrando-as e impedindo o seu deslocamento transversal.
Bitola	Também designada por largura da via, é a distância entre as faces interiores das cabeças dos carris de uma via simples, medida 15 mm (esta cota varia de país para país) abaixo da mesa de rolamento e em esquadria com os carris. A bitola dita normal é de 1 668 mm, praticada na Península Ibérica. A bitola europeia é de 1435 mm. Na via do TRANSRAPID, é a distância entre as faces exteriores dos carris de guiamento e tem o valor de 2800 mm.
Bitola Larga ou Normal	A bitola dita larga ou normal é de 1668 mm, praticada na Península Ibérica. A bitola larga europeia é de 1435 mm.
Bloco	Sistema que salvaguarda uma distância mínima entre comboios circulando na mesma direção, garantindo também que dois comboios em direções opostas não se encontram na mesma secção de via, em simultâneo.
Bloco absoluto	Sistema de cantonamento dos comboios, no qual apenas uma composição pode estar, num dado momento, num cantão do bloco.
Bloco de estação	Sistema que, numa estação, garante uma distância mínima entre composições que circulem na mesma direção, garantindo também que duas composições circulando em direções opostas nunca estão, em simultâneo, no mesmo troço de via.
Bloco de plena via	Sistema que garante, em plena via, uma distância mínima entre composições que circulem na mesma direção, garantindo também que duas composições circulando em direções opostas nunca estão, em simultâneo, no mesmo troço.
Cabeça do cavalo	Ponto mais alto da linha que, numa estação de triagem, apresenta inclinação para os dois sentidos e é designada por cavalo ou funil.
Cadência	Intervalo regular entre comboios de uma mesma tipologia e para o mesmo período temporal.
Cais	Plataforma para embarque e descida de passageiros.

Camada de co-roamento	Também designada por camada de forma, é constituída quando é necessário melhorar a capacidade de carga ao nível da plataforma de terraplenagem. Corresponde geralmente a materiais de melhor qualidade, nos aterros e ao melhoramento dos terrenos "in situ", nas escavações. Localiza-se sob a camada de sub-balastro.
Camada de sub-balastro	Camada sobre a qual assenta o balastro, construída com o objetivo de assegurar o bom comportamento da via, do ponto de vista da manutenção da sua geometria. Esta camada contribui para a correta degradação das cargas e das vibrações transmitidas em profundidade, e para a evacuação das águas de circulação superficial, impedindo a contaminação do balastro e a erosão da plataforma de terraplenagem.
Caminha-mento	Deslocamento longitudinal incontroado dos carris, sob o efeito de variações de temperatura e em conjugação com os esforços de tração e de frenagem dos comboios.
Cantão	Troço de linha onde, em condições normais de exploração, só pode circular um comboio em cada momento. Porém, em condições especiais regulamentarmente previstas, é possível fazer circular mais do que um comboio em cada momento num dado cantão.
Cantão de bloco	Troço de via situado entre dois sinais de bloco sucessivos.
Cantonamento	Sistema de controlo da distância de separação entre comboios, dividindo a linha-férrea em secções que, normalmente, não consintam mais do que um comboio em cada secção. Um cantão pode ser fixo ou móvel.
Cantonamento absoluto	Sistema de cantonamento dos comboios, no qual apenas uma composição pode estar, num dado momento, num cantão do bloco.
Cantonamento automático	Realiza-se automaticamente pelo movimento dos próprios comboios e tem por finalidade a proteção de circulações sucessivas no mesmo sentido e numa mesma via, mantendo entre elas distâncias de segurança.
Carril	Componente da superestrutura da via, que recebe as cargas do material circulante, guiando-o ao longo da linha-férrea. É um perfil de aço laminado, em que podemos distinguir três partes principais: a cabeça, cuja face superior constitui a mesa de rolamento; a alma, parte vertical ligando a cabeça à patilha; a patilha, base inferior que assenta sobre as travessas, alargada e oferecendo resistência à alteração da inclinação transversal dos carris.

Circulação	Movimento de um comboio num determinado percurso segundo determinadas regras de exploração.
Clotóide	Curva de transição entre o alinhamento reto de uma via-férrea e a curva circular.
Comboio	Conjunto de veículos rebocados ou impelidos por uma ou mais unidades motoras, conjunto de unidades motoras ou unidade motora isolada, que efetua um percurso determinado segundo uma marcha previamente estabelecida entre duas dependências. O termo comboio é também, por vezes, substituído pelo termo genérico circulação.
Comboio basculante	Termo genérico para designar comboios com sistema de inclinação ativo ou passivo. Também designado por "comboio pendular", ou simplesmente "pendular".
Comboio pendular	Termo genérico para designar comboios com sistema de inclinação ativo ou passivo. Também designado por "comboio basculante", ou simplesmente "pendular".
Comprimento de um cantão de bloco	Comprimento de um troço de linha onde, em condições normais de exploração, só pode circular um comboio em cada momento. Esse troço designa-se por "bloco" quando existe um sistema que salvaguarda uma distância mínima entre comboios circulando na mesma direção, garantindo também que dois comboios em direções opostas não se encontram na mesma secção de via, em simultâneo.
Concordância	Curva de transição entre traçados ou entre trainéis, respetivamente com alinhamentos (em planta) ou com inclinações (em perfil) diferentes.
Curva circular	Curva de raio constante.
curva de concordância em planta	Curva de transição entre traçados de via com alinhamentos (em planta) diferentes, com um raio variável ao longo do seu desenvolvimento. É usada para assegurar uma variação gradual, e, portanto, não brusca, da aceleração transversal quando da passagem de um alinhamento reto para uma curva circular (ou vice-versa), ou entre duas curvas de raios diferentes.
Declive	Trainel que desce em relação ao sentido da marcha.
Doucine	Termo francês. O mesmo que ducina. Curva do 2º grau introduzida (em planta) entre os alinhamentos retos e as curvas de transição e também entre estas e a curva circular, para raios de curvatura inferiores a 1 000 m, por forma a que a variação da aceleração transversal evolua gradualmente proporcionando maior conforto aos passageiros.

Empeno	Característica localizada da via, em que os dois carris apresentam, numa determinada extensão, inclinações longitudinais diferentes.
Entre-eixo	Distância entre centros de vias-férreas contíguas.
Entre-vias	Espaço compreendido entre duas vias paralelas adjacentes e que se mede entre linhas verticais que passam pelos bordos interiores das cabeças dos carris das filas mais próximas de cada uma das vias.
Escala	Inclinação transversal da via em curva, a fim de reduzir a influência da força centrífuga. (a)No sistema roda/carril, a diferença de nível entre as mesas de rolamento dos dois carris (em curva, o carril exterior é sobreelevado em relação ao interior). (b)No caso do comboio de sustentação magnética TRANSRAPID, a rotação da viga de suporte e guiamento em torno do seu eixo longitudinal origina a escala da via. A inclinação transversal daí resultante é expressa em graus e pode atingir 12 graus.
Estação	Conjunto de instalações fixas que possui pelo menos duas agulhas inseridas nas linhas gerais e dispõe de equipamentos de segurança que permitem ao agente responsável pela segurança de circulação a interferência no cantonamento dos comboios e onde se podem realizar operações relativas à receção, formação e expedição de comboios. É limitada pelos sinais principais de entrada, se os tiver, ou pelas agulhas de entrada e de saída.
Estrutura da via	Uma via-férrea compõe-se de uma infra-estrutura: plataforma e fundação, que se situa abaixo da super-estrutura: carris, travessas, sistema de fixação e balastro ou betão.
Excesso de escala	Diferença excessiva da altura entre o carril da fila interior (fila baixa) e o da fila exterior (fila alta), numa curva de via-férrea.
Fixação	Termo que se aplica ao aperto do carril à travessa. O mesmo que pregação.
Fixação elástica	Sistema de fixação dos carris às travessas através de chapins metálicos, garras e palmilhas de borracha canelada interpostas entre o carril e o chapim, o que conduz a um melhor comportamento da madeira das travessas, atenuando-se substancialmente o caminhamento dos carris.
Fixação rígida	Fixação dos carris às travessas de madeira, com utilização de parafusos designados por "tirefonds", cuja cabeça apresenta uma aba que aperta a patilha do carril contra a travessa
Força centrífuga não compensada	Residual da força de aceleração transversal atuante sobre um veículo, em função da escala, da velocidade e do raio de curvatura da via.
Frenagem	Travagem.

Gabari	Secção transversal ao eixo da via, que define o máximo espaço da ocupação possível dos veículos (motores ou rebocados) quando circulam na via. Este espaço é mais amplo do que o que resulta das dimensões dos veículos porque considera as suas posições de inscrição na via.
Gabari cinemático	Contorno de referência mais amplo do que o resultante das dimensões dos veículos, determinado a partir de um veículo em movimento, tendo em consideração para além das posições da sua inscrição em curvas, as suas deslocações devidas a desgaste dos rodados, jogo de balanço da travessa dançante, oscilações transversais, características de suspensão e até eventuais defeitos na via.
Gabari de circulação	Contorno-limite que o material carregado pode ocupar na via.
Inclinação	Tangente do ângulo formado pelo trainel com a horizontal. Exprime-se em percentagem e é positiva ou negativa conforme, no sentido da via, o trainel for em rampa ou declive.
Insuficiência de escala	Diferença entre a escala real e a escala teórica que eliminaria integralmente o efeito da força centrífuga correspondente à velocidade máxima. A insuficiência de escala pode ser necessária no caso dos aparelhos de mudança de via, ou para evitar um excesso de escala no caso dos comboios lentos (por exemplo alguns comboios de mercadorias).
Jogo entre eixo e via	Diferença (designada pela letra grega sigma) entre a bitola da via e a distância entre faces ativas dos verdugos das rodas (por exemplo em caso de lacete ou numa curva).
Leito da via	Superfície onde assenta a via.
Linha de via estreita	Via em que a bitola, distância entre as faces interiores da cabeça dos carris, é de 1 metro. É por isso também denominada Via Métrica.
Linha de via larga	A via dita larga ou normal é a que tem uma bitola de 1668 mm, a praticada na Península Ibérica. A via larga europeia tem uma bitola de 1435 mm.
Material circulante	Designação utilizada, de um modo geral, para o conjunto de veículos ferroviários.
Metropolitano	Sistema de caminho-de-ferro, geralmente subterrâneo, destinado ao transporte público rápido de passageiros em meios urbanos.
Nomenclatura	Conjunto de vocábulos ou termos técnicos de uma determinada especialidade, que constitui, por exemplo, um léxico.
Plena via	Designação por que é conhecido o troço de via entre estações.

Ponto quilométrico	Abreviadamente designado por <i>PK</i> , é uma das formas de, numa determinada linha-férrea, referenciar uma dada ocorrência ou instalação. Para caracterizar, por exemplo, a localização da Ponte do Alviela diz-se que se situa ao <i>PK</i> 88,361 700 da Linha do Norte, sendo este ponto quilométrico referido ao meio da Ponte.
Raio de curva em perfil longitudinal	Parâmetro de traçado de via que define o desenvolvimento do perfil longitudinal nas suas zonas convexas ou côncavas.
Raio de curva em planta	Parâmetro de traçado em planta, estabelecido em função da velocidade de circulação, da escala ou da inclinação transversal da via, da aceleração transversal admissível e do empeno de via admissível.
Rampa	Troço de linha com inclinação desfavorável ao movimento.
Sobreelevação	Inclinação transversal da via em curva, a fim de reduzir a influência da força centrífuga. (a) No sistema roda/carril, a diferença de nível entre as mesas de rolamento dos dois carris (em curva, o carril exterior é sobreelevado em relação ao interior).
Sobrelargura	Aumento da bitola da via: pode ser intencional no caso, por exemplo, de aparelhos de mudança de via ou de curvas em planta, destinando-se a limitar a força que o veículo exerce sobre a via; ou resultar de defeito da via, como seja no caso do desgaste da face interior da cabeça do carril.
Traçado	Conjunto das características geométricas, em planta e perfil, de uma via férrea.
Travessa	Elemento situado transversalmente à via que faz a ligação entre o carril e o balastro. A roda atua sobre o carril, transmitindo-lhes tensões elevadas, a travessa recebe essas tensões e transmite-as, degradadas, à camada de balastro de tal forma que elas sejam compatíveis com a sua capacidade de resistência e de deformação. As travessas desempenham a função de garantir, em conjunto com as fixações, a distância entre os carris (bitola da via).
Via balastrada	Via em que as travessas assentam na plataforma com interposição de balastro.
Via sobre laje	Tipo de via sem balastro compreendendo, por exemplo, travessas de betão pré-esforçado, que asseguram a bitola da via e são embebidas numa laje de betão colocado em obra.

SIGLAS

AEIF	Associação Europeia para a Interoperabilidade Ferroviária
AICCF	Associação Internacional do Congresso dos Caminhos-de-Ferro.
AIM	Acordo relativo ao Transporte Internacional de Mercadorias por Caminho-de-Ferro, que é a sigla francesa correspondente.
AIV	Acordo relativo ao Transporte Internacional de Passageiros por Caminho-de-Ferro.
AMV	Aparelho de Mudança de Via
ATC	Automatic Train Control
BA	Bloco Automático
BI	Bitola Ibérica
CBTC	Communications-based train control
ERTMS	European Rail Traffic Management System
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Infraestruturas de Portugal
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
ML	Metropolitano de Lisboa
NP	Norma Portuguesa
P.M.O.s	Parque de Material e Oficinas
PK	Ponto quilométrico
UIC	União Internacional de caminhos de ferro

SÍMBOLOS

da_q/dt	Variação da aceleração lateral não compensada em função do tempo
da_i/dt	Variação da aceleração lateral quasi-estática paralela ao pavimento do veículo em função do tempo
a_v	Aceleração vertical quasi-estática em curva vertical
D_l	Limite de escala
L_i	Comprimento dos elementos do traçado (curvas circulares e alinhamentos retos)
R_v	Raio de curva vertical
$V_{máx}$	Velocidade máxima
V_{min}	Velocidade mínima
Δa_q	Variação total da aceleração lateral não compensada ao longo do comprimento total da curva de transição
$\delta(dr)$	Diferença de escala real
$\delta(\Delta d)$	Diferença de deficiência de escala das curvas adjacentes
D_{EQ}	Escala de equilíbrio
$L_{g,lim}$	Limites inferiores para comprimentos de inclinações de traineis
a_i	Aceleração quasi-estática paralela ao pavimento do veículo
a_q	Aceleração lateral não compensada no plano da via
a_r	Aceleração centrífuga residual (não compensada)
d_r	Escala real da via

$\delta_d ; d$	Deficiência de escala
D	Escala
dD/dl	Variação da escala em função do comprimento
dD/ds	Variação da escala em função do comprimento
dD/dt	Variação da escala em função do tempo
dI/dt	Variação da insuficiência de escala em função do tempo
E	Excesso de escala
g	Aceleração da gravidade
I	Insuficiência de escala
L	Comprimento da curva de transição no plano horizontal ou da variação de escala
lim	Valor limite (índice)
p	Inclinações de traineis na Norma 2017
p	Valor da progressividade da escala - disfarce da escala , na Norma Metropolitana
q_E	Fator para calculo da escala de equilíbrio
R	Raio de curva horizontal
R_o	Raio de curva no vértice
t	Tempo
V	Velocidade da linha
ΔD	Variação total da escala ao longo de uma curva de transição, entre um alinhamento reto e uma curva circular ou entre duas curvas adjacentes de raios diferentes
ΔI	Variação total da insuficiência de escala ao longo de uma curva de transição, entre um alinhamento reto e uma curva circular ou entre duas curvas adjacentes de raios diferentes
Δp	Variação instantânea de inclinações
χ	Coeficiente de conforto (variação de escala com o tempo)

ψ

Coeficiente de conforto (variação de aceleração centrífuga com o tempo)

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

A ferrovia teve a sua origem no século XVI, impulsionada pela crescente necessidade de transporte de grandes quantidades de minérios. Esta crescente necessidade levou à invenção de um pavimento de suporte capaz de suportar grandes cargas com uma fricção reduzida ao longo do percurso a ser realizado. Vários formatos de carris paralelos foram desenvolvidos, nomeadamente os sistemas de rebordo no carril e os de rebordo na roda do material circulante. Este último acabou por conseguir uma superior adoção por ser mais difícil a acumulação de detritos no próprio carril, resultando assim numa mais reduzida frequência de manutenção. Na Figura 1.1 apresentam-se vários exemplos de carris desde o século XVIII até à atualidade.

Quanto ao método de tração, estas ferrovias iniciais recorriam a sistemas de gravidade ou de tração animal. Com o aumento das necessidades de transporte de carga e pessoas geradas pela revolução industrial na segunda metade do século XVIII e a adaptação do motor a vapor por Richard Trevithick em 1803, a forma de tração dominante passou a ser a vapor (Encyclopaedia Britannica, s.d.).

O primeiro sistema de metropolitano do mundo foi inaugurado na cidade de Londres, Reino Unido, em 10 de janeiro de 1863. Conhecido como "Metropolitan Railway," este sistema começou por utilizar tração a vapor e ligar as estações de Paddington e Farringdon. Esta linha de 6 km foi projetada para aliviar o congestionamento das ruas da cidade, permitindo o transporte rápido e eficiente de passageiros (London Transport Museum, s.d.). A inovação deste sistema de transporte subterrâneo abriu caminho para a construção de outros sistemas semelhantes noutras grandes cidades do mundo, como o de Paris em 1900 ou o de Nova Iorque em 1904. Com o decorrer dos anos foi adotada a tração elétrica e os sistemas expandidos e modernizados.

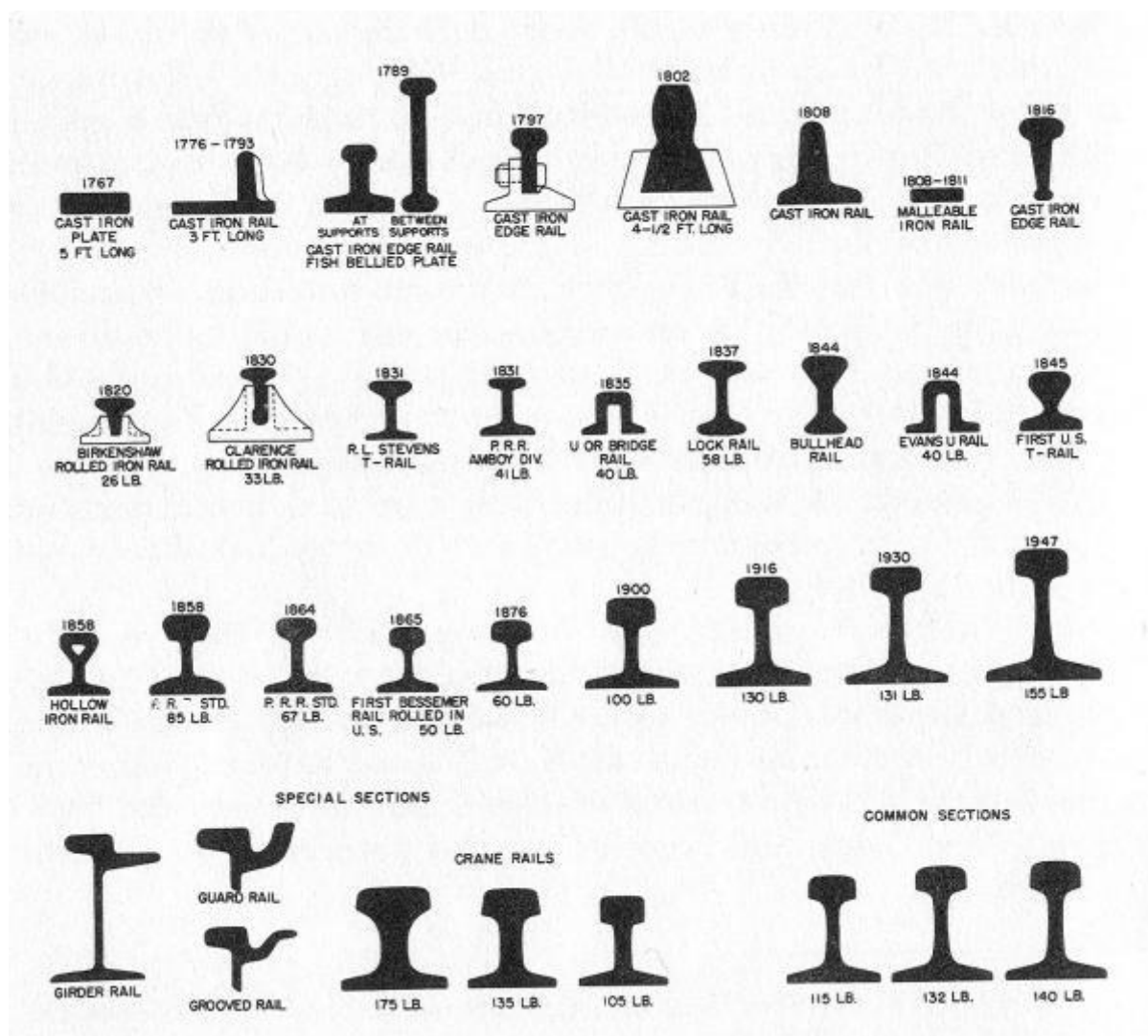


Figura 1.1 - Representações de secções de carris desde os primórdios da ferrovia até ao presente (WITF, Inc.)

Em Portugal, o início do metropolitano foi marcado pela inauguração do Metropolitano de Lisboa em 29 de dezembro de 1959. A primeira linha, em Y, possuía três troços distintos, em que o primeiro ligava a estação de Sete Rios, atualmente Jardim Zoológico, e a da Rotunda, hoje em dia denominada Marquês de Pombal. O segundo troço ligava a estação de Entre Campos à da Rotunda. Finalmente existia um troço comum entre a estação da Rotunda e a dos Restauradores. Este projeto foi uma resposta à crescente necessidade de um sistema de transporte público eficiente na capital portuguesa e obteve a sua inspiração nos sistemas de metropolitano já implementados noutras cidades mundiais (Metropolitano de Lisboa, s.d.). O Metropolitano de Lisboa foi fundamental para o desenvolvimento urbano da cidade, proporcionando uma alternativa rápida e confiável ao trânsito rodoviário. Desde então, a rede tem sido ampliada e modernizada para dar resposta às crescentes pressões demográficas nos subúrbios lisboetas.

1.2 Contexto e motivação

No âmbito da colaboração do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *LNEC*, com o Metropolitano de Lisboa, *ML*, foi estudada a definição das condições limite de circulação com vista à futura instalação do sistema *Communications Based Train Control*, *CBTC*.

Esta mudança de sistema permite ao *ML* um aumento da frequência dos seus comboios através de um aumento da velocidade a que podem circular. Este aumento pode ser crítico para a longevidade do *ML*, para o aumento do número dos seus utentes e para a crescente necessidade de mais comboios com menos tempo de espera, representativo da vida citadina.

A necessidade de garantir e melhorar a segurança e conforto dos utilizadores do *ML* é de extrema importância e a motivação desta dissertação. Não obstante, existe uma ausência de documentação específica disponível para o traçado de via-férrea de metropolitano, sendo que a maior parte das normas existentes são para vias-férreas convencionais.

1.3 Objetivos do trabalho

Existem várias normas para aplicações ferroviárias, nacionais e internacionais, que foram abordadas no contexto deste trabalho. Estas normas utilizam diferentes nomenclaturas para o mesmo significado, apresentam diferenças nos seus parâmetros e podem não ser específicas para os sistemas de metropolitano. Este trabalho visa assim contribuir com uma fonte de dados concreta e robusta, que permita a sua comparação e que possibilite tomar decisões informadas sobre as infraestruturas ferroviárias do *ML*.

A partir dos resultados obtidos procedeu-se à elaboração de uma versão revista da Norma do *ML*.

A partir desta norma, foi também um objetivo desta dissertação estimar qual a velocidade máxima de circulação no *ML*. Esta estimativa teve em conta o valor mais restritivo resultante da análise do projeto de traçado em planta e em perfil longitudinal de um troço da via. Não foram tidas em consideração eventuais restrições resultantes do gabarito do material circulante. Os mesmos cálculos foram efetuados usando a norma para vias-férreas convencionais em vigor. Os resultados obtidos através da aplicação das várias normas foram comparados e analisados.

Foi assim possível contribuir para o estudo de uma via em serviço e a possibilidade de aumentar a velocidade de circulação em segurança, identificando quais os fatores condicionantes. Num contexto do aproveitamento das infraestruturas ferroviárias existentes, com destaque para o caso do *ML*, o presente estudo tem interesse para a comunidade científica e também, cada vez mais, para o futuro da indústria.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em dez capítulos. O primeiro capítulo oferece um enquadramento geral do tema, apresentando os aspetos relevantes para o desenvolvimento desta problemática no contexto atual, a motivação do autor no âmbito académico e profissional, bem como os principais objetivos do estudo.

O segundo capítulo é dedicado à via ferroviária, fazendo a categorização dos seus constituintes e sistemas, salientando a diferença entre via-férrea balastrada e não balastrada.

O terceiro capítulo apresenta a sinalização, componente extremamente importante para a segurança ferroviária e em especial para o presente trabalho por ser um dos motivos principais da possibilidade de aumento da velocidade no *ML*.

No quarto capítulo são descritos os elementos do traçado da ferrovia essenciais para a compreensão das normas. São também definidos os parâmetros geométricos que definem as características físicas da via, impactando diretamente a segurança, a capacidade de transporte e a interoperabilidade do sistema ferroviário.

No quinto capítulo são abordadas as diferenças entre ferrovias convencionais e o metropolitano, diferenças essas que nem sempre são evidentes. Também são mencionados os principais materiais da via-férrea no *ML*, via esta que é a base do caso de estudo.

O sexto capítulo transmite a parte mais extensa deste estudo com a análise comparativa das normas de traçado escolhidas como principais, demonstrando as suas semelhanças e principais diferenças.

O sétimo capítulo é dedicado à velocidade, de forma a entender a sua importância e fatores de cálculo.

No oitavo capítulo é apresentada uma proposta de norma de traçado de metropolitano, baseado em todo o estudo feito nos capítulos anteriores.

O nono capítulo consiste na apresentação do caso de estudo escolhido para análise neste trabalho, onde é feita uma apresentação global dos dados disponibilizados e o cálculo da velocidade máxima de circulação. Este cálculo foi realizado com base na proposta de norma apresentada no capítulo oitavo e comparado com a norma em vigor para vias-férreas convencionais.

Por último, no décimo capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas deste estudo e sugestões de desenvolvimentos futuros.

A VIA FÉRREA: CONSTITUIÇÃO E SISTEMAS

No capítulo seguinte são apresentados os principais tipos de vias ferroviárias, todos eles relevantes para o estudo da via do *ML*. Como é amplamente conhecido, o *ML* é um sistema heterogéneo, cuja construção, iniciada em 1955, continua até aos dias de hoje com a expansão de novos troços e a modernização das suas infraestruturas. As diversas fases de construção refletem-se na variação dos materiais utilizados e dos tipos de via ferroviária instalados, o que é expectável e desejável para atender às necessidades específicas de cada período. Ao longo da extensão da linha do *ML*, é possível encontrar diferentes tipos de vias ferroviárias, refletindo essa evolução histórica.

2.1 Via-Férrea Balastrada

Também referida como via clássica ou convencional, a via-férrea balastrada, como o nome indica, utiliza balastro na sua constituição.

É constituída por várias camadas, cada uma com uma função vital ao seu bom funcionamento. O que atesta à eficácia desta via é o facto de se manter quase inalterada desde que foi concebida para as primeiras vias-férreas construídas.

Uma das suas grandes vantagens é ser menos dispendiosa de construir, em comparação com as estruturas alternativas e também a grande facilidade e rapidez de manutenção. A sua estrutura bem concebida tem uma excelente capacidade de drenagem natural e atua também como uma capacidade de atenuação de vibrações e do ruído provocado pela passagem do tráfego ferroviário.

O seu maior problema é o que faz com que outras vias sejam escolhidas, nos dias de hoje, é a alta frequência de manutenção necessária para manter a via-férrea balastrada no seu período de vida.

Apresenta-se na Figura 2.1, uma representação dos elementos constituintes da via balastrada:

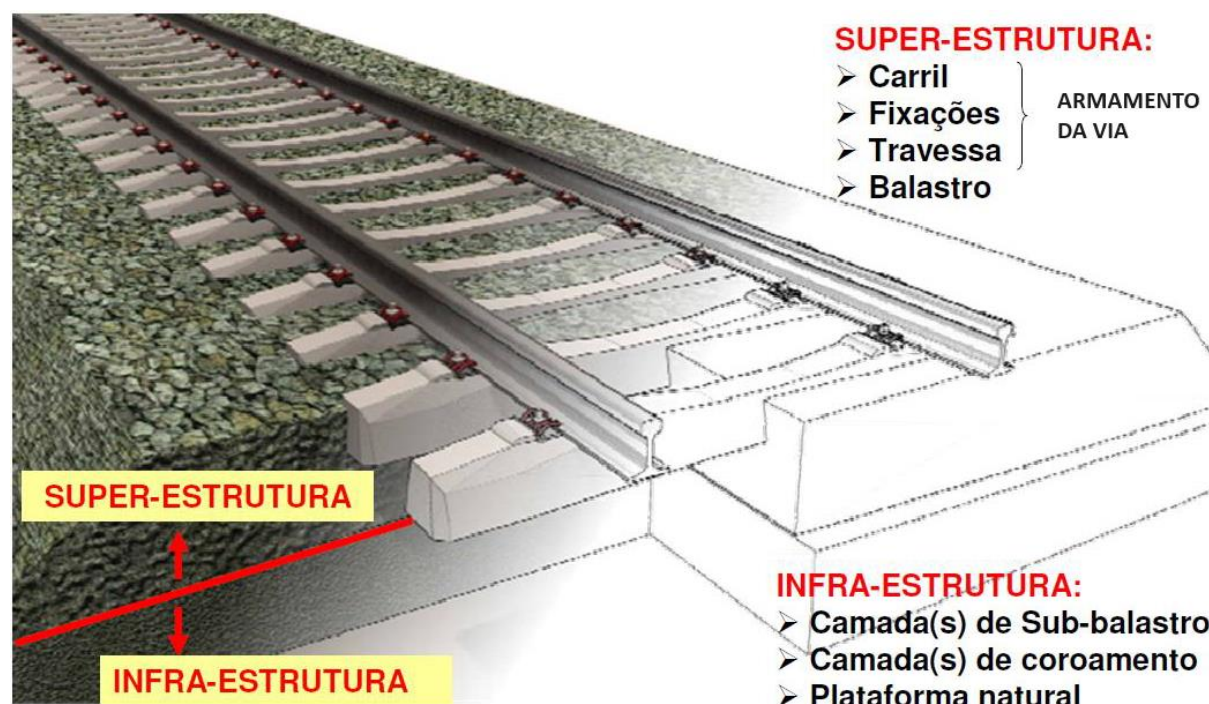


Figura 2.1 - Constituição da via-férrea balastrada (Fontul, 2024)

2.1.1 Carril

O carril é uma componente da superestrutura da via que recebe as cargas do material circulante, guiando-o ao longo da linha-férrea. Esta função é assegurada pela conicidade e a existência da pestana, verdugo, nas rodas e pela forma da cabeça do carril. É constituído por um perfil de aço laminado, em que podem ser distinguidas três partes principais:

- A cabeça, cuja face superior constitui a mesa de rolamento;
- A alma, parte vertical que liga a cabeça à patilha;
- A patilha, base inferior que assenta sobre as travessas, alargada e que oferece resistência à alteração da inclinação transversal dos carris (Infraestruturas-de-Portugal, Terminologia, s.d.).

O carril é um elemento estrutural que está sujeito a esforços de origem térmica e do material circulante e que tem a função de resistir, atenuar e transmitir os esforços longitudinais (acelerações, frenagem e variações de temperatura), transversais (movimentos transversais das rodas dos veículos) e verticais (cargas dos veículos) aos outros elementos da via (Marques, 2013). Apresenta-se na Figura 2.2 um exemplo de carris.



Figura 2.2 - Exemplo de carris no ML (Somafel, s.d.)

2.1.2 Travessa

A travessa é um elemento colocado transversalmente à via e que faz a ligação entre o carril e o balastro, exemplificado na Figura 2.3. Recebe tensões elevadas dos carris e transmite-as, degradadas, à camada de balastro, de tal maneira que elas sejam compatíveis com a sua capacidade de resistência e de deformação (Infraestruturas-de-Portugal, Terminologia, s.d.).



Figura 2.3 - Exemplo de travessas do ML (Construção, s.d.)

Como todos os elementos da via, a travessa apresenta uma função fulcral, já que, para além de transmitir as cargas verticais e horizontais para o balastro, também fixa os carris e mantém a distância entre eles. Esta distância é denominada de bitola da via.

Existem os seguintes tipos de travessas, consoante o material constituinte:

- Madeira - São as travessas mais usadas tradicionalmente, mas têm vindo a cair em desuso por serem suscetíveis a variações de temperatura e de humidade. Além disso, o seu tempo de serviço depende da espécie de árvore a partir da qual são produzidas e dos efeitos mecânicos a que estão sujeitas. Salienta-se que, com a migração para utilização de carris em barra longa soldada em vez de via com juntas, as travessas de madeira foram substituídas por travessas em betão.
- Betão monobloco e bi-bloco - São travessas mais duráveis e pesadas que as de madeira, permitindo um maior tempo de serviço e um maior afastamento entre travessas. Têm ainda a vantagem de serem de fabrico e colocação fácil, no entanto aumentam as cargas dinâmicas e tensões no balastro e são menos elásticas que as de madeira.

- Metálicas - São travessas menos utilizadas devido ao seu custo elevado, a dificuldade de garantir o isolamento elétrico, a facilidade com que se podem deformar e a reduzida atenuação das vibrações. No entanto, têm um longo tempo de serviço e são de construção fácil e rigorosa devido ao peso reduzido.

2.1.3 Camada de balastro

A camada de balastro é um elemento fundamental de 20 a 40 cm de espessura e é responsável pelo nome da via-férrea balastrada. Como todos os outros elementos, distribui as cargas, neste caso das travessas à plataforma, conforme exemplificado na Figura 2.4. É constituída por um material granular grosseiro selecionado, solto e drenante, que, devido à sua resistência mecânica e ao atrito entre grãos, absorve as tensões de compressão e tangenciais que resultam da circulação dos comboios. Apresenta uma elevada resistência à compressão vertical, contudo a resistência lateral é bastante inferior por apenas depender do atrito e imbricamento do material granular (Marques, 2013).



Figura 2.4 - Exemplo de balastro no ML (Lisboa, s.d.)

Como já referido anteriormente, esta camada confere a toda a via uma drenagem natural eficaz, para além de servir de apoio resistente às ações verticais, longitudinais e laterais aplicadas sobre as travessas, mantendo a via na geometria pretendida.

Esta camada é de fácil colocação, remoção e manutenção, contudo implica um compromisso de alta frequência de manutenção, através de trabalhos de ataque de via e ripagem.

Esta camada importante garante também suficiente elasticidade da via para absorver e amortecer as cargas dinâmicas e vibrações que resultam da passagem do material circulante.

2.1.4 Camada de sub-balastro

A Camada de sub-balastro é a camada sobre a qual assenta o balastro, construída com o objetivo de assegurar o bom comportamento da via, do ponto de vista da manutenção da sua geometria. Esta camada contribui para a correta degradação das cargas e das vibrações transmitidas em profundidade e para a evacuação das águas de circulação superficial, impedindo a contaminação do balastro e a erosão da plataforma de terraplenagem (Infraestruturas-de-Portugal, Terminologia, s.d.). No caso do *ML* não existe esta camada, visto que o balastro é colocado sobre uma placa em betão.

