FELIPE RABAY LUCAS

Influência do uso de trens de caixa móvel na implantação e operação de novas ferrovias

São Paulo

2014

FELIPE RABAY LUCAS

Influência do uso de trens de caixa móvel na implantação e operação de novas ferrovias

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

São Paulo

2014

FELIPE RABAY LUCAS

Influência do uso de trens de caixa móvel na implantação e operação de novas ferrovias

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Felipe Issa Kabbach Junior

São Paulo
2014

Catalogação-na-publicação

Lucas, Felipe Rabay
Influência do uso de trens de caixa móvel na implantação e operações de novas ferrovias / F.R. Lucas. -- São Paulo, 2014.
293 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Ferrovias 2.Material rodante I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Dedico este trabalho à minha namorada Cristina, à minha família, aos meus amigos e aos meus colegas de profissão.

E o dedico também a todos aqueles que constroem todos os dias, sejam coisas materiais ou não.

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que compartilham do fascínio pelo conhecimento, da vontade de mudar o mundo e do interesse em melhorar a vida das pessoas, seja por qualquer meio.

Ao Eng. Marcelo Missato, ao Eng. Ruy Grieco, ao Eng. Luis Russo e outros colegas profissionais, pelas informações e materiais transmitidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao Eng. Alberto dos Santos e ao Eng. Fabio Troccoli, coordenadores respectivamente dos departamentos de ferrovias e geometria na Planservi Engenharia, pelos ensinamentos e suporte durante a realização desta dissertação.

À diretoria da Planservi Engenharia e à empresa como um todo, pelo suporte fornecido durante toda minha pós-graduação e por todo o aprendizado obtido nos últimos seis anos.

Aos meus caros colegas das equipes de geometria e ferrovias, Lina, Bruno, Deryon e tantos outros que por elas passaram, pelo trabalho conjunto, pelas conversas interessantes e pelos momentos de descontração.

À Escola Politécnica da USP e seus professores, pelos ensinamentos transmitidos, pelo suporte e pelo material fornecido por meio de sua infraestrutura.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe Issa Kabbach Jr., pela paciência, ajuda, informações transmitidas e principalmente pelas conversas muito interessantes acerca da engenharia ferroviária.

Aos meus sogros e cunhada, por terem me acolhido com carinho em suas famílias, pelos incentivos e pela boa estima, que certamente é recíproca.

Aos meus caros amigos, João, Thomás, Danilo, Leonardo, Patrícia e a tantos outros que vejo com menor frequência, mas não com menor apreço, agradeço pela paciência e compreensão nesse período de maior ausência, assim como pela valorosa amizade e pelos inúmeros momentos de descontração.

Ao meu irmão, Eng. Leandro, pela honra e pelo exemplo de perseverança. À minha avó, Mafalda, por todo o carinho e dedicação empregados durante minha vida.

Ao meu pai, Eng. José, por toda a proteção, pelos ensinamentos e por desde minha infância ter compartilhado de seu apreço pela engenharia e pelos trens, que culminou em que eu seguisse este caminho profissionalmente.

À minha mãe, Mirian, pela imensurável dedicação, carinho e incentivos em toda a minha criação e na minha educação, sem os quais certamente eu não teria podido atingir meus objetivos de vida. Grande parte deste trabalho é graças a você.

E finalmente, à minha companheira, amiga, colega profissional e namorada, Cristina, por todo o amor, carinho, apoio, compreensão, paciência, entusiasmo e incentivos dados ao longo dessa jornada nos últimos dois anos. Assim como só há a ferrovia com um trilho e o outro lado a lado, só há sentido para este trabalho conosco também assim, lado a lado.

A voz do intelecto é suave, mas não descansa enquanto não consegue uma audiência. Finalmente, após uma incontável sucessão de reveses, obtém êxito. Esse é um dos poucos pontos sobre o qual se pode ser otimista a respeito do futuro da humanidade.

Sigmund Freud

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo primário abordar os atuais conhecimentos sobre o transporte ferroviário interurbano e regional de passageiros, com foco na tecnologia dos trens de caixa móvel, também conhecidos como trens pendulares. Como objetivo secundário busca-se analisar a influência dos trens de caixa móvel ou pendulares na implantação e operação de novas ferrovias, com ênfase na adequação em fase de projeto, mostrando-se o potencial dessa tecnologia para o aumento da velocidade média e a redução dos tempos de viagem. São tratados os tópicos relevantes para o transporte ferroviário de passageiros, como o conforto do usuário, as especificações técnicas do material rodante e referências dos custos de implantação e operação envolvidos, mostrando-se também dentro de cada aspecto as diferenças dos trens pendulares em relação aos trens convencionais. Três estudos de caso elaborados terão como objetivo explicitar as interveniências da operação dos trens pendulares com o projeto ferroviário, em especial com o projeto geométrico, e através de simulações de marcha e comparações, mostrar de maneira prática o potencial do uso dos trens pendulares. Através do embasamento teórico e dos estudos de caso, é feita uma análise crítica de modo a possibilitar tanto um entendimento do transporte ferroviário de passageiros, quanto do material rodante de caixa móvel e suas possibilidades. Os resultados dos estudos de caso e a análise crítica mostram uma redução significativa dos tempos de viagem, entre 8,1 e 20,0%, mediante a operação de trens pendulares em substituição ao material rodante convencional.

Palavras-Chave: Projeto geométrico de ferrovias. Trem de passageiros. Trem regional. Trem pendular. Trem de caixa móvel.

ABSTRACT

As a primary objective, the present work aims to summarize the current knowledge on intercity and regional passenger railway transportation, focusing on tilting train technology, also known as car body tilt. As a secondary objective, the present work seeks to analyze the influence of tilting train technology on the design, implementation and operation of new railway corridors, with emphasis on design phase, showing the potential of this technology to increase speeds and reduce travel times. Railway passenger transportation issues, such as passenger comfort, rolling stock technical specifications and implementation and operational costs are addressed. Additionally, different aspects between conventional and tilting trains are also discussed. Three case studies help clarify the correlation between tilting train operation and railway design, especially the geometric design; further, with the help of speed simulations and comparisons, the potential use of tilting train operations are demonstrated. With the theoretical basis and the case studies, a critical analysis is made, allowing as a better understanding of railway passenger transportation with regards to the use of tilting rolling stock and its possibilities. The results of the case studies and the critical analysis present a considerable reduction in travel times, between 8,1 and 20,0%, with the operation of tilting trains in the place of the conventional rolling stock.

Keywords: Railway geometric design. Passenger train. Regional train. Tilting train. Car body tilt.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
ABIFER	Associação Brasileira da Indústria Ferroviária
AEIF	*Association Européenne pour l'Interopérabilité Ferroviaire* - Associação Europeia para a Interoperabilidade Ferroviária
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
APT	*Advanced Passenger Train*
ASTER	*Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer*
CEN	*Comité Européen de Normalisation* - Comitê Europeu de Normalização
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
DB	*Deutsche Bahn* - Ferrovia estatal alemã
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo
DMU	*Diesel Multiple Unit* - Unidade Múltipla Diesel
ETR	*Elettrotreni Rapidi*
FACT	*Fast And Comfortable Trains*
GDEM	*Global Digital Elevation Model* - Modelo Digital Global de Elevações
MDT	Modelo Digital do Terreno
RD	*Ruedas Desplazables* - Rodas deslocáveis
RMS	Região Metropolitana de Sorocaba
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SNCF	*Société Nationale des Chemins de fer Français*
TAV	Trem de Alta Velocidade
TGV	*Train à Grande Vitesse* - Trem de Alta Velocidade (francês)
TPU	Tabela de Preços Unitários
TSI	*Technical Specification of Interoperability* - Especificação Técnica de Interoperabilidade
UIC	*Union Internationale des Chemins de Fer - International Union of Railways*
VFRGS	Viação Férrea do Rio Grande do Sul

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1 – Equilíbrio do veículo em curva horizontal (AASHTO, 2004) 48

Equação 4.2 – Raio mínimo de curva horizontal numa rodovia (AASHTO, 2004) 48

Equação 4.3 – Superelevação d segundo o critério do conforto (PORTO e KABBACH JUNIOR, 2002) 53

Equação 4.4 – Aceleração lateral não compensada no plano do passageiro – Bitola normal (SCHRAMM, 1974) 55

Equação 4.5 – Superelevação teórica (SCHRAMM, 1974) 55

Equação 4.6 – Raio mínimo da curva horizontal – Insuficiência de superelevação I (CEN, 2010) 57

Equação 4.7 – Raio máximo da curva horizontal – Excesso de superelevação E 57

Equação 4.8 – Superelevação mínima necessária (CEN, 2010) 58

Equação 4.9 - Velocidade máxima na curva horizontal 62

Equação 4.10 – Limite da razão entre as forças lateral e vertical na interface roda-trilho (PERSSON, 2007) 66

Equação 4.11 – Limite para o critério de Prud'homme 67

Equação 4.12 – Equilíbrio relativo ao critério de segurança do tombamento (PORTO e KABBACH JUNIOR, 2002) 70

Equação 4.13 – Critério de tombamento do veículo – norma CEN (2010) 73

Equação 6.1 – Índice de conforto simplificado NMV (PITA, 2006) 104

Equação 6.2 – Índice de conforto completo NVA, para passageiros sentados (PITA, 2006) 104

Equação 6.3 – Índice de conforto completo NVD, para passageiros em pé (PITA, 2006) .. 104

Equação 6.4 – Fórmula geral da porcentagem de passageiros que sente desconforto numa curva de transição (GOODALL e MEI, 2006) 106

Equação 6.5 – Fórmula geral da porcentagem de passageiros que sente desconforto num evento discreto (PITA, 2006) 109

Equação 8.1 – Resistência devido à curva horizontal 144

Equação 8.2 – Velocidade que pode ser praticada numa curva (CEN, 2010) 148

Equação 9.1 – Relação linear entre a aceleração lateral anc e a insuficiência de superelevação I (CEN, 2010) 158

Equação 9.2 – Cálculo da aceleração lateral não compensada sentida pelo passageiro no caso crítico (PITA, 2006) 159

Equação 9.3 – Insuficiência de superelevação decomposta 169

Equação 9.4 – Aceleração centrífuga numa curva vertical e raio mínimo correspondente. 187

Equação 9.5 – Potência conforme a física clássica 198

Equação 10.1 – Regra de três, das relações entre os tempos de viagem..... 226

Equação 0.1 – Expressão que caracteriza a clotoide..... 273

Equação 0.2 - Aceleração lateral sentida pelo passageiro – Trem pendular ativo..... 284

Equação 0.3 - Coeficiente de compensação da aceleração lateral – Trens pendulares de sistema ativo (MANCINI, PELACCHI, et al., 2008) 284

Equação 0.4 - Jerk lateral em função do comprimento da clotoide, para o caso típico (opção F-2)..... 285

Equação 0.5 - Velocidade de giro em função do comprimento da clotoide para o caso típico (opção F-2)..... 286

Equação 0.6 – PCTp, para um passageiro em pé no caso típico (opção F-2) em função do comprimento da clotoide..... 286

Equação 0.7 - PCTs, para um passageiro sentado no caso típico (opção F-2) em função do comprimento da clotoide..... 286

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Trem japonês Shinkansen Série 0, primeiro TAV a entrar em operação (WIKIPEDIA, 2014a) 39

Figura 3.2 – Trem espanhol Talgo Pendular RD Camas, de 1981, em operação em maio de 1993 (TRAINS-WORLDEXPRESSES.COM, 2014) 42

Figura 3.3 – Trem sueco X2, em operação a partir de 1990 (WIKIPEDIA, 2014g) 43

Figura 3.4 – TAV japonês com sistema pendular Série N700, em operação desde 2007 (WIKIPEDIA, 2014c) 43

Figura 3.5 - Trem X2000 sueco (esq.) e carros suíços SIG (dir.) (PITA, 2006) 44

Figura 4.1 – Forças atuantes no veículo percorrendo uma curva circular superelevada (DER/SP, 2006) 48

Figura 4.2 – Forças atuantes no veículo ferroviário percorrendo uma curva circular superelevada (PORTO e KABBACH JUNIOR, 2002) 52

Figura 4.3 – Acelerações atuantes em um trem convencional numa curva circular (CPTM, 2011) 54

Figura 4.4 - Efeito da flexibilidade da suspensão (PITA, 2006) 59

Figura 4.5 - Conceito do sistema pendular – acelerações atuantes (ALSTOM, 2010) 61

Figura 4.6 – Representação esquemática do descarrilamento por meio da roda subindo no trilho externo (ENSCO, 2013) 65

Figura 4.7 – Forças atuantes nos trilhos e nas rodas na curva (PERSSON, 2007) 66

Figura 4.8 – Forças atuantes e critério de segurança contra o tombamento (PORTO e KABBACH JUNIOR, 2002) 69

Figura 4.9 - Exemplo de gabarito estático - Viação Férrea/RS, 1931 (CENTRO-OESTE BRASIL: FERREOMODELISMO, TRENS E FERROVIAS DO BRASIL, 2013) 74

Figura 5.1 – Sistema de pendulação com guia em arco circular (PERSSON, 2011) 81

Figura 5.2 – Comparação entre os sistemas japonês (esq.) e europeu (dir.) de pendulação (HITACHI, 2013) 82

Figura 5.3 – Conceito da pendulação ativa no sistema japonês (HITACHI, 2013) 83

Figura 5.4 – Comparação do diagrama de superelevação e do ângulo de pendulação provido ao veículo no sistema japonês (HITACHI, 2013) 83

Figura 5.5 – Princípio da pendulação natural nos trens da Talgo (TALGO, 2011) 85

Figura 5.6 – Sistema de rodas independentes (TALGO, 2011) 86

Figura 5.7 – Truque do sistema de pendulação natural com suspensão elevada (TALGO, 2011) 86

Figura 5.8 – Sistema com barras inclinadas anti-giro – FLEXX Tronic WAKO (BOMBARDIER, 2011) 87

Figura 5.9 – Exemplo de truque motor de trem de passageiros (ALSTOM, 2013) 88

Figura 5.10 - Exemplo de atuador eletromecânico (PERSSON, 2011) 90

Figura 5.11 - Exemplo de sistema ativo com atuação acima da suspensão secundária - Alstom, Pendolino italiano ETR610 (PERSSON, 2011) 91

Figura 5.12 - Exemplos de sistemas ativos com atuação abaixo da suspensão secundária - Alstom Pendolino (esquerda) e Bombardier X2 (direita) (PERSSON, 2011) 91

Figura 5.13 - Trem pendular ativo produzido pela Fiat em 1970 - Pantógrafo na mesma posição mesmo após a inclinação da caixa (PITA, 2006) 92

Figura 5.14 – Arquitetura do sistema de pendulação do Pendolino (adaptado de MANCINI et al, 2008)..... 93

Figura 6.1 – Sistema referencial adotado em relação ao passageiro (NORSONIC, 2013)... 97

Figura 6.2 - Pontos de medição das acelerações em testes do conforto – Passageiro sentado (PITA, 2006)..... 103

Figura 6.3 – Interior da cabine de um simulador para avaliação do conforto (FÖRSTBERG, 2000) 111

Figura 8.1 – Mapa da área de estudo (CPTM, 2011) 124

Figura 8.2 – Fluxo de viagens – Modo automóvel (CPTM, 2011)..... 125

Figura 8.3 – Fluxo de viagens – Modo ônibus (CPTM, 2011)..... 125

Figura 8.4 – Alternativas de traçado para o segmento B, até Mairinque (CPTM, 2011) 132

Figura 8.5 - Alternativas de traçado para o segmento B, de Mairinque até Amador Bueno (CPTM, 2011) 133

Figura 9.1 – Inserção de clotoides num traçado horizontal (KABBACH JUNIOR, 2013) 165