2.1.5 Fundação e leito de via ou coroamento

A camada de fundação ou terraplenagem é a zona mais profunda da ferrovia e a sua qualidade é fundamental para evitar a ruína da via. Pode ser composta por terrenos naturais, com possíveis escavações ou aterros. A superfície superior da terraplenagem designa-se de plataforma da terraplenagem ou plataforma.

A camada de coroamento ou leito de via, também designada por camada de forma, é construída quando é necessário melhorar a capacidade de carga ao nível da plataforma de terraplenagem. Esta é mais superficial, localizando-se sob a camada de sub-balastro.

O leito de fundação tem como função evitar a deformação do solo, a homogeneização das características mecânicas da fundação, servir de plataforma construtiva e possibilitar a compactação das camadas sobrejacentes em adequadas condições (Marques, 2013).

2.2 Via-Férrea Não Balastrada

A via-férrea não balastrada é caracterizada pelo facto de não ter balastro na sua constituição. As grandes vantagens deste tipo de via residem na redução dos custos de conservação, assim como numa maior estabilidade conferida à via, permitindo uma maior segurança para a circulação de veículos a velocidades cada vez mais elevadas (Paixão & Fortunato, 2009).

Contudo, ao contrário da via-férrea balastrada, este tipo sem balastro apresenta custos e tempo de construção mais elevados, além de uma atenuação muito reduzida do ruído. Além disso, qualquer necessidade de correção da geometria da via é muito mais complicada e cara de executar. Em caso de descarrilamento, as obras de reparação serão mais demoradas e caras.

Com estas agravantes e o facto de, normalmente, serem usadas para maiores velocidades de circulação, as exigências sobre as estruturas de apoio são maiores.

A superestrutura da via não balastrada é constituída por uma laje de betão armado ou de mistura betuminosa. A camada imediatamente abaixo é tratada com ligante hidráulico.

A subestrutura das vias balastrada e não balastrada são praticamente coincidentes, no facto de não existir a camada de sub-balastro. A camada de material granular de proteção ao gelo que transmite os esforços à camada de fundação deve apresentar um bom comportamento ao assentamento (Marques, 2013).

2.2.1 Via não balastrada em mistura betuminosa

Com o aproveitamento da experiência proveniente das misturas betuminosas das rodovias, este material é resistente à deformação e apresenta elevada estabilidade estrutural e durabilidade, cumprindo assim os requisitos para as vias de alta velocidade ou de transporte de mercadorias. Neste tipo de via os carris são apoiados em travessas de betão armado que estão assentes diretamente numa camada betuminosa (Paixão & Fortunato, 2009), podendo ser observada esta composição na Figura 2.5.

As vantagens deste sistema assemelham-se às das rodovias, em que a aplicação da camada betuminosa é controlada com uma precisão de 2mm e é de rápida construção. Esta necessita de arrefecimento antes de suportar as cargas, com a colocação de travessas e carris e não necessita de ajustamento na direção vertical. Também é extremamente conveniente e vantajoso ser capaz de fazer pequenas reparações sem ser necessário demolir uma grande parte da estrutura, por ser possível a reutilização da mistura betuminosa e a substituição de travessas.

Mas também, à semelhança das rodovias, essa mesma camada betuminosa apresenta deformações a longo prazo, o que gerará a necessidade de manutenções para manter a geometria da via.

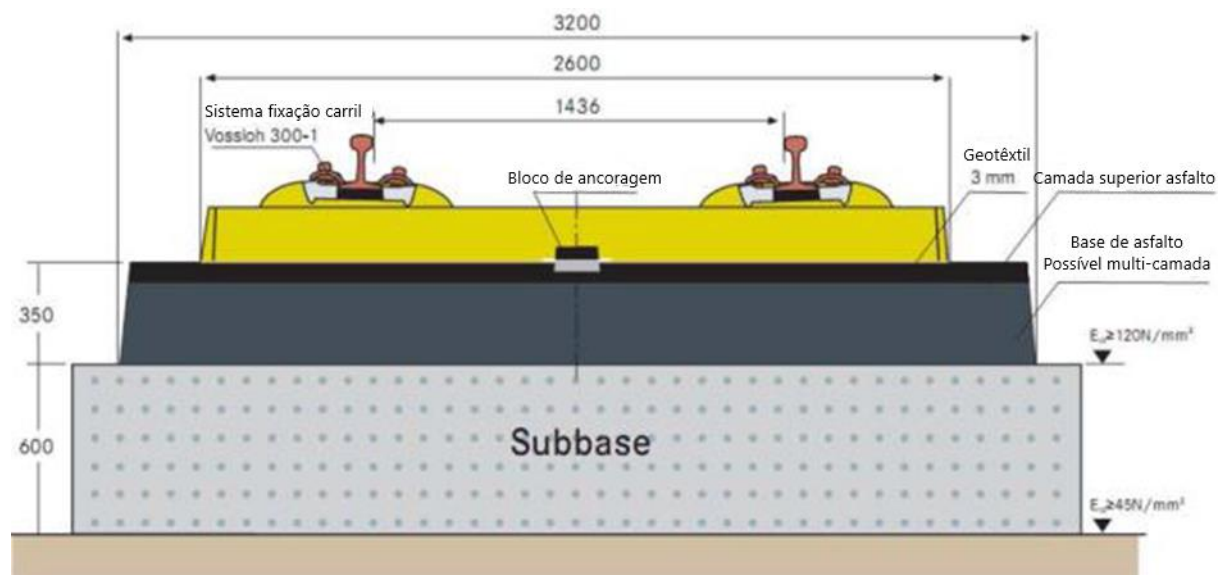


Figura 2.5 - Exemplo de via não balastrada em mistura betuminosa (RAIL.ONE, 2007a)

2.2.2 Via não balastrada em laje

Neste tipo de via não balastrada em laje, os carris são apoiados em travessas de betão armado assentes ou embebidas numa laje de betão armado ou fixadas diretamente na laje. É expectável que este tipo de via apresente períodos de vida útil que rondem os 60 anos, praticamente sem necessitar de operações de conservação (Paixão & Fortunato, 2009).

A baixa necessidade de manutenção é a característica mais relevante deste tipo de via. Apesar de apresentar custos iniciais de construção muito mais elevados, tem custos de manutenção e interrupções de via muito menores.

Na Figura 2.7 representa-se a composição das camadas deste tipo de via-férrea e na Figura 2.6 um exemplo do ML.

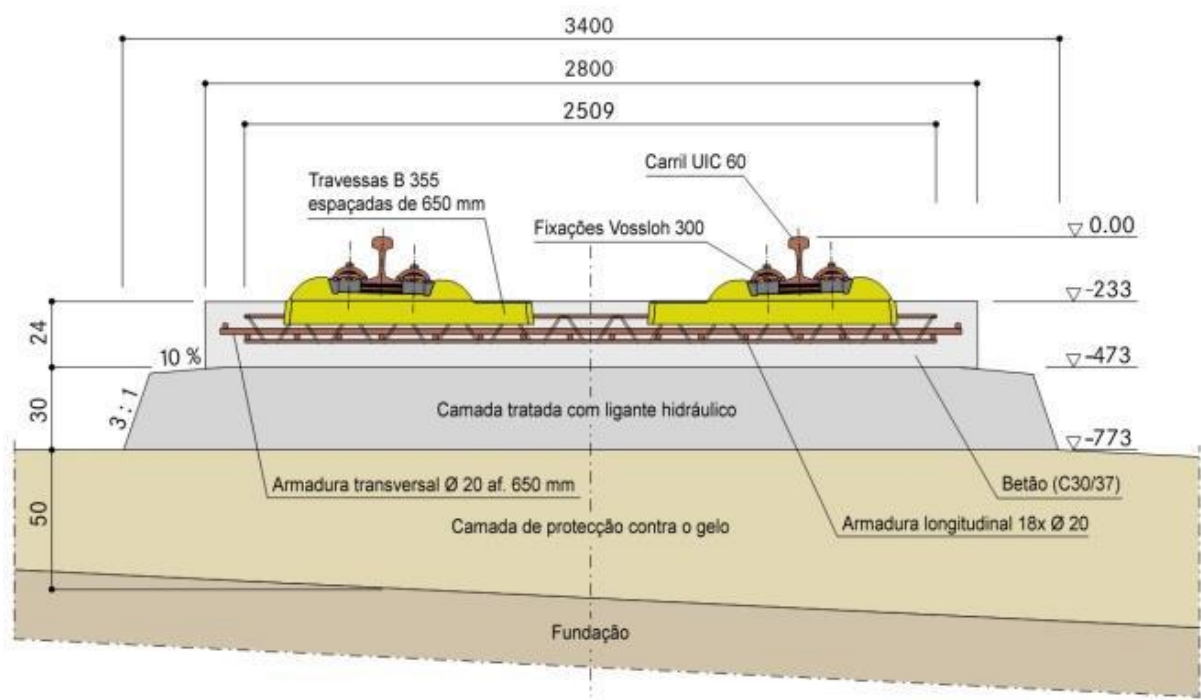


Figura 2.7 - Exemplo de via não balastrada em laje (Paixão & Fortunato, 2009)



Figura 2.6 - Exemplo de via em laje do ML, São Sebastião - Alameda (Infraestruturas, 2024)

2.3 Via em apoio misto

Este tipo de via-férrea apresenta-se como um intermédio entre as vantagens e desvantagens da via balastrada e a da via não balastrada. Não é tão dispendiosa de construir como a via-férrea sem balastro, mas também não necessita de um nível de manutenção tão elevada como a via-férrea balastrada.

Carateriza-se por incluir diferentes tipos de materiais e, frequentemente, a camada de sub-balastro é substituída por uma camada de mistura betuminosa ou é adicionado um ligante hidráulico ao agregado granular. Na Figura 9 representa-se um exemplo de composição deste tipo de via.

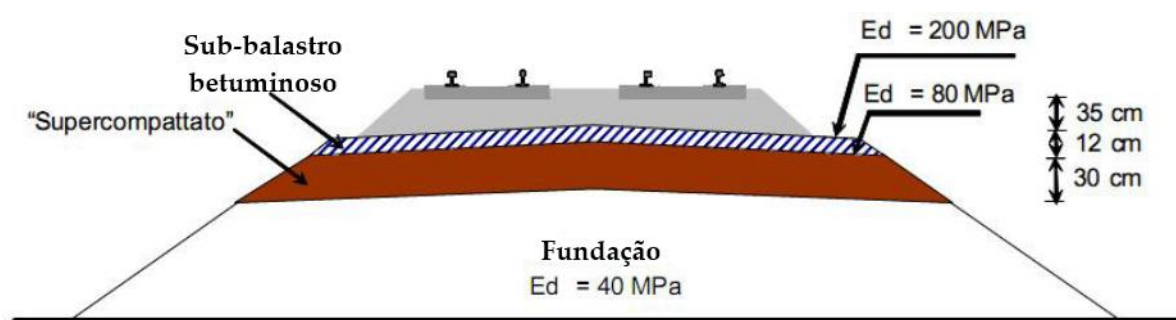


Figura 2.8 - Exemplo de via em apoio misto (Fontul, 2024)

2.4 Aparelhos de mudança de via

Os Aparelhos de Mudança de Via, ou *AMV*, exemplificados na Figura 2.9, servem para suportar e guiar os veículos e são constituídos por carris, lanças e outras peças mecânicas. Estes elementos destinam-se a assegurar a ligação tangencial de duas vias, permitindo a circulação do material circulante quer numa quer noutra via (Infraestruturas-de-Portugal, Terminologia, s.d.). Através da manobra das agulhas constituintes destes dispositivos é permitido o desvio do material circulante para outras vias.

Os *AMV* são identificados, para além do seu tipo, pelo valor da tangente do ângulo de abertura entre a via direta e a via desviada.



Figura 2.9 - Exemplo de AMV do ML

SINALIZAÇÃO

A sinalização desempenha um papel crucial na operação eficiente e segura dos sistemas ferroviários. Contribui significativamente para a segurança operacional e para a manutenção de uma frequência adequada dos comboios. Este capítulo examina a importância da sinalização no metropolitano, com um foco particular na sua influência sobre a frequência e a segurança da circulação dos comboios.

3.1 Importância da sinalização

A sinalização ajuda a regular a frequência dos comboios, garantindo que eles mantenham intervalos de tempo consistentes e seguros entre si. Existem vários sistemas de sinalização, entre eles o mais tradicional é o sistema por blocos ou cantonamento. Atualmente existem alguns sistemas avançados de sinalização, como o *CBTC*, sigla do inglês *Communications-Based Train Control*, ou seja, Controlo de Comboios baseado em Comunicações, que permitem que os operadores monitorizem e ajustem a velocidade e a posição dos comboios em tempo real (Transportation Research Board, 2004).

Existem vários tipos de sinalização utilizados no metropolitano, tendo cada um uma origem e propósitos específicos na regulação do tráfego e na garantia da segurança:

- Sinalização por blocos: Este sistema divide a via em blocos e permite que apenas um comboio ocupe cada bloco de cada vez. Esta é uma medida de segurança fundamental para prevenir colisões frontais e traseiras (Transportation Research Board, 2004);
- Sinalização móvel: Mais avançada, a tecnologia *CBTC* permite uma maior flexibilidade e capacidade na linha, ajustando os blocos em tempo real com base na

posição dos comboios. Este sistema pode aumentar a frequência das composições, sem comprometer a segurança (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005);

A sinalização no metropolitano é uma componente essencial para a operação segura e eficiente do sistema. Regula a frequência dos comboios, assegura a segurança operacional e melhora a capacidade de resposta em situações de emergência.

3.2 Sinalização por blocos

A sinalização por blocos, ou cantonamento, é um sistema de sinalização utilizado em ferrovias e metropolitanos para garantir a segurança e a eficiência na circulação dos comboios. Este sistema divide a via em segmentos, blocos, ou cantões, e utiliza sinais elétricos para comunicar ao operador do comboio se um bloco está ocupado ou livre. Este método de sinalização funciona de modo simples, mas assegura uma operação segura e eficiente. Na Figura 3.1 apresenta-se um esquema do modo de funcionamento deste tipo de sinalização.

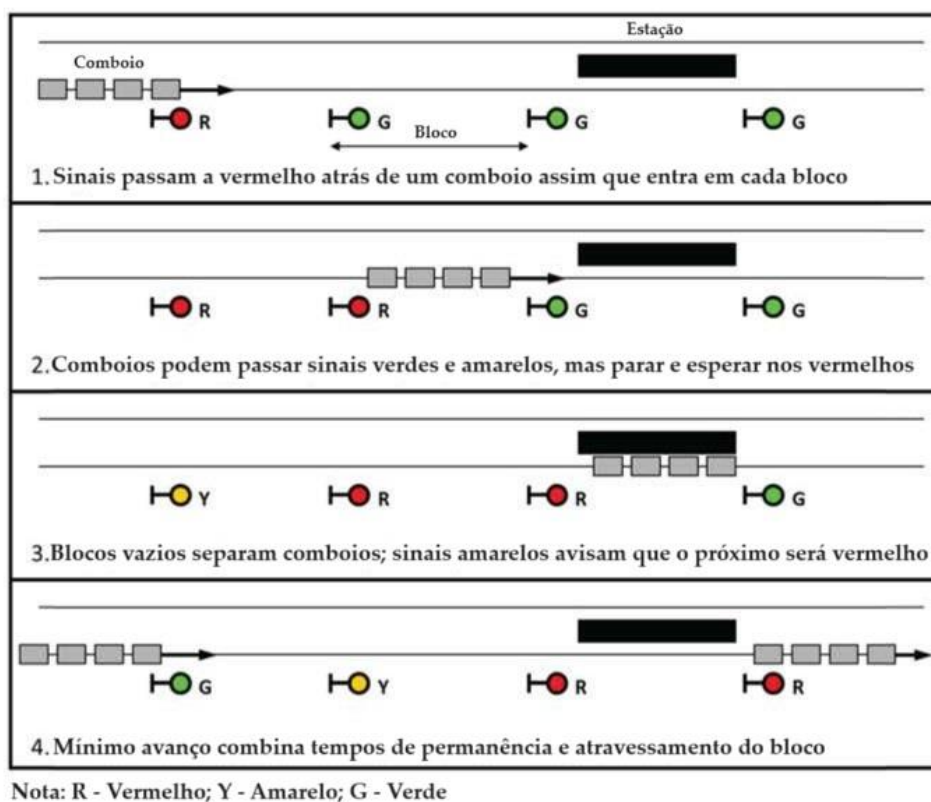


Figura 3.1 - Sistema de sinalização por blocos. Adaptado de (Transportation Research Board, 2004)

Os principais componentes e princípios de funcionamento da sinalização por blocos incluem:

- Divisão em blocos: Este sistema divide a via em blocos fixos e predeterminados. Um bloco é considerado ocupado até que o comboio que está nele saia completamente, momento em que o bloco é libertado para o próximo comboio. Este sistema é simples, mas pode limitar a capacidade e eficiência em vias de alta densidade. Cada bloco é equipado com dispositivos de deteção que identificam a presença de um comboio;
- Deteção de ocupação: Os dispositivos de deteção, como circuitos de via ou contadores de eixos, monitorizam se um bloco está ocupado. Quando um comboio entra num bloco, os dispositivos de deteção sinalizam que o bloco está ocupado e não deve ser ocupado por outro comboio até que esteja livre;
- Sinais de bloco: Cada bloco possui sinais que indicam ao operador do comboio se ele pode avançar. Os sinais apresentam diferentes cores, nomeadamente o vermelho, o amarelo e o verde para indicar se o bloco à frente está ocupado, prestes a ser ocupado ou livre;
- Sistemas de segurança: Sistemas de bloqueio automático podem ser implementados para evitar que os comboios entrem em blocos ocupados.

3.3 Sinalização baseada em comunicação

3.3.1 Conceito Geral

A sinalização baseada em comunicação, *CBTC*, ou outro exemplo como a *ERTMS*, European Rail Traffic Management System, é uma tecnologia avançada de controlo de comboios que utiliza comunicação contínua entre estes e a infraestrutura para gerir e controlar o tráfego ferroviário. Este sistema permite uma operação mais segura, eficiente e flexível em comparação com os sistemas de sinalização tradicionais, como a sinalização por blocos.

A sinalização baseada em comunicação, como o *CBTC* ou o *ERTMS*, European Rail Traffic Management System, são tecnologias avançada de sinalização e controlo de comboios que utilizam a comunicação contínua entre estes e a infraestrutura para gerir e controlar o tráfego ferroviário. Estes sistemas permitem uma operação mais segura, eficiente e flexível em comparação com os sistemas de sinalização tradicionais, como a sinalização por blocos.

Segundo a (European Union Agency for Railways, s.d.): "O *ERTMS* é um sistema europeu de sinalização e controlo da velocidade que assegura a interoperabilidade dos sistemas

ferroviários nacionais, reduzindo os custos de aquisição e manutenção dos sistemas de sinalização bem como aumentando a velocidade dos comboios, a capacidade da infraestrutura e o nível de segurança no transporte ferroviário. O *ERTMS* compreende o *ETCS*, European Train Control System, isto é, um sistema de sinalização que incorpora proteção automática de comboios, o *GSM-R*, Global System for Mobile communications for Railways, e regras operacionais."

O *CBTC* utiliza tecnologia de comunicação digital para fornecer informações em tempo real sobre a localização, a velocidade e a direção dos comboios. Adicionalmente também entram em linha de conta parâmetros já conhecidos da via férrea, como as curvas, inclinações, estações, etc. Os principais componentes e princípios de funcionamento do *CBTC* incluem:

- Comunicação contínua: A sinalização *CBTC* permite uma comunicação bidirecional contínua entre os comboios e os centros de controlo, utilizando redes de comunicação sem fios. Isto garante que os dados sobre a posição e a velocidade dos comboios sejam constantemente atualizados (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005);
- Localização precisa: Os comboios equipados com *CBTC* utilizam sensores a bordo, como GPS e odómetros, para determinar a sua localização precisa. Esta informação é enviada continuamente ao sistema de controlo central;
- Controlo dinâmico de tráfego: O sistema *CBTC* ajusta dinamicamente os intervalos entre os comboios, permitindo uma operação mais próxima e eficiente. Isso resulta em uma maior capacidade da linha e uma melhor gestão do fluxo de tráfego;
- Segurança avançada: O *CBTC* melhora a segurança ao monitorizar constantemente a posição dos comboios e garantir que eles mantenham uma distância segura entre si. Sistemas de proteção automática evitam colisões e permitem uma resposta rápida a emergências (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005).

A sinalização *CBTC* oferece várias vantagens em relação aos sistemas de sinalização tradicionais:

- Aumento da capacidade: O *CBTC* permite reduzir os intervalos entre os comboios (headways), aumentando a capacidade da linha e permitindo um maior número de comboios em circulação simultaneamente;
- Melhoria da segurança: A comunicação contínua e a monitorização em tempo real aumentam a segurança operacional, reduzindo o risco de colisões e permitindo uma gestão eficaz de emergências;

- Eficiência operacional: O *CBTC* melhora a eficiência do sistema ferroviário, otimizando a velocidade e a distância entre os comboios, resultando em menos atrasos e uma operação mais suave (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005);
- Flexibilidade: O sistema *CBTC* pode adaptar-se facilmente a diferentes condições operacionais e de tráfego, permitindo uma resposta rápida a alterações no serviço ou a necessidades de manutenção.

A implementação de um sistema *CBTC* envolve várias etapas e requisitos técnicos:

- Equipamento de comboios: Os comboios devem ser equipados com dispositivos de comunicação e sensores para monitorizar a sua localização e velocidade;
- Infraestrutura de comunicação: Uma rede de comunicação sem fios deve ser estabelecida ao longo da linha ferroviária para permitir a transmissão contínua de dados entre os comboios e os centros de controlo.
- Centros de controlo: Os centros de controlo devem ser equipados com sistemas de processamento de dados e software avançado para gerir a informação recebida dos comboios e ajustar dinamicamente a operação ferroviária;
- Testes e certificação: Antes da implementação completa, o sistema *CBTC* deve ser rigorosamente testado e certificado para garantir que atende a todos os requisitos de segurança e desempenho.

A sinalização *CBTC* representa uma evolução significativa na tecnologia de controlo ferroviário, oferecendo vantagens substanciais em termos de capacidade, segurança, eficiência e flexibilidade. A implementação bem-sucedida de sistemas *CBTC* pode transformar a operação ferroviária, tornando-a mais eficiente e segura para os passageiros e operadores.

3.3.2 Modelo Típico de Frenagem Segura

Na Figura 3.2 encontra-se ilustrado um modelo típico de frenagem para sistemas *CBTC*. Esta figura não está desenhada à escala, mas é apenas uma simples representação para que possa mais facilmente ser compreendido o modelo. Note-se também que o modelo está definido para um troço sem pendente e teria que ser ajustado no caso de esta existir.

Nesta figura, a *Curva de Frenagem de Emergência* representa a curva do pior caso que um comboio tomará assim que a *PAC*, Proteção Automática de Comboio, tiver iniciado a aplicação da frenagem de emergência. Esta curva de frenagem de emergência deverá ser sempre menor ou igual à curva de velocidade segura, em que a velocidade segura é definida como a velocidade máxima acima da qual poderá ocorrer um descarrilamento ou colisão.

Neste modelo, fatores de segurança são tidos em conta na curva de frenagem de emergência, incertezas de posição do comboio e outras tolerâncias de medição incorporadas no projeto de sistema CBTC e não há necessidade de adicionar qualquer margem de segurança adicional.

A *PAC Curva de detecção sobrevelocidade* é a curva velocidade/distância que o subsistema PAC usa para imediatamente iniciar a aplicação da frenagem de emergência, se este subsistema detetar que a velocidade medida excede esta curva na localização medida do comboio. Após o subsistema PAC iniciar a aplicação da frenagem de emergência, deixa de estar em controlo e o comboio travará na ou abaixo da curva de frenagem de emergência. Esta curva inclui um período de propulsão descontrolada, até que a propulsão seja desativada.

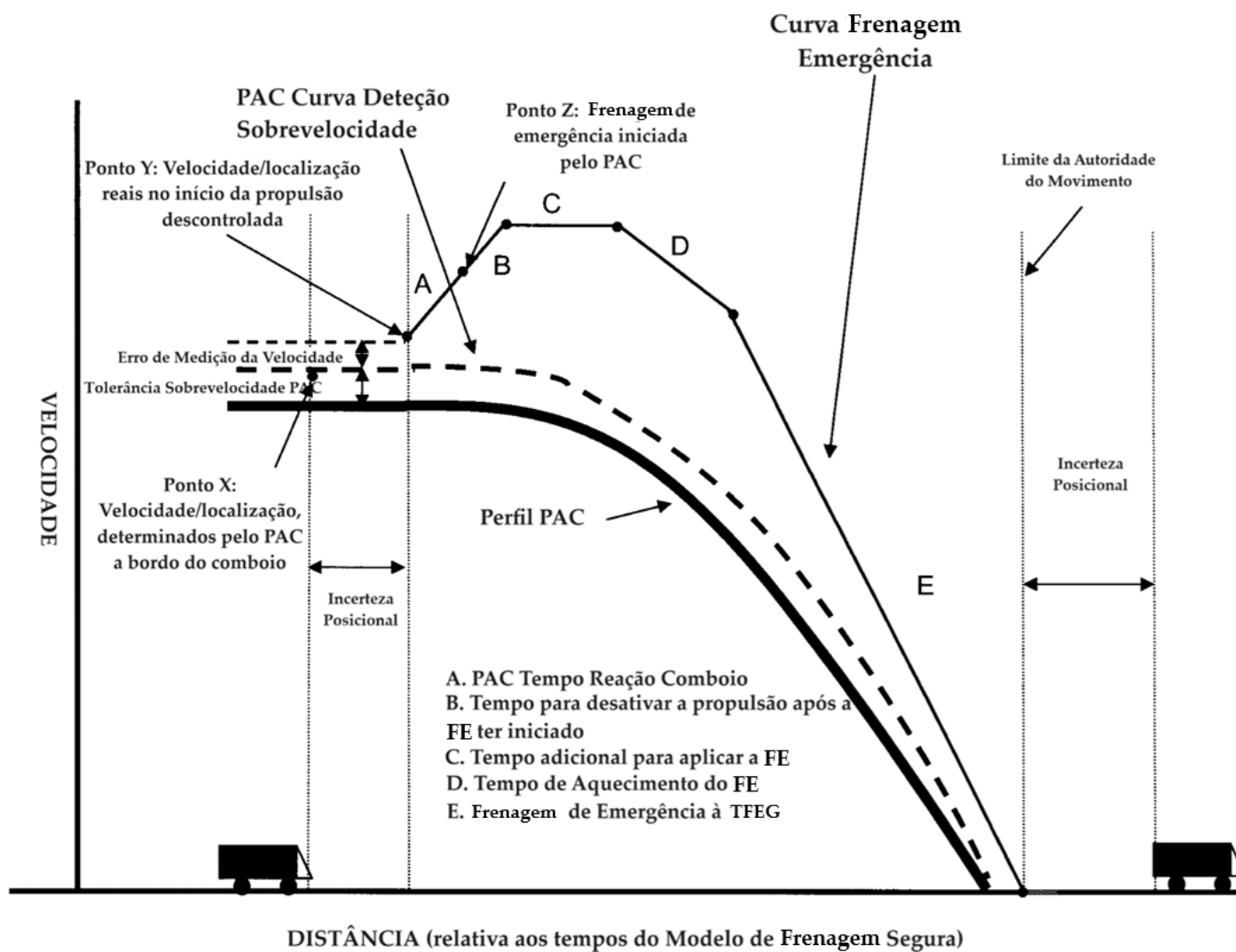


Figura 3.2 - Modelo de frenagem típico. Adaptado de (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005)

A *curva de perfil PAC* é a curva velocidade/distância que representa uma tolerância de sobrevelocidade PAC abaixo da *PAC curva de detecção de sobrevelocidade*. A *curva de perfil PAC* é a curva base utilizada pelo subsistema PAC.

3.3.2.1 (A) Tempo de resposta do CBTC a bordo do comboio

Na Figura 3.2 assume-se que o sistema CBTC medirá a velocidade e localização do comboio relativamente ao Limite da Autoridade do Movimento e comparará a velocidade medida com a velocidade do perfil PAC na mesma localização com uma determinada frequência.

O ponto X representa a situação onde a velocidade medida pelo CBTC é logo abaixo da PAC Curva Detecção Sobrevelocidade na localização medida pelo PAC, isto é, muito embora a velocidade medida pelo PAC esteja acima da curva de perfil PAC, ainda está dentro da tolerância de sobrevelocidade PAC. Como tal, o sistema CBTC não iniciará a frenagem de emergência.

No entanto, devido aos piores casos de erros de velocidade e localização, é possível que as velocidade e localização reais do comboio sejam um ponto Y.

Nesta altura, muito embora o maquinista e o subsistema de operação automática do comboio estivessem normalmente a tentar reduzir a velocidade do comboio para a *curva de perfil PAC*, assume-se que ocorre uma avaria que resulta na aceleração do comboio em vez da sua frenagem.

Alguns segundos depois, esta situação será detetada pelo sistema CBTC, ponto Z, já que a velocidade medida é agora claramente superior à PAC Curva Detecção Sobrevelocidade e o sistema CBTC irá imediatamente iniciar a aplicação de uma frenagem de emergência.

A velocidade no ponto Z representa assim a máxima velocidade que o comboio pode atingir acima da *curva de perfil PAC* devido ao pior cenário de tempos de resposta e erros de leitura do sistema CBTC. Neste ponto, as restantes contribuições para o modelo de frenagem segura são determinadas apenas pelas características do veículo.

3.3.2.2 (B) Tempo de resposta de desativação da propulsão

Durante esta componente do modelo de frenagem segura, o comboio continua a acelerar até que o sistema de propulsão do comboio tenha sido desativado em resposta ao facto de o sistema CBTC ter iniciado a aplicação de uma frenagem de emergência.

3.3.2.3 (C) Tempo de rolagem livre

Durante esta componente do modelo de frenagem segura, assume-se que o comboio está a rolar livremente à máxima velocidade atingida como resultado da aceleração do comboio prévia à desativação da propulsão. Esta componente finda quando a frenagem de emergência começa a produzir efeito.

3.3.2.4 (D) Tempo de aquecimento do freio de emergência

Durante esta componente do modelo de frenagem segura, a taxa do freio de emergência irá aumentar desde zero até, pelo menos, a *TFEG*, Taxa de Frenagem de Emergência Garantida.

3.3.2.5 (E) Tempo de frenagem de emergência à *TFEG*

Durante esta componente do modelo de frenagem segura, o comboio continua a desacelerar à *TFEG* até que chegue à velocidade zero.

3.3.2.6 Incerteza posicional

O modelo de frenagem segura tem de incluir a máxima distância devido à inexatidão de medida do sistema *CBTC*, tanto para o comboio que segue à frente como para o que o segue.

3.4 Considerações finais

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a velocidade de circulação na rede do *ML* para um melhor aproveitamento desta e para garantir um melhor serviço aos utentes.

Segundo os critérios expostos na norma (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005), para o caso em estudo do *ML*, este terá que contemplar uma redução de 16 km/h na velocidade atual para estar em conformidade com as regras de segurança intrínsecas ao *CBTC*.

Assim, com base na infraestrutura existente é possível avaliar a velocidade de circulação por forma a entrar na estimativa da velocidade a ser praticada após instalação do *CBTC*.

ELEMENTOS DO TRAÇADO E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

O traçado de uma ferrovia é um dos componentes mais críticos no projeto e operação de sistemas ferroviários. Determina não apenas a viabilidade técnica e económica da linha, mas também influencia diretamente a velocidade, segurança e conforto dos passageiros. Este capítulo explora os principais elementos do traçado da ferrovia, explicando como cada componente impacta o desempenho e a eficiência do sistema ferroviário.

4.1 Traçado em planta

O traçado em planta é o conjunto de características geométricas da via-férrea inerentes à planta, via vista de cima, que a constituem. Na Figura 4.1 apresenta-se um exemplo deste tipo de traçado.



Figura 4.1 - Exemplo de traçado em planta (Fontul, 2024)

4.1.1 Alinhamento reto

O alinhamento reto é um segmento de parte de uma reta, que tem um ponto inicial e um final.

4.1.2 Curva circular

A curva circular é uma curva de raio constante. Como em todas as curvas, os seus parâmetros são definidos pelo eixo da via, exceto em casos especiais.

4.1.3 Curva de transição

A curva de transição é uma curva de raio variável. Pode existir uma curva de transição entre duas curvas circulares, com raios diferentes, assim como entre uma curva circular e um alinhamento reto, como exemplificado na Figura 4.2. A clotóide, ou parábola cúbica, é normalmente usada como curva de transição, proporcionando uma variação constante da curvatura e da escala. Em certos casos, os extremos das curvas de transição são arredondados através de *doucines*.

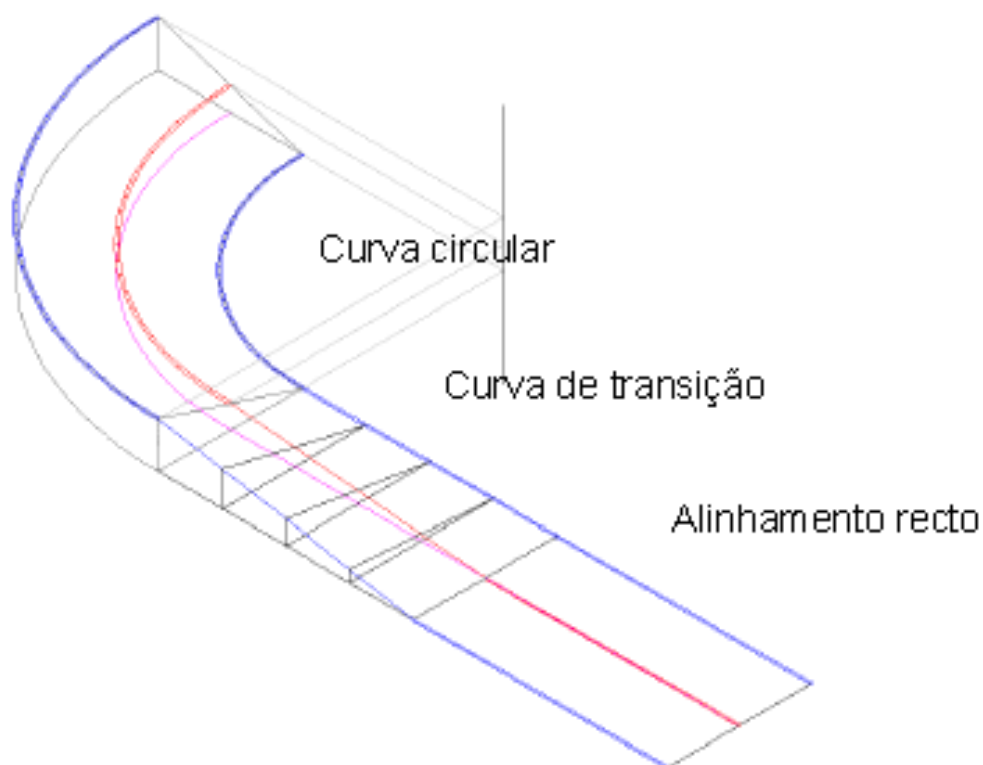


Figura 4.2 - Elementos do traçado em planta (Fontul, 2024)

Neste tipo de transições verifica-se, geralmente, proporcionalidade entre a curvatura e a escala. No entanto, podem usar-se outras formas de curvas de transição que apresentem uma variação não constante entre a curvatura e a escala.