Figura 9.2 – Curva 12: Exemplo de alterações no traçado geométrico (caso típico) com inserção das clotoides 180

Figura 9.3 – Curva 5: Exemplo de alterações no traçado geométrico, com aumento do raio (de 1.000 m para 2.100 m) e inserção das clotoides..... 181

Figura 9.4 – Curvas 6 e 7: Exemplo de alterações no traçado geométrico, com modificação na tangente e inserção das clotoides unidas numa só transição..... 182

Figura 9.5 – Planta e perfil do trecho do intermédio (segmento B) modificado, com as clotoides inseridas 186

Figura 9.6 – Trem pendular ativo da Alstom – Novo pendolino, ETR 600 (LEFERROVIE.IT, 2014) 195

Figura 9.7 – Trem pendular passivo da Talgo – Talgo 250 (REVISTA ELETRÔNICA TAV, 2014) 195

Figura 10.1 – Mapa mostrando a região da ligação Estocolmo – Gotemburgo, na Suécia (GOOGLE MAPS, 2014)..... 217

Figura 11.1 – Traçado teórico gerado em planta e perfil 234

Figura 11.2 – Trecho de ferrovia nos Alpes Suíços com túneis helicoidais - Planta (PITA, 2008) 236

Figura 11.3 – Trecho de ferrovia nos Alpes Suíços com túneis helicoidais - Perfil (PITA, 2008) 236

Figura 0.1 - Mudanças nas acelerações lateral e vertical sentidas pelo passageiro (FÖRSTBERG, 2000) 293

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Concorrência entre os modos ferroviário, rodoviário e aeroviário na Alemanha (PITA, 2008) 40

Gráfico 4.1 – Aceleração lateral não compensada anc em função da velocidade 50

Gráfico 4.2 – Curvas características do vento em função da velocidade (PERSSON, 2011) 71

Gráfico 4.3 – Deslocamento (sway) em função da superelevação equivalente Deqv (JOHNSON, 2006) 75

Gráfico 4.4 – Deslocamento (sway) do cantrail em um trem pendular (JOHNSON, 2006) ... 76

Gráfico 4.5 - Deslocamento (sway) do step em um trem pendular (JOHNSON, 2006) 77

Gráfico 5.1 – Comparação entre os sistemas passivos convencional e controlado (HITACHI, 2013) 84

Gráfico 5.2 - Efeito do atraso na pendulação (JOHNSON, 2006) 94

Gráfico 6.1 – Exemplo de função para ponderação dos valores da aceleração lateral - Wd (PERSSON, 2011) 105

Gráfico 6.2 - Aferição da aceleração lateral e do jerk lateral para uso na fórmula PCT (PITA, 2006) 106

Gráfico 6.3 - Aferição da velocidade máxima de giro para uso na fórmula PCT 107

Gráfico 6.4 - Índice de conforto PCT na linha Roma - Milão (CANDELA et al, 2005, apud PITA, 2006) 108

Gráfico 7.1 - Comparação da eficiência energética de vários modos de transporte (SATO, 1980, apud PITA, 2008) 115

Gráfico 7.2 – Diagrama dos serviços a cada hora em cada direção na linha sueca – Configuração possível com o uso de trens pendulares (PERSSON, 2007) 119

Gráfico 8.1 – Extensões em elevado (ponte ou viaduto) para cada alternativa 136

Gráfico 8.2 – Extensões em túnel para cada alternativa (CPTM, 2011) 136

Gráfico 8.3 – Custo total em função do atendimento às cidades (CPTM, 2011) 137

Gráfico 8.4 – Comparação das extensões relativas para cada tipo de obra - Alternativas atendendo a Alumínio, Mairinque e São Roque (CPTM, 2011) 138

Gráfico 8.5 - Comparação das extensões relativas para cada tipo de obra - Alternativas atendendo a Mairinque e São Roque (CPTM, 2011) 138

Gráfico 8.6 - Comparação das extensões relativas para cada tipo de obra - Alternativas atendendo apenas a São Roque (CPTM, 2011) 139

Gráfico 8.7 - Comparação das extensões relativas para cada tipo de obra - Alternativas atendendo a nenhuma das três cidades (CPTM, 2011) 139

Gráfico 8.8 – Curva de motorização adotada nas simulações de marcha (SIEMENS, 2011) ... 144

Gráfico 8.9 – Simulação de marcha – Alternativa B232, caixa fixa, 50% de motorização (CPTM, 2011) ... 148

Gráfico 8.10 - Simulação de marcha – Alternativa B232, caixa pendular, 50% de motorização (CPTM, 2011) ... 149

Gráfico 8.11 – Desenvolvimento das curvas horizontais ao longo do intermédio ... 153

Gráfico 8.12 – Desenvolvimento dos elementos do traçado – Tangentes e curvas (PLANSERVI, 2012) ... 154

Gráfico 9.1 - Restrições de velocidade ao longo do trecho analisado, para as três opções de operação F-0, F-1 e F-2 ... 193

Gráfico 9.2 – Curvas de motorização – Esforço trator e resistência ao movimento (kN) – Acelerações e desacelerações impostas (m/s²) ... 199

Gráfico 9.3 – Simulações de marcha para a opção operacional F-0 (trem convencional) .. 202

Gráfico 9.4 – Simulações de marcha para a opção operacional F-1 (trem pendular de sistema passivo) ... 205

Gráfico 9.5 – Simulações de marcha para a opção operacional F-2 (trem pendular de sistema ativo) ... 208

Gráfico 9.6 – Simulações de marcha das três opções operacionais comparadas para o nível de motorização de 50% (1.300 kW) ... 210

Gráfico 9.7 - Simulações de marcha das três opções operacionais comparadas para o nível de motorização de 100% (2.600 kW) ... 211

Gráfico 9.8 – Tempo total de viagem em função da potência instalada, para cada tipo de material rodante ... 212

Gráfico 9.9 – Tempo total de viagem em função do material rodante, para cada nível de motorização ... 213

Gráfico 9.10 – Tempo total de viagem em função da superelevação teórica Dt, para cada nível de motorização ... 214

Gráfico 10.1 – Distribuição dos raios em extensão relativa ao total da linha Estocolmo - Gotemburgo (PERSSON, 2008) ... 218

Gráfico 10.2 – Distribuição dos raios em extensão relativa ao total do trecho do intermédio modificado do Estudo de Caso 1 ... 218

Gráfico 10.3 – Tempos totais de viagem (linha Estocolmo – Gutemburgo) em função da superelevação teórica Dt (PERSSON, 2008) ... 221

Gráfico 10.4 – Tempos totais de viagem (linha Estocolmo – Gutemburgo) em função da velocidade máxima Vmax permitida (PERSSON, 2008) ... 222

Gráfico 10.5 – Tempos totais de viagem (linha Estocolmo – Gutemburgo) em função da potência instalada (PERSSON, 2008) ... 223

Gráfico 10.6 – Tempos de viagem extrapolados no Estudo de Caso 2 ... 226

Gráfico 10.7 – Tempo de viagem adaptado para um subtrecho de 47,4 km e para um comboio de 4 carros 228

Gráfico 10.8 – Tempo de viagem em função da potência instalada adaptada 229

Gráfico 11.1 – Restrições de velocidade para o traçado teórico gerado (opções de operação T-0, T-1 e T-2) 241

Gráfico 11.2 - Simulações de marcha para a opção operacional T-0 (trem convencional), no traçado teórico 242

Gráfico 11.3 - Simulações de marcha para a opção operacional T-1 (trem pendular de sistema passivo), no traçado teórico 243

Gráfico 11.4 - Simulações de marcha para a opção operacional T-2 (trem pendular de sistema ativo), no traçado teórico 244

Gráfico 11.5 - Simulações de marcha para o nível de motorização de 100% (2.600 kW), no traçado teórico 247

Gráfico 11.6 - Simulações de marcha para o nível de motorização de 150% (3.900 kW), no traçado teórico 248

Gráfico 11.7 - Tempo total de viagem em função da potência instalada (traçado teórico).. 249

Gráfico 11.8 - Tempo total de viagem em função do material rodante (traçado teórico)..... 250

Gráfico 11.9 - Tempo total de viagem em função da superelevação teórica Dt (traçado teórico) 250

Gráfico 12.1 – Tempos relativos de viagem para cada material rodante, para cada um dos estudos de caso, em função da porcentagem em extensão de curvas dos traçados 256

Gráfico 0.1 - Diagrama de curvatura K para a clotoide (variação linear) 272

Gráfico 0.2 – Diagrama de superelevação D para a clotoide (variação linear) 272

Gráfico 0.3 – Aspecto da curva de transição - Espiral do tipo clotoide (KABBACH JUNIOR, 2013) 273

Gráfico 0.4 – Relação entre o raio e comprimento na clotoide (KABBACH JUNIOR, 2013) 273

Gráfico 0.5 – Tipos de curvas de transição (LAZAREVIC, POPOVIC, et al., 2011)..... 275

Gráfico 0.6 – Desconforto do passageiro em função do comprimento da clotoide – Opção F-2 para o caso típico 287

Gráfico 0.7 – Desconforto sentido pelo passageiro (em pé e sentado) em função do raio nas curvas do intermédio..... 291

LISTA DE SÍMBOLOS

$\sum Y$	Soma das forças laterais nos contatos roda-trilho
$\sum Y_{max,lim}$	Soma das forças laterais nos contatos roda-trilho (limite máximo)
A	Parâmetro da clotoide
A', B', C'	Coeficientes para o cálculo do índice P_{DE}
A, B, C, D, E	Coeficientes para o cálculo do índice P_{CT}
a_c	Aceleração centrífuga
a_c^v	Aceleração centrífuga vertical, devida à curva vertical
AC	Ângulo central
AC_{max}	Ângulo central máximo
a_d	Aceleração lateral devida aos defeitos na via
a_i^s	Aceleração medida (valor quadrático médio ou eficaz) para avaliação do conforto
a_{lp}	Aceleração lateral sentida pelo passageiro
$a_{lp,p}$	Aceleração lateral sentida pelo passageiro, contabilizado o efeito da pendulação
a_{nc}	Aceleração lateral não compensada
$a_{nc,f}$	Aceleração lateral não compensada, contabilizado o efeito da flexibilidade da suspensão
$a_{nc,f,d}$	Aceleração lateral não compensada, contabilizado o efeito da flexibilidade da suspensão e dos defeitos na via
$a_{nc,f,p}$	Aceleração lateral não compensada, contabilizado o efeito da flexibilidade da suspensão e da pendulação
$a_{nc,p}$	Aceleração lateral não compensada, contabilizado o efeito da pendulação
a_v	Aceleração vertical
b	Bitola
b_0	Distância entre os eixos dos trilhos
C	Constante para conversão de unidades
CC	Centro da curva circular (original)
C_c	Coeficiente de compensação (trem pendular de sitema ativo)
CC_1	Centro da curva circular (deslocado)
CG	Centro de massa do veículo
CG'	Centro de massa deslocado do veículo
CS	Ponto entre a curva circular e a curva de transição de saída
d	Superelevação (m)
D	Superelevação (mm)
D_{eqv}	Superelevação equivalente
D_{max}	Superelevação máxima
D_{min}	Superelevação mínima
D_t	Superelevação de equilíbrio ou teórica
e	Declividade transversal ou superelevação da pista
E	Excesso de superelevação
e_{CG}	Deslocamento lateral do centro de massa do veículo
E_{lim}	Excesso de superelevação (limite)
e_{max}	Declividade transversal ou superelevação da pista (máxima adotada)
f	Afastamento lateral
F	Força (esforço trator)
f_a	Fator de atrito lateral pneu-pavimento
Fa	Força de atrito lateral pneu-pavimento

F_c	Força (pseudoforça) centrífuga
f_{max}	Fator de atrito lateral pneu-pavimento (máximo admissível)
f_R	Fator de giro ou de rolamento efetivo
g	Aceleração da gravidade
H	Altura do centro de massa do veículo em relação ao topo dos boletos
I	Insuficiência de superelevação
i	Declividade de rampa, longitudinal ou do greide
I_C	Insuficiência de superelevação compensada
I_{lim}	Insuficiência de superelevação (limite)
Inf.	Infinito
I_R	Insuficiência de superelevação residual
K	Curvatura (inverso do raio) de um elemento de alinhamento horizontal
k_1	Constante para vagões de carga
K_v	Parâmetro K da curva vertical
L	Desenvolvimento dos elementos de alinhamento horizontal e vertical
L_b	Distância da baliza até o início da curva de transição de entrada
L_c	Comprimento da clotoide (mínimo exigido)
L_e	Desenvolvimento da curva de transição de entrada
L_e'	Extensão de inclinação da caixa (curva de transição de entrada)
L_i	Extensão mínima do elemento de alinhamento horizontal
L_s	Desenvolvimento da curva de transição de saída
L_s'	Extensão de inclinação da caixa (curva de transição de saída)
M_d	Momento desestabilizador ou instabilizador
M_e	Momento estabilizador
N	Força normal
n	Coeficiente de segurança do momento desestabilizador
n_{max}	Denominador da razão de inclinação da rampa de superelevação
N_{MV}	Índice de conforto simplificado
N_{VA}	Índice de conforto completo (passageiro sentado)
N_{VD}	Índice de conforto completo (passageiro em pé)
P	Força peso
PC	Ponto de começo da curva circular
P_{CT}	Desconforto na curva de transição
P_{CTp}	Desconforto na curva de transição (passageiro em pé)
P_{CTs}	Desconforto na curva de transição (passageiro sentado)
P_{DE}	Desconforto em eventos discretos
PI	Ponto de inflexão
PT	Ponto de término da curva circular
P_t	Potência
Q	Força vertical no contato roda-trilho
Q_0	Carga estática vertical sobre cada roda
Q_d	Força vertical no contato roda-trilho (roda direita)
Q_e	Força vertical no contato roda-trilho (roda esquerda)
R	Raio da curva horizontal circular
R'	Valor do raio no início do elemento de alinhamento horizontal
R'_c	Taxa de resistência de curva horizontal
R_F	Resultante de forças agindo no veículo
R_{max}	Raio da curva horizontal circular (máximo)

R_{min}	Raio da curva horizontal circular (mínimo)
R_v	Raio da curva vertical
s	Posição
SC	Ponto entre a curva de transição de entrada e a curva circular
s_f	Componente do fator de rolamento
ST	Ponto entre a curva de transição de saída e a tangente
t	Tempo
$t_{j,\,l}$	Designações do tempo de viagem, no estudo de Persson
TS	Ponto entre a tangente e a curva de transição de entrada
v	Velocidade do veículo (m/s)
V	Velocidade do veículo (km/h)
V_{max}	Velocidade do veículo (máxima)
V_{min}	Velocidade do veículo (mínima)
W_i	Curva de ponderação das frequências de acelerações
x	Eixo longitudinal, paralelo ao piso do veículo
$\dot{x}$	Velocidade no eixo longitudinal
X_A	Eixo longitudinal no assento (passageiro sentado)
X_D	Eixo longitudinal no encosto (passageiro sentado)
X_P	Eixo longitudinal no piso (passageiro sentado)
Y	Força lateral no contato roda-trilho
y	Eixo lateral, paralelo ao piso do veículo
$\ddot{y}$	Aceleração no eixo lateral (plano do passageiro)
$\dddot{y}$	Variação da aceleração ou *jerk* no eixo lateral
$\dddot{y}_{max}$	Variação da aceleração ou *jerk* no eixo lateral (máximo)
Y_A	Eixo lateral no assento (passageiro sentado)
Y_d	Força lateral no contato roda-trilho (roda direita)
Y_D	Eixo lateral no encosto (passageiro sentado)
Y_e	Força lateral no contato roda-trilho (roda esquerda)
Y_P	Eixo lateral no piso (passageiro sentado)
z	Eixo vertical, perpendicular ao piso do veículo
$\ddot{z}$	Aceleração no eixo vertical ao plano do passageiro
Z_A	Eixo vertical no assento (passageiro sentado)
Z_D	Eixo vertical no encosto (passageiro sentado)
Z_P	Eixo vertical no piso (passageiro sentado)
α	Ângulo de inclinação provido pelo sistema pendular, em relação à via
β	Ângulo de inclinação da pista superelevada
δ	Ângulo de contato roda-trilho
Δf	Diferença no afastamento lateral
θ	Ângulo entre o plano do passageiro e o plano horizontal
θ'	Ângulo efetivo entre o plano do passageiro e o plano horizontal (com o efeito da flexibilidade e/ou do sistema pendular)
φ	*Roll* ou giro - Rotação em torno do eixo longitudinal; Ângulo de inclinação da ferrovia superelevada
$\dot{\varphi}$	Velocidade angular em relação ao eixo longitudinal
$\ddot{\varphi}$	Aceleração angular em relação ao eixo longitudinal
χ	*Pitch* - Rotação em torno do eixo lateral
ψ	*Yaw* - Rotação em torno do eixo vertical
$\dot{\psi}$	Velocidade angular em relação ao eixo vertical