Por princípio, não se usam curvas de transição no traçado em perfil longitudinal. (EN13803-1:2007, 2007)

As curvas de transição têm como principal objetivo atenuar o *grau de incómodo* e os esforços induzidos pela variação da aceleração centrífuga, na unidade de tempo.

4.2 Traçado em perfil longitudinal

O traçado em perfil longitudinal representa o desenvolvimento da via no plano vertical, como exemplificado na Figura 4.3.

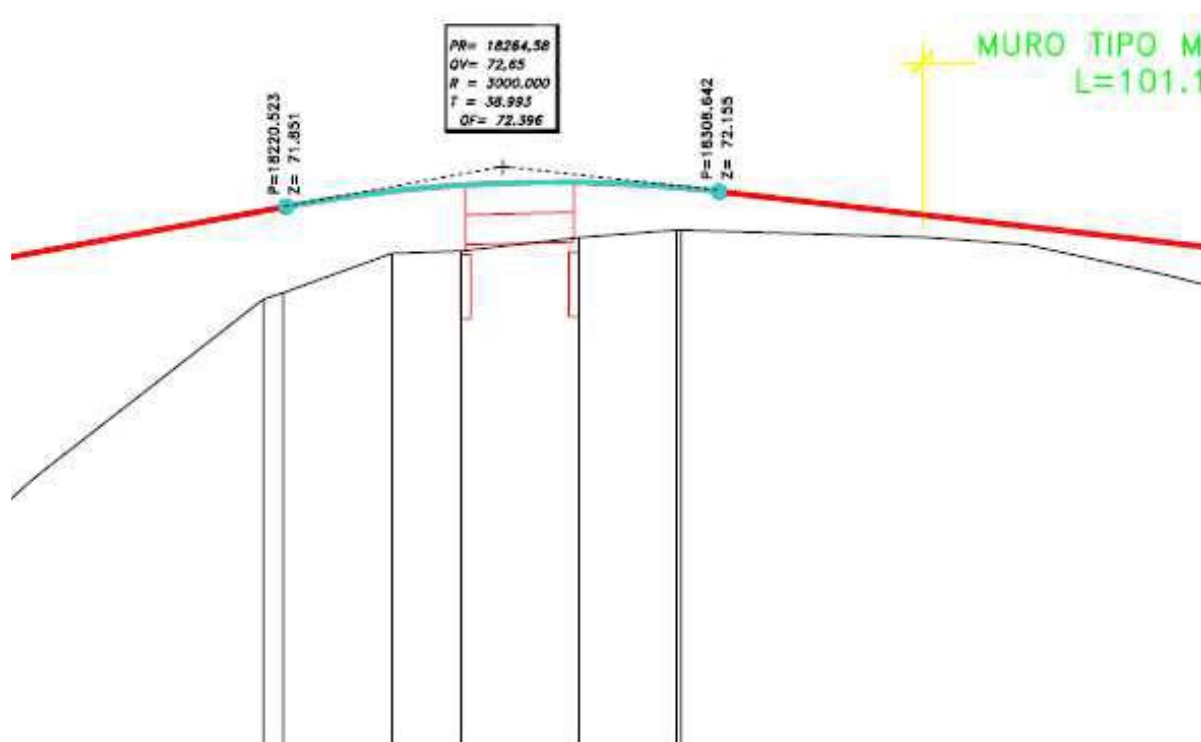


Figura 4.3 - Exemplo de traçado em perfil longitudinal (Fontul, 2024)

4.2.1 Declives

Os declives são troços de via que se estendem de um modo coincidente com um plano inclinado. O declive é designado por rampa se for um percurso ascendente, ou pendente se for um percurso descendente.

Em Portugal, as inclinações na via-férrea são menores que 20‰, ou seja, menores que 20mm por metro.

Para o *ML*, os valores máximos a usar na rede são os seguintes:

- $i=4,000\%$ - em plena via, tanto em zonas de exploração como de serviço;
- $i=0,300\%$ - para zonas de estações, de términos, de aparelhos de via e de garagem ou estacionamento;
- valores fora desses parâmetros são possíveis, mas requerem uma nota justificativa (Metropolitano de Lisboa, s.d.).

4.2.2 Curvas de concordâncias verticais

As curvas de concordância verticais, como se pode observar na Figura 4.4, são curvas verticais que ligam os troços com diferentes inclinações. Estas curvas podem ser côncavas ou convexas, sendo convexas quando têm o centro num ponto de cota inferior ao terreno e côncavas quando têm o centro num ponto de cota superior ao terreno.

4.2.2.1 Raio das curvas verticais

O raio das curvas verticais é o parâmetro de traçado de via que define o desenvolvimento do perfil longitudinal nas suas zonas convexas ou côncavas (Infraestruturas-de-Portugal, Terminologia, s.d.).

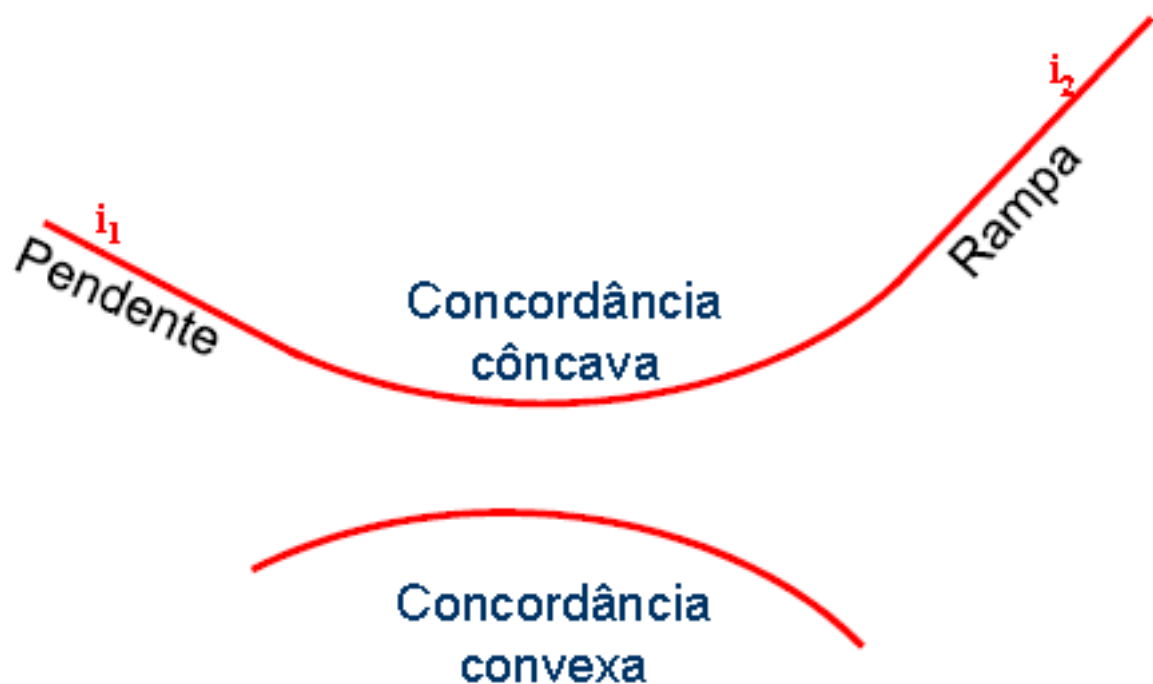


Figura 4.4 - Curvas de concordância verticais (Fontul, 2024)

4.3 Parâmetros Geométricos

Este subcapítulo é crucial para compreender e consolidar as diferenças nos parâmetros geométricos que influenciarão os capítulos subsequentes. Os parâmetros geométricos de uma ferrovia são essenciais para definir as características físicas da via, impactando diretamente a segurança, a capacidade de transporte e a interoperabilidade do sistema ferroviário. Entre esses parâmetros, destacam-se a bitola, empeno, alinhamento, nivelamento longitudinal e transversal, entre outros. Cada um desses aspectos deve ser cuidadosamente projetado e mantido para assegurar a eficiência e a segurança das operações ferroviárias.

Particularmente a escala que, ao longo dos anos e através de diferentes normas tem assumido designações variadas, deve ser compreendida e definida com precisão para identificar e diferenciar as suas características.

4.3.1 Bitola

A bitola da via é a distância entre as faces interiores das cabeças dos carris medida 14mm abaixo da mesa de rolamento e em esquadria com eles, como se observa na Figura 4.5.

Em Portugal existem três tipos de bitolas distintas, a bitola europeia (1435mm), em vigor apenas no *ML*, a bitola ibérica (1668mm), para linha de via larga e por último a bitola métrica (1000mm) para linhas de via estreita, estando estas duas últimas sob gestão das Infra-estruturas de Portugal (Mato, 2023).

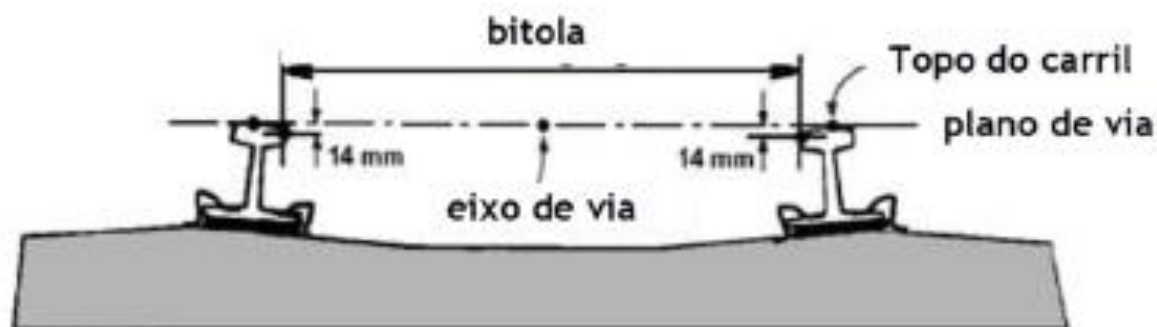


Figura 4.5 - Exemplo de bitola (Fontul, 2024)

4.3.2 Escala

4.3.2.1 Significado geral

O significado literal da palavra escala da via é a diferença máxima na altura entre o carril exterior e interior, medida ao centro da cabeça de carril, em mm. Esta medida encontra-se representada na Figura 4.6.

O valor depende da bitola se for medida em mm, e não depende se for medida em graus.

A escala tem as seguintes funções:

- Limitar os esforços transversais e choques à entrada e saída das curvas, que podem produzir descarrilamentos e capotagem;
- Assegurar um desgaste similar em ambos os carris;
- Permitir uma maior comodidade para os passageiros e evitar possíveis movimentos das mercadorias. (Fontul, 2024)

4.3.2.2 Escala real

Diferentes normas referem-se de forma diferente à escala, apesar de terem o mesmo significado, como apresentado na Tabela 4.1.

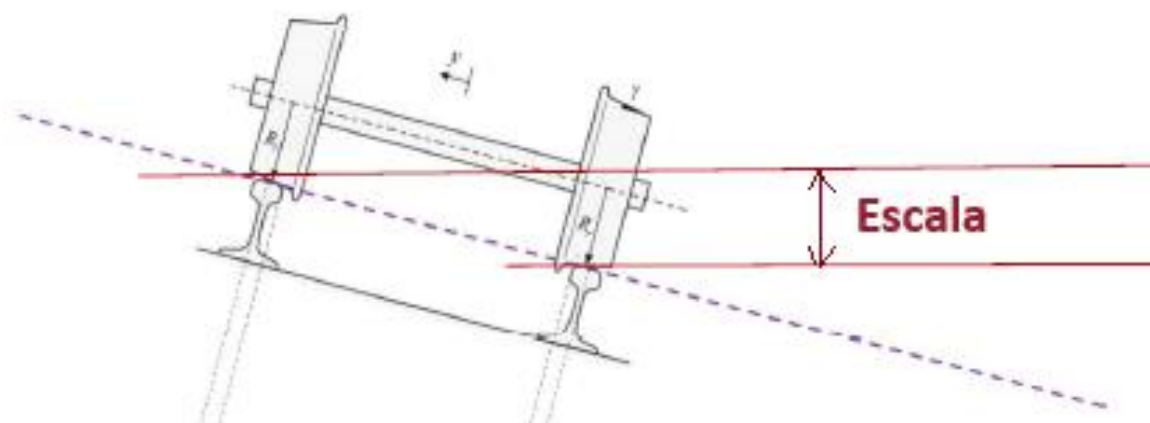


Figura 4.6 - Exemplificação de escala, adaptado (Fontul, 2024)

No caso em que se refere escala, escala real, escala prática ou em inglês *cant*, está a ser referida a escala adotada em projeto para determinada curva, em função da velocidade a praticar pelos comboios rápidos e lentos e que conduz a valores admissíveis de insuficiência e excesso de escala.

Tabela 4.1 - Diferentes designações para escala

Escala ou Escala real / Escala Prática / <i>Cant</i>	Diferentes designações
	h
	D
	d_r

Considera-se que a escala é positiva quando o carril exterior, numa via em curva, se situa a uma cota superior à do carril interior e negativa quando é o carril interior que se situa a uma cota superior à do carril exterior.

4.3.2.3 Escala de equilíbrio

A escala de equilíbrio é a escala capaz de anular todo o efeito, na direção do plano de rolamento, da força centrífuga sobre um veículo que circula numa curva a uma determinada velocidade. Para se atingir esta condição numa via em curva torna-se necessário sobreelevar, de um determinado valor, uma das filas de carris em relação à outra. Este valor designa-se por escala teórica, escala de equilíbrio ou escala de projeto, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Diferentes designações para escala teórica

Escala teórica ou Escala de equilíbrio / Escala de projeto / <i>Equilibrium cant</i>	Diferentes designações
	D_{EQ} h_t d_t

4.3.2.4 Excesso de escala, E

Nas curvas de grande raio, existe geralmente uma diferença significativa entre a velocidade dos comboios rápidos V_{max} e a dos mais lentos V_{min} . O excesso de escala é então o superavit do valor da escala que ocorre quando um veículo percorre uma curva a uma velocidade inferior à velocidade de equilíbrio, sendo submetido a uma força centrípeta não compensada.

Neste caso, os comboios mais lentos vão circular com excesso de escala, como se representa na Figura 4.7.

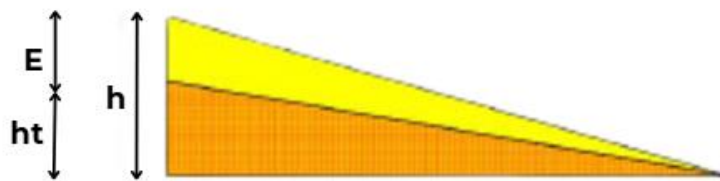


Figura 4.7 - Excesso de escala para os comboios mais lentos (Fontul, 2024)

4.3.2.5 Insuficiência de escala, I

A insuficiência de escala será o défice do valor da escala que ocorre quando um veículo percorre uma curva a uma velocidade superior à velocidade de equilíbrio, sendo submetido a uma força centrífuga não compensada.

Nestes casos os comboios mais rápidos vão circular com insuficiência de escala, como se pode constatar na Figura 4.8.

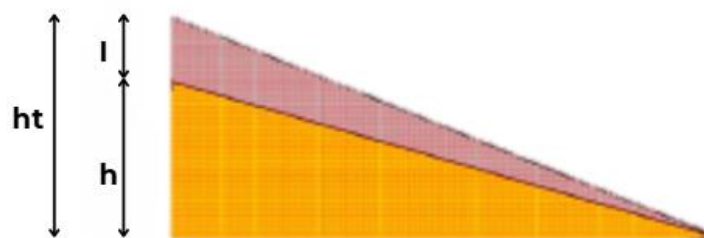


Figura 4.8 - Insuficiência de escala para os comboios mais rápidos, (Fontul, 2024)

4.3.2.6 Resumo da escala

Para resumir e simplificar a consulta, foi elaborada a Tabela 4.3 com todos os tipos de escala acima referidos.

Tabela 4.3 - Resumo dos significados de escala

DESIGNAÇÃO	SIGNIFICADO	SÍMBOLOS
Escala teórica / Escala de equilíbrio / Escala de projecto / <i>Equilibrium cant</i>	É a escala capaz de anular todo o efeito, na direção do plano de rolamento, da força centrífuga sobre um veículo que circula numa curva a uma determinada velocidade.	D_{EQ} h_t d_t
Escala / Escala real / Escala Prática / <i>Cant</i>	Escala literal é a diferença de cotas entre as duas filas de carris medidas nas respetivas mesas de rolamento. Escala adotada em projeto para determinada curva, em função da velocidade a praticar pelos comboios rápidos e lentos, conduzindo a valores admissíveis de insuficiência e excesso de escala.	h D d_r
Excesso de escala	Superavit do valor da escala que ocorre quando um veículo percorre uma curva a uma velocidade inferior à velocidade de equilíbrio, sendo submetido a uma força centrípeta não compensada.	E
Insuficiência de escala	Défice do valor da escala que ocorre quando um veículo percorre uma curva a uma velocidade superior à velocidade de equilíbrio, sendo submetido a uma força centrífuga não compensada.	I
Escala negativa	Quando o carril interior, numa via em curva, se situa a uma cota superior à do carril exterior, podendo ocorrer em aparelhos de mudança de via assentes em	N.A.

	curva com escala, e/ou na plena via nas suas zonas colaterais.	
Escala positiva	Quando o carril exterior, numa via em curva, se situa a uma cota superior à do carril interior.	N.A.
Variação da escala em função do comprimento / Disfarce de escala / Valor da progressividade de escala / <i>Cant gradient</i>	Taxa segundo a qual a escala aumenta ou diminui ao longo de um dado comprimento da transição, também designada por disfarce de escala.	$\frac{dD}{dl}$ $\frac{dD}{ds}$ p
Variação da escala em função do tempo / <i>Rate of change of cant</i>	Taxa segundo a qual a escala aumenta ou diminui relativamente à velocidade máxima de um veículo que circula numa curva de transição.	$\frac{dD}{dt}$ X
Variação da insuficiência de escala em função do tempo / <i>Rate of change of cant deficiency</i>	Taxa segundo a qual a insuficiência de escala aumenta ou diminui relativamente à velocidade máxima de um veículo que circula numa curva de transição.	$\frac{dI}{dt}$
Variação instantânea de insuficiência de escala / <i>Abrupt change of cant deficiency</i>	Diferença entre valores da insuficiência de escala que poderá ocorrer na transposição de um ponto de tangência entre uma curva circular e uma reta ou duas curvas circulares de raios diferentes e/ou sentidos opostos.	ΔI

N.A. - Não aplicável

4.3.3 Empeno

O empeno é definido como a diferença algébrica entre dois valores de escala medidos a uma distância definida, conforme representado na Figura 4.9.

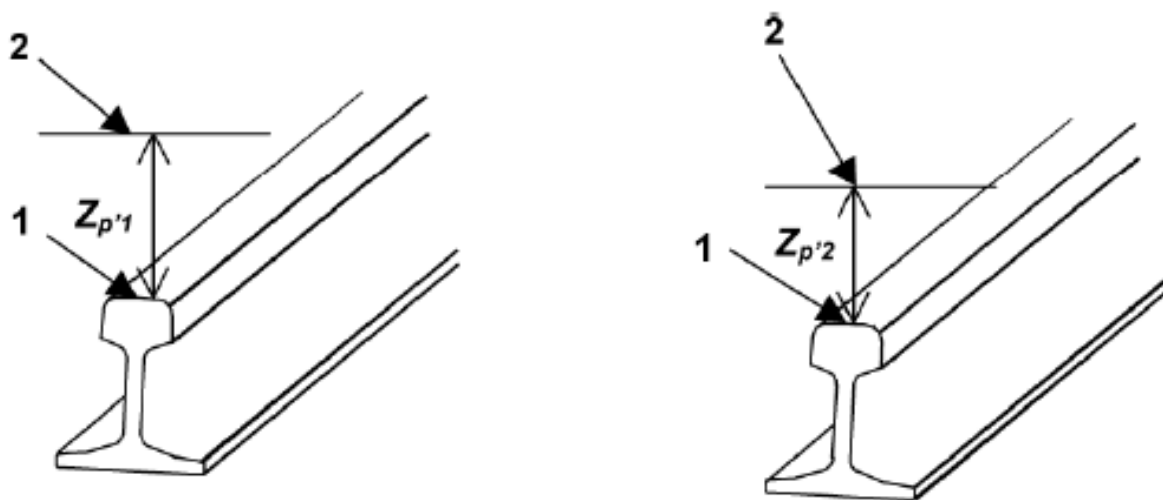


Figura 4.9 - Empeno (Fontul, 2024)

4.3.4 Nivelamento longitudinal

Na Figura 4.10 é exemplificado o nivelamento longitudinal, que é o perfil longitudinal da face superior de cada um dos carris no plano vertical, em relação à posição teórica estabelecida em projeto. Este nivelamento corresponde ao desvio ZP' na direção Z , perpendicular ao plano de rolamento, em consecutivas posições do eixo de cada carril em relação a uma linha de referência paralela ao plano de rolamento, calculado em sucessivas medições (IP, S.A. IT. VIA. 018, 2009).

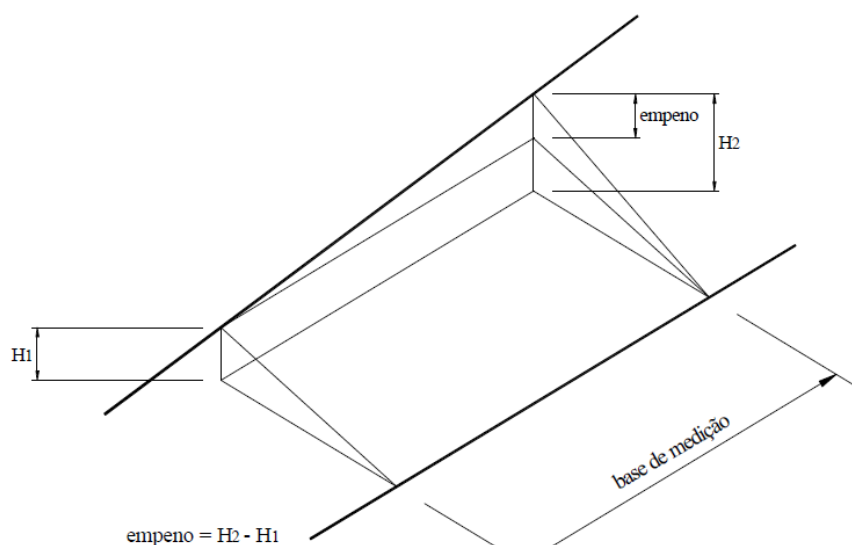


Figura 4.10 - Nivelamento longitudinal (IP, S.A. IT. VIA. 018, 2009)

4.3.5 Alinhamento

O alinhamento é o desvio y_p na direção y , paralela ao plano de rolamento, em consecutivas posições, de P em cada carril, em relação a uma linha de referência intermédia, calculado em sucessivas medições (IP, S.A. IT. VIA. 018, 2009).

Sendo que na Figura 4.11 :

1 - Plano de Rolamento

2 - Eixo de via

3 - Eixo da mesa de rolamento

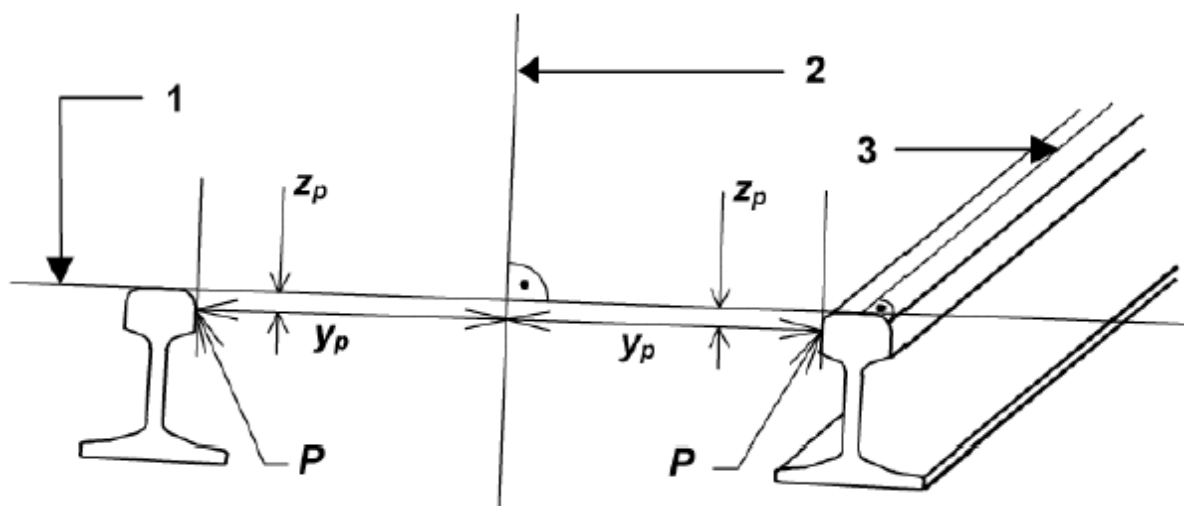


Figura 4.11 - Alinhamento (IP, S.A. IT. VIA. 018, 2009)

4.3.6 Nivelamento transversal

O nivelamento transversal é a diferença em altura da mesa de rolamento de cada carril obtida pelo ângulo entre o plano de rolamento e o plano horizontal de referência. Corresponde

1 - Nivelamento transversal

2 - Plano de rolamento

3 - Plano horizontal de referência

4 - Distância entre eixos dos carris

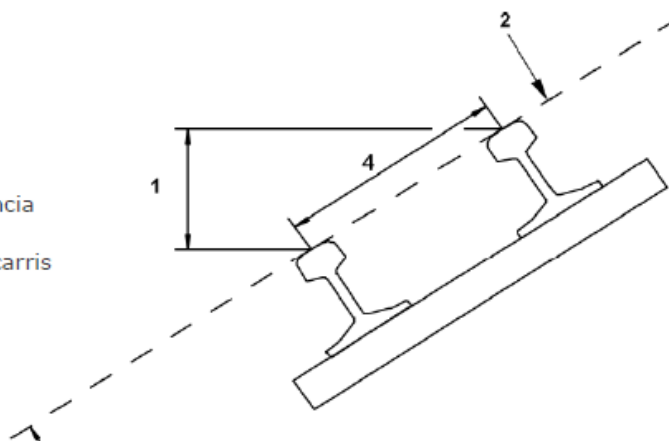


Figura 4.12 - Nivelamento transversal (IP, S.A. IT. VIA. 018, 2009)

à dimensão do cateto vertical de um triângulo retângulo que tem como hipotenusa um valor de referência representativo da distância entre os eixos dos carris (IP, S.A. IT. VIA. 018, 2009). Este nivelamento encontra-se representado na Figura 4.12.

DIFERENÇAS ENTRE FERROVIA CONVENCIONAL E METROPOLITANO

5.1 Introdução

As infraestruturas de transporte ferroviário desempenham um papel crucial na mobilidade urbana e interurbana. Tanto a ferrovia comum como o metropolitano utilizam sistemas de carris para o transporte de passageiros, contudo, as suas características, funções e desafios operacionais diferem significativamente. Este capítulo explora as principais diferenças quanto a aspetos como a infraestrutura, a operação, a capacidade, e o impacto ambiental.

5.2 Infraestruturas

5.2.1 Carris e Vias

A ferrovia comum e o metropolitano utilizam carris como meio de suporte, mas existem diferenças consideráveis na conceção e construção das vias. As linhas ferroviárias comuns são geralmente projetadas para acomodar comboios de longa distância e de mercadorias e possuem carris mais pesados do que os sistemas de metropolitano. Em Portugal, a via-férrea comum apresenta um maior espaçamento entre carris, de modo a suportar cargas pesadas e velocidades elevadas. Estas vias podem atravessar vastas áreas geográficas, exigindo a construção de pontes, túneis e outros elementos de engenharia civil complexos (Vuchic, 2007).

Por outro lado, o metropolitano, sendo um sistema urbano, é projetado para viagens curtas dentro das cidades. As vias são geralmente mais leves, com curvas mais acentuadas e inclinações mais íngremes para se adaptarem ao ambiente urbano. A infraestrutura do metropolitano frequentemente inclui troços subterrâneos, o que eleva a complexidade de projeto e

o custo de construção. Contudo, permite uma integração eficiente com o ambiente urbano e minimiz o impacto sobre o espaço superficial (Garrison & Levinson, 2005).

5.2.2 Estações

As estações ferroviárias comuns são tipicamente maiores e mais complexas porque servem a função de interfaces intermodais para diferentes formas de transporte, como o transporte automóvel individual e coletivo, o metropolitano, os transportes marítimos ou fluviais e também os transportes aéreos. Estas estações podem incluir várias plataformas, áreas de espera e instalações auxiliares, como restaurantes e lojas (Hay, 1982).

As estações de metropolitano, em contraste, são mais compactas e projetadas para facilitar o movimento rápido e eficiente dos passageiros. Com menos amenidades, as estações de metropolitano priorizam a acessibilidade e a integração com o espaço urbano circundante. A sua localização é, geralmente, colocada em áreas de alto tráfego como centros comerciais e áreas residenciais densamente povoadas (Vuchic, 2007).

5.3 Operação

5.3.1 Capacidade e frequência

Um dos principais diferenciais entre a ferrovia comum e o metropolitano é a capacidade e a frequência dos serviços. O metropolitano é projetado para transportar grandes volumes de passageiros em curtas distâncias, com comboios a circular em intervalos de poucos minutos durante os horários de ponta. Este sistema é ideal para áreas urbanas densamente povoadas, onde existe uma procura por transporte de com uma frequência constante e aumentada em períodos específicos do dia (Vuchic, 2007).

Em comparação, a ferrovia comum opera com menos frequência e em distâncias maiores. Os comboios ferroviários transportam menos passageiros por unidade de tempo, mas são projetados para longas viagens, como os serviços regionais e de longo curso. A capacidade de carga também é maior na ferrovia comum, já que é projetada para o transporte de mercadorias pesadas. Os sistemas de metropolitano não são, comumente, concebidos para o transporte de mercadorias (Garrison & Levinson, 2005).

5.3.2 Velocidade

Os comboios de ferrovia comum geralmente operam a velocidades mais altas em comparação com o metropolitano, especialmente em linhas de alta velocidade (TGV, AVE, etc.). Isto é possível devido à conceção das vias e à menor frequência de paragens entre as estações.

Por outro lado, o metropolitano, devido à sua operação em ambiente urbano e à necessidade de paragens frequentes e acentuados perfis das linhas, opera a velocidades mais baixas. Contudo, circula com altas acelerações positivas e negativas, graças ao peso aderente e à potência instalada, ambos comparativamente fortes. Do acima referido, associado à utilização generalizada de *bogies*, resulta a perda da necessidade da compensação dos traçados, um dos princípios fundamentais das linhas de ferrovia comum. Também deixa de fazer sentido a comparação de comprimentos virtuais para escolha de traçados, já que estes são impostos, geralmente, por diferentes motivos. Ao nível do estudo económico, são mais importantes considerações de ordem construtiva, em função das condições locais (Pinto, 1966).

5.3.3 Material circulante

Enquanto que na ferrovia de interesse geral, o material circulante é muito diverso, pois tem que acomodar diversas tipologias de transporte de passageiros e de carga, nos sistemas de metropolitano há uma grande uniformidade. Esta homogeneidade provém da especialização funcional, ou seja, o exclusivo transporte de passageiros.

Além disso, também existe uma uniformidade quase completa nas diversas carruagens de um comboio, graças às características de intercambiabilidade, de dispersão de cargas pelos *bogies* e dos meios de aplicação e de recolha de energia. Também estão ausentes os altos centros de gravidade, os grandes embasamentos rígidos e os rodados submetidos a altos esforços verticais.

Por último, a própria marcha dos comboios, apesar de poder variar a frequência, é também uniforme porque estes percorrem sempre o mesmo percurso da mesma forma (Pinto, 1966).

5.3.4 Impacto ambiental

O impacto ambiental dos sistemas ferroviários é uma consideração importante. Em termos gerais, ambos os sistemas são mais sustentáveis do que o transporte rodoviário, devido à sua eficiência energética e à capacidade de transportar grandes volumes de passageiros com menor emissão de gases de efeito estufa por pessoa (Garrison & Levinson, 2005).

No entanto, a ferrovia comum, devido à sua infraestrutura extensa e ao impacto no uso do solo, pode ter um impacto ambiental maior na fase de construção. O metropolitano, apesar de complexo na construção, especialmente em áreas subterrâneas, tem um impacto menor no ambiente urbano após a sua conclusão, devido à redução da necessidade de infraestruturas rodoviárias e à diminuição do congestionamento do tráfego (Vuchic, 2007).

5.4 Materiais da Via-Férrea no Metropolitano de Lisboa

A infraestrutura ferroviária do *ML* é composta por uma variedade de materiais cuidadosamente selecionados para assegurar a durabilidade, segurança e eficiência operacional. Os materiais utilizados variam consoante a natureza da via, que pode ser balastrada ou em laje de betão, e são escolhidos em função das condições ambientais, da frequência de tráfego e das exigências de manutenção.

De seguida, apresenta-se uma análise detalhada dos principais materiais empregados na construção e manutenção das vias-férreas do *ML*, com uma descrição pormenorizada das suas propriedades, funções e aplicação no sistema.

5.4.1 Carris

Os carris constituem o principal elemento estrutural da via-férrea, sendo responsáveis por guiar as rodas dos comboios e suportar as cargas transmitidas por estas. No *ML*, os carris de rolamento mais utilizados são do tipo 50 E6, também conhecidos como UIC50. Estes apresentam um perfil em forma de I, como exemplificado na Figura 5.1, e um peso de 50 kg/m. Estes carris são fabricados em aço de elevada resistência, com teor de carbono na ordem de 0,7% a 0,8%, submetido a processos de tratamento térmico para melhorar a resistência ao desgaste e à fadiga.

Os carris são instalados com uma ligeira inclinação, geralmente 1:20, para melhorar a estabilidade dos comboios e reduzir o desgaste das rodas. A junta entre os carris é frequentemente soldada para criar uma via contínua, minimizando assim os impactos e o ruído durante a passagem dos comboios. Em zonas onde a soldagem não é viável utilizam-se barras de junta, que permitem alguma flexibilidade longitudinal, compensando as dilatações térmicas do aço.

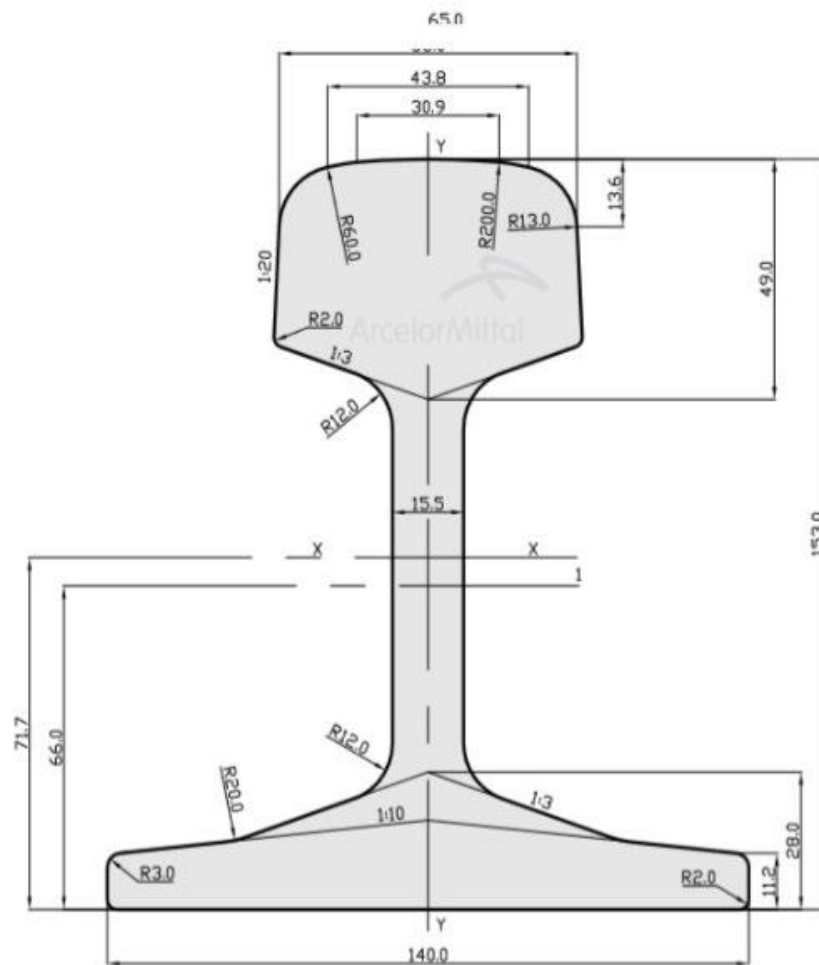


Figura 5.1 - Carril 50 E6

5.4.2 Travessas

As travessas são elementos transversais que suportam os carris e transferem as cargas para o substrato da via, além de manterem o espaçamento correto entre os carris, ou seja, a bitola. No *ML*, as travessas de betão pré-fabricado são amplamente utilizadas devido à sua elevada resistência mecânica e longa vida útil. Estas travessas são fabricadas em betão armado ou pré-esforçado, utilizando agregados de alta qualidade e aditivos que conferem resistência adicional ao desgaste e à corrosão.

As travessas de betão do *ML* são do tipo monobloco, o que significa que são peças únicas, o que aumenta a sua estabilidade e durabilidade. Em secções onde as características geométricas da via exigem maior flexibilidade, como em curvas de raio reduzido, podem ser utilizadas travessas de madeira. No entanto, estas estão a ser progressivamente substituídas por travessas de betão devido às suas vantagens em termos de durabilidade e manutenção.

5.4.3 Balastro

O balastro é composto por uma camada de pedras britadas, geralmente de granito ou basalto, que é colocada entre as travessas e o subleito da via. No *ML*, o balastro desempenha várias funções críticas: distribui as cargas dos comboios uniformemente para o subleito, permite a drenagem eficiente da água, fornece flexibilidade à via e facilita a manutenção, permitindo pequenos ajustes na posição dos carris.

A granulometria do balastro é cuidadosamente selecionada para garantir a máxima estabilidade e durabilidade da via. As partículas de balastro devem ter uma forma angular, o que melhora o entrelaçamento e, conseqüentemente, a capacidade de suporte de carga. Além disso, a altura da camada de balastro é calculada para garantir que as travessas estejam suficientemente suportadas e que a via mantenha a sua correta geometria ao longo do tempo.

5.4.4 Placas de betão

Nas secções onde a via-férrea é instalada em laje, em vez de balastro, utiliza-se uma base contínua de betão armado, conhecida como placa de betão. Este método é frequentemente utilizado em túneis e zonas urbanas densas, onde a minimização das vibrações e do ruído é essencial. As placas de betão no Metropolitano de Lisboa são projetadas para proporcionar uma superfície estável e de longa duração, que requer menos manutenção comparativamente às vias balastradas.

As placas de betão são geralmente reforçadas com barras de aço e, em alguns casos, incluem juntas de dilatação para acomodar variações térmicas. O uso de betão de alta resistência, com adição de fibras, é comum para prevenir fissuras e aumentar a durabilidade. As placas de betão proporcionam uma excelente fixação dos carris e ajudam a reduzir o desgaste dos componentes ferroviários devido à sua rigidez e estabilidade superior.

5.4.5 Sistemas de fixação

Os sistemas de fixação são essenciais para assegurar que os carris permanecem firmemente presos às travessas ou às placas de betão, mesmo sob cargas dinâmicas elevadas. No *ML*, utiliza-se predominantemente um sistema de fixação elástica, composto por grampos de aço, frequentemente do tipo Pandrol, e placas de elastómero. Este sistema permite uma ligeira flexibilidade do carril, o que ajuda a absorver as vibrações geradas pelo movimento dos comboios e a prolongar a vida útil tanto dos carris como das travessas.

Além disso, o sistema de fixação elástica é projetado para resistir a variações térmicas e garantir que os carris permaneçam na posição correta, independentemente das condições ambientais. As placas de elastômero também ajudam a reduzir o ruído e as vibrações transmitidas ao solo, o que é particularmente importante em áreas urbanas densamente povoadas.

5.4.6 Aparelhos de mudança de via

Os Aparelhos de Mudança de Via são componentes complexos que permitem a alteração da rota dos comboios de uma linha para outra. No *ML*, os *AMV* são constituídos por carris, lanças, agulhas, contracarris e mecanismos de acionamento, todos projetados para operar com precisão e segurança. Estes aparelhos são fabricados em aço de alta resistência, devido às exigências mecânicas associadas ao movimento repetitivo das agulhas e ao impacto dos comboios ao passar sobre as lanças.

A manutenção dos *AMV* é crítica, pois qualquer falha pode ter consequências graves para a segurança das operações. Por este motivo, os *AMV* do *ML* são submetidos a inspeções regulares e manutenções preventivas rigorosas. Além disso, são equipados com sensores que monitorizam o posicionamento correto das agulhas, permitindo uma intervenção imediata em caso de anomalias.

5.5 Síntese

Embora ambos os sistemas de transporte ferroviário sejam fundamentais para a mobilidade moderna, as diferenças entre a ferrovia comum e o metropolitano são grandes. A ferrovia comum é ideal para longas distâncias e transporte de carga, enquanto o metropolitano é essencial para a mobilidade urbana de alta capacidade.

Os materiais utilizados na construção e manutenção das vias-férreas do *ML* são selecionados com base em critérios rigorosos de desempenho, durabilidade e segurança. Cada componente, desde os carris de aço até às travessas de betão e aos sofisticados sistemas de fixação, desempenha um papel crucial na manutenção de uma infraestrutura confiável e eficiente. O compromisso contínuo com a utilização de materiais de alta qualidade e com a adoção de tecnologias avançadas reflete a dedicação do *ML* em proporcionar um serviço seguro e de alta qualidade aos seus passageiros.

ANÁLISE COMPARATIVA DAS NORMAS DE TRAÇADO

Nesta seção crucial da dissertação será apresentada uma análise comparativa das normas de traçado disponíveis para aplicações ferroviárias. As normas analisadas foram as seguintes:

- Aplicações Ferroviárias. Parâmetros de Projeto de Traçado de Via - Bitolas de Via de 1435 mm e de Valor Superior. Parte 1: Plena Via" (NPENV13803-1:2007, 2007);
- "Railway Applications - Track - Track Alignment Design Parameters - Track Gauges 1435mm and Wider" (EN13803-1:2017, 2017);
- A norma confidencial e específica do ML "Normas para o Projeto de Traçado das Vias" (Metropolitano de Lisboa, s.d.).

Por uma questão de clareza e simplificação serão designadas no texto seguinte por Norma 2007, Norma 2017 e Norma Metropolitano, respetivamente.

A importância desta comparação reside no facto de que, embora as normas se refiram às mesmas definições, utilizam nomenclaturas diferentes e, em muitos casos, parâmetros distintos, o que torna a sua correlação complexa e demorada.

É também relevante salientar que as normas de traçado disponíveis para aplicações ferroviárias não são específicas para sistemas de metropolitano, o que deixa margem para interpretações. Além disso, como mencionado anteriormente, a infraestrutura do ML é composta tanto por via-férrea balastrada quanto por via-férrea em placa, enquanto as normas em questão foram desenvolvidas exclusivamente para vias balastradas, com exceção da "Norma para o Projeto de Traçado das Vias". Isso acrescenta um nível adicional de complexidade na interpretação e escolha correta dos parâmetros a serem analisados.

Neste capítulo descreve-se cada um dos parâmetros das três normas e, em seguida, apresenta-se uma versão resumida. Esta versão resumida não substitui a consulta da descrição completa de cada parâmetro, servindo apenas para destacar os pontos essenciais e para facilitar a comparação e a compreensão das diferenças entre os parâmetros em cada norma.

Nas conclusões serão apresentadas, de forma tabelada, as diferentes nomenclaturas para cada parâmetro, de acordo com a respectiva norma, para uma melhor compreensão das suas semelhanças e diferenças.

6.1 Cálculo da velocidade de circulação

6.1.1 Definição de valores limite

Para a maioria dos parâmetros são definidos dois tipos distintos de valores limite, um valor limite recomendado e um valor limite máximo.

O valor limite recomendado, como o nome indica, é o valor que é aconselhado, tendo em conta a segurança e o conforto dos passageiros.

O valor limite máximo pode apresentar dois significados distintos. Para os parâmetros relacionados com a segurança, deve ser considerado como o limite máximo absoluto e pode depender do estado mecânico e geométrico real da via. Para os parâmetros não relacionados com a segurança, estes valores devem ser considerados como o limite para além do qual o conforto dos passageiros pode ser afetado e a necessidade de conservação da via significativamente incrementada (Fontul, 2024).

Os parâmetros relacionados com a segurança são os seguintes:

- Raio de curva horizontal;
- Escala;
- Insuficiência de escala;
- Aceleração lateral, quasi-estática, não compensada ao nível da via;
- Variação da escala em função do comprimento;
- Velocidade.

Os restantes parâmetros de projeto de traçado de via que não estão diretamente relacionados com segurança são os seguintes:

- Excesso de escala;
- Variação da escala em função do tempo;
- Variação da insuficiência de escala em função do tempo;
- Comprimento dos elementos do traçado, curvas circulares e alinhamentos retos;

- Comprimento das curvas de transição no plano horizontal;
- Raio de curva vertical;
- Aceleração vertical;

Realce-se que, embora na Norma 2007 sejam usados os termos *valor limite recomendado* e *valor limite máximo*, na Norma 2017 os termos equivalentes passam a ter a designação de *limite normal* e *Limite excepcional*.

6.1.2 Categorias de tráfego

6.1.2.1 Norma 2007

Na presente norma, a velocidade de referência é a dos comboios de passageiros para bitolas de via de 1435 mm e de valor superior.

Na Tabela 6.1 apresentam-se as respetivas categorias de tráfego desta norma.

Tabela 6.1 - Categorias de tráfego da Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)

	I	IIa	IIb	III	IV	V
Tipo de Tráfego	Misto	Misto	Misto	Misto	Misto	Passageiros
Velocidade* (km/h)	80-120	120-160	160-200	200-300	>230 (250) **	250-300

*velocidade máxima para os comboios de passageiros

**veículos dotados de características técnicas especiais

Onde se descreve:

I - Linhas de tráfego misto com velocidades para comboios de passageiros de 80 km/h até 120 km/h no máximo;

IIa - Linhas de tráfego misto com velocidades para comboios de passageiros superiores a 120 km/h e até 160 km/h no máximo;

IIb - Linhas de tráfego misto com velocidades para comboios de passageiros superiores a 160 km/h e até 200 km/h no máximo;

III - Linhas de tráfego misto concebidas para velocidades dos comboios de passageiros superiores a 200 km/h e até 300 km/h;

IV - Linhas de tráfego misto com velocidades para comboios de passageiros superiores 230 km/h (ou 250 km/h em linhas modernizadas) com veículos dotados de características técnicas especiais (reduzida massa por eixo, baixo coeficiente de souplesse, etc.);

V - Linhas especialmente dedicadas ao tráfego de passageiros com velocidades entre 250 km/h e 300 km/h.

A partir deste ponto, as categorias de tráfego serão designadas dessa forma sucinta.

6.1.2.2 Norma 2017

Nesta norma não existe, como na anterior, uma descrição detalhada das categorias de tráfego. Apenas é referido que a presente norma é aplicável a bitolas de valor igual ou superior a 1435 mm e para velocidades até 360 km/h.

Como irá ser apresentado adiante, cada parâmetro terá os seus intervalos de velocidades associados aos respetivos valores limite.

6.1.2.3 Norma Metropolitano

Na norma específica para o *ML* a bitola é de 1435 mm, com tráfego exclusivo de passageiros e a velocidade máxima de circulação, na altura em que a norma foi redigida, de 60 km/h. Estava prevista, numa fase futura de exploração, o aumento para uma velocidade máxima de circulação de 72 km/h.

6.1.2.4 Resumo da comparação das categorias de tráfego

A comparação simplificada das categorias de tráfego apresentada na Tabela 6.2 serve apenas para comparar rapidamente e não dispensa a consulta da descrição mais detalhada feita anteriormente.

Tabela 6.2 - Resumo comparação das categorias de tráfego

Norma 2007	Norma 2017	Norma Metropolitano
Definição clara das categorias de tráfego Até 300 km/h	Não apresenta uma definição clara das categorias Até 360 km/h	É específica só para o Metropolitano de Lisboa 60 - 72 km/h

6.1.3 Raio de curva horizontal

6.1.3.1 Norma 2007

A Norma 2007 afirma que não devem ser utilizados raios de curva inferiores a 180m nos novos traçados. Sempre que possível, deverão ser utilizados os maiores raios de curvatura permitidos pelas condicionantes de projeto, o que facilitará qualquer futuro aumento da velocidade.

Os parâmetros que deverão ser considerados para a determinação do raio de curva mínimo são:

- As velocidades máxima e mínima de operação;
- A escala aplicada;
- Os valores limite de insuficiência e de excesso de escala.

O raio de curva mínimo admitido para a velocidade de operação máxima, com insuficiência de escala, é determinado através da Equação 1:

$$R = \frac{11,8}{D + I} V_{max}^2 \quad [m] \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

R - Raio de curva horizontal;

D - Escala;

I - Insuficiência de escala;

V_{max} - Velocidade máxima.

O raio de curva mínimo admitido para a velocidade de operação mínima, com excesso de escala, é determinado através da Equação 2:

$$R = \frac{11,8}{D - E} V_{min}^2 \quad [m] \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

E - Excesso de escala;

V_{min} - Velocidade mínima.

O raio de curva mínimo deve ser determinado de tal modo que os valores de D , I e E respeitem os limites definidos na presente Norma e satisfaçam o constante na Equação 3:

$$\frac{11,8V_{min}^2}{D - E} \geq R \geq \frac{11,8V_{max}^2}{D + I} \quad [m] \quad \text{Equação 3}$$

No entanto, é recomendado que o valor do raio das curvas em vias adjacentes aos cais de passageiros não seja inferior a 500m. Esta prescrição destina-se a limitar a dimensão da

lacuna entre o cais e os veículos para facilitar o acesso em segurança dos passageiros aos comboios.

6.1.3.2 Norma 2017

Para o parâmetro do raio de curva horizontal, esta norma define o valor apresentado na Tabela 6.3:

Tabela 6.3 - Valor limite inferior para raios de curvas horizontais R_{lim} , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

Limite recomendado	Limite excecional
150 m	

Realce-se que nem todos os veículos estão concebidos e aprovados para raios horizontais inferiores a 150 metros e, nesse caso, será necessária a consulta de outras normas como, por exemplo, a EN 15273-2. Não existe um valor limite superior para raios de curva horizontal nesta norma europeia, o que não impede que exista a nível local.

6.1.3.3 Norma Metropolitano

Para o parâmetro de raio de curva horizontal, a norma Metropolitano adota como raios mínimos de curvatura horizontal os seguintes:

- 300 metros - para vias de exploração em condições normais;
- 200 metros - para vias de exploração em situações de traçado extremamente difíceis;
- 100 metros - para as vias de serviço, ou seja, terminos de inversão, resguardos, ramais de acesso ao Parque de Material e Oficinas e feixes de vias de P.M.O.

6.1.3.4 Resumo da comparação do raio de curva horizontal

Apresenta-se na Tabela 6.4 uma comparação simplificada dos valores limite para raios de curva horizontal. Esta tabela resumo tem o objetivo de facilitar a consulta rápida e comparativa dos valores principais. No entanto, não substitui a leitura da descrição detalhada fornecida anteriormente.

Tabela 6.4 - Resumo da comparação do Valor limite inferior para raios de curvas horizontais

Norma 2007	Norma 2017	Norma Metropolitano
180m	150m	300m - vias normais 200m - vias difíceis 100m - vias de serviço

6.1.4 Escala

6.1.4.1 Norma 2007

Na norma 2007 a escala é designada por D e deve ser determinada tendo em atenção as seguintes considerações:

- Uma escala de valor elevado em curvas de pequeno raio aumenta o risco de descarrilamento dos vagões de mercadorias que circulem a baixa velocidade;
- Uma escala superior a 160 mm pode originar deslocamentos da carga dos vagões de mercadorias e deterioração do conforto dos passageiros em caso de paragens imprevistas em locais com escalas dessa ordem de grandeza. Além disso, em zonas de escala muito elevada, os veículos de trabalhos de via e certos carregamentos em que o centro de gravidade fique muito alto podem tornar-se instáveis;
- Uma escala elevada causa o aumento dos valores do excesso de escala em curvas onde se verifiquem grandes diferenças entre as velocidades dos comboios rápidos e lentos.
- Recomenda-se ainda que nas vias adjacentes aos cais de passageiros, a escala seja limitada ao valor de 110 mm. Algumas outras situações de via, tais como em passagens de nível, em pontes e em túneis, podem igualmente em certas circunstâncias locais impor restrições de escala.

Como no parâmetro anterior, a divisão continua a ser feita pelas categorias de tráfego inicialmente definidas. Apresenta-se na Tabela 6.5 um resumo do parâmetro escala para as diferentes categorias.

Tabela 6.5 - Escala D_{lim} , adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)

Categorias de tráfego	I	IIa	IIb	III	IV	V
Valor limite recomendado [mm] *	160	160	160	160	160	160
Valor limite máximo [mm] *	180	180	180	180	180	200
*Para evitar o risco de descarrilamento dos vagões com grande rigidez à torção em curva de pequeno raio, recomenda-se que a escala não ultrapasse o limite seguinte: $D_l = \frac{R - 50}{1,5} \text{ [mm]}$						

6.1.4.2 Norma 2017

Na norma 2017, os valores da escala, aqui designada por D , deverão ser obtidos a partir da Tabela 6.6 e da Tabela 6.7.

Tabela 6.6 - Limites superiores da Escala D_{lim} , adaptado da Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

	Limite normal	Limite excecional
Plena Via	160 mm	180 mm *
AMV e cruzamentos	120 mm	160 mm
* Uma escala superior a 160 mm pode originar deslocamentos da carga dos vagões de mercadorias e deterioração do conforto dos passageiros quando um comboio para ou circula a baixa velocidade (alto valor de excesso de escala). Veículos de trabalhos de via e veículos com cargas especiais e centro de gravidade elevado podem tornar-se instáveis. Por conseguinte, poderá ser necessário um regime de manutenção associado e outras medidas (por exemplo, excluir certos tipos de tráfego de mercadorias, evitar que os comboios parem regularmente nessa curva, etc.).		

Tabela 6.7 - Limite superior da escala $D_{R,lim}$, em função do raio de curva horizontal R , adaptado da Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

Limite normal *	limite excecional *
$D_{R,lim} = \frac{R - 50 \text{ m}}{1,5 \text{ m/mm}}$	
* Este limite pode ser relaxado desde que sejam tomadas medidas para garantir a segurança, ou no caso da via divergente com um elemento de pelo menos 10 m de comprimento com escala constante em ambos os lados da curva com pequeno raio	

6.1.4.3 Norma Metropolitano

A escala teórica na Norma Metropolitano é calculada através da Equação 4:

$$d_t = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \text{ [mm]} \quad \text{Equação 4}$$

Onde R deverá ser introduzido em metros e V em km/h.

O valor máximo da escala é definido pela Equação 5:

$$d_{lim} = \frac{1}{10} \cdot bitola = 0,15m = 150mm \quad \text{Equação 5}$$

Como a deficiência de escala depende do valor da aceleração centrífuga residual, resulta para o cálculo da Escala Real da via, d_r , o expresso na Equação 6:

$$d_r = 11,8 \frac{V^2}{R} - d \quad [mm] \quad \text{Equação 6}$$

Nesta equação o valor de insuficiência de escala, d , deverá ser calculado através dos seguintes passos. Inicialmente deverá ser calculado o parâmetro b' , que é definido através da Equação 7.

$$b' = b + 2 \frac{0,067}{2} = 1,5 \text{ m} \quad \text{Equação 7}$$

Nesta equação o valor b , bitola, é de 1435 mm.

Na Norma Metropolitano o valor limite para a aceleração centrífuga residual, $a_{r,d \max}$, é 0,07g [m.s⁻²], em que g representa o valor da aceleração da gravidade.

Assim, resulta o valor de insuficiência de escala, d , apresentado na Equação 8.

$$d = \frac{b'}{g} \times 10^3 \times a_r = 100mm \quad \text{Equação 8}$$

Posto isto, pode calcular-se o valor da Escala Real da via, d_r , através da Equação 9.

$$d_r = 11,8 \frac{V^2}{R} - 100 \quad [mm] \quad \text{Equação 9}$$

Nas curvas de raio elevado, em que R é maior ou igual a 900 m, para as quais é dispensada a aplicação de curva de concordância, deverá determinar-se se é necessária a utilização de escala. Esta determinação deve ser realizada através da aplicação da Equação 10 e consequente obtenção do parâmetro da força centrífuga total, a_t .

$$a_t = a_c + a_r \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

a_c - Aceleração centrífuga compensada;

a_r - Aceleração centrífuga residual, ou seja, não compensada.

Para determinar se é necessária a utilização de escala deverá comparar-se o valor obtido de a_t com $\frac{1}{2}a_{r\max}$, ou seja:

$$a_t > 0,35 \text{ m.s}^{-2}$$

$$a_t < 0,35 \text{ m.s}^{-2}$$

6.1.4.4 Resumo da escala

Na Tabela 6.8 apresenta-se uma comparação simplificada dos valores limite para a escala, constante em cada uma das normas. Esta serve apenas para comparar rapidamente os valores principais e não dispensa a consulta da descrição mais detalhada feita anteriormente.

Tabela 6.8 - Resumo da comparação das escalas das diferentes normas

	Norma 2007						Norma 2017		Norma Metro-politano
Classe	I	IIa	IIb	III	IV	V	Via plena	AMV e cruzamentos	-
L. N.	160	160	160	160	160	160	160	120	150
L. Exc.	180	180	180	180	180	200	180	160	

L. N. - Limite normal

L. Exc. - Limite excepcional

Os valores de escala das diferentes normas abordadas para os valores de velocidade praticados no ML são para o limite normal na Norma 2007 e 2017 de 160mm e de 150mm para a Norma Metropolitano.

Estes valores indicam o máximo admissível de escala permitido em cada norma, sendo que a norma do ML adota um valor mais conservador, privilegiando a segurança, em comparação com as restantes.

6.1.5 Insuficiência de escala

6.1.5.1 Norma 2007

Nesta norma, a insuficiência de escala, I , determina a velocidade máxima em plena curva. Na Equação 11 devem utilizar-se os valores do raio, R , e da escala real ou prática, D , do local em estudo.

$$I = 11,8 \frac{V_{max}^2}{R} - D \leq I_{lim} \quad [mm] \quad \text{Equação 11}$$

I_{lim} pode substituir-se pelo valor $(a_q)_{lim}$ obtido através da Equação 12.

$$a_q = \frac{V_{max}^2}{12,96R} - \frac{g \cdot D}{1500} = \frac{I}{153} \leq (a_q)_{lim} = \frac{I_{lim}}{153} \quad [m/s^2] \quad \text{Equação 12}$$

Em que a_q é a aceleração lateral não compensada no plano da via, nas unidades m/s^2 .

Na Tabela 6.9 apresentam-se a maioria dos valores limite máximos utilizados pelas diferentes redes europeias em operação comercial, para linhas novas e para linhas existentes. Estes valores são utilizados tanto para o aumento da velocidade da linha como para otimizar velocidades quando as mesmas vias são utilizadas por comboios de mercadorias e de passageiros. O procedimento de ensaio dos veículos do ponto de vista do seu comportamento dinâmico deve ser baseado nos valores indicados.

A norma sugere adotar valores da insuficiência de escala inferiores em 20 mm ao valor limite recomendado.

Estes valores aplicam-se aos aumentos progressivos da insuficiência de escala apenas para velocidades superiores a 80 km/h. No caso de descontinuidades da insuficiência de escala, ou seja, a aplicação brusca de uma aceleração transversal, as regras específicas relativas à via desviada dos aparelhos de mudança de via podem ser tomadas em consideração.

Tabela 6.9 - Insuficiência de escala limite I_{lim} , adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)

Categorias de tráfego (Velocidade em km/h)		Valor limite recomendado[mm]		Valor limite máximo [mm]	
		Mercadorias	Passageiros	Mercadorias	Passageiros
I	R<650m	110	130	130	160
	R≥650m	110	150	130	165
IIa	120<V≤160	110	150	160 ^d	165
IIb	160<V≤200	110	150	160	165

III	200<V≤250	100	100	150	150
	250<V≤300	80	80	130	130 ^c
IV	V≤160	110	160 ^b	160 ^d	180 ^b
	160<V≤200	X	140	X	160
	200<V≤230	X	120	X	160
	230<V≤250	X	100	X	150
V	V=250	X	100	X	150
	V>250	X	80	X	130 ^c

a - Para as vias com juntas, os valores da insuficiência de escala devem ser especificados no documento contratual;

b - Estes limites da insuficiência de escala devem ser aplicados apenas aos tipos de veículos específicos dotados de características mecânicas especiais, tais como pequena massa por eixo, massas não suspensas reduzidas, baixo coeficiente de souplesse;

c - Em vias não balastradas, para velocidades superiores a 250 km/h, pode ser utilizada uma insuficiência de escala de 150 mm;

d - Estes valores só são aplicáveis a vagões de mercadorias que apresentam características mecânicas especiais que lhes conferem desempenhos semelhantes aos dos veículos de passageiros;

6.1.5.2 Norma 2017

Nesta norma, a insuficiência de escala, I , é calculada através da Equação 13. Nesta equação devem utilizar-se os valores do raio, R , da escala real ou prática, D , e da velocidade, V , do local em estudo.

$$I = D_{EQ} - D = q_E \frac{V^2}{R} - D \quad \text{Equação 13}$$

Onde D_{EQ} é a escala de projeto, que também pode ser referida como escala de equilíbrio ou teórica em mm e o fator $q_E = 11,8 \text{ mm.m.h}^2/\text{km}^2$.

Note-se que, para o caso de a escala ser negativa, a insuficiência de escala será maior que a escala de projeto.

Os limites superiores para insuficiência de escala são apresentados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Limites superiores para insuficiência de escala I_{lim} , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

	Limite normal[mm]	Limite excecional[mm]
Comboios convencionais		
$V \leq 220 \text{ km/h}$	153	180
$220 \text{ km/h} < V \leq 300 \text{ km/h}$	153	
$300 \text{ km/h} < V \leq 360 \text{ km/h}$	100	
Comboios pendulares		
$80 \text{ km/h} \leq V \leq 260 \text{ km/h}$	275	300

6.1.5.3 Norma Metropolitano

Na Norma Metropolitano, como a deficiência de escala depende do valor da aceleração centrífuga residual, resulta a :

$$d = \frac{b'}{g} \times 10^3 \times a_r = 100 \text{ mm}$$

Em que d é a insuficiência de escala definida para o ML.

A Equação 7 define o valor de b' , dado que b , bitola, é igual a 1435 mm:

$$b' = b + 2 \frac{0,067}{2} = 1,5 \text{ m}$$

Para o limite de aceleração centrífuga residual, $a_{r,d \max}$, praticado na rede do ML, tem-se:

$$a_{r,d \max} = 0,07g \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$$

6.1.5.4 Resumo da insuficiência de escala

Na Tabela 6.11 apresenta-se uma comparação simplificada dos valores limite para a insuficiência de escala limite. Esta serve apenas para comparar rapidamente a grandeza dos valores principais e não dispensa a consulta da descrição mais detalhada feita anteriormente.

Tabela 6.11 - Comparação da insuficiência de escala limite das diferentes normas

	Norma 2007						Norma 2017				Norma Metro- poli- tano
Catego- rias de tráfego	I	IIa	IIb	III	IV	V	C.Conv. V ≤220 km/h	C.Con v. 220 km/h < V ≤ 300 km/h	C.Con v. 300<V ≤ 360 km/h	C.Pend . 80 km/h < V ≤ 260 km/h	-
L.N. (mm)	110;130;150 *	110;150 *	110;150 *	80; 100 *	100;110;120;140;160 *	100;80 *	153	153	100	275	100
L.Exc. (mm)	130;160;165 *	160;165 *	160;165 *	130;150 *	150;160;180 *	130;150 *	180			300	
* os limites nesta norma dependem de vários fatores não referidos nesta tabela. É necessário a consulta da Tabela 6.9 para os saber na íntegra. Estes valores servem só de comparação da grandeza geral dos limites entre as normas.											

C.Conv. - Comboios convencionais

C.Pend. - Comboios pendulares

Tomando por base de comparação o caso do *ML*, para a Norma 2007, os valores normais de escala são de 160 mm, já que este caso está enquadrado na categoria de tráfego IV, velocidade inferior a 160 km/h para passageiros. Na Norma 2017, o valor é de 153mm, visto que tratam-se de comboios convencionais com velocidade inferior a 220 km/h. Por último, para a Norma Metropolitano assume o valor de 100 .

Estes valores refletem o limite máximo permitido para a insuficiência de escala em cada norma, destacando que a norma do Metropolitano de Lisboa adota uma postura mais cautelosa, com um foco maior na segurança em relação às restantes normas.

É relevante observar, contudo, que a Norma 2017 introduz uma alteração significativa em relação à de 2007 no que diz respeito ao valor da insuficiência de escala, adotando um critério mais restritivo. Essa mudança tem implicações importantes, pois influencia os cálculos de forma a privilegiar a segurança. Por essa razão, opta-se pelo valor de 153 mm em vez dos 160 mm, quando necessário.

6.1.6 Excesso de escala

6.1.6.1 Norma 2007

Quando existe excesso de escala, definido pela letra *E*, o resultado da Equação 14 assume um valor positivo.

$$E = D - 11,8 \frac{V_{min}^2}{R} \quad [mm] \quad \text{Equação 14}$$

A título indicativo podem utilizar-se os seguintes valores limite:

- Valor limite recomendado: 110mm;
- Valor limite máximo: 130mm;
- Para comboios de passageiros recomenda-se que não se ultrapasse o valor limite máximo de 110mm.

6.1.6.2 Norma 2017

Numa curva horizontal onde a insuficiência de escala *I*, é negativa, resulta a Equação 15

$$E = -I \quad \text{Equação 15}$$

O excesso de escala é definido pela Equação 16:

$$E = D$$

Equação 16

Numa reta também poderá haver, em certas situações, excesso de escala, definida pela mesma expressão anterior.

Na Tabela 6.12 apresentam-se os limites do excesso de escala para esta norma.

Tabela 6.12 - Limites superiores para excesso de escala E_{lim} , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

Limite normal	Limite excecional
110 mm	150 mm

6.1.6.3 Norma Metropolitano

Não especificado.

6.1.6.4 Resumo para excesso de escala

Na Tabela 6.13 apresenta-se uma comparação simplificada dos valores limite para o excesso de escala. Esta comparação serve apenas para comparar rapidamente e não dispensa a consulta da descrição detalhada feita anteriormente.

Tabela 6.13 - Resumo da comparação dos limites de excesso de escala das diferentes normas

	Norma 2007	Norma 2017	Norma Metropolitano
L.N. [mm]	110	110	N.A.
L.Exc. [mm]	130	150	N.A.

A Norma do *ML* não aborda o excesso de escala, pois, em condições normais, o sistema de metropolitano não apresenta este tipo de situação. Ao comparar as duas normas restantes, verificou-se que ambas estabelecem o mesmo limite normal. No entanto, a norma de 2017 é mais permissiva quanto ao limite excecional.

6.1.7 Variação da escala em função do tempo

Por princípio, as variações de escala encontram-se em curvas de transição. Contudo, pode ser necessário prever variações da escala nas curvas circulares e nos alinhamentos retos.

6.1.7.1 Norma 2007

Nesta norma, a variação da escala em função do tempo designa-se por $\frac{dD}{dt}$. Para variações de escala com declive uniforme é desejável que se verifique a relação seguinte, sendo ΔD a variação da escala presente na Equação 17:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\Delta D \cdot V_{max}}{3,6 \cdot L} \leq \left(\frac{dD}{dt} \right)_{lim} \quad [mm/s] \quad \text{Equação 17}$$

Para variações de escala com declive variável, o valor de $\frac{dD}{dt}$ é variável.

Nas Tabela 6.14 e Tabela 6.15 apresentam-se os valores recomendados e os valores máximos aplicáveis.

Tabela 6.14 - Variação da escala em função do tempo $\left(\frac{dD}{dt} \right)_{lim}$, (variação da escala com declive uniforme), adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)

Categorias de tráfego	I	IIa	IIb	III	IV	V
Valor limite recomendado (mm/s)	50	50	50	50	50	50
Valor limite máximo (mm/s)	55	60	60	60	60	60

Tabela 6.15 - Variação da escala em função do tempo $\left(\frac{dD}{dt} \right)_{lim}$, (variação da escala com declive variável), adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)

Categorias de tráfego	I	IIa	IIb	III	IV	V
Valor limite recomendado (mm/s)	55	55	55	55	55	55
Valor limite máximo (mm/s)	70	70	70	70	70	70

6.1.7.2 Norma 2017

Na Tabela 6.16 e Tabela 6.17 apresentam-se os valores para a variação de escala para declive uniforme e declive variável, respetivamente, para a Norma 2017.

Tabela 6.16 - Limites superiores para variação de escala $\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim}$ para declive uniforme, adaptado Norma 2017
(EN13803-1:2017, 2017)

	Limite normal [mm/s]	Limite excecional [mm/s]
Comboios Convencionais $V \leq 200$ km/h		
$I \leq 160$ mm	50	70
$160 \text{ mm} < I \leq 180$ mm	50	60
Comboios Convencionais $200 \text{ km/h} < V \leq 360$ km/h		
	50	60
Comboios Pendulares $V \leq 200$ km/h		
	75	95
Comboios pendulares $200 \text{ km/h} < V \leq 260$ km/h		
	60	70

Tabela 6.17 - Limite superior para variação de escala $\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim}$ para declive variável, adaptado Norma 2017
(EN13803-1:2017, 2017)

Limite normal [mm/s]	Limite excecional [mm/s]
$V \leq 300$ km/h	
55	76

6.1.7.3 Norma Metropolitano

Sendo que χ é o coeficiente que define a variação de escala com o tempo e d_r é a escala real da via, tem-se a Equação 18:

$$\chi = 28 \cdot d_r \frac{V}{L} \text{ [cm.s}^{-1}\text{]} \quad \text{Equação 18}$$

Não sendo independentes, podem-se relacionar na seguinte Equação 19, em que ψ é o coeficiente de conforto [m.s^{-3}], ou seja, a variação da aceleração centrífuga com o tempo.

$$\chi = \psi \cdot \frac{0,15}{a_r + \frac{\lambda}{\sigma}} \cdot 10^2 \text{ [cm.s}^{-1}\text{]} \quad \text{Equação 19}$$

Onde λ é a abcissa do ponto de tangência T da curva circular, expressa através da Equação 20.

$$\lambda = \frac{d_r}{d_l} = \frac{d_r}{0,15} \quad \text{Equação 20}$$

$$\sigma = 1 \text{ m}^{-1} \cdot \text{s}^2$$

Para o *ML*, os limites são:

- $\psi_{lim} = 0,25 \text{ m.s}^{-3}$
- $\chi_{lim} = 3,5 \text{ cm.s}^{-1}$

Sendo τ o coeficiente de impulso transversal calculado através da Equação 21:

$$\tau = \frac{a_r}{g} \cdot 10 \text{ [Newton.T}^{-1}\text{]} \quad \text{Equação 21}$$

6.1.7.4 Resumo da variação da escala em função do tempo

Na Tabela 6.18 e apresenta-se uma comparação simplificada dos valores limite para os limites da variação de escala em função do tempo, para declives uniforme e variável, respectivamente. Esta serve apenas para comparar rapidamente a ordem de grandeza dos valores principais e não dispensa a consulta da descrição mais detalhada feita anteriormente.