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo dos estudos de caso e opções de operação analisadas 35

Tabela 3.1 - Redução do tempo de viagem com emprego de trens pendular de sistema ativo em corredores europeus (PITA, 2006) 44

Tabela 3.2 – Trens pendulares ao redor do mundo (WIKIPEDIA, 2014i) 46

Tabela 4.1 – Raio mínimo e aceleração lateral não compensada (elaborado a partir de DER/SP, 2006) 50

Tabela 6.1 – Coeficientes da equação do conforto na curva de transição (GOODALL e MEI, 2006) 107

Tabela 6.2 - Coeficientes da equação do conforto em eventos discretos, em função da posição do passageiro (PITA, 2006) 109

Tabela 7.1 – Opções para aumento de velocidades em relação aos trens convencionais (DUMONT E HERISSÉ, 1997, apud PITA, 2006) 120

Tabela 8.1 – Características dos segmentos do corredor (CPTM, 2011) 128

Tabela 8.2 – Critérios adotados para elaboração de alternativas de traçado (CPTM, 2011) 129

Tabela 8.3 – Resumo de alternativas de traçado para o segmento B (CPTM, 2011) 131

Tabela 8.4 – Quantitativos e custos de investimento para as alternativas do segmento B (CPTM, 2011) 134

Tabela 8.5 – Resumo das alternativas do segmento B utilizadas nas 9 opções gerais (CPTM, 2011) 141

Tabela 8.6 – Resultados das simulações de marcha efetuadas (CPTM, 2011)..... 146

Tabela 8.7 – Alinhamento horizontal do intermédio (segmento B) - Projeto geométrico funcional (PLANSERVI, 2012) 151

Tabela 9.1 – Critério de conforto segundo a SNCF - Ferrovia francesa (ALIAS, 1984, apud PITA, 1997) 157

Tabela 9.2 – Velocidade máxima nas curvas para a opção de referência F-R 163

Tabela 9.3 – Comprimento mínimo das clotoides para a opção de referência (F-R) 164

Tabela 9.4 – Insuficiências de superelevação e aceleração sentida pelo passageiro, anc,p para as três opções de operação F0, F-1 e F-2 171

Tabela 9.5 – Máximas velocidades para as três opções de operação (D = 150 mm em todas as curvas) 172

Tabela 9.6 – Comprimento mínimo das clotoides para as opções F-0, F-1 e F-2..... 174

Tabela 9.7 – Alterações no alinhamento horizontal e inserção das clotoides..... 179

Tabela 9.8 – Alinhamento horizontal do intermédio modificado 185

Tabela 9.9 – Alinhamento vertical do intermédio modificado..... 189

Tabela 9.10 – Exemplo parcial da planilha de trabalho para cálculo das restrições de velocidade 192

Tabela 9.11 – Potências instaladas adotadas 196

Tabela 9.12 – Especificações técnicas válidas para todos os trens (CPTM, 2011) 197

Tabela 9.13 – Resumo das simulações de marcha originárias do projeto funcional – Trem convencional e traçado da alternativa B232 (CPTM, 2011) 201

Tabela 9.14 – Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção F-0, com trem convencional) 203

Tabela 9.15 – Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção F-1, com trem pendular passivo) 204

Tabela 9.16 - Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção F-2, com trem pendular ativo) 207

Tabela 9.17 – Comparação das velocidades médias nos cenários simulados 209

Tabela 9.18 – Comparação dos tempos totais de viagem nos cenários simulados 212

Tabela 10.1 - Especificações técnicas do trem considerado nas simulações (PERSSON, 2008) 220

Tabela 11.1 – Alinhamento horizontal teórico gerado 233

Tabela 11.2 – Alinhamento vertical teórico gerado 238

Tabela 11.3 - Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção T-0), para o traçado teórico 245

Tabela 11.4 - Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção T-1), para o traçado teórico 245

Tabela 11.5 - Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção T-2), para o traçado teórico 245

Tabela 11.6 – Comparação dos tempos totais de viagem (traçado teórico) 246

Tabela 11.7 - Comparação das velocidades médias (traçado teórico) 246

Tabela 12.1 – Tempos e velocidades médias para cada material rodante, para os três estudos de casos 255

Tabela 0.1 - Comparação dos tipos de curvas de transição dado um mesmo desenvolvimento L (CEN, 2010) 276

Tabela 0.2 – Comparação dos tipos de curvas de transição dado um mesmo afastamento f (CEN, 2010) 276

Tabela 0.3 – Comparação de curvas de transição de diferentes tipos – Clotoide e senoidal (de Klein) 278

Tabela 0.4 – Resumo do processo para estimativa do conforto do passageiro (em pé e sentado) em cada curva 289

Tabela 0.5 – Incremento nas acelerações verticais devido à inclinação da caixa do veículo em trechos de coincidência 295

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 27

2. ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA 36

2.1 Objetivos 29

2.2 Justificativas 30

2.3 Organização 31

2.3.1 Parte 1 – Revisão bibliográfica 32
2.3.2 Parte 2 – Estudos de caso 33
2.3.3 Parte 3 – Análise crítica 35

PARTE 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 37

3. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA 38

3.1 Desenvolvimento do transporte ferroviário 38

3.2 Trens e ferrovias de alta velocidade 39

3.3 Síntese da evolução dos trens pendulares 41

4. DINÂMICA DOS VEÍCULOS EM CURVA E CONCEITO DO SISTEMA PENDULAR 47

4.1 Caso rodoviário 47

4.2 Caso ferroviário 51

4.2.1 Efeito da flexibilidade da suspensão 58
4.2.2 Caso dos trens pendulares 60
4.2.3 Critérios de segurança 63
4.2.4 Atendimento do gabarito ferroviário 73

5. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL RODANTE PENDULAR 78

5.1 Sistemas passivos 78

5.1.1 Sistema com guia em arco circular 80
5.1.2 Sistema com suspensão elevada 84
5.1.3 Sistema com barras inclinadas anti-giro 86

5.2 Sistemas ativos 88

5.2.1 Sistema mecânico 90
5.2.2 Sistemas de controle 92

6. CONFORTO DO PASSAGEIRO 96

6.1 Movimentos translacionais e rotacionais 96

6.1.1 Movimento longitudinal 98
6.1.2 Movimento lateral 99
6.1.3 Movimento vertical 101
6.1.4 Movimentos rotacionais 101

6.2 Definições e avaliação do conforto 103
6.2.1 Conforto/desconforto médio de viagem 103
6.2.2 Perturbações eventuais no conforto..... 105
6.2.3 Enjoo de movimento ou cinetose 110

7. REFERÊNCIAS DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO, MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DOS TRENS PENDULARES 114
7.1 Principais custos adicionais 115
7.1.1 Custo de aquisição do material rodante 115
7.1.2 Custo de manutenção do material rodante 116
7.1.3 Custo de implantação e/ou adaptação da via 116
7.1.4 Custo de manutenção da via..... 117
7.2 Exemplos da competitividade do material rodante pendular 118
7.2.1 Comparação entre alternativas numa linha sueca: modernização e retificação da linha ou emprego de trens pendulares 118
7.2.2 Comparações entre o emprego de trens pendulares e a construção de novas linhas para trens de alta velocidade 120
7.2.3 Diminuição dos raios mínimos de curva numa nova linha, prevendo operação de trens pendulares 121

PARTE 2 – ESTUDOS DE CASO..... 123

8. ESTUDO DE CASO PRELIMINAR – CORREDOR SÃO PAULO – SOROCABA 124
8.1 Considerações iniciais e caracterização do objeto 124
8.2 Características do material rodante..... 126
8.3 Elaboração de alternativas de traçado 127
8.4 Levantamento de custos, comparação e escolha de alternativas 133
8.5 Simulações de marcha..... 141
8.5.1 Motorização e resistências consideradas 143
8.5.2 Simulações de marcha efetuadas 145
8.6 Projeto geométrico funcional 150
8.6.1 Análise do traçado geométrico..... 152

9. ESTUDO DE CASO 1 – INCREMENTO DE VELOCIDADES NO CORREDOR SÃO PAULO - SOROCABA 155
9.1 Premissas e orientações..... 156
9.2 Complementação do projeto funcional – Opção de referência F-R ... 157
9.2.1 Máxima aceleração lateral não compensada admissível 157
9.2.2 Superelevação máxima..... 161
9.2.3 Velocidade máxima permitida em cada curva..... 162
9.2.4 Curvas de transição – Tipo adotado 163
9.2.5 Curvas de transição – Comprimento..... 163
9.2.6 Inserção das clotoides no alinhamento horizontal..... 164
9.2.7 Avaliação do conforto na curva de transição 167

9.3 Complementação do projeto funcional – Opções prevendo incremento de velocidade (F-0, F-1 e F-2) 167
9.3.1 Máxima aceleração lateral não compensada admissível 168
9.3.2 Superelevação máxima 171
9.3.3 Velocidade máxima permitida no trecho e em cada curva 171
9.3.4 Curvas de transição –Tipos discutidos e tipo adotado 173
9.3.5 Curvas de transição – Comprimento 173
9.3.6 Inserção das clotoides no alinhamento horizontal 175
9.3.7 Alinhamento vertical 187
9.3.8 Avaliação do conforto 190
9.4 Novas simulações de marcha 190
9.4.1 Restrições de velocidade devidas ao traçado geométrico 191
9.4.2 Potência instalada 194
9.4.3 Especificações técnicas adotadas 197
9.4.4 Curvas de motorização 198
9.4.5 Processo de simulação 200
9.4.6 Gráficos e resultados das simulações 201

10. ESTUDO DE CASO 2 - DISCUSSÃO DE RESULTADOS PARA UM TRAÇADO POUCO SINUOSO 216
10.1 Justificativa 216
10.2 Objeto do estudo de caso 216
10.3 Procedimento 219
10.4 Resultados 220
10.5 Discussão dos resultados apresentados 223
10.6 Adaptação dos resultados 224

11. ESTUDO DE CASO 3 – ANÁLISE DE UM TRAÇADO TEÓRICO MUITO SINUOSO 231
11.1 Justificativa 231
11.2 Objeto e procedimento 231
11.2.1 Alinhamento horizontal gerado 231
11.2.2 Alinhamento vertical gerado 237
11.2.3 Simulações de marcha para o traçado teórico 239
11.3 Resultados 240
11.4 Comparação, conclusões e discussões 245

PARTE 3 – ANÁLISE CRÍTICA 252

12. COMPARAÇÃO ENTRE OS TRÊS ESTUDOS DE CASO 253
12.1 Justificativa 253
12.2 Comparação geral 254

12.3 Discussão dos resultados 256

13. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 258

13.1 Parte 1 – Revisão bibliográfica 258

13.2 Parte 2 – Estudos de caso 261

13.2.1 Capítulo 8 - Estudo de Caso Preliminar 261
13.2.2 Capítulo 9 - Estudo de Caso 1 261
13.2.3 Capítulo 10 – Estudo de Caso 2 263
13.2.4 Capítulo 11 – Estudo de Caso 3 263

13.3 Parte 3 – Análise crítica 264

13.4 Considerações finais 265

14. REFERÊNCIAS 267

APÊNDICE A – CURVAS DE TRANSIÇÃO 271

A.1 Conceito da curva de transição 271

A.2 Tipos de curvas de transição 272

A.2.1 Espiral do tipo clotoide 272

A.2.2 Parábola cúbica 274

A.2.3 Curvas de transição “superiores” ou “de padrão mais elevado” 274

A.3 Justificativa para adoção da clotoide 277

APÊNDICE B – AVALIAÇÃO DO CONFORTO NA CURVA DE TRANSIÇÃO 280

B.1 Opção de operação de referência F-R 280

B.2 Opções de velocidade incrementada F-0, F-1 e F-2 282

B.2.1 Avaliação preliminar do conforto para a clotoide redefinida 282

B.2.2 Avaliação do conforto em cada curva do alinhamento modificado 288

B.2.2.1 Implicações da aceleração vertical 292

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário exerceu nos últimos 200 anos papel fundamental no desenvolvimento mundial. Embora nas últimas décadas tenham surgido e se desenvolvido opções alternativas (como os modos aeroviário e rodoviário), ainda hoje o transporte sobre trilhos é considerado como uma opção viável, econômica e sustentável para o transporte de cargas e passageiros. No cenário brasileiro, houve um sucateamento do transporte ferroviário nos últimos 30 anos.

É prevista, porém, uma retomada num futuro próximo, com o estabelecimento dos serviços regionais no Estado de São Paulo pela Companhia Paulista de Trens Metropolitanos – CPTM (2010), e no restante do Brasil conforme relatado pela Associação Brasileira da Indústria Ferroviária – ABIFER (ABATE, 2013). Também é prevista a implantação de um serviço de Trens de Alta Velocidade – TAVs entre Rio de Janeiro e São Paulo, além de maiores investimentos em ferrovias transportadoras de carga. Todas são empreitadas no sentido de resolver um gargalo da infraestrutura viária nacional.

Desta forma, é necessário reunir e reorganizar uma série de conhecimentos da engenharia ferroviária, de certa maneira abandonados em virtude do desincentivo do país a esse modo de transporte, em favor do modo rodoviário no âmbito das médias e grandes distâncias, por exemplo. Também é necessário integrar a esse corpo os conhecimentos e tecnologias desenvolvidos nas últimas décadas principalmente no exterior.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objeto principal de estudo as ferrovias e respectivos trens de passageiros de média velocidade, que em geral atendem a serviços regionais e interurbanos. Os trens de média velocidade operam numa faixa entre 120 km/h e 200 km/h, sendo que comumente a velocidade máxima se situa em torno de 150 km/h. Para o estudo, é parte integrante e importante a área subordinada de traçado geométrico, que muitas vezes está intimamente relacionada com os custos de obra. No presente trabalho foca-se, ainda, na tecnologia dos trens de caixa móvel ou trens pendulares.

Os trens pendulares representam, de maneira simplificada, uma solução tecnológica que permite uma velocidade maior de operação num traçado geométrico mais restrito (com curvas de raios pequenos), conforme a caixa do veículo é inclinada e a aceleração lateral à qual o passageiro está sujeito é atenuada. Essa tecnologia está bem estabelecida comercialmente desde o início da década de 1990, embora não esteja amplamente difundida no mundo.

Assim, com relação ao transporte de passageiros, a operação dos trens pendulares apresenta um conjunto de implicações. Entre essas, além do potencial de aumento das velocidades, encontram-se: a dinâmica dos veículos ferroviários em curva; os custos de obras civis e de operação de corredores ferroviários; o estudo do desconforto sentido pelo passageiro; as particularidades do funcionamento do material rodante pendular; o projeto geométrico de uma nova ferrovia de modo que trens pendulares possam nela operar; dentre outros.

As implicações descritas serão avaliadas e discutidas ao longo do trabalho, principalmente por meio de estudos de caso. Desse modo, espera-se que o presente material seja estabelecido como referência quanto ao transporte ferroviário de passageiros, com um foco especial nos trens de caixa móvel ou pendulares[1].

[1] Optou-se por adotar o termo “trem pendular” em grande parte do presente trabalho. Este termo é adotado no artigo da Wikipedia em português (2014b), em apresentação da Talgo (2011) traduzida do espanhol para o português e no projeto funcional do trem São Paulo - Sorocaba (CPTM, 2011), entre outros. O termo “trem de caixa móvel” é uma tradução mais próxima do termo em inglês *carbody tilting* e também é utilizado ao longo do trabalho.

2. ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA

2.1 OBJETIVOS

O principal objetivo do presente trabalho é fazer uma contribuição ao entendimento do transporte ferroviário de passageiros, com foco na tecnologia dos trens pendulares: quais são suas possibilidades e implicações, e qual o papel da mesma no desenvolvimento do transporte ferroviário. Será adotada uma perspectiva com foco no projeto ferroviário e na implantação de novos corredores. Serão feitas ao longo do trabalho comparações da tecnologia dos trens pendulares com os trens convencionais, com o objetivo de estabelecer as principais diferenças entre o material rodante pendular e o material rodante convencional – tanto na operação quanto nos requisitos de infraestrutura. A contribuição em si se dará de duas formas ou âmbitos: conceitual e experimental.

Primeiramente, no âmbito conceitual, será exposta e demonstrada a base teórica, a experiência existente e o estado da arte, para os trens de passageiros de média velocidade de maneira geral, porém com destaque para o material rodante pendular. Ou seja, expor-se-ão os conceitos básicos da dinâmica dos veículos em curva, como funcionam os trens pendulares, quais os parâmetros do estado da arte da tecnologia e como se deu o surgimento, desenvolvimento e estabelecimento da mesma até os dias atuais. Serão abordados conceitos relacionados relevantes, como o conforto do passageiro e o gabarito dinâmico ferroviário.

Em segundo lugar, no âmbito experimental, serão apresentados dados e resultados por meio de três estudos de casos. Estes terão o objetivo de permitir uma comparação clara entre sistemas com caixa móvel e sistemas de caixa fixa, para diferentes combinações de material rodante e traçados, sendo necessária assim também a consideração dos diferentes critérios de projeto envolvidos.

Por fim, juntando os dois âmbitos, o trabalho terá como objetivo final avaliar o impacto do uso dos trens pendulares no aumento de velocidades e na redução dos tempos de viagem, quando comparados com os trens convencionais. Para isso, serão analisados e comparados entre si os dados provenientes dos três estudos de

caso. Nessa abordagem não será dado enfoque nos custos, que serão considerados apenas conceitualmente, por meio da revisão bibliográfica.

2.2 JUSTIFICATIVAS

O transporte ferroviário tem sua importância histórica no deslocamento de pessoas e cargas em longas distâncias. No âmbito específico do transporte de passageiros, nas últimas décadas surgiram e se estabeleceram serviços rodoviários e aeroviários, porém o modo ferroviário ainda é significativamente presente. Além disso, o transporte ferroviário se apresenta atualmente no mundo como uma opção ambientalmente sustentável e viável economicamente.

Com relação ao Brasil, houve um sucateamento dos serviços de transporte de passageiros nas últimas décadas, principalmente regionais e de longa distância. Os serviços urbanos e metropolitanos estão instalados, porém estão sobrecarregados e novas linhas são construídas muito lentamente. Discussões sobre a implantação de corredores para trens de alta velocidade (TAVs) são sucessivamente levantadas e abandonadas no país, sem nenhum corredor ter sido ainda implantado. Por fim, há uma perspectiva de retomada dos serviços regionais e interurbanos (ou intercidades) nos próximos anos, onde normalmente trafegam trens de média velocidade (de 120 a 200 km/h), e que compõem o âmbito principal de discussão no presente trabalho.

Dadas essas perspectivas, o presente trabalho se justifica por contribuir para um reestabelecimento do conhecimento acerca do transporte ferroviário de passageiros no Brasil. Com o sucateamento dos serviços ferroviários, também se viu surgir um descompasso da literatura e do conhecimento técnico ferroviário no Brasil com relação ao restante do mundo. O desconhecimento nacional sobre a tecnologia dos trens de caixa móvel em si é sintoma disto, dado que ela tem sido desenvolvida fora do país desde a década de 1970 e se estabeleceu a partir do início da década de 1990.

Outra justificativa do trabalho, de caráter mais técnico, se dá devido à retomada prevista dos serviços regionais nos próximos anos. Nessa retomada estão sendo estudados diversos corredores, dentre os quais o corredor São Paulo – Sorocaba, cujo projeto funcional é objeto do Estudo de Caso 1. O principal potencial dos trens

pendulares é o aumento da velocidade nas curvas, resultando em reduções do tempo de viagem total nos corredores; avaliou-se a possibilidade de utilizá-los, inclusive, no projeto funcional referido. De uma maneira utilitária, alinhada com a retomada descrita e em curso, o presente trabalho se justifica por:

- Compreender as questões técnicas gerais envolvidas na implantação de novos corredores ou na operação em corredores existentes;
- De modo mais específico, estabelecer um entendimento do conceito, do potencial e das implicações da utilização dos trens pendulares, permitindo uma melhor consideração deles como opção operacional, principalmente com repercussões na fase de projeto.

Finalmente, dado o foco no material rodante de caixa móvel, o trabalho também se justifica pela necessidade crescente dos serviços ferroviários serem competitivos e apresentarem níveis de conforto elevados. A tecnologia se destaca principalmente pelo potencial de aumento das velocidades e de melhora do conforto de viagem dos passageiros.

O uso dos trens pendulares acarreta em economias na implantação dos corredores, em aumento da competitividade do modo e em benefícios para o meio ambiente (decorrentes do maior uso do modo ferroviário); mas o maior benefício é o do passageiro, que tem a redução de seu tempo de viagem e aumento do seu nível de conforto. Por conta disso, justifica-se no presente trabalho que a tecnologia dos trens de caixa móvel seja amplamente entendida, seus aspectos analisados e discutidos e seu potencial avaliado por meio dos dados que serão apresentados.

2.3 ORGANIZAÇÃO

Ao longo do trabalho, será estabelecida uma base teórica, serão estudados diversos casos e será feita uma comparação geral dos resultados encontrados. Nesse sentido, diversos temas serão discutidos, todos relacionados com o transporte ferroviário de passageiros com foco nos trens pendulares. Devido a essa amplitude de aspectos tratados, uma organização da linha de raciocínio adotada faz-se necessária.

2.3.1 Parte 1 – Revisão bibliográfica

A primeira parte trará a revisão bibliográfica, de modo a estabelecer a base teórica do trabalho. Esta parte será composta por cinco capítulos:

- O Capítulo 3 abordará a contextualização histórica, mostrando o desenvolvimento do transporte ferroviário. Será dado destaque para o desenvolvimento dos TAVs e principalmente dos trens pendulares.

- Em seguida, no Capítulo 4, será revisada a dinâmica dos veículos em curva. Esse assunto é bastante relevante para o transporte ferroviário de passageiros, influenciando o projeto geométrico da via. Também será apresentado o conceito de pendulação[2], este relacionado tanto com a dinâmica na curva quanto com o projeto geométrico. Serão abordados também os subtemas: a flexibilidade da suspensão, os critérios de segurança a serem respeitados e o gabarito dinâmico do veículo; em todos serão analisadas as implicações específicas dos trens pendulares.

- No Capítulo 5 serão mostradas as características do material rodante pendular. Apresentar-se-ão as variantes tecnológicas (de sistema passivo e ativo), como se dá o funcionamento e quais são as particularidades de cada uma.

- Na sequência, no Capítulo 6, é abordado o tema do conforto do passageiro no trem: a que movimentos o usuário está sujeito, o que causa desconforto, quais são os métodos para avaliar o desconforto, entre outros. Este tema é de importância para o transporte ferroviário de passageiros, para o projeto geométrico e em especial para o entendimento dos trens pendulares, dado que estes “agem” no sentido de diminuir o desconforto sentido pelo usuário.

- Por fim, o Capítulo 7 apresenta referências dos custos envolvidos na implantação e operação de ferrovias e quais os custos adicionais relacionados com o material rodante pendular, que naturalmente é mais sofisticado e apresenta uma operação diferenciada. Serão apresentados

[2] O vocábulo “pendulação” é de uso incomum na língua portuguesa, porém é adotado ao longo do presente trabalho em referência aos sistemas de caixa móvel. A empresa espanhola Talgo, fabricante de trens de caixa móvel, adota essa nomenclatura em brochura traduzida para o português (TALGO, 2011).

exemplos provenientes da literatura que indiquem a competitividade do emprego dos trens pendulares.

2.3.2 Parte 2 – Estudos de caso

A Parte 2 reunirá os estudos de caso, constituindo a parte prática ou experimental do trabalho. Seguirão então quatro capítulos:

- O Capítulo 8 conterá o Estudo de Caso Preliminar. Nele, o objeto será o projeto funcional do corredor São Paulo – Sorocaba[3], uma ferrovia para trens regionais a ser implantada nos próximos anos, e que prevê uma velocidade máxima de 140 km/h. Serão repassados, entre outros: a caracterização do corredor, as alternativas de traçado elaboradas, as considerações acerca do material rodante (onde foi avaliada a possibilidade de utilizar trens pendulares), o levantamento de custos construtivos, as simulações de marcha efetuadas e seus resultados.

- Na sequência, será abordado no Capítulo 9 o que foi denominado como Estudo de Caso 1. Nele será analisada a possibilidade de incremento de velocidades no corredor São Paulo – Sorocaba, apresentado no Estudo de Caso Preliminar, mediante a operação de trens pendulares. Para isso, primeiramente será feita uma complementação do projeto geométrico funcional, em função de critérios de projeto e discutindo-se também o conforto do usuário (sendo que os apêndices A e B incluem informações complementares). Em seguida, serão feitas simulações de marcha prevendo uma velocidade máxima aumentada para em torno de 200 km/h. A complementação do projeto e as simulações englobarão quatro opções de operação:

    - Opção F-R, de referência (de modo que F remeta a “funcional” e R, a “referência”), prevendo o emprego de trens convencionais e a velocidade máxima de 140 km/h;

[3] O autor obteve acesso ao trabalho (CPTM, 2011), utilizado mediante autorização como estudo de caso.

- Opção F-0, prevendo o emprego de trens convencionais e a velocidade máxima incrementada, em torno de 200 km/h, porém próxima de 140 km/h nas curvas de menor raio;
- Opção F-1, prevendo o emprego de trens pendulares de sistema passivo e a velocidade máxima incrementada, em torno de 200 km/h, porém próxima de 170 km/h nas curvas de menor raio;
- Opção F-2, prevendo o emprego de trens pendulares de sistema ativo e a velocidade máxima incrementada, em torno de 200 km/h, praticada inclusive ao trafegar nas curvas de menor raio.

- No Capítulo 10 será apresentado o Estudo de Caso 2. Neste, o objeto será um corredor sueco, analisado mediante os dados e conclusões da tese feita por Persson (2008). Essa tese apresenta muitas semelhanças com o presente trabalho, com considerações acerca do emprego de trens pendulares, porém o corredor estudado é de traçado menos sinuoso em comparação com o projeto funcional do Estudo de Caso 1. Essa menor sinuosidade é bastante relevante para a proposta do trabalho. Os dados de tempo de viagem encontrados e discutidos serão extrapolados e adaptados para permitir posteriores comparações.
- Para o Capítulo 11, será feito o Estudo de Caso 3, no qual será gerado um traçado novo, teórico, de maior sinuosidade que o avaliado pelo primeiro estudo de caso. Serão adotadas as mesmas premissas de projeto e do mesmo modo feitas simulações de marcha para a velocidade incrementada. Assim sendo, serão encontradas velocidades médias e tempos totais de viagem nesse corredor teórico conforme as três opções de operação:
    - Opção T-0, de referência (de modo que T remeta a “teórico”), prevendo o emprego de trens convencionais e a velocidade máxima incrementada, em torno de 200 km/h, porém próxima de 140 km/h nas curvas de menor raio;
    - Opção T-1, prevendo o emprego de trens pendulares de sistema passivo e a velocidade máxima incrementada, em torno de 200 km/h, porém próxima de 170 km/h nas curvas de menor raio;

- Opção T-2, prevendo o emprego de trens pendulares de sistema ativo e a velocidade máxima incrementada, em torno de 200 km/h, praticada inclusive ao trafegar nas curvas de menor raio.

De maneira a facilitar a compreensão dos três estudos de caso que serão realizados e posteriormente comparados, a Tabela 2.1 de resumo é apresentada, com as características e detalhes das opções de operação.

Tabela 2.1 – Resumo dos estudos de caso e opções de operação analisadas

	Opção de operação	Material rodante	Caracterização do alinhamento horizontal	Velocidade máxima	Velocidade de operação nas curvas de menor raio
Estudo de Caso 1	F-R (referência)	Convencional	Medianamente sinuoso	140 km/h	140 km/h
	F-0	Convencional		~200 km/h	~140 km/h
	F-1	Pendular de sistema passivo		~200 km/h	~170 km/h
	F-2	Pendular de sistema ativo		~200 km/h	~200 km/h
Estudo de Caso 2	Não há (avaliação de dados existentes)	Convencional e de sistema pendular ativo	Pouco sinuoso	~200 km/h	~140 a 200 km/h (presumidas)
Estudo de Caso 3	T-0	Convencional	Muito sinuoso	~200 km/h	~140 km/h
	T-1	Pendular de sistema passivo		~200 km/h	~170 km/h
	T-2	Pendular de sistema ativo		~200 km/h	~200 km/h

2.3.3 Parte 3 – Análise crítica

A análise crítica a ser efetuada na Parte 3 compreenderá dois capítulos, trazendo considerações, conclusões e recomendações alimentadas pelos capítulos anteriores, de revisão bibliográfica e de estudos de caso.

Primeiramente, no Capítulo 11, será feita uma comparação geral dos resultados encontrados nos três estudos de caso (1, 2 e 3). Essa comparação possibilitará conclusões englobantes acerca do material rodante pendular, pois cada estudo de caso individualmente envolve um traçado com características particulares

e discussões que lhes são de certa forma internas. Somente a comparação entre os resultados dos três estudos de caso possibilitará generalizações, que eventualmente tenham validade para outros corredores, sendo assim possível fazer melhores recomendações.

Finalmente, no Capítulo 12, serão feitas as conclusões e recomendações do presente trabalho. As considerações então feitas farão referência a todos os aspectos discutidos ao longo do trabalho, como os presentes nos capítulos da revisão bibliográfica. Também serão apontadas as conclusões e recomendações provenientes de cada estudo de caso e da posterior comparação geral feita entre eles.

PARTE 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

3.1 DESENVOLVIMENTO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO

O transporte sobre trilhos data desde o início do século 16, com a utilização de trilhos de madeira para carroças em minas de carvão e minério de ferro. Os trilhos de ferro e as locomotivas a vapor surgiram no final do século 18 e início do século 19, respectivamente. Com estas, as ferrovias se proliferaram pela Europa e depois pelo mundo. A primeira ferrovia brasileira foi construída pelo barão de Mauá em 1854, ligando o Rio de Janeiro a Petrópolis. A tração elétrica e a diesel foram desenvolvidas no início do século 20 (SANTOS, 2011).