Tabela 6.18 - Comparação dos limites para variação de escala em função do tempo para declive uniforme das diferentes normas

	Norma 2007						Norma 2017				Norma Me- tropolitano
Categorias de tráfego	I	IIa	IIb	III	IV	V	C.Conv. V ≤200 km/h	C.Conv. 200 km/h < V ≤ 360 km/h	C.Pend.V ≤ 200 km/h	C.Pend. 200 km/h < V ≤ 260 km/h	-
L.N.(mm/s)	50	50	50	50	50	50	50	50	75	60	32,5
V.Exc.(mm/s)	55	60	60	60	60	60	70; 60	60	95	70	

Tabela 6.19 - Comparação dos limites para variação de escala em função do tempo para declive variável das diferentes normas

	Norma 2007						Norma 2017	Norma Metropolitano
Categorias de tráfego	I	IIa	IIb	III	IV	V	V ≤ 300 km/h	-
L.N. (mm/s)	50	50	50	50	50	50	55	32,5
V.Exc. (mm/s)	55	60	60	60	60	60	76	

Comparando tanto os valores dos limites para variação de escala em função do tempo para declive uniforme e os limites para variação de escala em função do tempo para declive variável, podemos aferir que a Norma Metropolitano é de novo a mais conservadora seguida da Norma 2007.

Pode-se também verificar ao comparar a expressão da Norma 2007, Equação 17

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\Delta D \cdot V_{max}}{3,6 \cdot L} \leq \left(\frac{\Delta D}{dt} \right)_{lim} [mm/s]$$

com a expressão da norma do metropolitano, Equação 18

$$\chi = 28 \cdot d_r \frac{V}{L} [cm.s^{-1}]$$

que, apesar de serem escritas de maneira distinta, são, de facto, iguais. Tome-se $\chi = \frac{dD}{dt}$ e constate-se que $\frac{1}{3,6} = 0,28$. Como as unidades de $\frac{dD}{dt}$ são mm.s⁻¹ e de χ são cm.s⁻¹, conclui-se que estas duas equações são, na realidade, a mesma.

6.1.8 Variação da escala em função do comprimento

A sobrelevação progressiva linearmente para se atingir a escala da via é denominada rampa de disfarce ou variação da escala em função do comprimento. Por princípio, estas rampas devem restringir-se exclusivamente às curvas de concordância.

6.1.8.1 Norma 2007

Deve ser sempre aplicado o valor mais restritivo entre os requisitos de segurança e de conforto.

- Em relação aos requisitos de segurança:

Em curvas de transição de pequeno comprimento o valor máximo do declive da escala $\frac{dD}{dt}$ com transições de declive não constante, ou $\frac{\Delta D}{L}$ no caso de transições com declive constante, deve ser definido tendo em conta a segurança do ponto de vista do descarrilamento dos comboios de mercadorias.

- Em relação aos requisitos de conforto:

Os valores constantes na Tabela 6.20 são calculados com base nos valores apresentados na Tabela 6.14 e na Tabela 6.15, através da aplicação Equação 22.

$$\frac{dD}{dl} = \frac{3,6}{V_{max}} \cdot \frac{dD}{dt} \quad [mm/m] \quad \text{Equação 22}$$

Tabela 6.20 - Valores limites da variação da escala em função do comprimento, adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)

Valor limite recomendado	Valor limite máximo
2,25 mm/m	2,5 mm/m

6.1.8.2 Norma 2017

Os limites da variação da escala em função do comprimento, $\frac{dD}{ds}$, especificados nesta norma são apresentados na Tabela 6.21.

Tabela 6.21 - Limites superiores da variação da escala $\left(\frac{dD}{ds}\right)_{lim}$, adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

	Limite normal	Limite excecional
$V \leq 50 \text{ km/h}$	2,50 mm/m	3,33 mm/m
$V > 50 \text{ km/h}$	2,50 mm/m	

6.1.8.3 Norma Metropolitano

Na Norma Metropolitano a variação da escala em função do comprimento é designada por disfarce de escala. Apresenta-se a sua definição na Equação 23.

$$p = tg\beta = \frac{d_r}{L} \quad [mm/m] \quad \text{Equação 23}$$

β é o ângulo que se pode observar na Figura 4.9.

Traduz-se num empeno para a via, ao longo de todo o comprimento das rampas de disfarce da escala, obrigando as quatro rodas do *bogie* a circular a cotas diferentes.

À semelhança da norma anteriormente referida, as suas limitações também se regem por requisitos de segurança, p_1 , e requisitos de conforto, p_2 .

Na Equação 24, p , é o valor da progressividade de escala, ou seja, disfarce de escala.

$$p = \frac{d_r}{L} \quad \text{Equação 24}$$

No caso de fortes sujeições geométricas à implantação de concordâncias admite-se para o comprimento L a sobre-extensão $2\Delta L$, tendo em vista a redução do valor do disfarce de escala. Esta redução encontra-se expressa na Equação 25:

$$p_1 = \frac{d_r}{L + 2\Delta L} \leq \frac{2}{1000} \quad \text{Equação 25}$$

Onde d_r representa a escala real da via e $\Delta L_{max} \leq 10$ m.

Está definido para o ML usar sempre a restrição maior, logo o requisito da segurança dado pela Equação 26:

$$p_1 \leq \frac{2}{1000} \quad \text{Equação 26}$$

6.1.8.4 Resumo da variação da escala em função do comprimento

Na Tabela 6.22 apresenta-se uma comparação simplificada dos valores limite para os limites da variação de escala em função do tempo. Esta tabela serve apenas para comparar rapidamente a ordem de grandeza dos valores principais e não dispensa a consulta da descrição mais detalhada feita anteriormente.

Tabela 6.22 - Comparação da variação da escala em função do comprimento das diferentes normas

	Norma 2007	Norma 2017		Norma Metropolitano
	-	$V \leq 50$ km/h	$V > 50$ km/h	-
L.N. [mm/m]	2,25	2,5	2,5	2
L.Exc. [mm/m]	2,5	3,33	2,5	

Através da comparação entre os diferentes limites para a variação da escala em função do comprimento constatou-se que a Norma Metropolitano adota uma abordagem mais conservadora, priorizando a segurança em relação às outras normas.

6.1.9 Variação da insuficiência de escala em função do tempo

6.1.9.1 Norma 2007

Nesta norma a insuficiência de escala em função do tempo designa-se por $\frac{dI}{dt}$. Para transições com variações uniformes da curvatura e da escala, pode-se estabelecer a relação constante na Equação 27, onde ΔI representa a variação da insuficiência de escala:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_{max}}{3,6 \cdot L} \cdot \Delta I \leq \left(\frac{dI}{dt} \right)_{lim} \quad [mm/s] \quad \text{Equação 27}$$

Do mesmo modo, a variação de aceleração lateral não compensada no plano da via pode ser determinada a partir da variação total de aceleração lateral não compensada, Δa_q , ao longo da totalidade da transição, como se apresenta na Equação 28.

$$\frac{da_q}{dt} = \frac{V_{max}}{3,6 \cdot L} \cdot \Delta a_q \leq \left(\frac{da_q}{dt} \right)_{lim} \quad [m/s^3] \quad \text{Equação 28}$$

Os valores $\frac{dI}{dt}$ e $\frac{da_q}{dt}$ não são constantes para transições com variações de curvatura e de escala não lineares. Atingem o seu valor máximo a meio da curva de transição.

Para comboios rápidos de passageiros os valores escolhidos para $\left(\frac{dI}{dt} \right)_{lim}$ devem ter em conta o conforto de rolamento, na eventualidade de uma plataforma de via instável.

A variação de aceleração lateral quasi-estática paralela ao pavimento do veículo $\left(\frac{da_i}{dt} \right)$ da Equação 29, que constitui uma medida da variação de aceleração percebida pelo passageiro a bordo do veículo, é superior à variação de aceleração não compensada no plano da via $\left(\frac{da_q}{dt} \right)$.

$$\frac{da_i}{dt} = (1 + s) \cdot \frac{da_q}{dt} \quad [m/s^3] \quad \text{Equação 29}$$

Em que s é o coeficiente de souplesse do veículo.

O valor máximo de $\frac{da_i}{dt}$ considerado aceitável deve encontrar-se no intervalo $0,5 \text{ m/s}^3$ a $0,8 \text{ m/s}^3$

O valor de $\left(\frac{dI}{dt} \right)_{lim}$ representado na Tabela 6.23 deve ter em conta o coeficiente de souplesse dos veículos rápidos de passageiros.

Tabela 6.23 - Variação da insuficiência de escala em função do tempo $\left(\frac{dl}{dt}\right)_{lim}$ (os valores aplicam-se a todas as formas de curvas de transição), adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)

Categorias de tráfego	I	IIa	IIb	III	IV	V
Valor limite recomendado (mm/s)	55	55	55	50	50	50
Valor limite máximo (mm/s)	90	90	90	75	90	75

6.1.9.2 Norma 2017

Os limites para a variação da insuficiência escala em função do tempo $\frac{dl}{dt}$ nesta norma são apresentados na Tabela 6.24 e na Tabela 6.25.

Tabela 6.24 - Limites superiores para a variação da insuficiência de escala em função do tempo $\left(\frac{dl}{dt}\right)_{lim}$ para clotoi-des, variação linear , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

	Limite normal	Limite excecional
Comboios Convencionais $V \leq 220$ km/h		
$I \leq 160$ mm	55 mm/s	100 mm/s
$160 \text{ mm} < I \leq 180$ mm	55 mm/s	90 mm/s
Comboios Convencionais $220 \text{ km/h} < V \leq 300$ km/h		
	55 mm/s	75 mm/s
Comboios Convencionais $300 \text{ km/h} < V \leq 360$ km/h		
	30 mm/s	55 mm/s
Comboios Pendulares $V \leq 225$ km/h		
	100 mm/s	180 mm/s
Comboios Pendulares $225 \text{ km/h} < V \leq 260$ km/h		
	80 mm/s	80 mm/s

Tabela 6.25 - Limites superiores para variação da insuficiência de escala em função do tempo $\left(\frac{dl}{dt}\right)_{lim}$ para curvas de transição com variação não linear, adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

Limite normal	Limite excecional
Comboios Convencionais $V \leq 300$ km/h	
95 mm/s	120 mm/s
Comboios Convencionais $300 \text{ km/h} < V \leq 360$ km/h	
30 mm/s	55 mm/s
Comboios Pendulares $V \leq 225$ km/h	
100 mm/s	180 mm/s
Comboios Pendulares $225 \text{ km/h} < V \leq 260$ km/h	
95 mm/s	120 mm/s

6.1.9.3 Norma Metropolitano

Não especificado.

6.1.9.4 Resumo da variação da insuficiência de escala em função do tempo

Esta comparação simplificada dos valores limite da Tabela 6.26 e Tabela 6.27 serve apenas para comparar rapidamente a ordem de grandeza dos valores principais e não dispensa a consulta da descrição mais detalhada feita anteriormente.

Tabela 6.26 - Comparação dos limites para a variação da insuficiência de escala em função do tempo para clotoídes de variação linear

	Norma 2007						Norma 2017					Norma Metro- poli- tano
Catego- rias de tráfego (V em km/h)	I	IIa	IIb	III	IV	V	C.Conv. V≤200	C.Conv. 220<V≤ 300	C.Conv. 300<V≤ 360	C.Pend. V≤225	C.Pend. 225<V≤ 260	-
L.N. (mm/s)	55	55	55	50	50	50	55	55	30	100	80	N.A.
L.Exc. (mm/s)	90	90	90	75	90	75	100; 90	75	55	180	80	

Tabela 6.27 - Comparação dos limites para a variação da insuficiência de escala em função do tempo para clotoídes de variação não linear

	Norma 2007						Norma 2017				Norma Metro- poli- tano
Categorias de tráfego (V em km/h)	I	IIa	IIb	III	IV	V	C.Conv. V ≤ 300	C.Conv. 300 < V ≤ 360	C.Pend. V ≤ 225	C.Pend. 225 < V ≤ 260	-
L.N. (mm/s)	55	55	55	50	50	50	95	30	100	95	Não espe- cificado
L.Exc. (mm/s)	90	90	90	75	90	75	120	55	180	120	

A Norma Metropolitano não especifica valores da variação da insuficiência de escala em função do tempo para comparação. Analisaram-se os limites para a variação da insuficiência de escala em função do tempo, tanto para clotoídes de variação linear, quanto para clotoídes de variação não linear, para o caso do *ML*. Constatou-se que a Norma 2007 adota uma abordagem mais conservadora.

6.1.10 Comprimento dos elementos do traçado

6.1.10.1 Norma 2007

Nesta norma L_i representa o comprimento dos elementos do traçado, ou seja, as curvas circulares e os alinhamentos retos. O comprimento efetivo de qualquer elemento do traçado, para além das curvas de transição, deve situar-se acima de um valor mínimo constante na Tabela 6.28, tendo em consideração os parâmetros de projeto efetivamente aplicados no traçado da zona, isto é, escala, insuficiência de escala e suas variações.

Elementos mais longos devem ser utilizados em caso de valores mais elevados destes parâmetros.

Tabela 6.28 - Comprimento mínimo dos elementos do traçado L_i (curvas circulares e alinhamentos retos), adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)

Categorias de tráfego	I	IIa	IIb	III	IV	V
Valor limite recomendado* (m)	$\frac{V_{max}^a}{3}$			$\frac{V_{max}}{1,5}$		
Valor limite máximo* (m)	$\frac{V_{max}^a}{5}$			$\frac{V_{max}}{2}$		
*) Na medida do possível, recomenda-se ligar duas curvas de sentidos contrários por uma curva de transição contínua em vez de intercalar um alinhamento reto entre as duas curvas de transição. Por esta razão, neste caso, o comprimento do alinhamento reto é nulo. a) Sem descer abaixo de 30 m.						

6.1.10.2 Norma 2017

Nesta norma o comprimento dos elementos do traçado, curvas circulares e alinhamentos retos, também são representados por L_i . Os limites inferiores são apresentados na Tabela 6.29.

Tabela 6.29 - Limites inferiores para o comprimento dos elementos do traçado L_i (curvas circulares e alinhamentos retos), adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

Limite normal [m]	Limite excepcional [m]
20	0

Em certas aplicações o comprimento real de qualquer elemento de alinhamento, exceto curvas de transição, deve ser igual ou superior a um limite inferior indicado na Tabela 6.30, tendo em conta os parâmetros reais de projeto de alinhamento dos elementos de inclinação vizinhos. Elementos mais longos devem ser usados para valores mais altos desses parâmetros. É desejável, sempre que possível, unir duas curvas circulares invertidas por uma curva de transição contínua, em vez de colocar um elemento de linha reta entre as duas curvas de transição. Portanto, neste caso, o comprimento do elemento de linha reta é nulo.

Tabela 6.30 - Limites inferiores para o comprimento dos elementos do traçado L_i (curvas circulares e alinhamentos retos), adaptado do anexo L da Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

	Limite normal *	Limite excepcional
$0 < V \leq 70 \text{ km/h}$	$V/3 \text{ m/(km/h)}$	$V/10 \text{ m/(km/h)}$
$70 \text{ km/h} < V \leq 200 \text{ km/h}$	$V/2 \text{ m/(km/h)}$	$V/5,2 \text{ m/(km/h)}$
$200 < V \leq 360 \text{ km/h}$	$V/1,5 \text{ m/(km/h)}$	$V/2,5 \text{ m/(km/h)}$
*Sem descer abaixo dos 20m		

Uma sucessão rápida de curvas e retas pode induzir uma redução no conforto, particularmente quando o comprimento dos elementos de alinhamento individuais é tal que os passageiros são sujeitos a acelerações variáveis a uma taxa que corresponde às frequências naturais dos veículos.

6.1.10.3 Norma Metropolitano

Não especificado.

6.1.10.4 Resumo dos limites do comprimento dos elementos de traçado

No caso deste parâmetro não existem valores específicos para comparação, apenas as expressões presentes nas Normas 2007 e 2017. A partir dessas expressões é possível concluir que a ordem de grandeza é semelhante.

6.1.11 Comprimento das curvas de transição no plano horizontal

6.1.11.1 Norma 2007

O comprimento das curvas de transição no plano horizontal, L , é válido somente para curvas de transição lineares. Este comprimento deve ser determinado a partir dos valores limite impostos pelos parâmetros seguintes:

- Variação da insuficiência de escala em função do tempo $\frac{dI}{dt}$;
- Variação da escala em função do comprimento $\frac{dD}{dl}$.

E das seguintes fórmulas da Equação 30 e Equação 31.

$$L \geq \frac{V_{max}}{3,6} \cdot \Delta I \cdot \left(\frac{dI}{dt} \right)^{-1} \quad [m] \quad \text{Equação 30}$$

$$L \geq \Delta D \cdot \left(\frac{dD}{dl} \right)^{-1} \quad [m] \quad \text{Equação 31}$$

O comprimento da curva de transição deve ser o maior dos valores obtidos a partir das fórmulas acima apresentadas para os valores escolhidos de $\frac{dI}{dt}$ e $\frac{dD}{dl}$.

Quando não exista curva de transição entre os elementos de traçado a ligar, devem ser respeitados os valores limite das descontinuidades admissíveis nos aparelhos de mudança de via.

6.1.11.2 Norma 2017

Uma mudança instantânea de curvatura pode ocorrer em estreita conjugação com AMV e cruzamentos, em alinhamento para baixas velocidades, p.ex. ramais, ou em pequenos desvios de alinhamento dentro de um comprimento limitado. É inevitável em pelo menos uma mudança de via. Na maioria dos outros casos devem ser utilizadas curvas de transição.

Para a variação instantânea de curvatura aplicam-se os seguintes limites:

- os limites superiores para variação instantânea da deficiência de escala ΔI_{lim} ;
- limites inferiores de comprimento entre duas variações instantâneas de curvatura $L_{c,lim}$;
- limites inferiores de comprimento entre duas variações instantâneas de deficiência de escala $L_{s,lim}$.

Variação instantânea de insuficiência de escala ΔI

Uma variação instantânea de insuficiência de escala ΔI ocorre onde há uma mudança instantânea de curvatura. Um ponto tangente com uma variação instantânea de insuficiência de escala gera perturbações na dinâmica do veículo. Os limites superiores para a variação instantânea da insuficiência de escala, ΔI_{lim} , são especificados na Tabela 6.31.

Tabela 6.31 - Valores limite de variação instantânea de insuficiência de escala (ΔI_{lim}), adaptado da Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

	Limite normal [mm]	Limite excecional [mm]
$V \leq 60 \text{ km/h}$	110	130 ^a
$60 \text{ km/h} < V \leq 200 \text{ km/h}$	100	125
$200 \text{ km/h} < V \leq 230 \text{ km/h}$	85	
$230 \text{ km/h} < V \leq 360 \text{ km/h}$	25 ^b	
a) Onde $V \leq 40 \text{ km/h}$ e $ I \leq 75\text{mm}$, antes e depois de uma variação instantânea de curvatura, o valor limite máximo de ΔI poderá assumir valores até 150mm.		
b) O limite pretende ser aplicável à via plena. Atualmente, nenhum desvio foi projetado para velocidades superiores a 230 km/h na via desviada.		

Comprimento entre duas variações instantâneas da curvatura no plano horizontal, L_c .

Existem limites para a diferença da deslocação para o exterior do veículo entre dois veículos adjacentes. O critério está relacionado com o bloqueio do amortecedor, mas também os veículos com acopladores centrais podem ter limites semelhantes. A deslocação para o exterior do veículo é o desvio geométrico, d_{ga} , para a extremidade do veículo.

Esta Norma Europeia baseia-se no critério das diferenças estáticas da deslocação para o exterior do veículo. O limite refere-se a uma longa curva circular de 190 m de raio a ser conectada a uma longa curva circular, também de 190 m de raio, no sentido oposto, com uma reta intermediária de 6 m de comprimento. Isto leva a uma diferença máxima da deslocação para o exterior de 395 mm para dois vagões de passageiros de 26,4 m de comprimento com uma distância de *bogie* de 19 m e permite que uma longa curva circular com um raio de 213 m seja diretamente conectada a uma longa curva circular, também de raio de 213 m, no sentido oposto. Também permite qualquer combinação de curvas circulares onde a mudança de curvatura é inferior a $1/106,5 \text{ m}^{-1}$.

Para vias exclusivas de tráfego de mercadorias o critério baseia-se nas diferenças estáticas da deslocação para o exterior do veículo, para dois veículos de mercadorias com 18 m de comprimento e uma distância de *bogie* de 12 m. Nesta situação o critério deve ser limitado a um máximo de 225 mm. A aplicação deste critério leva a que seja permissível que uma longa curva circular de 200 m de raio seja diretamente conectada a uma longa curva circular, também de 200 m de raio, na direção oposta. Também permite qualquer combinação de curvas circulares onde a mudança de curvatura é inferior a $1/100,0 \text{ m}^{-1}$.

Quando as curvas horizontais tiverem curvaturas que difiram mais de $1/106,5 \text{ m}^{-1}$ ou $1/100,0 \text{ m}^{-1}$, respectivamente, um elemento intermediário deve ser introduzido para reduzir as diferenças. Deve usar-se o método estático do deslocamento para o exterior do veículo até que este seja menor ou igual a 395 mm ou 225 mm, respetivamente. Este elemento intermediário pode ser uma linha reta, uma curva de transição ou uma curva circular. O comprimento necessário do elemento intermediário depende dos raios das curvas de raio pequeno, bem como do tipo de elemento intermediário.

Para veículos com outras características, presume-se que os engates e amortecedores sejam projetados para o comprimento mínimo do elemento intermediário, L_c .

A Tabela 6.32 especifica certos limites inferiores para os comprimentos de um elemento intermediário reto para algumas combinações de longas curvas circulares em direções opostas.

A via tem um valor máximo de bitola em serviço de 1470 mm, ou seja, bitola nominal 1435 mm adicionada de 35 mm.

Tabela 6.32 - Determinados limites inferiores para o comprimento entre duas variações instantâneas da curvatura no plano horizontal $L_{c,lim}$, adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

Sequência do alinhamento	Limites para vias de tráfego de passageiros [m]	Limites para vias exclusivas de tráfego de mercadorias [m]
R=150m - reta - R=150m	10,78	6,79
R=160m - reta - R=160m	9,48	6,01
R=170m - reta - R=170m	8,30	5,20
R=180m - reta - R=180m	7,20	4,25
R=190m - reta - R=190m	6,00	3,01
R=200m - reta - R=200m	4,50	0
R=210m - reta - R=210m	2,11	0
R=213m - reta - R=213m	0	0

Comprimento entre duas variações instantâneas de insuficiência de escala L_s

Um ponto de tangência com uma variação instantânea de curvatura gera perturbação no comportamento dinâmico do veículo. Por isso, poderá ter de haver um elemento intermédio com um comprimento mínimo até ao ponto de tangência seguinte onde ocorra uma variação instantânea de curvatura. O comprimento mínimo do referido elemento intermédio entre duas variações instantâneas de curvatura é definido através da Equação 32:

$$L_{s,lim} = q_{s,lim} \cdot V \quad \text{Equação 32}$$

Em que V é a velocidade máxima e q_s é um fator de cálculo cujos valores limite estão definidos na Tabela 6.33, em função das velocidades.

Tabela 6.33 - Valores limite do fator $q_{s,lim}$ que define o comprimento mínimo do elemento de traçado entre dois pontos de tangência com variação instantânea de curvatura $L_{s,lim}$, adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

	Limite normal	Limite excecional
$V \leq 70 \text{ km/h}$	0,20	0,10 ^a
$70 \text{ km/h} < V \leq 100 \text{ km/h}$	0,20	0,15 ^b
$100 \text{ km/h} < V \leq 360 \text{ km/h}$	0,25	0,19
a) onde $\Delta I \leq 110\text{mm}$ e $V \leq 50\text{Km/h}$, $q_{s,lim}$ poderá ser reduzido para 0,08 m.h/km		
b) onde $\Delta I \leq 100\text{mm}$ e $V \leq 90\text{Km/h}$, $q_{s,lim}$ poderá ser reduzido para 0,10 m.h/km		

Para AMV e cruzamentos colocados em curvas de transição o comprimento entre duas variações instantâneas de insuficiência de escala pode envolver mais de um elemento intermédio. O elemento intermédio é normalmente um elemento com insuficiência de escala constante, ou excesso de escala constante. Onde a deficiência de escala não for constante a taxa de variação da deficiência de escala não deve ser superior ao limite superior dado anteriormente em $\left(\frac{dl}{dt}\right)_{lim}$. O limite inferior, $L_{s,lim}$, não se aplica quando a variação total da insuficiência de escala ao longo dos dois, ou mais, pontos tangente não excede o limite superior de ΔI .

6.1.11.3 Norma Metropolitano

Não especificado.

6.1.11.4 Resumo dos limites

Neste caso não existem valores comparáveis suficientes para poderem ser tiradas conclusões.

6.1.12 Raio de curva vertical

6.1.12.1 Norma 2007

As curvas verticais podem ser projetadas sem curvas de transição. Nas mudanças de trainel devem prever-se curvas verticais com um comprimento mínimo de 20 m, desde que a diferença de inclinação entre dois traineis adjacentes seja superior a:

- 2mm/m para velocidades até 230 km/h;
- 1mm/m para velocidades superiores a 230 km/h.

O raio das curvas verticais, R_V , deve ser calculado através da Equação 33:

$$R_V = \frac{V_{max}^2}{12,96 \cdot a_V} \geq (R_V)_{lim} \quad \text{Equação 33}$$

Tabela 6.34 - Raio das curvas verticais $(R_V)_{lim}$, adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)

Categorias de tráfego	I	IIa	IIb	III	IV	V
Valor limite recomendado [mm] *	$0,35.V_{max}^2{}^b$	$0,35.V_{max}^2$		$0,35.V_{max}^2$	$0,35.V_{max}^2$	$0,35.V_{max}^2$
Valor limite máximo [mm] *	$0,25.V_{max}^2{}^c$			$0,175.V_{max}^2{}^a$	$0,25.V_{max}^2{}^c$	$0,175.V_{max}^2{}^a$

a) com uma tolerância +10% numa curva convexa, +30% numa curva côncava

b) em linhas onde passageiros possam viajar de pé, recomenda-se que R_V seja superior a $0,77.V^2$

c) sem descer abaixo de 2000m de raio

6.1.12.2 Norma 2017

Nesta norma as curvas verticais também são designadas por R_V . Estas curvas são normalmente desenhadas como parábolas, ou seja, polinómios de 2º grau, ou como curvas circulares. Podem ser projetadas sem curvas de transição. Os limites inferiores independentes da velocidade para raios verticais $R_{V,lim}$ são apresentados na Tabela 6.35.

Tabela 6.35 - Limites inferiores para raios verticais $R_{V,lim}$, adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

	Limite normal [m]	Limite excecional [m]
Plena via	2000	500 *
AMV e cruzamentos, Curvas convexas	5000	2000
AMV e cruzamentos, Curvas côncavas	3000	2000
Cavalo de triagem, curvas convexas	250 *	
Cavalo de triagem, curvas côncavas	300 *	
*Nem todos os veículos são concebidos e aprovados para raios verticais inferiores a 500 m		

O raio vertical para a via plena, para os AMV e para os cruzamentos deve também cumprir os limites inferiores dependentes da velocidade especificados na Equação 34.

$$R_V \geq q_{R,lim} \cdot V^2 \quad \text{Equação 34}$$

Os valores de $q_{R,lim}$ são apresentados na Tabela 6.36.

Tabela 6.36 - Limite inferior para o fator do raio vertical $q_{R,lim}$, adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

	Limite normal	Limite excecional
Curvas convexas	$0,35 \text{ m} \cdot h^2 / \text{Km}^2$	$0,15 \text{ m} \cdot h^2 / \text{Km}^2$
Curvas côncavas	$0,35 \text{ m} \cdot h^2 / \text{Km}^2$	$0,13 \text{ m} \cdot h^2 / \text{Km}^2$

Não existe um limite superior para o raio vertical nesta Norma Europeia. No entanto, os padrões locais podem ter esse limite superior relacionado com as capacidades do software de alinhamento para lidar com números muito grandes ou outros aspetos práticos.

6.1.12.3 Norma Metropolitano

As curvas de transição nos traineis devem corresponder a uma curvatura que assegure uma reduzidas e constante transição de declive. Na rede do *ML* aplica-se a parábola apresentada na Equação 35.

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot R_0} \quad \text{Equação 35}$$

Em que R_0 é o raio da curva no vértice.

A regra geral para as curvas convexas deverá ser dotá-las de menor curvatura por serem suscetíveis de originar maior incomodidade. A caracterização destas curvas deverá abranger, além do raio, a tangente, a flecha e a extensão da curva. Devem ser também indicadas a distância do vértice dos traineis ao vértice da parábola e as cotas destes dois vértices. Os pontos notáveis da transição são:

- ECV - entrada da curva vertical;
- SCV - saída da curva vertical;
- V - vértice dos traineis;

Em redes de metropolitano considera-se inadmissível que as curvas verticais imponham limitação à velocidade de circulação. Para a rede do *ML* as limitações visam:

- **Nas vias de exploração e nos ramais de acesso a P.M.O.s**
 - a extensão da concordância vertical tem um valor mínimo $2t = 40m$;
 - as velocidades de circulação estão representadas na Tabela 6.37.

Tabela 6.37 - Valores do raio da curvatura no vértice R_0 para curvas convexas e côncavas, adaptado Norma Metropolitano (Metropolitano de Lisboa, s.d.)

Velocidade de circulação	Curvas convexas	Curvas côncavas
V = 60/50 km/h	$R_0 \geq 2200 \text{ m}$	$R_0 \geq 2000 \text{ m}$
V = 40 km/h	$R_0 \geq 1200 \text{ m}$	$R_0 \geq 1000 \text{ m}$
A adoção de valores abaixo destes limites deverá ser entendida como uma deficiência local da via e só poderá ser admitida mediante nota justificativa.		

- **Nas vias de serviço (términos de inversão, resguardos e feixes de vias dos P.M.O.s)**

- Como para estas vias os declives devem ser baixos, não se limita a extensão do arco da parábola. O raio da curvatura fica no entanto limitado ao valor $R_0 \geq 1000 \text{ m}$;
- Não são admitidas curvas verticais contíguas de raios diferentes (do mesmo ou de sentidos contrários).

6.1.12.4 Resumo dos limites do raio de curva vertical

A comparação de valores para os limites do raio de curva vertical é mais complexo, devido à disparidade dos fatores discriminatórios, como pode ser observado na Tabela 6.38. Contudo, assumindo o exemplo do *ML*, temos na Norma 2007 a categoria de tráfego I, e como no metro passageiros podem viajar de pé retiramos que $0,77.V^2$. Usando a $V=60 \text{ km/h}$, resulta num raio mínimo de 2772 m.

Tomando a via plena com velocidade 60/50 km/h numa curva convexa, temos que o raio de curva vertical mínimo para a Norma 2017 é de 2000 m.

Para a Norma Metropolitano o valor limite do raio de curva vertical é de 2200 m.

Conclui-se que a Norma 2007 é a mais restritiva, uma vez que apresenta um valor de raio mínimo superior, para o caso do *ML*.

Tabela 6.38 - Comparação dos raios de curva verticais mínimos admissíveis para as diferentes normas

	Norma 2007	Norma 2017					Norma Metropolitano			
		Plena Via	AMV e cruzamentos, curvas convexas	AMV e cruzamentos, curvas côncavas	Cavalo de triagem, curvas convexas	Cavalo de triagem, curvas côncavas	V = 60/50 km/h Curva convexa	V = 60/50 km/h Curva côncava	V = 40 km/h Curva convexa	V = 40 km/h Curva côncava
L.N.[m]	São dados em expressões com dependência da velocidade máxima	2000	5000	3000	250	300	2200	2000	1200	1000
L.Exc.[m]		500	2000	2000						

6.1.13 Aceleração vertical

6.1.13.1 Norma 2007

A aceleração vertical nesta norma é representada por a_v na Equação 36.

$$a_v = \frac{V_{max}^2}{12,96 \cdot R_v} \leq (a_v)_{lim} \quad [m/s^2] \quad \text{Equação 36}$$

O valor máximo de $(a_v)_{lim}$ da Tabela 6.39 deve ser escolhido tendo em consideração o conforto de rolamento na eventualidade da existência de uma plataforma da via instável. Além disso, deve-se também considerar os aspetos de segurança face ao risco de descarrilamento devido à diminuição da carga da roda à passagem pelas curvas convexas. Contudo, este limite de segurança não é considerado, salvo se for ultrapassado o valor limite máximo de a_v .

Tabela 6.39 - Aceleração vertical $(a_v)_{lim}$, adaptado Norma 2007 (NPENV13803-1:2007, 2007)

Categorias de tráfego	I	IIa	IIb	III	IV	V
Valor limite recomendado [m/s ²]	0,22 ^b	0,22		0,22	0,22	0,22
Valor limite máximo [m/s ²]	0,31			0,44 ^a	0,31	0,44 ^a
a) com uma tolerância +10% numa curva convexa, +30% numa curva côncava						
b) em linhas onde os passageiros possam viajar de pé, recomenda-se que a_v não exceda 0,1						

6.1.13.2 Norma 2017

Não especificado.

6.1.13.3 Norma Metropolitano

Para o limite de aceleração centrífuga residual, a_r , praticado na rede do ML, ter-se-á:

$$a_{r_{max}} = 0,07g \quad [m \cdot s^{-2}]$$

Nas curvas de raio elevado, $R \geq 900$ m, para as quais é dispensada a aplicação de curvas de concordância, utilizar-se-á escala ou não consoante a força centrífuga total, a_t , obtida através da Equação 10:

$$a_t = a_c + a_r$$

Em que:

a_r - aceleração centrífuga residual (não compensada)

a_c - aceleração centrífuga compensada

O acima exposto resulta nas relações apresentadas na Equação 37 e na Equação 38:

$$a_t > \frac{1}{2} a_{r_{max}} \quad \text{Equação 37}$$

Ou:

$$a_t < \frac{1}{2} a_{r_{max}} \quad \text{Equação 38}$$

Ou seja:

$$a_t > 0,35 \text{ m.s}^{-2}$$

$$a_t < 0,35 \text{ m.s}^{-2}$$

6.1.13.4 Resumo dos limites da aceleração vertical

Embora não existam dados suficientes para uma comparação completa das três normas disponíveis, é possível correlacionar que, no caso do *ML*, a Norma 2007 estabelece que a aceleração vertical não pode exceder $0,1 \text{ m/s}^2$, considerando que os passageiros podem viajar em pé. Por outro lado, a Norma Metropolitano permite um limite de $0,35 \text{ m/s}^2$. Assim, a Norma 2007 é mais restritiva, exigindo uma aceleração vertical mais baixa.