A partir de meados da década de 1950, os serviços ferroviários interurbanos de passageiros começaram a sentir, principalmente na Europa, os efeitos do crescimento dos outros modos que com eles concorriam: o transporte rodoviário, cuja infraestrutura se desenvolvia rapidamente; e o transporte aeroviário, que se tornava predominante em deslocamentos de médias e longas distâncias.

Dentro desse contexto, esforços se sucederam de maneira a elevar as velocidades médias dos trens e assim recuperar cotas de mercado. A velocidade máxima dos comboios na época se situava em torno de 160 km/h. Nas décadas seguintes surgiram os chamados trens de alta velocidade, que costumeiramente superam os 200 km/h. Estes exigiam a modernização das linhas existentes, retificadas e com maiores raios de curva, ou a construção de linhas inteiramente novas para permitir esse tipo de operação.

A opção alternativa para o aumento de velocidades foi o desenvolvimento dos trens de caixa móvel ou com sistema de pendulação, que possibilitavam a operação em velocidade incrementada mesmo em curvas de pequeno raio. As tecnologias se desenvolveram desde a década de 1960, mas somente ao final da década de 1980 os chamados trens pendulares entraram em operação comercial. A tecnologia é hoje bem estabelecida, porém não amplamente difundida.

No Brasil, enquanto isso, os sistemas ferroviários sofreram um processo de sucateamento nos últimos 40 anos. Praticamente não existem ligações operantes de trens interurbanos ou mesmo regionais no país. Nos próximos anos, espera-se uma

retomada, com a implantação de diversos novos corredores. Dentre esses novos corredores, destaca-se o corredor Rio de Janeiro – Campinas para trens de alta velocidade (TAV Rio de Janeiro – Campinas). O projeto desta linha é antigo, tendo décadas desde sua primeira concepção, e até hoje enfrenta percalços, com vários abandonos e retomadas. A última concepção data de 2009, atualmente estando incerta sua implantação, conforme informações da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT (2014).

Dada a implantação dos novos corredores, com a construção de novas linhas ou mesmo a modernização da malha existente, torna-se importante também uma retomada acadêmica da literatura de engenharia ferroviária do país. Nesse contexto, o trabalho de Stech (2012) pode servir de base para estudos referentes aos TAVs. O presente trabalho, por sua vez, propõe-se a servir de referência para trens de média velocidade, em ligações regionais e intercidades, com ênfase nas considerações relativas ao uso do material rodante de caixa móvel.

3.2 TRENS E FERROVIAS DE ALTA VELOCIDADE

Tal qual referido, os TAVs surgiram diante da necessidade de diminuir os tempos de viagem para melhorar a competitividade do modo ferroviário, diante da perda de cotas de mercado que se sucedeu devido ao desenvolvimento das rodovias e do transporte aeroviário a partir da década de 1950. Os trens de alta velocidade em sua maioria exigiam a implantação de novas vias, com raios superiores aos das vias existentes (da ordem de 2.000 m ou maiores). O primeiro TAV a entrar em operação, em 1964, foi o Shinkansen Série 0 japonês (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Trem japonês Shinkansen Série 0, primeiro TAV a entrar em operação (WIKIPEDIA, 2014a)

Como regra geral, na época da década de 1970 destacava-se que as ferrovias deveriam oferecer um tempo de viagem menor que o que o automóvel possibilitava. Era sugerido que esse tempo fosse equivalente a 2/3 do tempo correspondente ao desenvolvido numa autoestrada, supondo que nesta um automóvel consegue uma velocidade média de 90 km/h, para que a ferrovia fosse competitiva; isso corresponderia a uma velocidade média de 135 km/h dos trens (PITA, 1998).

Já para ser competitivo com o modo aeroviário, o tempo de viagem desejável do trem deveria ser, de centro a centro, menor ou igual ao tempo de voo do avião mais 75 minutos, que representam o embarque e desembarque, acesso ao aeroporto, etc. Disso é intuitivo que para distâncias grandes, maiores que 700 km por exemplo, os outros modos não conseguiriam competir com o modo aeroviário. Essas relações são mostradas pelo Gráfico 3.1.

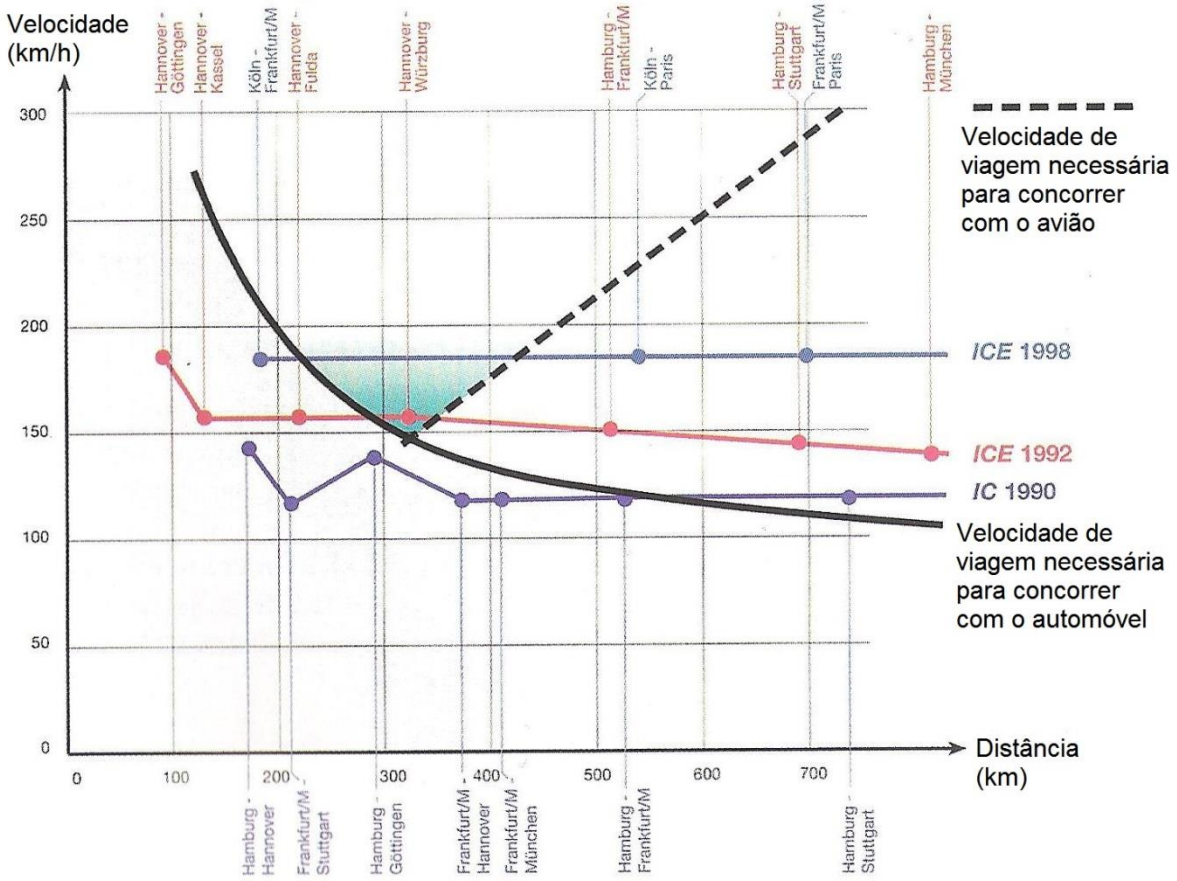


Gráfico 3.1 - Concorrência entre os modos ferroviário, rodoviário e aeroviário na Alemanha (PITA, 2008)

Os TAVs e as linhas projetadas para eles, inclusive, são o que tornaram possível estender o “raio” de competitividade do modo ferroviário para distâncias relativamente grandes, o que mostra o interesse comercial em se aumentar a velocidade diante da

concorrência. Atualmente, os investimentos de muitos países em ferrovias concentram-se em sistemas de alta velocidade. Mesmo assim, o transporte ferroviário de passageiros ainda enfrenta uma competição dura, embora ele se destaque por sua sustentabilidade.

3.3 SÍNTESE DA EVOLUÇÃO DOS TRENS PENDULARES

O desenvolvimento dos trens de caixa móvel, também chamados de trens pendulares, teve motivação bastante parecida com o dos TAVs. O objetivo em sua concepção foi incrementar as velocidades nas vias existentes sem a necessidade de construção de novas linhas de custos proibitivos – pois os raios elevados implicam em extensões significativas em túneis, pontes e viadutos dependendo da topografia. De maneira geral, poderia ser inferida uma dualidade entre as duas abordagens (TAVs e trens pendulares), mas como destaca Pita (2006), a análise de um corredor deve entender as duas tecnologias como opções, cada uma podendo se adequar melhor que a outra dependendo do caso, e não necessariamente que uma seja prioritariamente melhor que a outra.

O princípio básico dos trens pendulares é que as acelerações laterais às quais os passageiros estão submetidos quando o comboio trafega numa curva são reduzidas pela inclinação da caixa do veículo para o lado de dentro da mesma. O mesmo princípio é adotado por meio da superelevação da via. Assim, quando a caixa inclina, o veículo pode trafegar numa velocidade superior nas curvas sem causar desconforto aos passageiros.

Os trens pendulares se dividem entre: os de sistema passivo ou natural, que dependem apenas das próprias forças inerciais para a inclinação da caixa do veículo; e os de sistema ativo, que dependem de um atuador mecânico para inclinar (logo demandam também um sistema de controle que dê o posicionamento do trem e detecte as curvas).

Os primeiros experimentos e considerações a fim de reduzir a força lateral sentida pelos passageiros e permitir um incremento de velocidades nas curvas datam do final da década de 1930. O primeiro carro pendular experimental, que consistia na caixa montada sobre um sistema de suspensão elevado (ou seja, de pendulação

natural), foi colocado em serviço pela companhia Pullman em 1938, na *Atchison, Topeka and Santa Fe Railway* (PERSSON, 2011).

As primeiras séries de trens pendulares, baseados na pendulação natural, foram os trens japoneses de classe 381, introduzidos em 1973 na linha entre Nagoya e Nagano e os trens espanhóis Talgo Pendular (Figura 3.2), introduzidos na Espanha em 1980.

Figura 3.2 – Trem espanhol Talgo Pendular RD Camas, de 1981, em operação em maio de 1993 (TRAINS-WORLDEXPRESSES.COM, 2014)

Já a tecnologia dos sistemas ativos foi introduzida em 1965 pela ferrovia alemã, Deutsche Bahn - DB, com a conversão de uma unidade múltipla diesel (*Diesel Multiple Unit* - DMU) para inclinar a caixa. Em 1972 uma versão pendular da série 624, chamada de série 634, foi introduzida na linha entre Colônia e Saarbrucken, sendo o primeiro trem pendular de sistema ativo em operação.

A tecnologia dos sistemas ativos veio progredindo e se estabelecendo desde então. Houve o desenvolvimento dos trens Pendolino desde 1969; o Elettrotreni Rapidi - ETR 401 foi o primeiro Pendolino a entrar em operação comercial, em 1975. Também se destacou o desenvolvimento de tecnologia com participação da Ferrovia Estatal Sueca desde 1973, que resultou na série X2 de trens pendulares ativos. Os ingleses desenvolveram trens pendulares ativos por meio do programa *Advanced Passenger Train* - APT, com operação durante alguns anos entre Londres e Glasgow, embora tenha ocorrido a descontinuidade dos serviços no final da década de 1980 (PERSSON, 2011).

O salto mais significativo para os trens pendulares de sistema ativo se deu em torno de 1990, com a introdução em grande escala comercial de trens como o ETR450 na Itália e o X2 na Suécia (Figura 3.3). A Série 2000 era ao mesmo tempo introduzida no Japão, sendo o primeiro trem pendular natural com suporte ativo de inclinação.

Figura 3.3 – Trem sueco X2, em operação a partir de 1990 (WIKIPEDIA, 2014g)

Em 2007, a Série Shinkansen N700 (Figura 3.4) se tornou o primeiro trem pendular com velocidade máxima acima de 250 km/h, em operação no Japão (sendo que trens pendulares anteriores já eram considerados de alta velocidade ao superarem a barreira dos 200 km/h). Em 2008, entrou em operação comercial o ETR 600 e suas variantes, chamadas também de Novo Pendolino.

Figura 3.4 – TAV japonês com sistema pendular Série N700, em operação desde 2007 (WIKIPEDIA, 2014c)

Segundo dados de Persson (2011), mais de 5.000 veículos de caixa móvel foram produzidos ao redor do mundo por diferentes fornecedores; exemplos são mostrados na Figura 3.5. Hoje a tecnologia é estabelecida e considerada de baixo custo para aumentar velocidades e reduzir tempos de viagem.

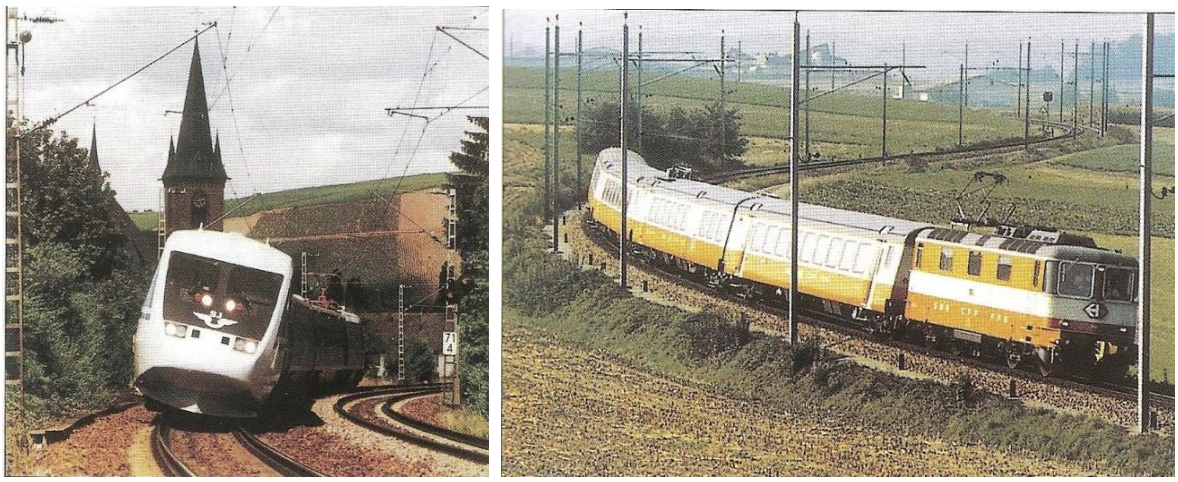


Figura 3.5 - Trem X2000 sueco (esq.) e carros suíços SIG (dir.) (PITA, 2006)

A vantagem dos trens pendulares foi um pouco reduzida nos últimos anos, devido à nova tendência geral dos trens convencionais de trafegar em velocidades mais altas nas curvas (o que reduz o conforto do passageiro). Atualmente a redução potencial do tempo de viagem com a introdução dos trens pendulares é dada na literatura como entre 10 e 15%.

A Tabela 3.1 a seguir mostra a redução do tempo de viagem em alguns corredores europeus na década de 1990 com o emprego de trens pendulares de sistema ativo, que são os com maior potencial de aumento de velocidade nas curvas. A redução do tempo de viagem nesses exemplos fica entre 12 e 20%.

Tabela 3.1 - Redução do tempo de viagem com emprego de trens pendulares de sistema ativo em corredores europeus (PITA, 2006)

Corredor	Extensão	Tempo total de viagem		Redução do tempo de viagem	
	(km)	Trem convencional	Trem pendular de sistema ativo	(min)	(%)
Roma - Milão	624	5 h 10	4 h 30	40	13
Roma - Veneza	573	5 h 30	4 h 30	60	18
Roma - Régio da Calábria	690	6 h 50	6 h 00	50	12
Roma - Bari	512	5 h 00	4 h 15	45	15
Milão - Zurique	293	4 h 30	3 h 50	40	15
Milão - Genebra	372	4 h 10	3 h 20	50	20
Milão - Basileia	419	4 h 50	4 h 00	50	17

Ressalva-se que parte dessa redução deve-se à desnecessidade de mudar o tipo de tração na fronteira entre os países, e não somente ao emprego de um material rodante de caixa móvel. A experiência francesa mostra, segundo Pita (2006), que a velocidade comercial pode ser aumentada de entre 10 a 15% em relação ao material rodante convencional.

Quanto ao conforto do passageiro, experimentalmente verifica-se que os trens pendulares apresentam um nível de conforto maior que os trens convencionais; entretanto o material rodante de caixa móvel é algumas vezes associado com níveis mais significativos de enjoo de movimento ou cinetose que os comboios convencionais (PERSSON, 2011). Essas questões são abordadas de maneira mais aprofundada no programa *Fast and Comfortable Trains* – FACT (KUFVER, 2005), nos trabalhos de Förstberg (2000), Persson (2011), entre outros.

A Tabela 3.2 a seguir mostra exemplos do material rodante pendular ao redor do mundo. Os trens pendulares de sistema passivo da Talgo e os de sistema ativo da Alstom da série Pendolino são os de uso mais difundido atualmente. Entre os países, como visto, Alemanha, Espanha, Itália, Japão, Reino Unido e Suécia hoje se destacam na operação do material rodante de caixa móvel.

No Capítulo 5 é aprofundado o estado da arte da tecnologia, com os tipos de trens pendulares disponíveis na atualidade explicitados e as particularidades do funcionamento de cada variante apresentadas.

Tabela 3.2 – Trens pendulares ao redor do mundo (WIKIPEDIA, 2014i)

Material rodante	País ou região	Ano (introdução)
Trens pendulares de sistema passivo		
Talgo XXI	Espanha	
UAC TurboTrain	Estados Unidos, Canadá	
JNR Sére 381	Japão	1973
Trens pendulares de sistema ativo		
LRC (MLW)	Canadá	
Acela Express (Bombardier)	Estados Unidos	
Advanced Passenger Train		1980
British Rail Pendolino Classe 390	Reino Unido	
Alfa Pendular	Portugal	
ElettroTreno	Itália	
ICE-T	Alemanha	
ICN (Bombardier)	Suíça	
JetTrain (Bombardier)	América do Norte	
NSB Classe 73	Noruega	
SZ Série 310	Eslovênia	
RegioSwinger	Alemanha e Croácia	
Pendolino (Alstom)	Itália, Finlândia, Reino Unido, República Tcheca	
Virgin Train Super Voyager		
TRA Taroko Express	Taiwan	2007
QR Tilt Train	Austrália	
X2, Xinshisu	Suécia, China	
JR Shikoku Série 2000	Japão	1989
JR Hokkaido KiHa Série 281	Japão	1992
JR Shikoku Série 8000	Japão	1992
JR East Série E351	Japão	1993
Chizu Express Série HOT7000	Japão	1994
JR Central Série 383	Japão	1994
JR Kyushu Série 883	Japão	1994
JR Hokkaido KiHa Série 283	Japão	1995
JR West Série 283	Japão	1996
JR Kyushu Série 885	Japão	1999
JR West KiHa Série 187	Japão	2001
JR Hokkaido KiHa Série 201	Japão	1996
JR Hokkaido KiHa Série 261	Japão	1999
Meitetsu Série 1600	Japão	1999
Meitetsu Série 2000	Japão	2004
Odakyu Série 50000 VSE	Japão	2005
Shinkansen Série N700	Japão	2007
Shinkansen Série E5	Japão	2011
Shinkansen Série E6	Japão	2013
TRA Puyuma Express	Taiwan	2013

4. DINÂMICA DOS VEÍCULOS EM CURVA E CONCEITO DO SISTEMA PENDULAR

A principal diferença do material rodante pendular em relação ao convencional se concentra em como a estrutura do que é chamado de caixa – a superestrutura do carro de passageiros, onde os mesmos estão – está sustentada pelo sistema de suspensão ao *boogie* ou truque ferroviário. O *boogie* ou truque, por sua vez, é o chassis que comporta os eixos e as rodas, sendo que os carros de passageiros normalmente possuem dois truques. Os trens capazes de, por meio de um sistema de suspensão diferenciado, inclinar a caixa do veículo em torno do eixo longitudinal do mesmo e internamente em relação às curvas são chamados de trens pendulares (PERSSON, 2011).

A função desse mecanismo é proporcionar uma inclinação maior do plano do passageiro em relação ao plano horizontal, em adição à inclinação que já é proporcionada pela superelevação da via. Com isso, é diminuída a aceleração lateral sentida pelos passageiros, um fator de grande influência no dimensionamento da geometria horizontal das linhas férreas.

A seguir será detalhado como se dá o comportamento dos veículos trafegando em curva. O caso rodoviário será incluído para permitir posteriores comparações, porém o foco se dará nas questões envolvidas no deslocamento dos trens ao longo de uma curva. Após essa base será explicado mais amplamente o conceito geral do sistema de inclinação da caixa do veículo, chamado também de sistema pendular. Nos capítulos subsequentes, serão abordadas as questões ligadas ao funcionamento do sistema em si (com a explicação de cada variante em particular) e uma discussão sobre o conforto do passageiro nos veículos convencionais e pendulares.

4.1 CASO RODOVIÁRIO

A dinâmica do veículo rodoviário percorrendo a curva circular é essencial para a determinação do raio mínimo R_{min} de projeto. Basicamente, essa definição provém do equilíbrio das forças para um observador não inercial situado dentro do veículo. Estas forças são a força peso (P), a força normal de reação à componente da força peso

(N), a força de atrito lateral pneu-pavimento (F_a) e a força centrífuga (F_c)[4], conforme a Figura 4.1. Considera-se ainda o ângulo de inclinação ou superelevação da pista β (°), embora a representação mais usual seja como a declividade transversal e (%).

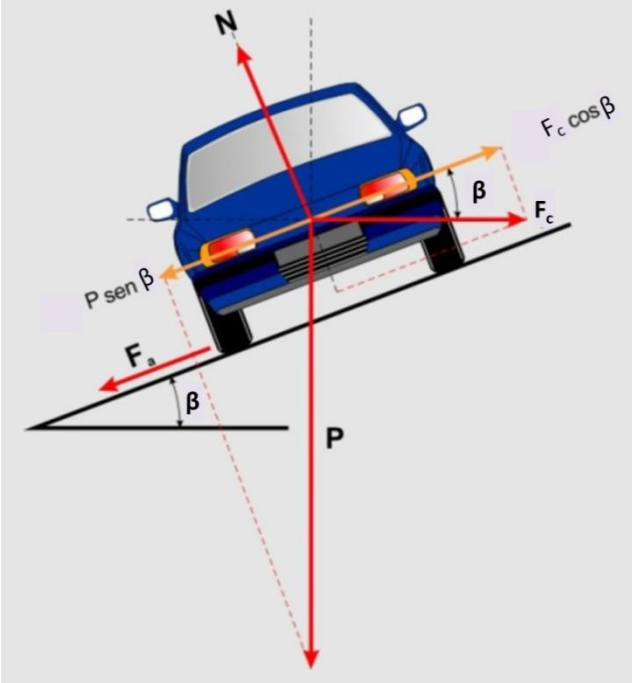


Figura 4.1 – Forças atuantes no veículo percorrendo uma curva circular superelevada (DER/SP, 2006)

O manual de projeto geométrico da *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO (2004), assim como as notas técnicas do Departamento de Estradas de Rodagem - DER (2006), mostram as fórmulas (Equação 4.1 e Equação 4.2) para cálculo do raio mínimo. Para isso são feitas aproximações como cos(β) = 1, sen(β) = tg(β) = e% e $1 - e \cdot f_a = 1$.

$$\frac{e + f_a}{1 - e \cdot f_a} = \frac{v^2}{g \cdot R} = \frac{0{,}0079 \cdot V^2}{R} = \frac{V^2}{127 \cdot R}$$

Equação 4.1 – Equilíbrio do veículo em curva horizontal (AASHTO, 2004)

$$R_{min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{max} + f_{max})}$$

Equação 4.2 – Raio mínimo de curva horizontal numa rodovia (AASHTO, 2004)

[4] A força centrífuga é na realidade uma pseudoforça, ou seja, uma força considerada para sistemas referenciais não inerciais de forma a estabelecer um equilíbrio para melhor entendimento – embora num referencial não inercial não haja esse equilíbrio, conforme o veículo faz a curva (havendo, portanto, alteração na direção do vetor velocidade).

Nas fórmulas tem-se:

- e: Superelevação da curva (adimensional, expressa em %), sendo e_{max} a superelevação máxima adotada;
- f_a: Fator de atrito lateral pneu-pavimento (adimensional), sendo f_{max} o máximo fator de atrito lateral admissível;
- v, V: Velocidade do veículo (m/s e km/h, respectivamente);
- g: Aceleração da gravidade (m/s²), considerada igual a 9,81 m/s²;
- R: Raio da curva horizontal (m), sendo R_{min} o raio mínimo admissível.

Será interessante calcular para o presente trabalho o valor da aceleração lateral sentida pelo passageiro. Essa aceleração normalmente não é considerada diretamente no projeto de rodovias, sendo mais comum como critério limitante no projeto geométrico ferroviário. Porém, a constatação dessa aceleração será útil para comparação de valores justamente com o caso ferroviário.

Para encontrar o valor da aceleração lateral sentida pelo passageiro, pode-se calcular a resultante das forças no plano da via (sem incluir o atrito lateral F_a), conforme a Figura 4.1. Considere-se então a resultante entre a componente da aceleração centrífuga e a componente da aceleração da gravidade, conforme a dedução a seguir.

$$a_{nc} = \frac{v^2}{R} \cdot \cos\beta - g \cdot \operatorname{sen}\beta \qquad \text{(I)}$$

$$a_{nc} = \frac{V^2}{12{,}96 \cdot R} \cdot \cos[arctg(e)] - 9{,}81 \cdot \operatorname{sen}[arctg(e)] \qquad \text{(II)}$$

As variáveis têm os mesmos significados e unidades apresentados anteriormente; apenas adiciona-se a aceleração não compensada a_{nc} (m/s²), que é deduzida.

A aceleração não compensada leva esse nome quando a aceleração lateral sentida pelo passageiro apresenta valor positivo. Efetivamente, a componente referente à gravidade no plano da via não está “compensando” completamente a aceleração lateral provocada pela aceleração centrífuga. O valor real de a_{nc}, porém,

seria ligeiramente maior devido ao efeito da flexibilidade da suspensão do veículo, que se apresenta também no caso ferroviário e é abordado com maior profundidade posteriormente.

Tomem-se os dados de f_{max} e as superelevações comumente praticadas de 4,0, 6,0 e 8,0%, provenientes das notas técnicas do DER (2006), para cada velocidade. Com esses valores, por meio da Equação 4.2 e pela dedução feita, pode-se calcular o raio mínimo R_{min} e a aceleração lateral não compensada a_{nc} sentida pelo passageiro. Os resultados são organizados conforme a Tabela 4.1 e o Gráfico 4.1, em função das velocidades de projeto V.

Tabela 4.1 – Raio mínimo e aceleração lateral não compensada (elaborado a partir de DER/SP, 2006)

Superelevação máxima, e_{max}(%)	Velocidade de projeto, V (km/h)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
	Fator de atrito lateral máximo, f_{max} (-)	0,35	0,28	0,23	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,09	0,08
4,0%	Raio mínimo adotado, R (m)	8	22	47	86	135	203	280	375	492	-	-	-
	Aceleração lateral não compensada, a_{nc} (m/s²)	3,46	2,76	2,23	1,85	1,66	1,47	1,37	1,27	1,17	-	-	-
6,0%	Raio mínimo adotado, R (m)	8	21	43	79	123	184	252	336	437	560	756	951
	Aceleração lateral não compensada, a_{nc} (m/s²)	3,26	2,71	2,28	1,85	1,67	1,46	1,37	1,27	1,17	1,08	0,88	0,78
8,0%	Raio mínimo adotado, R (m)	7	20	41	73	113	168	229	304	394	501	667	832
	Aceleração lateral não compensada, a_{nc} (m/s²)	3,61	2,68	2,22	1,85	1,67	1,46	1,37	1,27	1,17	1,08	0,88	0,78

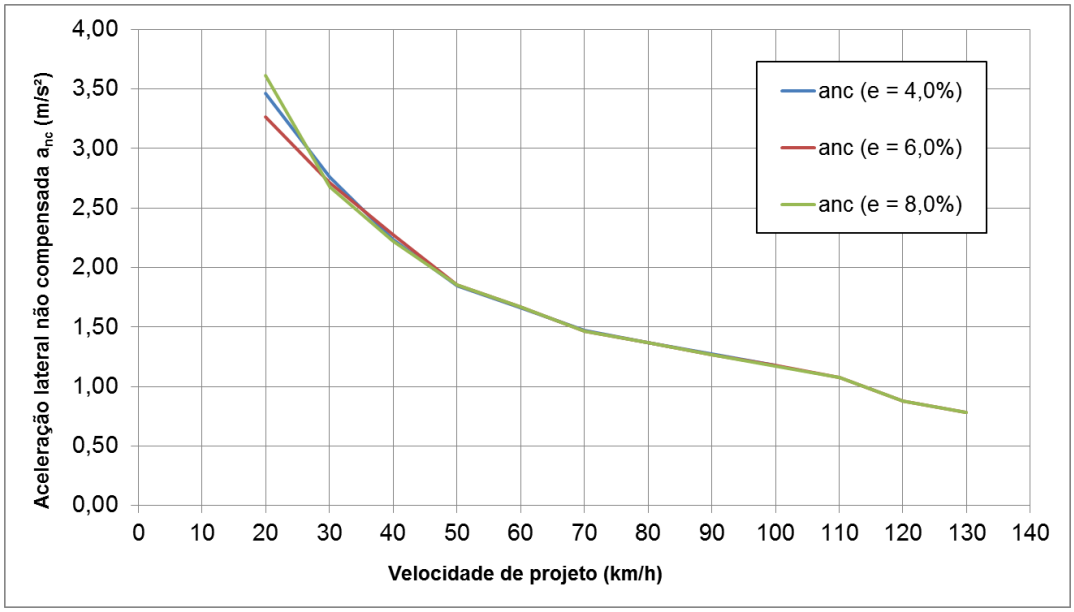


Gráfico 4.1 – Aceleração lateral não compensada a_{nc} em função da velocidade

Visualiza-se que a aceleração lateral sentida pelo passageiro na curva de uma rodovia diminui tanto quanto for maior a velocidade de projeto, sem grandes variações em função da superelevação adotada.

Existe uma discussão a respeito do valor a ser adotado como limite para a aceleração lateral percebida pelo passageiro do modo ferroviário, em função de o mesmo estar de pé ou sentado, entre outros fatores. Os valores comumente adotados variam de 0,50 a 1,40 m/s² para trens de média velocidade, entre 120 e 200 km/h. De maneira subjetiva, se poderia a princípio tender a aplicar valores menores, mais conservadores, visto que para o caso rodoviário resultam valores típicos em torno de 0,80 m/s² para uma velocidade de 130 km/h; velocidades ainda maiores exigiriam acelerações laterais ainda menores.

É interessante pontuar a necessidade do transporte ferroviário de oferecer condições de conforto tão parecidas ou mesmo melhores que as do transporte rodoviário, de uma maneira semelhante à questão do tempo de viagem, que deve ser menor. O atendimento a essas e outras necessidades é que vai determinar a maior atratividade do modo ferroviário em comparação com os outros modos, podendo mesmo definir a viabilidade econômica de um corredor em função de sua capacidade de absorver a demanda desses outros modos.