6.1.14 Inclinação de traneis

6.1.14.1 Norma 2007

Não especificado.

6.1.14.2 Norma 2017

As magnitudes absolutas das inclinações de traneis, p , devem ser limitadas devido à tração disponível em relação à massa do comboio, bem como ao desempenho de frenagem

destes. Não são especificados limites superiores para as magnitudes das inclinações nesta Norma Europeia.

Limites inferiores para comprimentos de inclinações de traneis $L_{g,lim}$ são especificados na Tabela 6.40.

Tabela 6.40 - Limites inferiores para comprimentos de inclinações de traneis $L_{g,lim}$, adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

Limite normal [m]	Limite excecional [m]
20	0

6.1.14.3 Norma Metropolitano

Não especificado.

6.1.14.4 Resumo da inclinação de traneis

Como apenas a Norma 2017 apresenta dados para a inclinação de traneis, não é possível realizar uma comparação com as restantes normas.

6.1.15 Variação instantânea de inclinações

6.1.15.1 Norma 2007

Não especificado.

6.1.15.2 Norma 2017

Duas inclinações constantes de traneis, normalmente, não devem ser conectadas entre si sem uma curva vertical intermediária. Em casos excecionais, pode ocorrer uma variação instantânea de inclinações Δp . Os valores limite superiores para Δ_{plim} são apresentados na Tabela 6.41.

Tabela 6.41 - limites superiores para variação instantânea de inclinações em plena via Δ_{plim} , adaptado Norma 2017 (EN13803-1:2017, 2017)

	Limite normal [mm/m]	Limite excecional [mm/m]
$0 < V \leq 230 \text{ km/h}$	1	2
$230 \text{ km/h} < V \leq 360 \text{ km/h}$	0,5	1

Em linhas secundárias, onde se pratiquem velocidades até 40 km/h, admite-se a possibilidade de aumentar o valor limite máximo para 4,5 mm/m desde que a variação instantânea de inclinações ocorra fora de AMVs e cruzamentos.

6.1.15.3 Norma Metropolitano

Não especificado.

6.1.15.4 Resumo da variação instantânea de inclinação

Como apenas a Norma 2017 apresenta dados para a variação instantânea de inclinação, não é possível realizar uma comparação com as restantes normas.

6.1.16 Aparelhos de mudança de via

No que se refere aos Aparelhos de Mudança de Via nenhuma das normas analisadas inclui uma secção específica dedicada a este parâmetro. Contudo, ao longo dos parâmetros previamente estudados, os *AMV* são frequentemente mencionados como fatores condicionantes com valores específicos a eles atribuídos em diversos casos.

6.2 Considerações finais

Como evidenciado neste capítulo, uma das principais dificuldades no estudo e aplicação das normas reside nas diferentes definições atribuídas a conceitos iguais entre elas. A Tabela 0.1, constante no Anexo A deste documento, apresenta uma relação simplificada desses conceitos, comparando as diferentes normas. A tabela inicia com a Norma 2007, identificando a designação de cada parâmetro e o seu respetivo símbolo, além das unidades utilizadas. Em seguida são comparados os mesmos parâmetros da Norma 2017, verificando se os nomes, símbolos e unidades coincidem. Finalmente, a Norma Metropolitano é igualmente analisada.

Esta tabela foi elaborada para facilitar a consulta e interpretação das normas e proporcionar uma visão mais clara das correspondências e diferenças entre elas.

Ao comparar as normas conclui-se que, na maioria dos parâmetros, a Norma Metropolitano é a mais restritiva. Isto era esperado, visto que esta norma foi especificamente desenvolvida para o ML, o qual, conforme discutido em capítulo anterior, apresenta diferenças significativas em relação às vias-férreas convencionais, às quais as outras normas se referem. No entanto, a Norma 2007 foi considerada mais adequada para o presente estudo em comparação com a Norma 2017 mais recente. A razão para essa escolha reside no facto de que a Norma 2007 classifica o tráfego em categorias, permitindo uma melhor caracterização das velocidades praticadas na rede do ML, dentro da faixa de 80 a 120 km/h. Além disso, a Norma 2007 oferece uma definição mais detalhada dos procedimentos de cálculo para os elementos de traçado, de modo a poder garantir-se que os valores calculados estejam orientados para a segurança. Com a ressalva que o valor da insuficiência de escala, conforme demonstrado anteriormente, é mais restritivo na Norma 2017, sendo, portanto, o mais adequado para garantir a segurança.

ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO

7.1 Introdução

A velocidade de operação no sistema de metropolitano é um fator crucial que afeta diretamente a eficiência do transporte urbano, o tempo de viagem dos passageiros e a capacidade de gestão do tráfego nas cidades. Calcular a sua velocidade de operação é uma tarefa essencial para garantir a eficiência, segurança e conforto dos passageiros. A velocidade não é apenas uma questão de atingir o máximo possível, mas sim de manter um equilíbrio entre diversos fatores, como o traçado da via, as características dos comboios, a qualidade da via e as condições operacionais. Muito embora os sistemas de metropolitano não exijam as altas velocidades características das linhas ferroviárias interurbanas, a manutenção de uma velocidade adequada é essencial para assegurar uma operação rápida e eficiente que responda às necessidades de deslocação de grandes populações em áreas densamente povoadas.

Como já foi referido em capítulos anteriores, na Norma Metropolitano tem-se que a velocidade máxima de circulação atual é de 60 km/h, perspectivando-se um aumento para 72 km/h numa fase futura de exploração. No entanto, nos dias de hoje, com a iminente mudança de sinalização para *CBTC* no *ML* há a possibilidade de estudar um eventual aumento da velocidade de forma segura.

No âmbito da colaboração do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *LNEC*, com o *ML*, foi estudada a definição das condições de circulação com vista à futura instalação do sistema *CBTC*.

Tendo em consideração as restrições resultantes da parametrização de velocidades de acordo com a norma referida para o *CBTC* (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005) e para garantir as velocidades de circulação após a sua implementação, semelhantes às previstas no projeto e nas normas de traçado da rede do *ML*, 72 km/h, foi fixada como objeto de estudo uma velocidade máxima de cálculo de 90 km/h. Este valor tem em conta que a migração para *CBTC* resulta em reduções de velocidade da ordem de 16 km/h, inerentes à sua implementação.

A velocidade máxima de circulação tem em conta o valor mais restritivo, resultante da análise do projeto do traçado em planta e em perfil longitudinal da via. Não são tidas em consideração eventuais restrições resultantes do gabarito do material circulante. No caso de singularidades específicas da via, mais precisamente dos *AMV*, foi considerado que estes, para a circulação em via direta, permitem a velocidade de circulação de projeto, 72 km/h. Ou seja, não representam um impedimento para circulação a esta velocidade e, para a circulação em via desviada, foi estimada a velocidade de circulação com base nas características geométricas, raios de curva, dos *AMV*.

São apresentadas de seguida as principais considerações tidas em conta para o cálculo da velocidade máxima de circulação, com base nas características de traçado. Este capítulo aborda os principais fatores do traçado que limitam a velocidade no metropolitano, incluindo curvas, rampas, estações, e o sistema de sinalização. Bem como são apresentadas as principais considerações tidas em conta para o cálculo da velocidade máxima de circulação, com base nas características de traçado.

7.2 Curvas

7.2.1 Raio de curvatura

No metropolitano, o raio de curvatura das vias é um dos principais fatores que limitam a velocidade. Devido à necessidade de operar em ambientes urbanos densos, o traçado do metropolitano muitas vezes inclui curvas acentuadas se para desviar de infraestruturas existentes ou seguir o contorno das ruas e avenidas. Curvas com raios pequenos exigem que os comboios reduzam a velocidade para manter a segurança e o conforto dos passageiros.

Por exemplo, em linhas onde o espaço é limitado, como nos centros urbanos históricos, o raio de curvatura pode ser significativamente menor do que nas linhas de superfície ou em linhas de longa distância, resultando numa limitação mais pronunciada da velocidade. A redução da velocidade em curvas apertadas é necessária para evitar o risco de descarrilamento e minimizar a desconforto causado pela força centrífuga sobre os passageiros (Vuchic, 2007).

7.2.2 Escala (Sobreelevação)

Embora a sobrelevação, que é a elevação do carril externo em relação ao interno numa curva, seja utilizada para permitir velocidades mais altas em curvas, a sua aplicação nos sistemas de metropolitano é limitada. Isto ocorre porque as velocidades operacionais nestes sistemas são geralmente mais baixas e a variação de velocidades entre comboios de diferentes tipos, como serviços expressos e de paragens regulares, torna difícil aplicar uma sobrelevação que seja ideal para todos os tipos de serviços. Além disso, a sobrelevação excessiva pode causar desconforto quando os comboios estão parados ou em baixa velocidade nas curvas.

7.3 Rampas e Inclinações

7.3.1 Gradientes Longitudinais

O projeto dos sistemas de metropolitano frequentemente inclui rampas íngremes, particularmente em troços subterrâneos que precisam emergir à superfície ou cruzar outras infraestruturas. Estes gradientes longitudinais podem ser significativos devido às restrições urbanas, exigindo que os comboios reduzam a velocidade para manter a tração e evitar esforço excessivo nos sistemas de propulsão. Embora as rampas nos sistemas de metropolitano sejam mais curtas do que em ferrovias interurbanas, ainda assim representam um desafio significativo para a manutenção de uma velocidade constante, especialmente em condições adversas, como carris com humidade ou quando há uma sobrecarga do comboio (Vuchic, 2007).

7.3.2 Curvas em rampas

Quando curvas são combinadas com rampas o impacto na velocidade é ainda mais pronunciado. O comboio não apenas precisa lidar com a força centrífuga nas curvas, mas também com as forças adicionais causadas pela inclinação. Isto resulta na necessidade de uma redução significativa da velocidade para garantir a segurança, o que pode impactar negativamente o tempo de viagem e a eficiência operacional.

7.4 Estações

7.4.1 Distância entre estações

A distância entre estações é um fator crucial limitativo da velocidade nos sistemas de metropolitano. Em linhas onde as estações estão próximas umas das outras os comboios raramente têm a oportunidade de atingir velocidades elevadas antes de necessitarem de iniciar o

processo de desaceleração para a próxima paragem. Esta característica é comum em áreas centrais onde a alta densidade populacional justifica a construção de estações frequentes para maximizar a acessibilidade. Esta limitação é menos pronunciada em linhas suburbanas ou em troços onde as estações estão mais espaçadas, permitindo que os comboios atinjam velocidades mais elevadas entre as paragens (Vuchic, 2007).

7.4.2 Tempo de paragem

O tempo de paragem nas estações, necessário para permitir o embarque e desembarque de passageiros, também influencia a velocidade média do serviço. Embora o tempo de paragem não afete diretamente a velocidade máxima que um comboio pode atingir, ele reduz a velocidade média geral do serviço, especialmente em linhas com muitas paragens e alta procura de passageiros. A otimização dos tempos de paragem, através de uma melhor gestão do fluxo de passageiros e do projeto eficiente das plataformas, é fundamental para melhorar a velocidade média sem comprometer a segurança.

7.5 Sinalização e Controle de Tráfego

7.5.1 Sistemas de Sinalização

Os sistemas de sinalização nos sistemas de metropolitano são cruciais para garantir a segurança dos comboios, mas também podem impor limites à velocidade. A sinalização, especialmente em sistemas com blocos fixos, determina a velocidade com que um comboio pode operar com base na ocupação das vias à frente. Quando um bloco está ocupado, o comboio deve reduzir a velocidade ou parar até que o bloco seja libertado. Isto pode resultar em velocidades operacionais mais baixas em troços congestionados onde os comboios precisam manter uma distância segura entre si (Vuchic, 2007).

7.5.2 Controle Automático de Velocidade

Os sistemas modernos de controle automático de velocidade, como o *CBTC*, permitem maior flexibilidade na operação dos comboios, uma vez que ajustam automaticamente a velocidade com base nas condições do traçado e tráfego. Embora esses sistemas possam otimizar a operação e permitir velocidades mais elevadas em certas circunstâncias, eles impõem restrições de velocidade para garantir a segurança, especialmente em áreas onde a distância entre comboios é reduzida ou em situações de emergência, como já foi exemplificado em capítulos anteriores.

7.6 Sumário dos fatores a considerar

A velocidade nos sistemas de metropolitano é condicionada por uma série de fatores relacionados com o traçado e a operação. Elementos como o raio de curvatura, gradientes longitudinais, a proximidade das estações e os sistemas de sinalização impõem restrições significativas à velocidade dos comboios. Embora o objetivo principal do metropolitano não seja atingir altas velocidades, mas sim fornecer um serviço rápido, eficiente e seguro dentro do ambiente urbano, a compreensão desses fatores limitantes é essencial para o planeamento e otimização dos sistemas de transporte subterrâneo nas cidades.

7.7 Cálculo da velocidade máxima de circulação

Após o cálculo das velocidades máximas excecionais referidas nos capítulos anteriores, para os elementos de traçado em planta, em perfil longitudinal e para os *AMV*, ao longo da rede do *ML*, é calculada a velocidade final mais condicionante como a mínima de entre as calculadas em cada elemento de traçado. Esta será considerada a velocidade máxima.

7.7.1 Traçado em planta

Para a estimativa da velocidade máxima condicionada pelo traçado em planta foram analisados os elementos de projeto do traçado disponibilizados pelo *ML*, nomeadamente os parâmetros das curvas circulares e as curvas de transição. Foi calculada a velocidade máxima de circulação ao longo da rede com base nos critérios apresentados de seguida.

7.7.1.1 Curva Circular

Para calcular a velocidade máxima neste contexto é essencial ter em consideração o critério de insuficiência de escala e o critério de aceleração centrífuga não compensada, além da escala e do raio da curva circular.

7.7.1.2 Curva de transição

Para o cálculo da velocidade excecional em curvas de transição, de tipo clotóide, foram considerados os seguintes critérios condicionantes:

- A variação da escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme, clotóide;
- A variação da insuficiência de escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme;

- Variação da insuficiência de escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme - Variação da aceleração lateral não compensada em função do tempo.

Foi ainda verificado o critério da variação da escala em função do comprimento da curva de transição, que não depende da velocidade de circulação.

7.7.2 Traçado em perfil longitudinal - curvas de concordância

Para o cálculo da velocidade excecional para o traçado em perfil longitudinal foram considerados:

- Critério de raio da curva de concordância vertical;
- Critério de aceleração centrífuga não compensada vertical.

7.7.3 Aparelhos de Mudança de Via

Como já referido, no caso dos AMV foi considerado que estes, para a circulação em via direta, permitem a velocidade de circulação de projeto, ou seja, 72 km/h.

Para a circulação em via desviada foi estimada a velocidade de circulação com base nas características geométricas, raios de curva, dos AMV, tendo em consideração o valor recomendado pela Universidade de Delft (Esveld, 2001) para a aceleração centrífuga não compensada limite em AMV sem escala da Equação 39.

$$(a)_{lim} = 0,6 \frac{m}{s^2} \quad \text{Equação 39}$$

com base na Equação 40

$$a = \frac{V^2}{R} \leq (a)_{lim} \quad \text{Equação 40}$$

PROPOSTA DE NORMA DE TRAÇADO DE METROPOLITANO

Após a análise comparativa das diferentes normas disponíveis, torna-se essencial extrair as considerações mais adequadas para o *ML*, culminando na elaboração de uma proposta de norma para o traçado de metropolitano. Esta proposta pode envolver desde a simples atualização das designações para harmonizá-las com as normas europeias em vigor, até à definição de valores anteriormente não especificados, ou ainda, a implementação de pequenas alterações nos métodos de cálculo. Todas estas possíveis alterações servirão para aproximar a Norma Metropolitano às normas europeias disponíveis, mantendo, ainda assim, a sua especialização inerente às suas características especiais.

Muito embora, maioritariamente, sejam apresentados em primeiro lugar os valores e expressões específicas para o metropolitano, é posteriormente apresentada uma alternativa complementar baseada, principalmente, na Norma 2007. Esta escolha decorre do facto de que a Norma Metropolitano considera apenas o limite normal, enquanto a Norma 2007 apresenta tanto um limite normal quanto um limite excecional. Desta forma fica a opção de utilização destas duas componentes para deixar espaço para futuras aplicações.

Este capítulo apresenta a proposta revista de norma para o traçado de metropolitano, fundamentada no estudo detalhado dos capítulos anteriores e servirá como base para o caso de estudo desenvolvido no capítulo subsequente.

8.1 Raio curva horizontal

O raio de curva mínimo, R , admitido para a velocidade de operação máxima, com insuficiência de escala, determina-se através da Equação 1 apresentada anteriormente e a seguir reproduzida:

$$R = \frac{11,8}{D + I} V_{max}^2 \quad [m]$$

Em que:

R - raio de curva horizontal;

D - escala;

I - insuficiência de escala;

V_{max} - velocidade máxima.

Como o *ML* não tem excesso de escala não é necessário calcular o raio de curva mínimo para a velocidade de operação máxima com excesso de escala. Não se devem utilizar raios de curva inferiores a 180 m nos novos traçados. Sempre que possível, devem ser utilizados os maiores raios de curvatura permitidos pelas condicionantes de projeto, o que facilitará qualquer futuro aumento da velocidade. No entanto, recomenda-se que o valor do raio das curvas em vias adjacentes aos cais de passageiros não seja inferior a 500 m. Esta prescrição destina-se a limitar a dimensão da lacuna entre o cais e os veículos para facilitar o acesso em segurança dos passageiros aos comboios.

Como raios mínimos de curvatura horizontal no *ML*, está especificado que deverão ser adotados os seguintes:

- 300 metros para vias de exploração em condições normais;
- 200 metros para vias de exploração em situações de traçado extremamente difíceis;
- 100 metros para as vias de serviço, ou seja, términos de inversão, resguardos, ramais de acesso a P.M.O.s , ou seja Parque de Material e Oficinas, e feixes de vias de P.M.O.s.

Considerações do raio curva horizontal

Foi acrescentada a expressão da Norma 2007 para discriminação do cálculo do raio de curva horizontal.

8.2 Escala

A escala teórica, D_t , deverá ser calculada através da Equação 41.

$$D_t = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \text{ [mm]} \quad \text{Equação 41}$$

Em que R está em metros e V em km/h.

O seu valor máximo na rede do ML é definido pela Equação 42.

$$D_{lim} = \frac{1}{10} \cdot bitola = 0,15m = 150mm \quad \text{Equação 42}$$

Como a deficiência de escala depende do valor da aceleração centrífuga residual resulta para o cálculo da Escala Real da via, D , o expresso na Equação 43.

$$D = 11,8 \frac{V^2}{R} - I \text{ [mm]} \quad \text{Equação 43}$$

E a Equação 44.

$$I = \frac{b'}{g} \times 10^3 \times a_q = 100mm \quad \text{Equação 44}$$

Em que I é a insuficiência de escala definida para o ML .

Através da Equação 7:

$$b' = b + 2 \frac{0,067}{2} = 1,5 \text{ m}$$

Em que b = bitola = 1435 mm.

Para o limite da aceleração centrífuga residual, praticado na rede do ML , tem-se:

$$a_{q,d \max} = 0,07 g \cdot s^{-2}$$

Resulta assim a Equação 45.

$$D = 11,8 \frac{V^2}{R} - 100 \text{ [mm]} \quad \text{Equação 45}$$

Nas curvas de raio elevado, $R \geq 900$ m, para as quais é dispensada a aplicação de curvas de concordância, utilizar-se-á escala ou não consoante a força centrífuga total, a_t , obtida através da Equação 46.

$$a_t = a_c + a_q \quad \text{Equação 46}$$

Para determinar se é necessária a utilização de escala deverá comparar-se o valor obtido de a_t com $\frac{1}{2}a_{r \max}$, ou seja:

$$a_t > 0,35 \text{ m.s}^{-2}$$

$$a_t < 0,35 \text{ m.s}^{-2}$$

Em que:

- a_c - aceleração centrífuga compensada;
- a_q - aceleração centrífuga residual, não compensada.

Para usufruo dos limites normais e excecional pode-se referenciar os valores apresentados na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 - Escala D_{lim} , adaptado da Norma Metropolitano e Norma 2007, para a norma proposta de metropolitano

Limite normal [mm]	Limite excecional [mm]
150	180

Considerações da escala

Foram modificados os símbolos utilizados pela Norma Metropolitano para melhor se compararem com as normas europeias em vigor:

- $d_t = D_t$
- $d_{lim} = D_{lim}$
- $d_r = D$
- $d = I$
- $a_r = a_q$

Foi acrescentado o limite excecional da Norma 2007 para uma maior inclusão de valores. Pode-se comparar que, enquanto que a Norma Metropolitano tem um valor limite normal de escala mais restritivo de 150mm, a Norma 2007 tem um limite normal de 160mm e portanto foi adotado o valor de 150mm.

8.3 Insuficiência de escala

O valor específico para o ML , retirado da Norma Metropolitano, como a deficiência de escala depende do valor da aceleração centrífuga residual, resulta a Equação 44 aqui novamente reproduzida.

$$I = \frac{b'}{g} \times 10^3 \times a_q = 100mm$$

Em que I é a insuficiência de escala definida para o ML e o valor de b' é obtido através da Equação 7 e o valor de b , bitola é de 1435 mm:

$$b' = b + 2 \frac{0,067}{2} = 1,5 m$$

Para o limite de aceleração centrífuga residual ou aceleração lateral não compensada, praticado na rede do ML , tem-se:

$$a_{q,d max} = 0,07 g \cdot m \cdot s^{-2} = 0,686 m \cdot s^{-2}$$

Dados os valores locais do raio, R , e da escala real ou prática, D , a insuficiência de escala, I , determina a velocidade máxima em plena curva com base na Equação 11, a seguir representada:

$$I = 11,8 \frac{V_{max}^2}{R} - D \leq I_{lim} \quad [mm]$$

I_{lim} pode substituir-se pelo valor $(a_q)_{lim}$ da Equação 12 e resulta:

$$a_q = \frac{V_{max}^2}{12,96R} - \frac{g \cdot D}{1500} = \frac{I}{153} \leq (a_q)_{lim} = \frac{I_{lim}}{153} \quad [m/s^2]$$

Em que a_q é a aceleração lateral não compensada no plano da via, em m/s^2 .

Para a utilização dos limites normais e excepcionais, deverão consultar-se os valores da Tabela 8.2.

Tabela 8.2 - Valores limite normal e excecional de a_q , adaptados da Norma Metropolitano e do Estudio Informativo de la Nueva Red Ferroviaria del País Vasco. Corredor de Acceso y Estación de Bilbao-Abando. Fase B, Anexo 5, para a proposta de norma de metropolitano

Limite normal [m/s^2]	Limite excecional [m/s^2]
0,07g = 0,686	0,85

A Tabela 8.3 considera os valores limite máximos da insuficiência de escala.

Tabela 8.3 - Insuficiência de escala limite I_{lim} , adaptado da Norma Metropolitano e Norma 2017, para a proposta de norma de traçado de metropolitano

	Limite normal [mm]	Limite excecional [mm]
Comboios convencionais		
V ≤ 220 km/h	100	180

Considerações da insuficiência de escala

Foram modificados os símbolos utilizados pela Norma Metropolitano para melhor se compararem com as normas europeias em vigor:

- $d = I$
- $a_r = a_q$

Inicialmente são expostos os valores específicos para o *ML*, de acordo com a Norma Metropolitano. De seguida são apresentadas as expressões e fórmulas da Norma 2007.

Também é utilizado o limite normal da insuficiência de escala, conforme estabelecido pela Norma Metropolitano. E o limite excecional da norma de 2017 em vez da Norma de 2007 porque impõe uma restrição maior no valor do limite, priorizando assim a segurança.

Para além do valor da aceleração lateral não compensada definido para o *ML*, também estão especificados os limites normal e excecional de a_q .

Na Norma 2007 estes valores de a_q são determinados em função do valor limite da insuficiência de escala, ou seja, tendo em conta a segurança. Como a_q é um parâmetro relacionado com o conforto foram adotados os valores estabelecidos pelas normas (NP-ISO-2631-1, 1997) de $0,65 \text{ m/s}^2$ e de $0,85 \text{ m/s}^2$ do (Estudio Informativo de la Nueva Red Ferroviaria del País Vasco. Corredor de Acceso y Estación de Bilbao-Abando. Fase B, ANEJO 5, 2019). Esta escolha foi realizada devido ao facto de, neste caso, o conforto do passageiro ser mais restritivo que a segurança do comboio. No entanto para a proposta de norma de metropolitano o limite normal de a_q será o definido pela Norma Metropolitano de $0,07g$.

8.4 Excesso de escala

Quando existe excesso de escala, E , a Equação 14, que se reproduz de seguida, toma um valor positivo:

$$E = D - 11,8 \frac{V_{min}^2}{R} \quad [mm]$$

A título indicativo podem utilizar-se os seguintes valores limite, apesar de que, para comboios de passageiros recomenda-se que não ultrapasse o valor limite máximo de 110mm:

- Valor limite recomendado: 110mm;
- Valor limite máximo: 130mm.

É de referir que no *ML*, em princípio, não existe excesso de escala.

Considerações do excesso de escala

Como o excesso de escala não estava especificado na Norma Metropolitano, foram utilizados os valores e parâmetros da Norma 2007. Esta norma foi considerada como a mais adequada para o presente estudo, quando comparada com a Norma 2017, dado apresentar uma divisão de tráfego por categorias. A categoria de velocidades do tráfego ferroviário da Norma 2007 que mais se adequa às praticadas na rede do *ML* é a que se situa entre 80 e 120 km/h. Adicionalmente, esta norma possui uma definição mais detalhada dos procedimentos de cálculo para elementos de traçado, estando os valores calculados do lado da segurança.

8.5 Variação da escala em função do tempo

A variação de escala em função do tempo é representada por $\frac{dD}{dt}$ e a escala real da via por D , pelo que resulta a Equação 47.

$$\frac{dD}{dt} = 28 \cdot D \cdot \frac{V}{L} \quad [cm \cdot s^{-1}] \quad \text{Equação 47}$$

Onde:

- $\frac{dD}{dt}$ em $cm \cdot s^{-1}$
- D em cm
- V em km/h
- L em cm

Apesar de não serem independentes, a variação da escala em função do tempo e a escala real da via podem relacionar-se através Equação 48, em que $\frac{da_q}{dt}$ representa o coeficiente de conforto, em $[m \cdot s^{-3}]$, ou seja, a variação da aceleração centrífuga com o tempo.

$$\frac{dD}{dt} = \frac{da_q}{dt} \cdot \frac{0,15}{a_q + \frac{\lambda}{\sigma}} \cdot 10^2 \quad [cm \cdot s^{-1}] \quad \text{Equação 48}$$

Em que λ é a abcissa do ponto de tangência T da curva circular definida através da Equação 49.

$$\lambda = \frac{d_q}{d_l} = \frac{d_q}{0,15} \quad \text{Equação 49}$$

$$\sigma = 1 \, m^{-1} \cdot s^2$$

Para o ML , os limites são os seguintes:

- $\left(\frac{da_q}{dt}\right)_{lim} = 0,25 \, m \cdot s^{-3}$
- $\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} = 3,5 \, cm \cdot s^{-1}$

O coeficiente de impulso transversal, τ , pode ser calculado através da Equação 50.

$$\tau = \frac{a_q}{g} \cdot 10 \quad [Newton \cdot T^{-1}] \quad \text{Equação 50}$$

Pode também usar-se a Equação 17 seguinte da Norma 2007 em vez da Equação 47, que é equivalente mas utiliza grandezas diferentes:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\Delta D \cdot V_{max}}{3,6 \cdot L} \leq \left(\frac{\Delta D}{dt} \right)_{lim} \quad [mm/s]$$

Onde:

- $\frac{dD}{dt}$ em mm/s
- D em mm
- L em m
- V em km/h

Os valores limite normal e excecional para a variação da escala em função do tempo a ser utilizados são os constantes na Tabela 8.4.

Tabela 8.4 - Valores limite para variação da escala em função do tempo $\frac{dD}{dt}$, com declive uniforme, para a proposta de norma de metropolitano, adaptado da Norma Metropolitano e Norma 2007

Limite normal [mm/s]	Limite excecional [mm/s]
35	55

É possível, assim, a aplicação de diferentes métodos de cálculo, conforme o objetivo.

Considerações da variação da escala em função do tempo

Foram modificados os símbolos utilizados pela Norma Metropolitano para melhor se compararem com as normas europeias em vigor:

- $X = \frac{dD}{dt}$;
- $d_r = D$;
- $\Psi = \frac{da_q}{dt}$;
- $\psi_{lim} = \left(\frac{da_q}{dt} \right)_{lim}$;
- $\chi_{lim} = \left(\frac{dD}{dt} \right)_{lim}$;
- $a_r = a_q$.

Foi acrescentada a possibilidade de utilização da fórmula equivalente de $\frac{dD}{dt}$ proveniente da Norma 2007.

No final o valor limite normal escolhido foi o proveniente da Norma Metropolitano por ser o mais restritivo. E o limite excecional foi da Norma 2007 por razões já anteriormente expostas.

8.6 Variação da escala em função do comprimento

A variação da escala em função do comprimento, $\frac{dD}{ds}$, é definida pela Equação 51.

$$\frac{dD}{ds} = tg\beta = \frac{D}{L} \quad [mm/m] \quad \text{Equação 51}$$

Em que β é o ângulo que se pode observar na Figura 4.9.

Este parâmetro traduz-se por um empeno para a via, ao longo de todo o comprimento das rampas de disfarce da escala, obrigando as quatro rodas do bogie a circular a cotas diferentes. À semelhança da norma anteriormente referida, as suas limitações também se regem por requisitos de segurança, p_1 , e requisitos de conforto, p_2 .

$$\frac{dD}{ds} = \frac{D}{L} \quad \text{Equação 52}$$

Em que $\frac{dD}{ds}$ da Equação 52 é o valor da progressividade de escala, ou seja, do disfarce de escala.

No caso de fortes sujeições geométricas à implantação de concordâncias, admite-se para o comprimento L , a sobre-extensão $2\Delta L$, tendo em vista o abaixamento do valor do disfarce de escala. Isto traduz-se através da Equação 53.

$$p_1 = \frac{D}{L + 2\Delta L} \leq \frac{2}{1000} \quad \text{Equação 53}$$

Em que, como já definido anteriormente, D representa a escala real da via e ΔL_{max} é menor ou igual a 10 m.

Está definido para o ML usar sempre a restrição maior, logo o requisito de segurança da Equação 26, de seguida novamente reproduzido:

$$p_1 \leq \frac{2}{1000}$$

Resulta assim no constante da Equação 54.

$$\left(\frac{dD}{ds}\right)_{lim} = 2 \quad \text{Equação 54}$$

No entanto, se quisermos relacionar com a velocidade máxima e utilizar o valor excepcional, pode-se utilizar a Equação 22 da norma de 2007:

$$\frac{dD}{ds} = \frac{3,6}{V_{max}} \cdot \frac{dD}{dt} \quad [mm/m]$$

Deve-se então aplicar os valores constantes na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 - Valores limites da variação da escala em função do comprimento, adaptado da Norma Metropolitano e Norma 2007, para a proposta de norma de metropolitano

Limite normal	Limite excepcional
2 mm/m	2,5 mm/m

Considerações da variação da escala em função do comprimento

Foram modificados os símbolos utilizados pela Norma Metropolitano para melhor se compararem com as normas europeias em vigor:

- Disfarce de escala = variação da escala em função do comprimento;
- $p = \frac{dD}{ds}$;
- $d_r = D$;

A expressão equivalente e o limite excepcional da Norma 2007 foram adicionados no final, para se obter uma solução completa. O limite normal utilizado foi da Norma Metropolitano por ser mais restritivo e logo do lado da segurança.

8.7 Variação da insuficiência de escala em função do tempo

O parâmetro da insuficiência de escala em função do tempo designa-se por $\frac{dI}{dt}$. Para transições com variações uniformes da curvatura e da escala estabeleceu-se a relação constante na Equação 27, de seguida reproduzida, onde ΔI é a variação da insuficiência de escala:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_{max}}{3,6 \cdot L} \cdot \Delta I \leq \left(\frac{dI}{dt} \right)_{lim} \quad [mm/s]$$

Do mesmo modo, a variação de aceleração lateral não compensada no plano da via pode ser determinada a partir da variação total de aceleração lateral não compensada Δa_q ao longo da totalidade da transição. Esta relação é traduzida pela Equação 28, de seguida reproduzida:

$$\frac{da_q}{dt} = \frac{V_{max}}{3,6 \cdot L} \cdot \Delta a_q \leq \left(\frac{da_q}{dt} \right)_{lim} \quad [m/s^3]$$

Os valores $\frac{dI}{dt}$ e $\frac{da_q}{dt}$ não são constantes para transições com variações de curvatura e de escala não lineares. Atingem o seu valor máximo a meio da curva de transição.

Para comboios rápidos de passageiros, os valores escolhidos para $\left(\frac{dI}{dt} \right)_{lim}$ devem ter em conta o conforto de rolamento, na eventualidade de uma plataforma de via instável.

A variação de aceleração lateral quasi-estática paralela ao pavimento do veículo $\left(\frac{da_i}{dt} \right)$, que constitui uma medida da variação de aceleração percebida pelo passageiro a bordo do veículo, é superior à variação de aceleração não compensada no plano da via $\left(\frac{da_q}{dt} \right)$. Esta relação é traduzida pela Equação 29, de seguida reproduzida:

$$\frac{da_i}{dt} = (1 + s) \cdot \frac{da_q}{dt} \quad [m/s^3]$$

Em que s representa o coeficiente de *souplesse* do veículo.

O valor máximo de $\frac{da_i}{dt}$ considerado aceitável deve estar situado no intervalo entre 0,5 m/s^3 e 0,8 m/s^3 .

O valor de $\left(\frac{dI}{dt} \right)_{lim}$ encontra-se na Tabela 8.6 seguinte:

Tabela 8.6 - Variação da insuficiência de escala em função do tempo $\left(\frac{dl}{dt}\right)_{lim}$ adaptado Norma 2017, para a proposta de norma de metropolitano

Limite normal[mm/s]	Limite excecional[mm/s]
55	100

Os valores limite de $\frac{da_q}{dt}$ são obtidos através da Equação 29, de seguida reproduzida:

$$\frac{da_i}{dt} = (1 + s) \cdot \frac{da_q}{dt} \quad [m/s^3]$$

Em que:

- $s = 0,4$ - coeficiente de *souplesse*;
- para o limite normal $\frac{da_i}{dt} = 0,5 \text{ m/s}^3$;
- para o limite excecional $\frac{da_i}{dt} = 0,8 \text{ m/s}^3$.

Resultam, assim, os valores expressos na Tabela 8.7.

Tabela 8.7- Valores limite de $\frac{da_q}{dt}$, adaptado da Norma 2007, para $s=0,4$

Limite normal $[m/s^3]$	Limite excecional $[m/s^3]$
0,36	0,59

Mas como está definido que na Norma Metropolitano $\left(\frac{da_q}{dt}\right)_{lim} = 0,25 \text{ m.s}^{-3}$ para limite normal, resulta nos valores finais a ser utilizados na norma proposta para metropolitano da Tabela 8.8.

Tabela 8.8 - Valores limite de $\frac{da_q}{dt}$, adaptado da Norma 2007 e Norma Metropolitano, para $s=0,4$, para a proposta de norma de metropolitano

Limite normal $[m/s^3]$	Limite excecional $[m/s^3]$
0,25	0,59

Considerações da variação da insuficiência de escala em função do tempo

Foram utilizados as equações da Norma 2007.

Também foram calculados e adicionados os valores de $\frac{da_q}{dt}$, que, embora mencionados na norma, não haviam sido explicitamente determinados. Cabe destacar que, caso o coeficiente de *souplesse* do veículo seja diferente de 0,4, esses valores deverão ser recalculados.

No entanto o limite normal de $\frac{da_q}{dt}$ é definido pela Norma Metropolitano por ser mais restritivo. Já o limite excecional foi escolhido o calculado da Norma 2007.

Os limites da variação da insuficiência de escala em função do tempo $\left(\frac{dl}{dt}\right)$ foram selecionados os da Norma 2017 em vez da Norma 2007. Essa escolha deveu-se ao facto que os valores da Norma 2017 serem específicos para clotoídes enquanto que os valores da Norma de 2007 são aplicáveis a todas as formas de curvas de transição.

8.8 Comprimento dos elementos do traçado

L_i representa o comprimento dos elementos do traçado, ou seja, curvas circulares e alinhamentos retos. O comprimento efetivo de qualquer elemento do traçado, para além das curvas de transição, deve situar-se acima de um valor mínimo apresentado na Tabela 8.9. Devem ter-se em consideração os parâmetros de projeto efetivamente aplicados no traçado da zona, isto é, escala, insuficiência de escala e suas variações. Elementos mais longos devem ser utilizados em caso de valores mais elevados destes parâmetros.

Tabela 8.9 - Comprimento mínimo dos elementos do traçado L_i (curvas circulares e alinhamentos retos), adaptado Norma 2007, para a proposta de norma para metropolitano

Limite normal*[m]	Limite excecional* [m]
$\frac{V_{max}^a}{3}$	$\frac{V_{max}^a}{5}$
*) Na medida do possível, recomenda-se ligar duas curvas de sentidos contrários por uma curva de transição contínua em vez de intercalar um alinhamento reto entre as duas curvas de transição. Por esta razão, neste caso, o comprimento do alinhamento reto é nulo. a) Sem descer abaixo de 30 m	

Este requisito é difícil de ser cumprido em traçado de metropolitano.

Considerações do Comprimento dos elementos do traçado, curvas circulares e alinhamentos retos

Não estava especificado na Norma Metropolitano, motivo pelo qual foram utilizados os parâmetros da Norma 2007, por razões já anteriormente explanadas.

8.9 Comprimento das curvas de transição no plano horizontal

O comprimento das curvas de transição no plano horizontal, L , é considerado para curvas de transição lineares. Este comprimento deve ser determinado a partir dos valores limite impostos pelos seguintes parâmetros:

- Variação da insuficiência de escala em função do tempo $\frac{dI}{dt}$;
- Variação da escala em função do comprimento $\frac{dD}{ds}$.

E da Equação 30 e Equação 31, de seguida reproduzidas:

$$L \geq \frac{V_{max}}{3,6} \cdot \Delta I \cdot \left(\frac{dI}{dt}\right)^{-1} [m]$$

$$L \geq \Delta D \cdot \left(\frac{dD}{ds}\right)^{-1} [m]$$

O comprimento da curva de transição adotado deverá ser o maior dos valores obtidos a partir das fórmulas acima apresentadas para os valores escolhidos de $\frac{dI}{dt}$ e $\frac{dD}{ds}$.

Quando não exista curva de transição entre os elementos de traçado a ligar devem ser respeitados os valores limite das discontinuidades admissíveis nos AMV.

Considerações do comprimento das curvas de transição no plano horizontal

Não estava especificado na Norma Metropolitano, motivo pelo qual foram utilizados os parâmetros da Norma 2007, por razões já anteriormente explanadas.

É de salientar que já foi atualizado o símbolo para a Norma 2017:

- $\frac{dD}{ds} = \frac{dD}{dt} =$ Variação da escala em função do comprimento

8.10 Raio de curva vertical

As curvas de transição nos traneis devem corresponder a uma curvatura que assegure uma pequena e constante transição de declive.

Na rede do *ML* aplica-se a parábola definida pela Equação 35, de seguida reproduzida:

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot R_0}$$

Em que R_0 é o raio de curva no vértice.

As curvas convexas, por regra, deverão ser dotadas de menor curvatura por serem suscetíveis de originar maior incomodidade. A caracterização da curva de transição deverá abranger além do raio, a tangente, a flecha e a extensão da curva. Devem ser também indicadas a distância do vértice dos traineis ao vértice da parábola e as cotas destes dois vértices.

Os pontos notáveis da transição são:

- ECV - entrada da curva vertical;
- SCV - saída da curva vertical;
- V - vértice dos traineis.

Em redes de metropolitano considera-se inadmissível que as curvas verticais imponham limitação à velocidade de circulação.

Para a rede do ML as limitações visam:

- **Nas vias de exploração e nos ramais de acesso a P.M.O.s:**
 - a extensão da concordância vertical tem um valor mínimo $2t = 40m$;
 - as velocidades de circulação estão representadas na seguinte Tabela 8.10.

Tabela 8.10 - Valores do raio da curvatura no vértice R_0 para curvas convexas e côncavas, adaptado Norma Metropolitana

Velocidade de circulação	Curvas convexas	Curvas côncavas
V = 60 / 50 km/h	$R_0 \geq 2200 m$	$R_0 \geq 2000 m$
V = 40 km/h	$R_0 \geq 1200 m$	$R_0 \geq 1000 m$
A adoção de valores abaixo destes limites deverá ser entendida como uma deficiência local da via e só poderá ser admitida mediante nota justificativa.		

- **Nas vias de serviço, términos de inversão, resguardos e feixes de vias dos P.M.O.s:**
Como para estas vias os declives devem ser baixos não se limita a extensão do arco da parábola. O raio da curvatura fica, no entanto, limitado ao valor $R_0 \geq 1000 m$;
Não são admitidas curvas verticais contíguas de raios diferentes, do mesmo ou de sentidos contrários;

As curvas verticais podem ser projetadas sem curvas de transição. Nas mudanças de trainel devem prever-se curvas verticais com um comprimento mínimo de 20 m, desde que a diferença de inclinação entre dois traineis adjacentes seja superior a:

- 2 mm/m para velocidades até 230 km/h;

- 1 mm/m para velocidades superiores a 230 km/h.

O raio das curvas verticais, R_V , deve ser calculado através da Equação 33, de seguida reproduzida:

$$R_V = \frac{V_{max}^2}{12,96 \cdot a_V} \geq (R_V)_{lim}$$

Podem ser consultados os valores de $(R_V)_{lim}$ na Tabela 8.11.

Tabela 8.11 - Raio das curvas verticais $(R_V)_{lim}$, adaptado Norma 2007, para a proposta de norma de metropolitano

Limite normal [mm] *	Limite excecional [mm] *
$0,77 \cdot V_{max}^2$ ^b	$0,25 \cdot V_{max}^2$ ^c
b) em linhas onde passageiros possam viajar de pé, recomenda-se que R_V seja superior a $0,77 \cdot V^2$ em vez dos $0,35 \cdot V^2$ c) sem descer abaixo de 2000m de raio	

Considerações do raio de curva vertical

Manteve-se na íntegra o que estava descrito na Norma Metropolitano e foram retirados da Norma 2007 os valores complementares pelas razões já expostas anteriormente.

De salientar que para o limite normal do raio da curva vertical, foi selecionado o valor de $0,77 \cdot V^2$ por o metropolitano permitir passageiros viajar de pé.

8.11 Aceleração vertical

Para o limite de aceleração centrífuga residual, a_q , praticado na rede do ML, ter-se-á:

$$a_{q_{max}} = 0,07g \quad [m \cdot s^{-2}]$$

$$I = 100 \text{ mm}$$

Em que a Equação 45:

$$D = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} - 100 \quad [mm]$$

Nas curvas de raio elevado, $R \geq 900$ m, para as quais é dispensada a aplicação de curvas de concordância, usar-se-á escala ou não, consoante a força centrífuga total a_t da Equação 46, de seguida reproduzida.

$$a_t = a_c + a_q$$

Em que:

a_q - aceleração centrífuga residual (não compensada)

a_c - aceleração centrífuga compensada

Onde a Equação 55 e Equação 56:

$$a_t > \frac{1}{2} a_{q_{max}} \quad \text{Equação 55}$$

Ou

$$a_t < \frac{1}{2} a_{q_{max}} \quad \text{Equação 56}$$

Ou seja:

$$a_t > 0,35 \text{ m. seg}^{-2}$$

$$a_t < 0,35 \text{ m. seg}^{-2}$$

A aceleração vertical é representada por a_v na Equação 36, de seguida reproduzida:

$$a_v = \frac{V_{max}^2}{12,96 \cdot R_v} \leq (a_v)_{lim} \quad [m/s^2]$$

O valor máximo de $(a_v)_{lim}$ da Tabela 8.12 deve ser escolhido tendo em consideração o conforto de rolamento, na eventualidade da existência de uma plataforma da via instável. Além disso, devem também ser considerados os aspetos de segurança face ao risco de descarilamento devido à diminuição da carga da roda à passagem pelas curvas convexas. Contudo, este limite de segurança não é considerado, salvo se for ultrapassado o valor limite máximo de a_v .

Tabela 8.12 - Aceleração vertical $(a_v)_{lim}$, adaptado Norma 2007 , para a proposta de norma de metropolitano

Categorias de tráfego (velocidade em km/h)	I Linhas de tráfego misto $80 \leq V \leq 120$
Limite normal $[m/s^2]$	0,1 ^b
Limite excepcional $[m/s^2]$	0,31
b) em linhas onde os passageiros possam viajar de pé, recomenda-se que a_v não exceda 0,1 em vez do valor de 0,22	

Considerações da aceleração vertical

Foram modificados os símbolos utilizados pela Norma Metropolitano para melhor se compararem com as normas europeias em vigor:

- $d_r = D$;
- $d = I$;
- $a_r = a_q$.

Os valores adicionais foram extraídos da Norma 2007, conforme as justificações apresentadas anteriormente. Salientando que foi escolhido para limite normal da aceleração vertical o valor de 0,1 em vez de 0,22 por o metropolitano ser um transporte onde os passageiros podem viajar de pé.

8.12 Aparelhos de mudanças de via

No caso dos Aparelhos de Mudança de Via, *AMV*, foi considerado que estes, para a circulação em via direta, permitem a velocidade de circulação de projeto.

Para a circulação em via desviada foi estimada a velocidade de circulação com base nas características geométricas, raios de curva, dos *AMV*, considerando o valor recomendado pela Universidade de Delft (Esveld, 2001) para a aceleração centrífuga não compensada limite em *AMV* sem escala da Equação 39, de seguida reproduzida:

$$(a)_{lim} = 0,6 \frac{m}{s^2}$$

Com base na Equação 40, de seguida reproduzida:

$$a = \frac{V^2}{R} \leq (a)_{lim}$$

Considerações dos Aparelhos de Mudança de Via

Não especificado na Norma Metropolitano.

8.13 Inclinação de traneis

As magnitudes absolutas das inclinações de traneis, p , devem ser limitadas devido à tração disponível em relação à massa do comboio, bem como ao desempenho de frenagem dos comboios. Não são especificados limites superiores para as magnitudes das inclinações nesta Norma Europeia. Os limites inferiores para comprimentos de inclinações de traneis, $L_{g,lim}$, são apresentados na Tabela 8.13.

Tabela 8.13 - Limites inferiores para comprimentos de inclinações de traneis $L_{g,lim}$, adaptado Norma 2017, para a proposta de norma de metropolitano

Limite normal [m]	Limite excecional [m]
20	0

Considerações da inclinação de traneis

Não estava especificado na Norma Metropolitano, nem na Norma 2007, motivo pelo qual foram utilizados os parâmetros da Norma 2017.

8.14 Variação instantânea de inclinações

Duas inclinações constantes de traneis, normalmente, não devem ser conectadas entre si sem uma curva vertical intermediária. Em casos excecionais pode ocorrer uma variação instantânea de inclinações Δp , cujos limites superiores são apresentados na Tabela 8.14.

Tabela 8.14 - Limites superiores para variação instantânea de inclinações em plena via Δ_{plim} , adaptado Norma 2017, para a proposta de norma de metropolitano

	Limite normal [mm/m]	Limite excecional [mm/m]
$0 < V \leq 230 \text{ km/h}$	1	2
$230 \text{ km/h} < V \leq 360 \text{ km/h}$	0,5	1

Em linhas secundárias, onde se pratiquem velocidades até 40 km/h, admite-se a possibilidade de aumentar o valor limite máximo para 4,5 mm/m desde que a variação instantânea de inclinações ocorra fora de *AMV* e cruzamentos.

Considerações da variação instantânea de inclinações

Não estava especificado na Norma Metropolitano, nem na Norma 2007, motivo pelo qual foram utilizados os parâmetros da Norma 2017.

CASO DE ESTUDO E TRATAMENTO DE DADOS

Para o presente caso de estudo foram fornecidos diversos dados, no âmbito da colaboração do Laboratório Nacional de Engenharia Civil com o Metropolitano de Lisboa, para o estudo das condições limite de circulação com vista à futura instalação do sistema Communications Based Train Control.

Por razões de segurança e confidencialidade não será possível divulgar integralmente todas as informações que foram generosamente disponibilizadas para a conclusão desta tese.

Inicialmente foi selecionado um segmento de uma via da rede do Metropolitano de Lisboa, que será designado de forma fictícia como Linha A, troço 1. Este troço, localizado entre duas estações do *ML*, abrange o trecho compreendido ilusoriamente entre o quilómetro 1 601,396m e o quilómetro 1 695,633m.

O Metropolitano de Lisboa adota um sistema de referência em que certas estações são designadas como pontos de origem para a quilometragem. Nesse sistema, a via ascendente é identificada como a via de partida a partir dessas estações, enquanto a via descendente é considerada a via de chegada.

O troço 1 é constituído por uma via em laje, em vez de uma via balastrada, o que seria mais alinhado com as normas analisadas. No entanto, este troço foi escolhido por incorporar o maior número possível de parâmetros relevantes tanto no traçado em planta quanto no traçado longitudinal, sendo, portanto, ideal para ilustrar o estudo realizado nos capítulos anteriores. Por outro lado, a rede do *ML* tem atualmente mais extensão em via betonada e todos os projetos de extensão são também em via betonada.

Neste capítulo, serão realizados os cálculos da velocidade máxima para o troço selecionado da linha de metro, identificando-se os parâmetros que apresentam maior influência na limitação dessa velocidade.

Como base para todos os cálculos irá ser utilizada a proposta de norma de traçado para metropolitano realizada no capítulo anterior.

A seguir serão refeitos todos os cálculos, desta vez com base na Norma 2007, identificando também os parâmetros que mais impactam a velocidade. Assim, será possível comparar os resultados obtidos a partir das duas normas e formular as devidas conclusões.

9.1 Dados fornecidos

Como indicado na Tabela 9.11 o alinhamento em planta deste troço inclui uma curva circular e uma curva de transição. No que diz respeito ao alinhamento vertical, o troço apresenta retas e uma curva circular, sem a presença de AMV.

Tabela 9.1 - Dados sobre alinhamento em planta e vertical, fornecidos do troço 1 da linha A

PK (m)	Elemento	Alinhamento Planta	Alinhamento Vertical	A.M.V.
1601,396	Troço 1	Curva Circular	Reta	0
1657,833	Troço 1	Curva Circular	Curva Circular	0
1687,396	Troço 1	Curva de Transição	Curva Circular	0
1695,633	Troço 1	Curva de Transição	Reta	0

Onde *PK* (do francês Point Kilométrique) é uma sigla que se refere a "ponto quilométrico". Na engenharia ferroviária e rodoviária, o *PK* indica uma localização específica ao longo de uma via (ferrovia, rodovia, etc.), medida em relação ao ponto de partida oficial ou inicial dessa via. O número que acompanha a sigla representa a distância em quilômetros desde esse ponto inicial.

Este sistema de marcação é utilizado para identificar a localização de eventos, infraestruturas, sinais e outras características ao longo da via.

Esses alinhamentos podem ser visualizados de forma mais clara nas figuras Figura 9.1 e Figura 9.2.

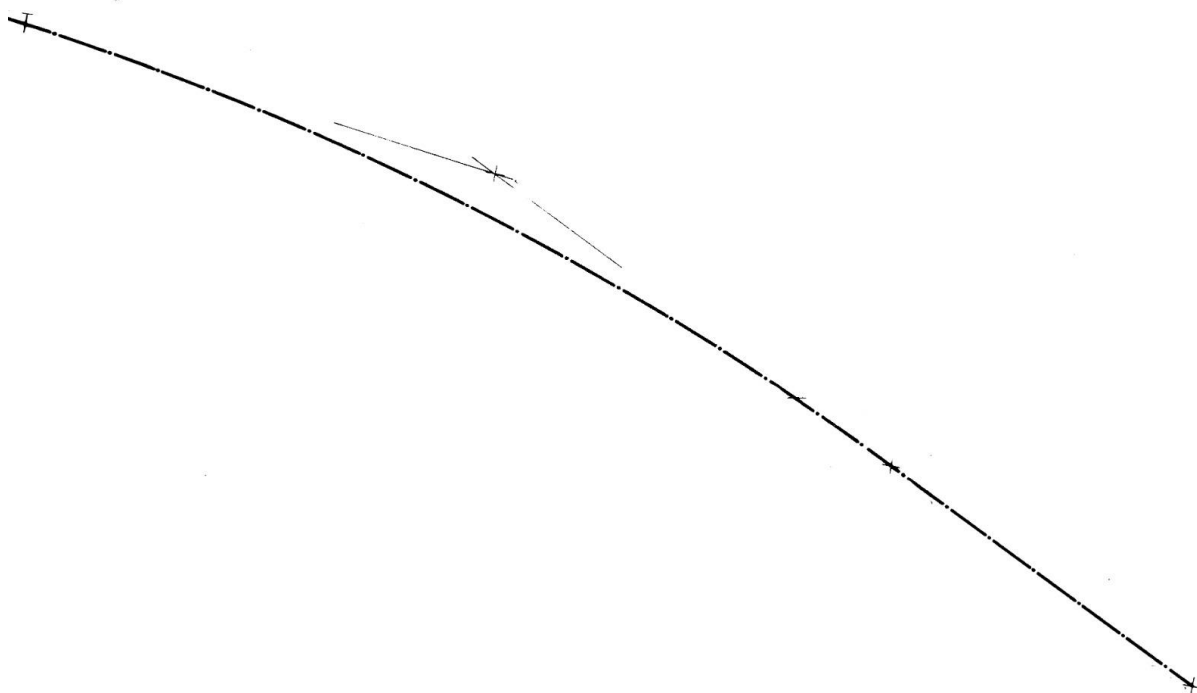


Figura 9.1 - Traçado em planta de uma secção da linha A que inclui o troço 1

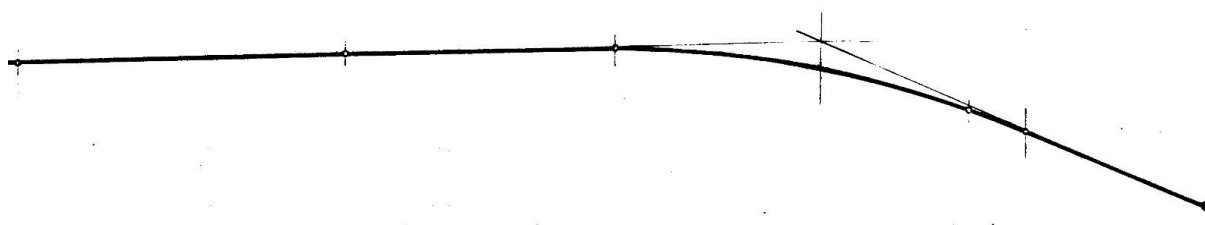


Figura 9.2 - Traçado longitudinal de uma secção da linha A que inclui o troço 1

Na Tabela 9.2 estão compilados todos os dados fornecidos pelo Metropolitano de Lisboa para o troço em análise, os quais servirão de base para a realização deste caso de estudo.

Tabela 9.2 - Dados fornecidos para o cálculo da velocidade, para a linha A, trecho 1

	PK (m)	1 601,396	1 657,833	1 657,833	1 687,396	1 687,396	1 695,633
Traçado em Planta	Alinhamento	Curva Circular	Curva Circular	Curva de Transição	Curva de Transição	Curva de Transição	Curva de Transição
	L (m)	98,732	98,732	37,800	37,8	37,8	37,8
	Raio (m)	401,451	401,451				
	A	-	-	123,186	123,186	123,186	123,186
	D (mm)	65	65				
	Dt (mm)	156,70	156,70				
Traçado Longitudinal	Alinhamento	Curva Circular	Curva Circular	Curva Circular	Curva Circular	Reta	Reta
	Comprimento (m)	86,000	86	86	86	150,590	150,590
	Inclinação (%)	-	-	-	-	-4,000	-4,000
	Raio (m)	2000	2000	2000	2000	-	-
	V _{máx.} Atual (km/h)	60	60	60	60		

9.2 Cálculos da velocidade máxima segundo a norma proposta para o metropolitano

9.2.1 Alinhamento em planta

Para a estimativa da velocidade máxima condicionada pelo traçado em planta foram analisados os elementos de projeto do traçado disponibilizados pelo *ML*, nomeadamente os parâmetros das curvas circulares e as curvas de transição. Foi calculada a velocidade máxima da circulação ao longo do troço com base nos critérios apresentados de seguida.

9.2.1.1 Curva Circular

Para calcular a velocidade máxima neste contexto, será essencial o critério de insuficiência de escala e o critério de aceleração centrífuga não compensada, além claro da escala e o raio da curva circular.

Raio da curva horizontal

Recorrendo à fórmula para o cálculo do raio da curva horizontal da Equação 1:

$$R = \frac{11,8}{D + I} V_{max}^2 \quad [m]$$

Onde:

- limite normal, $I=100$ mm
- limite excecional $I=180$ mm
- $D=65$ mm, dos dados fornecidos
- $R=401,451$ m, dos dados fornecidos

Determina-se, assim, a velocidade máxima para o limite normal:

$$401,451 = \frac{11,8}{65 + 100} V_{max}^2$$

$$V_{max} = 74,92 \text{ Km/h}$$

E para o limite excepcional:

$$V_{max} = 91,30 \text{ Km/h}$$

Insuficiência de escala

A partir da insuficiência de escala da Equação 12, obtemos:

$$a_q = \frac{V_{max}^2}{12,96R} - \frac{g \cdot D}{1500} = \frac{I}{153} \leq (a_q)_{lim} = \frac{I_{lim}}{153} \quad [m/s^2]$$

$$V_{max} = \sqrt{\left(a_q + \frac{D}{153,061}\right) \cdot 12,96 \cdot R}$$

Onde:

- $a_q = 0,07 \cdot g \text{ m/s}^2 = 0,686 \text{ m/s}^2$ é o limite normal da aceleração lateral não compensada no plano da via;
- $a_q = 0,85 \text{ m/s}^2$ é o limite excepcional da aceleração lateral não compensada no plano da via;
- $D = 65 \text{ mm}$;
- $R = 401,451\text{m}$ -

Retira-se então para o limite normal:

$$V_{max} = 76,02 \text{ m/s}^2$$

E para o limite excepcional:

$$V_{max} = 81,44 \text{ Km/h}$$

9.2.1.2 Curva de transição

Para o cálculo da velocidade excepcional em curvas de transição, de tipo clotóide, foram considerados os seguintes critérios condicionantes.

- A variação da escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme (clotóide);
- A variação da insuficiência de escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme;

- Variação da insuficiência de escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme - Variação da aceleração lateral não compensada em função do tempo.

A variação da escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme (clotóide)

Usando a Equação 47:

$$\frac{dD}{dt} = 28.D.\frac{V}{L} \text{ [cm.s}^{-1}\text{]}$$

Onde:

- limite normal $\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} = 3,5 \text{ cm.s}^{-1}$
- limite excecional $\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} = 5,5 \text{ cm.s}^{-1}$
- $D=65 \text{ mm}=6,5\text{cm}$, dos dados fornecidos
- $L=37,800\text{m} = 3780\text{cm}$, dos dados fornecidos

Resulta na velocidade máxima para o limite normal:

$$V_{max} = 72,69 \text{ Km/h}$$

E para o limite excecional:

$$V_{max} = 114,23 \text{ Km/h}$$

Variação da insuficiência de escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme

A partir da Equação 27:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_{max}}{3,6.L} . \Delta I \leq \left(\frac{dI}{dt}\right)_{lim} \text{ [mm/s]}$$

$$V_{max} = \frac{\left(\frac{dI}{dt}\right)_{lim} . 3,6.L}{\Delta I}$$

Onde:

- $L = 37,800\text{m}$;

- Valor limite normal $I = 100\text{mm}$;
- Valor limite excepcional $I = 180\text{mm}$;
- Valor limite normal $\frac{dI}{dt} = 55 \text{ mm/s}$;
- Valor limite excepcional $\frac{dI}{dt} = 100 \text{ mm/s}$.

Resultando para o valor normal:

$$V_{max} = 74,84 \text{ Km/h}$$

E para o valor excepcional:

$$V_{max} = 75,06 \text{ Km/h}$$

Variação da insuficiência de escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme - Variação da aceleração lateral não compensada em função do tempo

Remetendo para a Equação 28:

$$\frac{da_q}{dt} = \frac{V_{max}}{3,6 \cdot L} \cdot \Delta a_q \leq \left(\frac{da_q}{dt} \right)_{lim} \quad [m/s^3]$$

$$V_{max} = \frac{\left(\frac{da_q}{dt} \right) \cdot 3,6 \cdot L}{\Delta a_q}$$

Onde:

- $L = 37,800\text{m}$;
- limite normal: $a_q = 0,07 \cdot g \text{ m/s}^2$;
- limite excepcional: $a_q = 0,85 \text{ m/s}^2$;
- limite normal:

$$\left(\frac{da_q}{dt} \right)_{lim} = 0,25 \text{ m. seg}^{-3}$$

- limite excepcional:

$$\left(\frac{da_q}{dt} \right)_{lim} = 0,59 \text{ m. seg}^{-3}$$

Resultando para o limite normal:

$$V_{max} = 49,59 \text{ Km/h}$$

E para o excepcional:

$$V_{max} = 94,46 \text{ Km/h}$$

9.2.2 Alinhamento vertical

Para o cálculo da velocidade para o traçado em perfil longitudinal foi considerado:

- Critério de raio da curva de concordância vertical;
- Critério de aceleração centrífuga não compensada vertical.

9.2.2.1 Curva circular

Raio de curva vertical

Pela Tabela 8.11, retiram-se a Equação 57 e Equação 58 :

- para limite normal, como os passageiros podem viajar de pé:

$$R_V = 0,77 \cdot V_{max}^2 \quad \text{Equação 57}$$

- para limite excepcional:

$$R_V = 0,25 \cdot V_{max}^2 \quad \text{Equação 58}$$

Onde:

- $R_V = 2000 \text{ m}$

Resultando assim na velocidade máxima:

- para limite normal:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{R_V}{0,77}} = 50,96 \text{ Km/h}$$

- para limite excepcional:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{R_V}{0,25}} = 89,44 \text{ Km/h}$$

Aceleração vertical

Pela expressão apresentada anteriormente na norma proposta para o metropolitano Equação 36:

$$a_v = \frac{V_{max}^2}{12,96 \cdot R_V} \leq (a_v)_{lim} \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$V_{max} = \sqrt{a_v \cdot 12,96 \cdot R_V}$$

Onde:

- $R_V = 2000\text{m}$, dos dados fornecidos
- valor normal $a_v = 0,1 \text{ m/s}^2$
- valor excepcional $a_v = 0,31 \text{ m/s}^2$

Substituindo na expressão anterior, retiramos que para o valor normal:

$$V_{max} = 50,91 \text{ Km/h}$$

E para o valor excepcional:

$$V_{max} = 89,64 \text{ Km/h}$$

9.2.3 Resultados finais para os cálculos segundo a norma proposta para o metropolitano

A Tabela 9.3 apresenta de forma resumida os resultados dos cálculos efetuados da velocidade máxima no traçado em planta para o trecho em estudo, baseados na proposta de norma para o metropolitano elaborada anteriormente.

A velocidade final mais restritiva corresponde ao menor valor entre os calculados.

Ao analisar os resultados obtidos, verifica-se que, na curva circular, o fator mais restritivo para o limite normal é o raio da curva. Enquanto que para o limite excepcional é a aceleração lateral não compensada no plano da via.

Já na curva de transição, a maior restrição no limite normal, ocorre devido à variação da aceleração lateral não compensada em função do tempo. Enquanto que para o limite excepcional é a variação da insuficiência de escala em função do tempo.

Tabela 9.3 - Resultados dos cálculos para limites normais e excepcionais para a velocidade máxima no traçado em planta para a linha A, trecho 1, segundo a norma proposta para metropolitano

	PK (m)	1 601,396	1 657,833	1 657,833	1 687,396	1 687,396	1 695,633
	Alinhamento	Curva Circular	Curva Circular	Curva de Transição	Curva de Transição	Curva de Transição	Curva de Transição
	V max (km/h)						
Curva Circular							
	Limite Normal	74,92	74,92				
	Limite Excecional	91,30	91,30				
Curva Circular							
aq	Limite Normal	76,02	76,02				
	Limite Excecional	81,44	81,44				
Curva Transição							
dI/dt	N			74,84	74,84	74,84	74,84
	Ex			75,60	75,60	75,60	75,60
Curva Transição							
dD/dt	N			72,69	72,69	72,69	72,69
	Ex			114,23	114,23	114,23	114,23
Curva Transição							
daq/dt	N			49,59	49,59	49,59	49,59
	Ex			94,46	94,46	94,46	94,46
Resultado final Traçado em planta (TP)							
	Limite Normal	74,92	74,92	49,59	49,59	49,59	49,59
	Limite Excecional	81,44	81,44	75,60	75,60	75,60	75,60

A Tabela 9.4 apresenta de forma resumida os resultados dos cálculos da velocidade máxima no traçado longitudinal para o trecho em estudo, baseados na proposta de norma para o metropolitano elaborada anteriormente.

A velocidade final mais restritiva corresponde ao menor valor entre os calculados.

No caso do alinhamento reto, a velocidade será a máxima de cálculo.

Ao analisar os resultados obtidos, verifica-se que, para o limite normal, o fator mais restritivo é a aceleração vertical. Já o limite excepcional, a maior restrição ocorre devido ao raio de curva vertical.

A Tabela 9.5 apresenta os resultados finais do cálculo da velocidade máxima para o trecho 1. Estão sintetizados os resultados tanto do traçado em planta quanto do traçado longitudinal, previamente discutidos, culminando na velocidade final para cada trecho.

A velocidade final é determinada pelo valor mais restritivo, ou seja, o menor entre as velocidades calculadas para o traçado em planta e o longitudinal, sendo essa a velocidade condicionante para cada segmento da via.

Por exemplo, no *Pk* 1657,833 m, a velocidade máxima permitida, para o limite normal, pelo traçado em planta é de 49,59 km/h, enquanto que no traçado longitudinal é de 50,91 km/h. Neste caso, o traçado em planta é o fator limitante, resultando numa velocidade máxima de 49,59 km/h para esse *Pk*.

Conclui-se que, apesar de algumas exceções, o traçado em planta é, em geral, o mais restritivo.

Tabela 9.4 - Resultados dos cálculos para limites normais e excepcionais para a velocidade máxima no traçado longitudinal para a linha A, troço 1, segundo a norma proposta para metropolitano

	PK (m)	1 601,396	1 657,833	1 657,833	1 687,396	1 687,396	1 695,633
	Alinhamento	Curva Circular	Curva Circular	Curva Circular	Curva Circular	Reta	Reta
	Vmax (km/h)						
av	Limite Normal	50,91	50,91	50,91	50,91		
	Limite Excecional	89,64	89,64	89,64	89,64		
Rv	N	50,96	50,96	50,96	50,96		
	Ex	89,44	89,44	89,44	89,44		
Resultado final traçado longitu- dinal (TL)							
	Normal	50,91	50,91	50,91	50,91	90,00	90,00
	Excecional	89,44	89,44	89,44	89,44	90,00	90,00

Tabela 9.5 - Resultados finais para a linha A, troço 1, segundo a norma proposta para o metropolitano

Resumo resultados	PK (m)	1 601,396	1 657,833	1 657,833	1 687,396	1 687,396	1 695,633
	Elemento	Troço 1	Troço 1	Troço 1	Troço 1	Troço 1	Troço 1
	Alinhamento Planta	Curva Circular	Curva Circular	Curva Transição	Curva Transição	Curva Transição	Curva Transição
	Alinhamento longitudinal	Curva Circular	Curva Circular	Curva Circular	Curva Circular	Reta	Reta
	A.M.V.	0	0	0	0	0	0
	Traçado em planta (TP)						
	Normal	74,92	74,92	49,59	49,59	49,59	49,59
	Excecional	81,44	81,44	75,60	75,60	75,60	75,60
	Traçado longitudinal (TL)						
	Normal	50,91	50,91	50,91	50,91	90,00	90,00
	Excecional	89,44	89,44	89,44	89,44	90,00	90,00
	Resultado final						
	TP+TL (Normal)	50,91	50,91	49,59	49,59	49,59	49,59
	TP+TL (Excecional)	81,44	81,44	75,60	75,60	75,60	75,60
	Condicionante						
	Limite (Normal)	TL	TL	TP	TP	TP	TP
	Limite (Excecional)	TP	TP	TP	TP	TP	TP

9.3 Cálculos da velocidade máxima segundo a Norma 2007

A seguir, todos os cálculos anteriores serão refeitos, desta vez utilizando a Norma 2007, destacando as principais diferenças em relação às resoluções previamente realizadas.

9.3.1 Alinhamento em planta

9.3.1.1 Curva Circular

Raio da curva horizontal

Recorrendo à fórmula para o cálculo do raio da curva horizontal, que neste caso é a mesma tanto para a norma proposta como na Norma 2007, Equação 1:

$$R = \frac{11,8}{D + I} V_{max}^2 \quad [m]$$

No entanto, a mudança no cálculo será no valor da insuficiência de escala. Que na Norma Metropolitano é de $I=100$ mm.

No entanto, devido às razões previamente expostas, serão utilizados os valores de insuficiência de escala definidos na Norma 2017, em substituição aos da Norma 2007, conforme lembrado na Tabela 9.6 a seguir:

Tabela 9.6 - Insuficiência de escala limite para o caso do *ML*, adaptado Norma 2007

	Limite normal [mm]	Limite excecional [mm]
Comboios convencionais		
$V \leq 220$ km/h	153	180

Onde:

- $D = 65$ mm , dos dados fornecidos;
- $R = 401,451$ m , dos dados fornecidos.