4.2 CASO FERROVIÁRIO

Semelhantemente ao caso rodoviário, o veículo sobre trilhos percorrendo uma trajetória circular estará sujeito à força peso e à pseudoforça centrífuga (considerando um referencial não inercial, de um observador dentro do trem). Considerando uma ferrovia superelevada, como reações a essas forças haverá a normal e, no lugar do atrito entre pneu e pavimento do caso rodoviário, haverá a resistência lateral provida pelo trilho fixado.

Como no caso rodoviário, a superelevação tem por objetivo reduzir a aceleração lateral, permitindo velocidades mais elevadas e/ou raios de curva horizontal menores. Essa redução acontece por meio da elevação do trilho externo da curva de uma medida D (dada normalmente em mm), ou seja, a superelevação D será a diferença de altura entre os topos dos boletos (que são as partes superiores dos trilhos).

A distância entre as faces internas dos boletos dos trilhos é chamada de bitola b (dada em m ou mm). A distância entre os eixos dos trilhos é designada como b_0, sendo ligeiramente superior à bitola. Existem vários tipos de bitola em uso, sendo a igual a 1,435 m e definida como bitola padrão, normal, *standard* ou internacional a mais frequentemente usada no mundo. Outros exemplos são a bitola larga, igual a 1,600 m, e a bitola métrica, igual a 1,000, sendo esta última a mais comum no Brasil. À bitola b normal corresponde uma distância entre os eixos dos trilhos, b_0, igual a 1,500 m.

Sendo que a bitola b pode assumir diferentes valores, há que se ter isso em conta na consideração da superelevação D adotada, já que esta normalmente é dada em mm. Ou seja, uma superelevação D de 100 mm numa ferrovia de bitola métrica terá um efeito bastante diferente que se fosse aplicada numa ferrovia de bitola padrão. Se a superelevação fosse designada em porcentagem, como no meio rodoviário, ou por meio de uma medida angular φ (em graus), evitar-se-iam eventuais confusões. A prática no meio ferroviário, entretanto, consolidou-se em adotar essa medida linear para representar a superelevação.

De maneira semelhante ao caso rodoviário, a análise do equilíbrio do veículo na curva (Figura 4.2), para um observador não inercial situado dentro dele, permite um equacionamento composto pelas variáveis envolvidas.

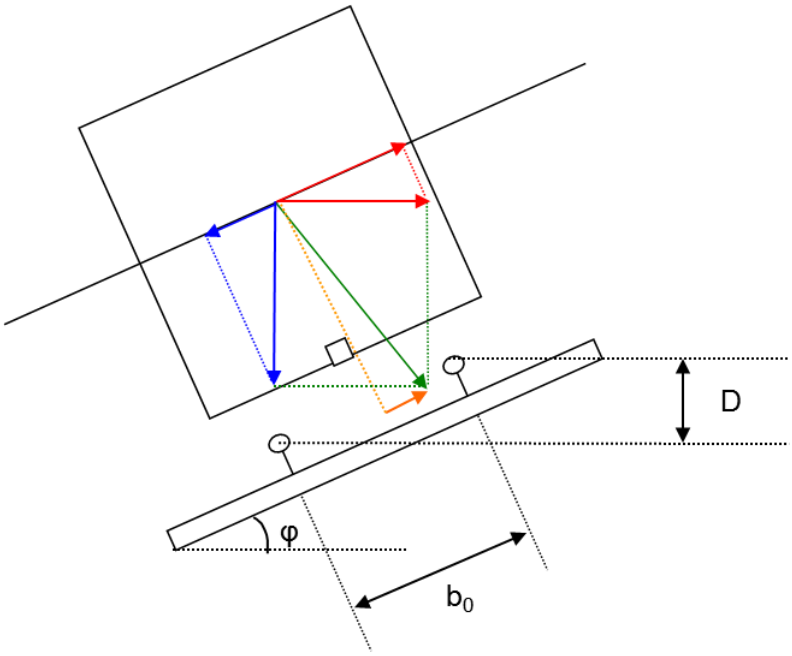


Figura 4.2 – Forças atuantes no veículo ferroviário percorrendo uma curva circular superelevada (PORTO e KABBACH JUNIOR, 2002)

Na figura anterior, as setas vermelhas representam a força centrífuga (correspondente à aceleração centrífuga a_c) no plano horizontal e sua componente no plano da via. As setas azuis representam a força peso, perpendicular ao plano horizontal e sua componente no plano da via. A seta verde representa a resultante entre a força centrífuga e a força peso; a seta laranja é sua componente no plano do passageiro, ou seja, corresponde à aceleração lateral não compensada a_{nc} sentida por ele.

A equação resultante pode ser organizada de várias maneiras. Uma dessas formas, bastante usual, define a superelevação d conforme o atendimento ao critério do conforto, sendo mostrada na Equação 4.3:

$$d = \frac{v^2}{R} \cdot \frac{b_0}{g} - a_{nc} \cdot \frac{b_0}{g} = \frac{V^2 \cdot b_0}{12{,}96 \cdot 9{,}81 \cdot R} - a_{nc} \cdot \frac{b_0}{9{,}81} = \left(\frac{V^2 \cdot b_0}{127 \cdot R}\right) - \left(a_{nc} \cdot \frac{b_0}{9{,}81}\right)$$

Equação 4.3 – Superelevação d segundo o critério do conforto (PORTO e KABBACH JUNIOR, 2002)

Onde:

- a_{nc}: Aceleração lateral não compensada, sentida no plano da via (m/s²);
- v, V: Velocidade do veículo (m/s e km/h, respectivamente);
- R: Raio da curva horizontal (m);
- g: Aceleração gravitacional (m/s²), considerada como 9,81 m/s²;
- d: Superelevação (m);
- b_0: Distância entre os eixos dos trilhos (m).

A seguir, esta equação é explicada, reorganizada e mostrada de outras maneiras, ao passo que é desenvolvido um raciocínio que será útil ao longo do presente trabalho. Como feito no caso rodoviário, este raciocínio é iniciado explicitando a influência da aceleração não compensada a_{nc}.

Por meio da superelevação D, a aceleração centrífuga original a_c é “redistribuída” em duas componentes: uma horizontal, paralela ao plano inclinado da via e ligeiramente menor em valor que a_c; a outra vertical e perpendicular ao plano da via. A aceleração gravitacional g também é “redistribuída” em duas componentes

devido à superelevação: uma é horizontal e paralela ao plano inclinado da via; a outra é vertical, perpendicular ao plano da via e de valor ligeiramente menor que g.

Com respeito à resultante das acelerações agindo no passageiro, a componente horizontal, paralela ao plano da via, designada como a_{nc} (aceleração lateral não compensada) ou a_{lp} (aceleração lateral sentida pelo passageiro), terá um valor menor que o que haveria se a via não estivesse superelevada. Isso se deve principalmente à componente paralela ao plano da via provinda da aceleração gravitacional g, que compensa grande parte da componente provinda da aceleração centrífuga a_c no mesmo plano. Já a componente vertical da resultante aumentará ligeiramente, devido principalmente ao efeito incrementador da componente vertical (perpendicular ao plano da via) da aceleração centrífuga a_c.

De maneira alternativa, pode-se entender o efeito da superelevação decompondo a resultante da aceleração centrífuga a_c e da aceleração gravitacional g ante a reorientação dos eixos horizontal e vertical (provida pela superelevação), conforme a

Figura 4.3. A componente horizontal a_{nc}, que representa a aceleração lateral sentida pelo passageiro e que é determinante para o conforto, acaba sendo diminuída com a via superelevada.

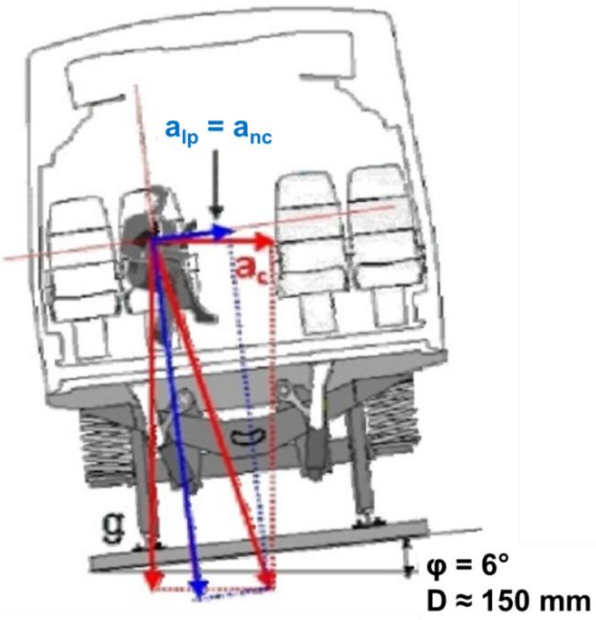


Figura 4.3 – Acelerações atuantes em um trem convencional numa curva circular (CPTM, 2011)

O valor máximo de superelevação normalmente utilizado numa linha férrea é de em torno de 10% de declividade transversal, o que corresponde a aproximadamente D = 150 mm para a bitola normal e a um ângulo φ de inclinação igual a 5,71° (aproximadamente 6°). Disto extrai-se, como regra prática, que as medidas em graus e em mm obedecem a uma relação aproximadamente linear: para a bitola normal, 25 mm de superelevação corresponderiam a aproximadamente 1° de inclinação por essa regra. Como no caso rodoviário, normalmente aproximações trigonométricas são utilizadas devido à pequena ordem de grandeza dos valores envolvidos, como assumir que tg(φ) = sen(φ) e cos(φ) = 1, isto já tendo sido considerado para a Equação 4.3.

Reorganizando a equação anterior, pode-se descrever a aceleração não compensada a_{nc} no plano do passageiro em função da velocidade, do raio da curva horizontal, da superelevação D e da bitola (Equação 4.4). A partir daqui, serão considerados os valores referentes à bitola b normal (1,435 m), logo b_0 = 1,500 m. As outras variáveis e unidades são as mesmas que as da Equação 4.3, com a adição da superelevação D agora expressa em mm.

$$a_{nc} = \frac{v^2}{R} - g \cdot \frac{d}{b_0} = \frac{V^2}{12{,}96 \cdot R} - \frac{D}{152{,}9}$$

Equação 4.4 – Aceleração lateral não compensada no plano do passageiro – Bitola normal (SCHRAMM, 1974)

A situação ideal quanto à aceleração lateral a_{nc} aconteceria quando a mesma se tornasse 0, por meio de uma superelevação D tal que o vetor resultante entre a força centrífuga e a força peso estivesse perpendicular ao plano inclinado da via. Tornando-se a_{nc} = 0 na Equação 4.4 e isolando-se a superelevação, chega-se a esse valor, que é denominado como superelevação de equilíbrio ou teórica D_t (mm), como na Equação 4.5 a seguir.

$$D_t = \frac{11{,}8 \cdot V^2}{R}$$

Equação 4.5 – Superelevação teórica (SCHRAMM, 1974)

A adoção da superelevação teórica D_t nas ferrovias, entretanto, não é usual. Essa superelevação poderia ser recomendada em casos nos quais todos os trens

operando numa linha trafegassem com a mesma velocidade, o que dificilmente acontece na prática. Mesmo que os trens trafegassem numa mesma velocidade, ainda haveria a possibilidade do trem parar na curva ou percorrê-la numa velocidade mais baixa, o que geraria uma aceleração lateral de valor indesejado para dentro da curva.

Imagine-se o caso de uma via de uso misto (como é comum nas ferrovias europeias), em que os trens de passageiros trafegam a 160 km/h e os trens de carga a 60 km/h. Numa dada curva, é adotada a superelevação teórica D_t de modo que a aceleração lateral sentida pelo passageiro torne-se igual a 0 quando o trem a percorre na velocidade máxima. Para os trens de carga, mais lentos, a superelevação nessa curva seria excessiva, provocando a aceleração lateral para dentro da curva (o valor de a_{nc}, na Equação 4.4, se tornaria negativo). Isto poderia solicitar excessivamente o trilho interno (causando desgaste excessivo e provocando deformações no alinhamento dos trilhos) e mesmo comprometer a segurança; essa aceleração lateral não compensada seria ainda maior se o trem de carga parasse.

Em virtude disso, é costumeiro adotar-se uma superelevação real menor que a superelevação teórica. Com a adoção dessa superelevação real, para os trens trafegando na velocidade máxima da via (velocidade de projeto), remanesce a aceleração lateral não compensada a_{nc}, que por sua vez deverá obedecer valores limite determinados. Como exemplo de valor limite, é relatado por Schramm (1974) que a Estrada de Ferro Alemã (Deutsche Bahn - DB) estabeleceu o valor máximo admissível de a_{nc} = 0,65 m/s², baseando-se na experiência com os trens de passageiros no país.

A aceleração lateral não compensada a_{nc} para fora da curva, típica do caso de trens de passageiros em velocidades mais altas, é representada de modo alternativo como o déficit, deficiência ou insuficiência de superelevação I, em mm. Da mesma forma, a aceleração lateral não compensada a_{nc} para dentro da curva, típica do caso de trens de carga em velocidades mais baixas em vias de uso misto, é representada alternativamente como o excesso de superelevação (E), também em mm.

A insuficiência I e o excesso E são proporcionais às acelerações laterais não compensadas que correspondem, podendo-se designá-las de maneira prática; elas podem assim ser somadas ao valor da superelevação D de modo a encontrar a

superelevação teórica D_t. A mesma relação aproximadamente linear usada como regra prática com a superelevação também pode ser aplicada ao estudar-se a insuficiência I e o excesso E.

Mais uma vez, variações das equações anteriores podem ser usadas e reconfiguradas para analisar uma série de casos, como o do raio mínimo que pode ser usado para uma dada velocidade de projeto e superelevação. A norma europeia EN 13803:2010, do CEN (Comitê Europeu de Normalização), por exemplo, determina a Equação 4.6 e a Equação 4.7 para definição de raios mínimos e máximos (2010).

$$R_{min} = \frac{C}{D + I_{lim}} \cdot V_{max}^2$$

Equação 4.6 – Raio mínimo da curva horizontal – Insuficiência de superelevação I (CEN, 2010)

$$R_{max} = \frac{C}{D - E_{lim}} \cdot V_{min}^2$$

Equação 4.7 – Raio máximo da curva horizontal – Excesso de superelevação E (CEN, 2010)

Onde:

- R_{min} e R_{max}: Raio mínimo e raio máximo, respectivamente (m);
- C: Constante para conversão de unidades, sendo C = 11,8 mm.m.h²/km²;
- D: Superelevação (mm);
- I_{lim} e E_{lim}: Insuficiência e excesso de superelevação limites, respectivamente (mm), sendo que D > E_{lim};
- V_{max} e V_{min}: Velocidades máxima e mínima, respectivamente (km/h).

Conforme detalha Schramm (1974), a definição da superelevação D a se adotar menor que a teórica pode ser de certa forma arbitrária. Por exemplo, a ferrovia alemã DB estabeleceu uma regra prática: para um determinado trecho, toma-se como base a velocidade regulamentar do trem mais rápido e assume-se a superelevação prática igual a dois terços da teórica.

A CPTM, de maneira mais detalhada, estabelece para suas vias de uso misto a chamada superelevação equilibrada, em função das velocidades praticadas pelos

trens de passageiros e de carga. Ou seja, adota-se uma superelevação menor que a teórica para o trem mais rápido (respeitando-se a aceleração lateral não compensada limite para o conforto do passageiro) e grande o suficiente de modo que não seja produzido um excesso de superelevação nos trens mais lentos (CPTM, 2007).