Determina-se, assim, a velocidade máxima normal:

$$V_{max} = 86,12 \text{ Km/h}$$

E a velocidade excecional:

$$V_{max} = 91,3 \text{ Km/h}$$

Insuficiência de escala

A partir da insuficiência de escala, obtemos pela Equação 12:

$$a_q = \frac{V_{max}^2}{12,96R} - \frac{g \cdot D}{1500} = \frac{I}{153} \leq (a_q)_{lim} = \frac{I_{lim}}{153} \quad [m/s^2]$$

$$V_{max} = \sqrt{\left(a_q + \frac{D}{153,061}\right) \cdot 12,96 \cdot R}$$

Onde a maior diferença será o valor de a_q . Que enquanto na Norma Metropolitano é de $0,07 \cdot g \text{ m/s}^2$, nestes cálculos irão ser utilizados os valores da Tabela 9.7, pelas razões anteriormente citadas:

Tabela 9.7 - Valores limite normal e excecional de a_q , adaptados da NP ISO 2631-1 e do Estudio Informativo de la Nueva Red Ferroviaria del País Vasco. Corredor de Acceso y Estación de Bilbao-Abando. Fase B, Anexo 5, para o caso do ML

Limite normal $[m/s^2]$	Limite excecional $[m/s^2]$
0,65	0,85

Onde:

- $D=65 \text{ mm}$;
- $R=401,451 \text{ m}$;

Retira-se então que a velocidade máxima normal:

$$V_{max} = 74,77 \text{ Km/h}$$

E a velocidade máxima excecional:

$$V_{max} = 81,44 \text{ Km/h}$$

9.3.1.2 Curva de transição

A variação da escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme (clotóide)

Utilizando a expressão retirada da Norma 2007, Equação 17 :

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\Delta D \cdot V_{max}}{3,6 \cdot L} \leq \left(\frac{\Delta D}{dt} \right)_{lim} \text{ [mm/s]}$$

Onde:

- D= 65 mm, dos dados fornecidos;
- L= 37,800 m, dos dados fornecidos.

Em vez de usar a Equação 47 utilizada anteriormente da norma do metro:

$$\frac{dD}{dt} = 28 \cdot D \cdot \frac{V}{L} \text{ [cm. s}^{-1}\text{]}$$

No entanto, como anteriormente já explicado, são equivalentes.

A real diferença neste caso, será nas unidades utilizadas e no valor de $\frac{dD}{dt}$ que invés de ser $3,5 \text{ cm. s}^{-1}$ será retirado da Tabela 9.8.

Tabela 9.8 - Valores limite para variação da escala em função do tempo $\frac{Dd}{dt}$, com declive uniforme, para o caso do ML, adaptado Norma 2007

Categorias de tráfego (velocidade em km/h)	I Linhas de tráfego misto $80 \leq V \leq 120$
Limite normal (mm/s)	50
Limite excecional (mm/s)	55

Resultando na velocidade máxima normal de:

$$V_{max} = 104,67 \text{ Km/h}$$

E na velocidade máxima excecional:

$$V_{max} = 115,14 \text{ Km/h}$$

Variação da insuficiência de escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme

Igualmente como feito anteriormente, parte-se da Equação 27:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_{max}}{3,6 \cdot L} \cdot \Delta I \leq \left(\frac{dI}{dt} \right)_{lim} \quad [mm/s]$$

$$V_{max} = \frac{\left(\frac{dI}{dt} \right) \cdot 3,6 \cdot L}{\Delta I}$$

Onde:

- $L = 37,800\text{m}$;
- Valor limite normal $\frac{dI}{dt} = 55 \text{ mm/s}$;
- Valor limite excecional $\frac{dI}{dt} = 100 \text{ mm/s}$;

Aqui a real diferença será no valor da insuficiência de escala, que em vez de 100mm estipulados na Norma Metropolitano, serão os valores já conhecidos da Tabela 9.9:

Tabela 9.9 -Insuficiência de escala limite para o caso do *ML*, adaptado Norma 2017

	Limite normal [mm]	Limite excecional [mm]
Comboios convencionais		
$V \leq 220 \text{ km/h}$	153	180

Resultando para o valor da velocidade máxima normal:

$$V_{max} = 48,92 \text{ Km/h}$$

E para o valor da velocidade máxima excecional:

$$V_{max} = 75,60 \text{ Km/h}$$

Variação da insuficiência de escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme - Variação da aceleração lateral não compensada em função do tempo

Remetendo para a Equação 28:

$$\frac{da_q}{dt} = \frac{V_{max}}{3,6 \cdot L} \cdot \Delta a_q \leq \left(\frac{da_q}{dt} \right)_{lim} \quad [m/s^3]$$

$$V_{max} = \frac{\left(\frac{da_q}{dt} \right) \cdot 3,6 \cdot L}{\Delta a_q}$$

Onde:

- $L = 37,800\text{m}$.

E as principais mudanças serão:

- Valor de a_q que muda de $a_q = 0,07 \cdot g \text{ m/s}^2$ (valor definido na Norma Metropolitano) para $a_{q \text{ limite normal}} = 0,65 \text{ m/s}^2$ e $a_{q \text{ limite excecional}} = 0,85 \text{ m/s}^2$, como já visto anteriormente;

- Para o Metro de Lisboa, segundo a norma, o limite é:

$$\left(\frac{da_q}{dt}\right)_{lim} = 0,25 \text{ m.s}^{-3}$$

Mas segundo a Norma 2007 e o que irá ser utilizado de seguida serão os valores deduzidos anteriormente da Tabela 8.7:

- limite normal de $\frac{da_q}{dt} = 0,36 \text{ m/s}^3$
- limite excecional de $\frac{da_q}{dt} = 0,59 \text{ m/s}^3$

Resultando então na velocidade máxima normal de:

$$V_{max} = 75,37 \text{ Km/h}$$

E na velocidade máxima excecional de:

$$V_{max} = 94,46 \text{ Km/h}$$

9.3.2 Alinhamento vertical

9.3.2.1 Curva circular

Raio de curva vertical

Utilizando a Norma 2007, resulta num processo completamente idêntico aos cálculos com a norma proposta anteriormente feitos.

Pela Tabela 6.34 , para categoria de tráfego I, retiram-se as expressões :

- para limite normal, como os passageiros podem viajar de pé remete para a Equação 57:

$$R_V = 0,77 \cdot V_{max}^2$$

- para limite excecional, Equação 58:

$$R_V = 0,25 \cdot V_{max}^2$$

Onde:

- $R_V = 2000 \text{ m}$

Resultando assim na velocidade máxima:

- para limite normal:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{R_V}{0,77}} = 50,96 \text{ Km/h}$$

- para limite excepcional:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{R_V}{0,25}} = 89,44 \text{ Km/h}$$

Aceleração vertical

Utilizando a Norma 2007, resulta num processo completamente idêntico aos cálculos com a norma proposta anteriormente feitos.

Pela Equação 36 apresentada anteriormente na norma proposta para o metropolitano:

$$a_V = \frac{V_{max}^2}{12,96 \cdot R_V} \leq (a_V)_{lim} \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$V_{max} = \sqrt{a_V \cdot 12,96 \cdot R_V}$$

Onde:

- $R_V = 2000\text{m}$, dos dados fornecidos;

da Tabela 6.39, para trafego tipo I , retirou-se:

-valor normal $a_v = 0,1 \text{ m/s}^2$, porque os passageiros no metropolitano podem ir de pé;

- valor excepcional $a_v = 0,31 \text{ m/s}^2$

Substituindo na expressão anterior, retiramos que para o valor normal:

$$V_{max} = 50,91 \text{ Km/h}$$

E para o valor excepcional:

$$V_{max} = 89,64 \text{ Km/h}$$

9.3.3 Resultados finais para os cálculos segundo a Norma 2007

A Tabela 9.10 apresenta de forma resumida os resultados dos cálculos efetuados da velocidade máxima no traçado em planta para o trecho em estudo, baseados na Norma 2007.

A velocidade final mais restritiva corresponde ao menor valor entre os calculados.

Pode-se determinar que para a curva circular o parâmetro mais restritivo será a aceleração lateral não compensada no plano da via. Enquanto que para a curva de transição o mais restritivo será a variação da insuficiência de escala em função do tempo.

Tabela 9.10 - Resultados dos cálculos para limites normais e excepcionais para a velocidade máxima no traçado em planta para a linha A, trecho 1, segundo a Norma 2007

	PK (m)	1 601,396	1 657,833	1 657,833	1 687,396	1 687,396	1 695,633
	Alinhamento	Curva Circular	Curva Circular	Curva de Transição	Curva de Transição	Curva de Transição	Curva de Transição
	V max (km/h)						
Curva Circular							
	Limite Normal	86,12	86,12				
	Limite Excecional	91,30	91,30				
Curva Circular							
aq	Limite Normal	74,77	74,77				
	Limite Excecional	81,44	81,44				
Curva Transição							
dI/dt	N			48,92	48,92	48,92	48,92
	Ex			75,60	75,60	75,60	75,60
Curva Transição							
dD/dt	N			104,68	104,68	104,68	104,68
	Ex			115,14	115,14	115,14	115,14
CT							
daq/dt	N			75,37	75,37	75,37	75,37
	Ex			94,46	94,46	94,46	94,46
Resultado final Traçado em planta (TP)							
	Limite Normal	74,77	74,77	48,92	48,92	48,92	48,92
	Limite Excecional	81,44	81,44	75,60	75,60	75,60	75,60

A Tabela 9.11 apresenta de forma resumida os resultados dos cálculos da velocidade máxima no traçado longitudinal para o troço em estudo, baseados na Norma 2007.

A velocidade final mais restritiva corresponde ao menor valor entre os calculados.

No caso do alinhamento reto, a velocidade será a máxima de cálculo.

Ao analisar os resultados obtidos, verifica-se que, para o limite normal, o fator mais restritivo é a aceleração vertical. Já o limite excepcional, a maior restrição ocorre devido ao raio de curva vertical.

A Tabela 9.12 apresenta os resultados finais do cálculo da velocidade máxima para o troço 1. Estão sintetizados os resultados tanto do traçado em planta quanto do traçado longitudinal, previamente discutidos, culminando na velocidade final para cada trecho.

A velocidade final é determinada pelo valor mais restritivo, ou seja, o menor entre as velocidades calculadas para o traçado em planta e o longitudinal, sendo essa a velocidade condicionante para cada segmento da via.

Por exemplo, no *Pk* 1657,833 m, a velocidade máxima normal permitida pelo traçado em planta é de 74,77 km/h, enquanto que no traçado longitudinal é de 50,91 km/h. Neste caso, o traçado longitudinal é o fator limitante, resultando numa velocidade máxima de 50,91 km/h para esse *Pk*.

À semelhança dos cálculos anteriores, conclui-se que, embora existam algumas exceções, o traçado em planta é, de modo geral, o mais limitante.

Tabela 9.11 - Resultados dos cálculos para limites normais e excepcionais para a velocidade máxima no traçado longitudinal para a linha A, troço 1, segundo a Norma 2007

	PK (m)	1 601,396	1 657,833	1 657,833	1 687,396	1 687,396	1 695,633
	Alinhamento	Curva Circular	Curva Circular	Curva Circular	Curva Circular	Reta	Reta
	Vmax (km/h)						
av	Limite Normal	50,91	50,91	50,91	50,91		
	Limite Excecional	89,64	89,64	89,64	89,64		
Rv	N	50,96	50,96	50,96	50,96		
	Ex	89,44	89,44	89,44	89,44		
Resultado final traçado longitu- dinal (TL)							
	Normal	50,91	50,91	50,91	50,91	90,00	90,00
	Excecional	89,44	89,44	89,44	89,44	90,00	90,00

Tabela 9.12 - Resultados finais para a linha A, troço 1, segundo a Norma 2007

Resumo resultados	PK (m)	1 601,396	1 657,833	1 657,833	1 687,396	1 687,396	1 695,633
	Elemento	Troço 1	Troço 1	Troço 1	Troço 1	Troço 1	Troço 1
	Alinhamento Planta	Curva Circular	Curva Circular	Curva Transição	Curva Transição	Curva Transição	Curva Transição
	Alinhamento longitudinal	Curva Circular	Curva Circular	Curva Circular	Curva Circular	Reta	Reta
	A.M.V.	0	0	0	0	0	0
	Traçado em planta (TP)						
	Normal	74,77	74,77	48,92	48,92	48,92	48,92
	Excecional	81,44	81,44	75,60	75,60	75,60	75,60
	Traçado longitudinal (TL)						
	Normal	50,91	50,91	50,91	50,91	90,00	90,00
	Excecional	89,44	89,44	89,44	89,44	90,00	90,00
	Resultado final						
	TP+TL (Normal)	50,91	50,91	48,92	48,92	48,92	48,92
	TP+TL (Excecional)	81,44	81,44	75,60	75,60	75,60	75,60
	Condicionante						
	Limite (Normal)	TL	TL	TP	TP	TP	TP
	Limite (Excecional)	TP	TP	TP	TP	TP	TP

9.4 Comparações finais dos cálculos baseados nas diferentes normas

A Figura 9.3 compara os valores normais e excecionais da velocidade máxima final dos cálculos anteriormente feitos, pela norma proposta para o metropolitano e pela Norma 2007.

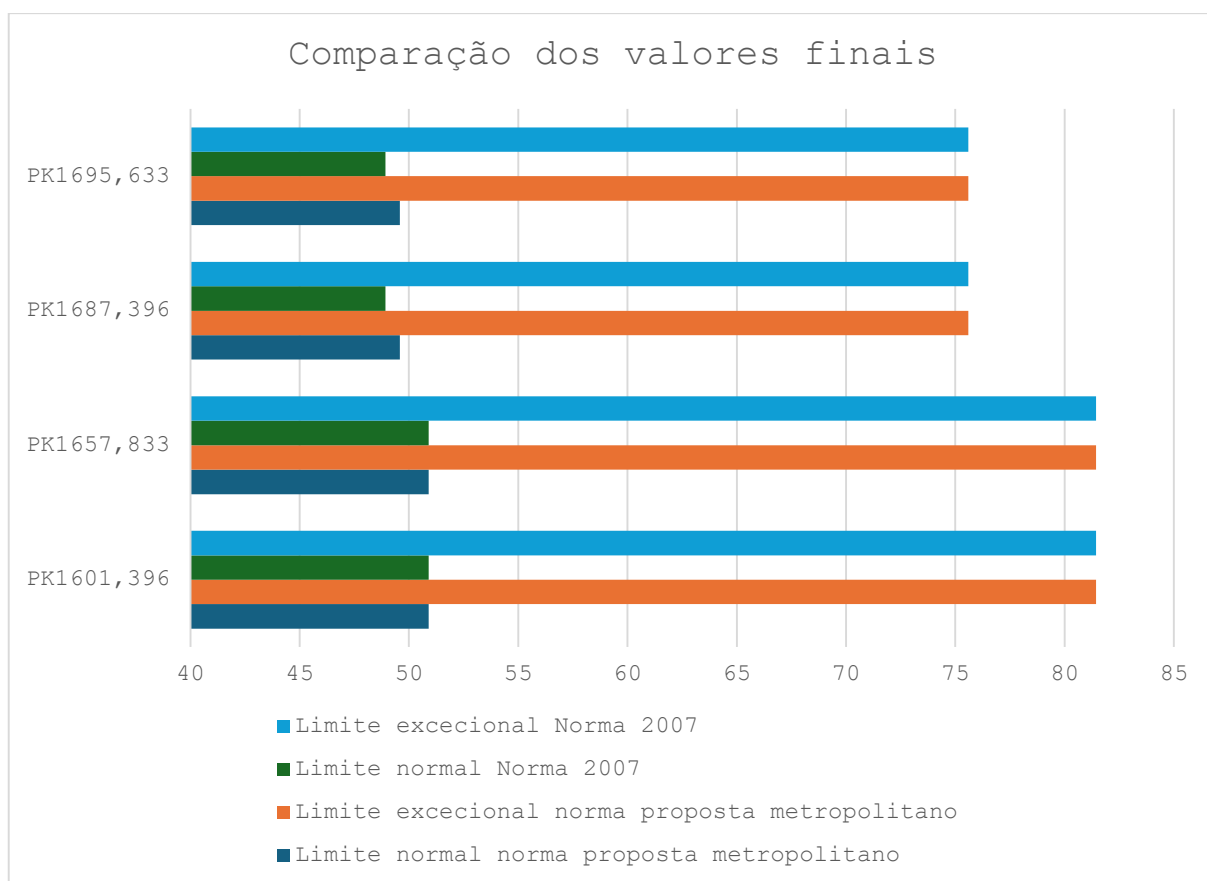


Figura 9.3 - Comparação dos limites normal e excecional da velocidade segundo a norma proposta para o metropolitano e a Norma 2007

Pode-se verificar claramente que os valores da norma proposta para o metropolitano são semelhantes ou iguais aos valores da Norma 2007.

Esse facto deve-se, em grande parte, à ausência de uma distinção entre limite normal e limite excecional, havendo apenas o valor estabelecido pelo Metropolitano de Lisboa. No entanto, essa restrição é mitigada na proposta de norma, uma vez que, além de apresentar o valor definido pelo Metropolitano de Lisboa, também complementa com os limites excecionais da Norma 2007, ou de outra referência.

Na maioria dos casos verifica-se que o traçado em planta é que condiciona a velocidade máxima. Mais especificamente a curva de transição, na variação da insuficiência de escala em função do tempo, para variações de escala com declive uniforme, sendo um fator ligado ao conforto.

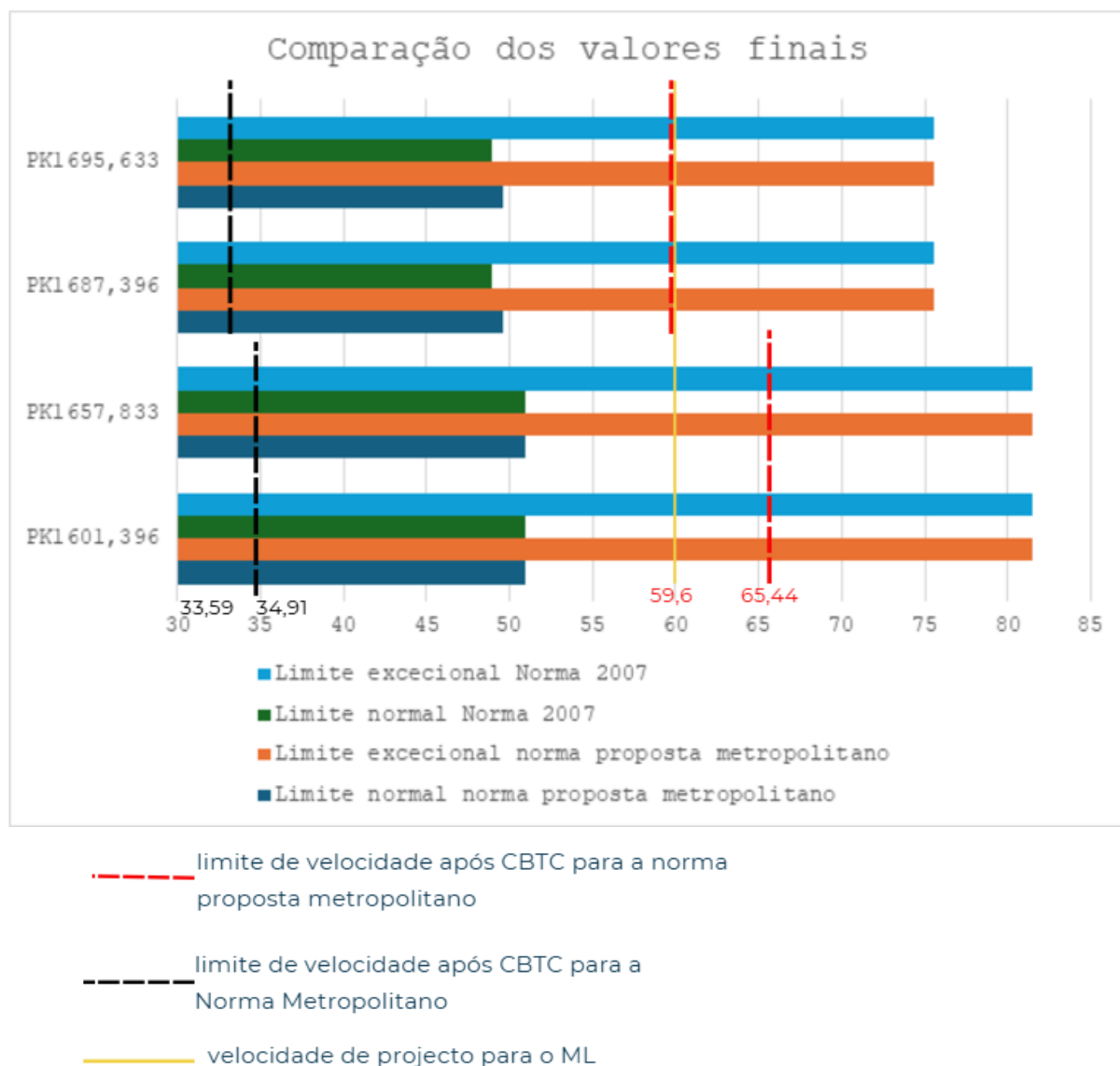


Figura 9.4 Comparação das velocidades no ML antes e após a instalação do sistema CBTC para a norma proposta metropolitano e para a Norma Metropolitano

Como já mencionado, para implementar o sistema *CBTC* com segurança, o *ML* precisará reduzir a velocidade em 16 km/h.

Na Figura 9.4, verifica-se que, ao manter a Norma Metropolitano, que não contempla limites de velocidade excepcionais, seria necessário reduzir, por exemplo, a velocidade na curva

circular de 50,91 km/h para 34,91 km/h. Tal redução representaria uma diminuição significativa no serviço atualmente oferecido, sendo, portanto, uma solução a evitar.

Por outro lado, ao adotar os limites excepcionais propostos na norma proposta para o metropolitano, a redução seria menos impactante. No caso da curva circular, por exemplo, a velocidade seria ajustada de 81,44 km/h para 65,44 km/h, permitindo ao ML manter sua velocidade de projeto de 60 km/h com segurança.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

As diferenças entre vias-férreas convencionais e vias-férreas de metropolitano podem facilmente passar despercebidas, especialmente considerando que muitas normas nacionais e internacionais não estabelecem uma distinção clara entre elas. No entanto, as vias-férreas de metropolitano possuem necessidades específicas e, através deste estudo das normas disponíveis, incluindo suas semelhanças, correspondências e reais diferenças, foi possível destacar essas particularidades.

A Norma Metropolitano é a única especificamente voltada para o metropolitano analisada neste estudo, motivo pelo qual serviu como base de comparação de todos os parâmetros, além de orientar a elaboração de uma nova proposta de norma para este sistema de transporte. Foi crucial compreender como as suas expressões e valores se correlacionavam com as demais normas e identificar as suas possíveis origens. O objetivo foi ancorá-la nas normas europeias, mesmo apresentando valores específicos para o metropolitano, permitindo atualizações e a uniformização da nomenclatura, facilitando a interpretação e a aplicação prática dessas normas.

As solicitações contemporâneas, com o aumento no número de passageiros e a necessidade de deslocamento em áreas urbanas densamente povoadas, somadas ao facto de muitas linhas férreas terem sido construídas há várias décadas com critérios desatualizados exigem modernizações e incrementos na velocidade de operação. Através do estudo das normas e do caso de estudo analisado, foi possível identificar os parâmetros necessários para calcular a velocidade máxima de circulação e quais os fatores mais restritivos para a mesma.

Os resultados indicam que, na maioria dos casos, o traçado em planta é o principal limitador da velocidade, especialmente no que se refere à curva de transição, devido à variação da insuficiência de escala em função do tempo para variações de escala com declive uniforme.

Como observado nos resultados, a velocidade excepcional da norma proposta metropolitana será superior à atual. Mesmo com a redução de 16 km/h necessária do *CBTC*, o *ML* poderá manter a velocidade de projeto de 60 km.

No entanto é fundamental referir que a estimativa da velocidade de circulação efetuada foi realizada com base nos dados de projeto, e não na condição real da via. Por isso é necessário fazer um levantamento da geometria da via e avaliar a velocidade de circulação em função da condição real da via, que deverá ser mantida por forma a garantir a boa circulação do tráfego ao longo da sua vida útil.

Como observado as normas ferroviárias embora semelhantes têm diferenças em relação às exigências particulares do metropolitano, sendo útil e desejável existir futuramente uma norma de traçado do metropolitano a nível Europeu.

Também será importante referir que uma via betonada poderá não necessitar de valores tão restritivos de segurança, devido à sua constituição, como uma via balastrada que foi a via contemplada neste estudo. Futuramente será interessante estudar especificamente essa diferença.

Como solução futura para o aumento da velocidade de circulação a ampliação da escala da via surge como uma alternativa viável. Contudo, restrições relacionadas ao gabarito do material circulante não foram consideradas neste estudo, sendo fundamental contemplá-las em análises futuras para garantir a viabilidade dessa solução.

Com base no estudo e nos resultados obtidos ao longo deste trabalho, foi igualmente desenvolvida uma versão integral revista da Norma do Metropolitano de Lisboa. Devido a questões de confidencialidade esta versão não será anexada à presente dissertação, mas será encaminhada ao Metropolitano de Lisboa para análise e avaliação.

BIBLIOGRAFIA

- Construção, A. R. (s.d.). Obtido em 1 de Agosto de 2024, de <https://www.alvesribeiro.pt/portfolio/metropolitano-de-lisboa/7>
- EN13803-1:2017. (2017). *Railway applications - Track - Track alignment design parameters - Track gauges 1435mm and wider*. European Committee for Standardization (CEN).
- Encyclopaedia Britannica. (s.d.). *Richard Trevithick*. Obtido em 31 de julho de 2024, de Encyclopaedia Britannica: <https://britannica.com/biography/Richard-Trevithick>
- Estudio Informativo de la Nueva Red Ferroviaria del País Vasco. Corredor de Acceso y Estación de Bilbao-Abando. Fase B, ANEJO 5*. (2019).
- Esvel, C. (2001). *Modern Railway Track*. MRT productions.
- European Union Agency for Railways. (s.d.). *European Rail Traffic Management System*. Obtido em 6 de agosto de 2024, de https://www.era.europa.eu/domains/infrastructure/european-rail-traffic-management-system-ertms_en#:~:text=ERTMS%20comprises%20of%20the%20European%20Train,for%20Railways%20%28GSM-R%29%20and%20operating%20rules.&text=ERTMS%20comprises%20of%20the,%28GSM-R%29
- Fergrupo. (s.d.). Obtido em Agosto de 2024, de <https://www.fergrupo.pt/projectos/principais-obras-realizadas/substituicao-de-via-balastrada-por-via>
- Fontul, S. (2024). *Slides das aulas da disciplina Infraestruturas Rodoviárias e Ferroviárias*. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa.
- Fowkes, A., & Balcombe, R. (1998). The Impact of Transport Telematics on the Provision of Public Transport Services. *Journal of Transport Economics and Policy*, 203-219.
- Garrison, W. L., & Levinson, D. M. (2005). *The Transportation Experience: Policy, Planning and Deployment*. Oxford University Press.
- Hay, W. W. (1982). *An Introduction to Transportation Engineering*. John Wiley & Sons.
- Infraestruturas, S. (s.d.). Obtido em Agosto de 2024, de <https://www.sacyrinfraestructuras.com/pt/metropolitano-de-lisboa-sao-sebastiao-alameda>

- Infraestruturas-de-Portugal. (s.d.). *Terminologia*. Obtido em 31 de Julho de 2024, de <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/terminologia?letter=A>
- Infraestruturas-de-Portugal. (s.d.). *Terminologia*. Obtido em 31 de Julho de 2024, de <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/terminologia?letter=A>
- IP, S.A. IT. VIA. 018. (2009). *Tolerância dos parâmetros geométricos da via*. Infraestruturas de Portugal.
- Lisboa, M. d. (s.d.). *Galeria*. Obtido em Agosto de 2024, de Metropolitano de Lisboa: <https://www.metrolisboa.pt/institucional/comunicar/galeria/>
- London Transport Museum. (s.d.). *A very short history of the Underground*. Obtido em 2024 de julho de 31, de <https://www.ltmuseum.co.uk/collections/stories/transport/very-short-history-underground>
- Marques, J. M. (2013). *Construção e manutenção de infraestruturas ferroviárias. Via em laje*. Lisboa: Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa.
- Mato, I. M. (2023). *Análise da evolução a longo-prazo sobre diferentes tipos de defeitos de geometria de vias-férreas*. Lisboa: Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa.
- Metropolitano de Lisboa. (s.d.). *Conhecer - História do Metro*. Obtido em 1 de Agosto de 2024, de metrolisboa: <https://www.metrolisboa.pt/institucional/conhecer/historia-do-metro/>
- Metropolitano de Lisboa. (s.d.). *História do metro*. Obtido em 31 de julho de 2024, de <https://www.metrolisboa.pt/institucional/conhecer/historia-do-metro/>
- Metropolitano de Lisboa. (s.d.). *Normas para o Projecto de Traçado das Vias*. Lisboa: Metropolitano de Lisboa.
- NPENV13803-1:2007. (2007). *Aplicações ferroviárias. Parâmetros de projecto de traçado de via- Bitolas de via de 1435mm e de valor superior. Parte 1:Plena via*. Comité Europeu de Normalização (CEN).
- NP-ISO-2631-1. (1997). *Vibrações Mecânicas e choque - Avaliação da exposição do corpo inteiro a vibrações*. European Committee for Standardization (CEN).
- Paixão, A., & Fortunato, E. (2009). *Novas soluções superestrutura de via para alta velocidade ferroviária*. LNEC.
- Pinto, E. A. (1966). *Bases Técnicas dos Traçados do Metropolitano de Lisboa*. Lisboa: Metropolitano de Lisboa S.A.R.L.
- Pires, D. A. (2018). *Reabilitação de infraestruturas ferroviárias. Aplicação de geogrelhas na camada de balastro*. Lisboa: Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologias Universidade Nova de Lisboa.

- RAIL.ONE . (2007a). *GETRAC The ballastless track system on asphalt*. Neumarkt: RAIL.ONE GmbH Pflleiderer track systems.
- Silva, T. S. (2012). *Inspecção e Reabilitação de Infraestruturas Ferroviárias*. Lisboa: Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa.
- Somafel. (s.d.). Obtido em Agosto de 2024, de <https://somafel.com/projetos/espansao-da-rede-do-metropolitano-de-lisboa/>
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (2005). *IEEE Std 1474.1™-2004: IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements*. New York, NY: IEEE.
- Transportation Research Board. (2004). *Transit Capacity and Quality of Service Manual (3.^a ed.)*. Washington, D.C.: National Academy of Sciences. doi:10.17226/24766
- Vuchic, V. R. (2007). *Urban Transit Systems and Technology*. John Wiley & Sons.
- WITF, Inc. (s.d.). *Illustration with cross-sections of different types of rails*. Obtido em 31 de julho de 2024, de <https://explorepahistory.com/displayimage.php?imgId=1-2-5F4>

ANEXO

Como apresentado nas conclusões do capítulo 6, de seguida apresenta-se a tabela que apresenta uma relação simplificada dos conceitos, comparando as diferentes normas.

Como já foi referido uma das principais dificuldades no estudo e aplicação das normas reside nas diferentes definições atribuídas a conceitos iguais entre elas.

A tabela inicia com a Norma 2007, identificando a designação de cada parâmetro e o seu respetivo símbolo, além das unidades utilizadas. Em seguida, são comparados os mesmos parâmetros na Norma 2017, verificando se os nomes, símbolos e unidades coincidem. Finalmente, a Norma Metropolitano é igualmente analisada.

Essa tabela foi elaborada para facilitar a consulta e interpretação das normas, proporcionando uma visão mais clara das correspondências e diferenças entre elas.

DESIGNAÇÃO	NP 13803-1 2007	UNIDADES	NP 13803-1 2017	UNIDADES	outra designação	Norma Metropolitano	UNIDADES	outra designação
aceleração lateral não compensada no plano da via	a_q	m/s ²	-	-	-	a_r	m/s ²	aceleração centrífuga residual (não compensada)
variação da aceleração lateral não compensada em função do tempo	da_q/dt	m/s ³	-	-	-	ψ	m.s ⁻³	coeficiente de conforto (variação de aceleração centrífuga com o tempo)
aceleração quasi-estática paralela ao pavimento do veículo	a_i	m/s ²	-	-	-	-	-	-
variação da aceleração lateral quasi-estática paralela ao pavimento do veículo em função do tempo	da_i/dt	m/s ³	-	-	-	-	-	-
aceleração vertical quasi-estática em curva vertical	a_v	m/s ²	-	-	-	-	-	-
escala (real ou prática)	D	mm	D	mm	cant	d_r	mm	escala real da via
limite de escala	D_l	mm	D_{lim}	mm	limits for cant	-	-	-
variação da escala em função do tempo	dD/dt	mm/s	dD/dt	mm/s	Rate of change of cant	χ	cm/s	coeficiente de conforto (variação de escala com o tempo)
variação da escala em função do comprimento	dD/dl	mm/m	dD/ds	mm/m	Cant gradient	p	mm/m	valor da progressividade da escala - disfarce da escala
excesso de escala	E	mm	E	mm	cant excess	-	-	-
insuficiência de escala	I	mm	I	mm	cant deficiency	δ_d ;d	mm	deficiência de escala
variação da insuficiência de escala em função do tempo	dl/dt	mm/s	dl/dt	mm/s	rate of change of cant deficiency	-	-	-
comprimento da curva de transição no plano horizontal ou da variação de escala	L	m	ΔI , Lc, Ls	mm, m , m.h/Km	abrupt change of horizontal curvature	-	-	-
comprimento dos elementos do traçado (curvas circulares e alinhamentos rectos)	L_i	m	L_i	m	length of constant cant between two linear cant transitions	-	-	-
raio de curva horizontal	R	m	R	m	radius of horizontal curve	R	m	raio mínimo de curvatura
raio de curva vertical	R_v	m	R_v	m	vertical radius	Ro	m	raio de curva no vértice
tempo	t	s	t	s	time	-	-	-
velocidade da linha	V	Km/h	V	Km/h	speed	V	Km/h	velocidade de circulação
velocidade máxima em curva dos comboios rápidos	$V_{m\acute{a}x}$	Km/h	$V_{m\acute{a}x}$	Km/h	maximum speed	-	-	-
velocidade mínima em curva dos comboios lentos	V_{min}	Km/h	V_{min}	Km/h	minimum speed	-	-	-
aceleração da gravidade - 9,81 m/s2	g	m/s ²	g	m/s ²	acceleration due to gravity	g	m/s ²	aceleração da gravidade
valor limite (índice)	lim	-	lim	-	general limit (index)	-	-	-
variação total da aceleração lateral não compensada ao longo do comprimento total da curva de transição	Δa_q	m/s ²	-	-	-	-	-	-
variação total da insuficiência de escala ao longo de uma curva de transição, entre um alinhamento recto e uma curva circular ou entre duas curvas adjacentes de raios diferentes	ΔI	mm	ΔI	mm	variação instantânea da deficiência de escala ou abrupt change of cant deficiency	$\delta(\Delta d)$	mm	diferença de deficiência de escala das curvas adjacentes
variação total da escala ao longo de uma curva de transição, entre um alinhamento recto e uma curva circular ou entre duas curvas adjacentes de raios diferentes	ΔD	mm	ΔD	mm	change of cant	$\delta(dr)$	mm	diferença de escala real
-	-	-	D_{EQ}	mm	equilibrium cant (escala de projecto = equilibrio = teorica)	-	-	-
-	-	-	Δp	mm/m	abrupt change of track gradient ou variação instantânea de inclinações	-	-	-
-	-	-	p		inclinações de traineis ou track gradient	-	-	-
-	-	-	$L_{g,lim}$	m	Limites inferiores para comprimentos de inclinações de traineis ou lower limits for lengths of constant track gradients	-	-	-

Tabela 0.1 - Tabela comparativa dos termos das diferentes normas



2024

JOANA TEIXEIRA

AVAIACÃO DAS CONDIÇÕES DE CIRCUIACÃO DO METROPOIITANO