Para a consideração em linhas exclusivas para trens de passageiros (ou a princípio projetadas com esse intuito), pode-se considerar a seguinte Equação 4.8 reorganizada para determinação da superelevação mínima, D_{min}, em mm:

$$D_{min} = \frac{11{,}8 \cdot V^2}{R} - I$$

Equação 4.8 – Superelevação mínima necessária (CEN, 2010)

4.2.1 Efeito da flexibilidade da suspensão

Conforme será visto a seguir, um dos propósitos dos sistemas de suspensão é garantir que defeitos na via não causem desconforto ao passageiro, como por exemplo o provocado quando o trem trafega sobre a interface de dois trilhos com uma solda precariamente executada. O "solavanco" que esses defeitos causariam é atenuado pelo sistema de molas e amortecedores da suspensão do veículo. Entretanto, um efeito colateral resultante da flexibilidade da suspensão é que a caixa do veículo se inclinará para fora da curva devido à força centrífuga. Essa inclinação é sempre contrária àquela proporcionada pela superelevação da via.

Esse fenômeno acontece tanto nos trens convencionais como nos trens pendulares, e dependerá da natureza e do estado dos sistemas de suspensão, podendo assim ser de maior ou menor grau. Como ilustrado na Figura 4.4 da página a seguir, a inclinação para fora da curva provoca um aumento da aceleração lateral não compensada de a_{nc} para $a_{nc,f}$ (m/s²) – esta última que designa a aceleração lateral não compensada com o efeito da flexibilidade da suspensão contabilizado. Nota-se que é perdido parte do “benefício” provido pela superelevação com a diminuição do ângulo efetivo entre o plano do passageiro e o plano horizontal.

A quantificação do efeito discutido pode ser designada pela aplicação do fator de giro ou rolamento efetivo, f_R (adimensional), conforme proposto pelo projeto *Fast And Comfortable Trains* - FACT, elaborado pela Comissão Europeia (KUFVER, 2005).

Multiplicando-se a aceleração lateral não compensada a_{nc} pelo fator f_R encontra-se a aceleração lateral efetivamente sentida pelo passageiro, $a_{nc,f}$.

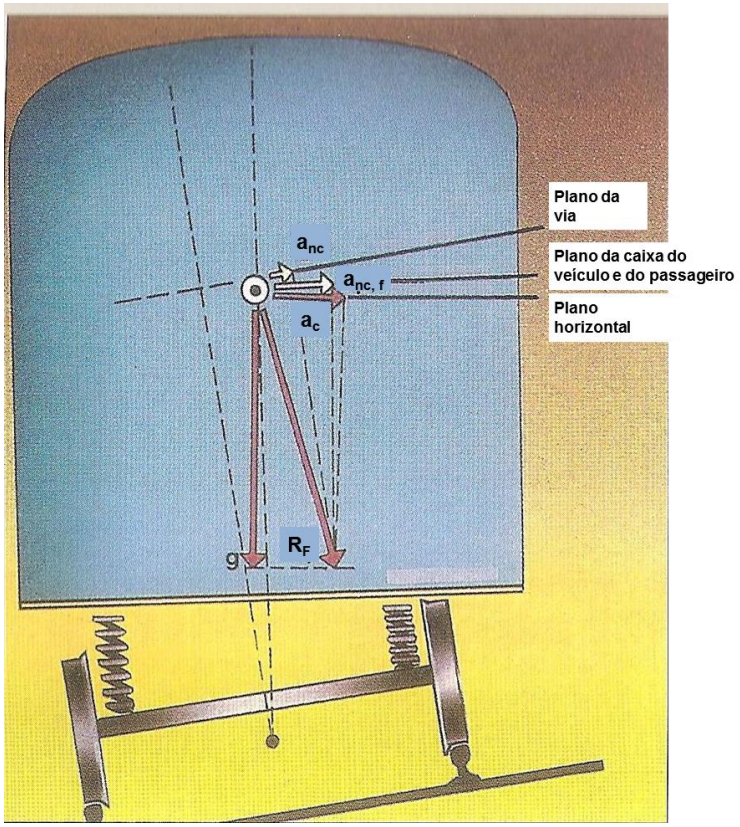


Figura 4.4 - Efeito da flexibilidade da suspensão (PITA, 2006)

No projeto FACT é considerado que a aceleração lateral percebida pelo passageiro pode aumentar de 20 a 50% comparada com a aceleração no plano da via, em função do carro de passageiros ser mais novo ou antigo. Isso corresponderia a uma variação do fator de rolamento efetivo na faixa de $1,2 \leq f_R \leq 1,5$. Já Pita (1998) retrata o fator de rolamento f_R entre 1,2 e 1,4 devido ao efeito da flexibilidade da suspensão, sugerindo a adoção de um fator médio igual a 1,3. Goodall e Mei (2006) consideram que o veículo convencional inclina tipicamente não mais que 1º para fora da curva, considerando-se uma insuficiência de superelevação I igual a 150 mm; isto corresponde a um fator de giro efetivo f_R igual a 1,17.

Os defeitos na geometria da via eventualmente podem causar um efeito semelhante, embora localizado, de incremento na aceleração lateral não compensada. Quando estes defeitos se encontram nos trechos em curva, pode ter-se o pior caso para o conforto do passageiro, pois este efeito se somará ao causado pela flexibilidade da suspensão do veículo.

4.2.2 Caso dos trens pendulares

Nos trens convencionais, como visto, a inclinação provida pela superelevação diminui a aceleração lateral no plano do veículo (que é sentida pelos passageiros), embora a flexibilidade da suspensão atenue ligeiramente esta diminuição. Já os trens pendulares provêm uma inclinação adicional da caixa do veículo, que se soma àquela provida pela superelevação da via. Dessa maneira, a aceleração lateral sentida pelos passageiros é diminuída ainda mais.

A inclinação adicional, de maneira semelhante ao caso do efeito da flexibilidade da suspensão, pode também ser designada pelo fator de giro ou de rolamento efetivo f_R apresentado anteriormente. Nos trens pendulares, o fator de rolamento efetivo f_R terá valores entre 0 e 1; portanto quanto mais próximo o valor se situar de 0, maior será a compensação da aceleração lateral percebida pelo passageiro. Um valor igual a 0 compensaria totalmente essa aceleração.

Entretanto, de maneira semelhante com o que acontece com a própria superelevação, uma compensação total da aceleração lateral sentida pelo passageiro é considerada desnecessária. Assim, os valores usuais do fator de rolamento efetivo ficam na faixa de $0,3 \leq f_R \leq 0,65$. Esse fator é especialmente importante no caso dos sistemas pendulares ativos, no qual o fator de compensação é estipulado para o sistema de controle, o que efetivamente definirá qual será a inclinação do veículo nas curvas.

O fator de compensação considerado estará relacionado com a insuficiência de superelevação I adotada para uma dada curva e com a consequente aceleração lateral não compensada resultante. Por exemplo, para trens convencionais, a norma europeia considera uma insuficiência de superelevação I de 130 mm (limite normal), para a bitola internacional, na faixa de velocidades entre 80 e 200 km/h. Para os trens pendulares, nessa mesma faixa de velocidades, é permitida uma insuficiência de superelevação I máxima (limite normal) de 275 mm para a mesma bitola (CEN, 2010).

Considere-se um trem convencional e uma insuficiência de superelevação I igual a 130 mm. A aceleração lateral não compensada correspondente seria de aproximadamente 0,85 m/s² (sem contar o efeito adicional da flexibilidade da suspensão). Para que resultasse essa mesma aceleração lateral sentida pelo

passageiro, um trem pendular deveria inclinar o equivalente a 275 - 130 = 145 mm; isso corresponde a uma inclinação adicional de aproximadamente 5,6º.

Em termos da inclinação em graus, os trens pendulares com sistema passivo ou de pendulação natural provêm até 4º adicionais de inclinação. Os trens pendulares com sistema ativo podem inclinar até 8º adicionais (PERSSON, 2011). As características particulares dos dois tipos de sistema de inclinação da caixa são apresentadas e detalhadas no Capítulo 5.

O conceito geral da pendulação é mostrado na Figura 4.5 a seguir, com o exemplo mostrando um trem pendular de sistema ativo.

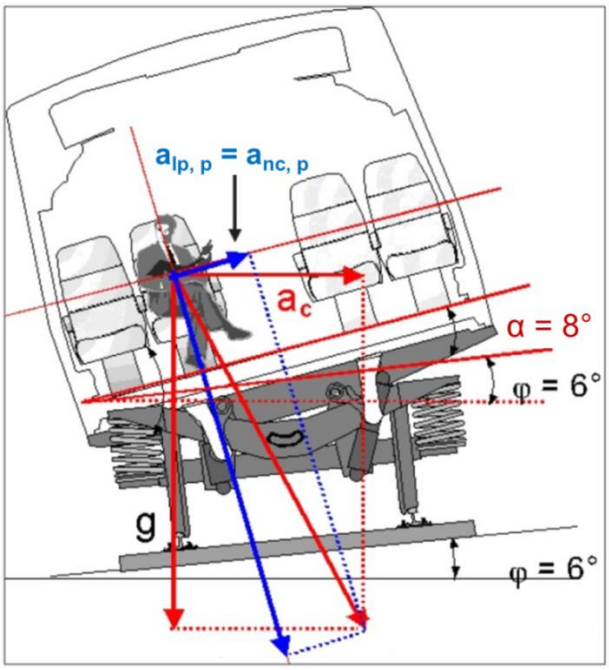


Figura 4.5 - Conceito do sistema pendular – acelerações atuantes (ALSTOM, 2010)

Sendo que nessa ilustração, trabalha-se com as mesmas variáveis da Figura 4.1, ressalva-se adicionalmente:

- O ângulo de inclinação da caixa do veículo em relação à via, α (°);
- A nova aceleração lateral não compensada, agora contabilizando o efeito provido pela pendulação ou inclinação da caixa do veículo, $a_{nc,p}$ (m/s²).

Novamente vale o raciocínio da decomposição da resultante para entendimento das acelerações atuantes. Comparando-se as duas figuras, é perceptível que o trem

pendular diminui mais significativamente a aceleração lateral sentida pelo passageiro (Figura 4.5) que o trem convencional (

Figura 4.3), devido ao efeito combinado da superelevação e da inclinação da caixa do veículo.

Com a inclinação adicional fornecida pelos trens pendulares geralmente é imposta ou a mesma ou uma menor aceleração lateral não compensada ao passageiro. Por meio disso, os veículos podem operar numa insuficiência de superelevação I maior. Para o caso dos trens de passageiros, vale da mesma maneira a Equação 4.6, de modo que com a consideração da técnica de inclinação da caixa do veículo se configuram duas possibilidades em termos da infraestrutura e da operação, respectivamente:

- Conforme a Equação 4.6, a previsão de operação de trens pendulares, e consequentemente um valor de insuficiência limite I_{lim} maior, resultaria num valor de R_{min} necessário menor, mantendo-se todos os outros valores inalterados, principalmente a velocidade máxima V_{max}. Ou seja, poder-se-ia implantar uma infraestrutura com raios mínimos menores (e consequentemente, de maneira geral, custos de obras civis menores) e que pudesse prever uma mesma velocidade máxima que uma infraestrutura com raios maiores e trens convencionais operando.
- Rearranjando a Equação 4.6 conforme a seguir, resultando na Equação 4.9, verifica-se que para uma infraestrutura existente (ou seja, raios mínimos fixos) a operação de trens pendulares demandaria um valor limite I_{lim} maior que a operação de trens convencionais. A esse valor de I_{lim} maior corresponderia uma velocidade máxima dos trens nas curvas maior, ou seja, poder-se-ia elevar a velocidade média dos trens e consequentemente reduzir os tempos de viagem num determinado corredor onde hoje operam veículos convencionais. Inclusive essa é, historicamente, a aplicação típica dos trens pendulares, e o objetivo pelo qual os mesmos foram idealizados.

$$V_{max} = \sqrt{\frac{R_{min} \cdot (D + I_{lim})}{C}}$$

Equação 4.9 - Velocidade máxima na curva horizontal

Ambas as possibilidades são discutidas e analisadas ao longo do presente trabalho. É relevante pontuar que, para os dois casos estudados (diminuição dos raios mantendo-se a mesma velocidade e aumento da velocidade mantendo-se o mesmo raio), por mais que o conforto do passageiro quanto à aceleração lateral não compensada seja garantido, o trem em si estará sujeito a uma maior aceleração centrífuga, cujos efeitos decorrentes nos critérios de segurança são discutidos a seguir.

4.2.3 Critérios de segurança

A dinâmica do veículo na curva representa uma situação crítica pelo fato de o mesmo estar sujeito à aceleração centrífuga, sendo assim um dos fatores mais importantes a serem averiguados quanto aos critérios de segurança adotados. A aceleração centrífuga no veículo em relação ao plano horizontal assume o valor dado pela Equação 4.4 desconsiderando-se o segundo termo do lado direito – ou seja, resulta no quadrado da velocidade sobre o raio. Os seguintes efeitos indesejáveis são produzidos pela aceleração centrífuga na curva (ESVELD, 2001):

- Possível desconforto do passageiro;
- Possível deslocamento das cargas (nos vagões de trens de carga);
- Risco de tombamento dos veículos;
- Risco de descarrilamento devido à roda subindo no trilho externo, ou devido ao desprendimento das placas de apoio;
- Produção de forças laterais elevadas na via, que aumentam:
    - A resistência ao movimento nas curvas;
    - O desgaste dos trilhos e dos flancos das rodas;
    - O risco de entortar os trilhos;
    - O risco de deslocamento lateral da via;
    - A produção de ruído elevado.

- Esforços laterais elevados na superestrutura em geral, e mesmo no subleito da via.

Alguns desses efeitos são agravados pela operação de trens pendulares em comparação com a de trens convencionais já que os mesmos ou operam a uma velocidade maior, ou necessitam de raios menores - e qualquer dessas duas alterações eleva a força centrífuga à qual o veículo está submetido.

Como destaca a norma EN 13803-1 (CEN, 2010) em seus anexos, existem três causas de maior relevância de falha na operação que podem comprometer a segurança e levar a um acidente. Todas elas estão relacionadas com a interação entre o veículo (sujeito à aceleração centrífuga) e a via na curva horizontal.

Os dois aspectos que não comprometem a segurança de operação mas são influenciados de maneira muito semelhante pela dinâmica do veículo em curva são, em resumo:

- O conforto experimentado pelo passageiro: como adiantado, o conforto é função em parte das acelerações experimentadas pelo passageiro. De maneira geral, para os trens convencionais, se estiver garantido o conforto do passageiro na curva também estarão garantidos os critérios de segurança; o atendimento a eles, todavia, mesmo assim deve ser avaliado. O conforto do passageiro é discutido mais profundamente no Capítulo 6, sendo que os trens pendulares apresentam particularidades importantes dentro desse aspecto.

- O desgaste sofrido pela via e pelas rodas do trem: em função da distribuição das forças na curva, esses elementos podem sofrer maior ou menor desgaste com a passagem sucessiva dos comboios. Naturalmente isso acarreta em maiores ou menores custos de manutenção da via e do material rodante, o que é discutido no Capítulo 7. Os trens pendulares, que operam sob uma insuficiência de superelevação I maior, resultam em forças laterais também maiores, o que teoricamente aumentaria os desgastes. É relatado por Persson (2007), porém, que esse efeito adicional de desgastes é pequeno.

Quanto às três causas que comprometem a segurança, estas são apresentadas a seguir. Também são destacadas as implicações específicas relativas à operação dos trens pendulares.

4.2.3.1 Descarrilamento devido à subida da roda no trilho

A primeira causa de falha de operação seria o não atendimento ao critério de descarrilamento de subida da roda no trilho externo numa curva. Usualmente ocorre quando a parte cônica da roda, que normalmente percorre o trilho externo, não mais fica em contato com o boleto. Mesmo com a resistência imposta pelo flanco da roda, esta sobe no trilho, causando o descarrilamento do veículo (Figura 4.6).

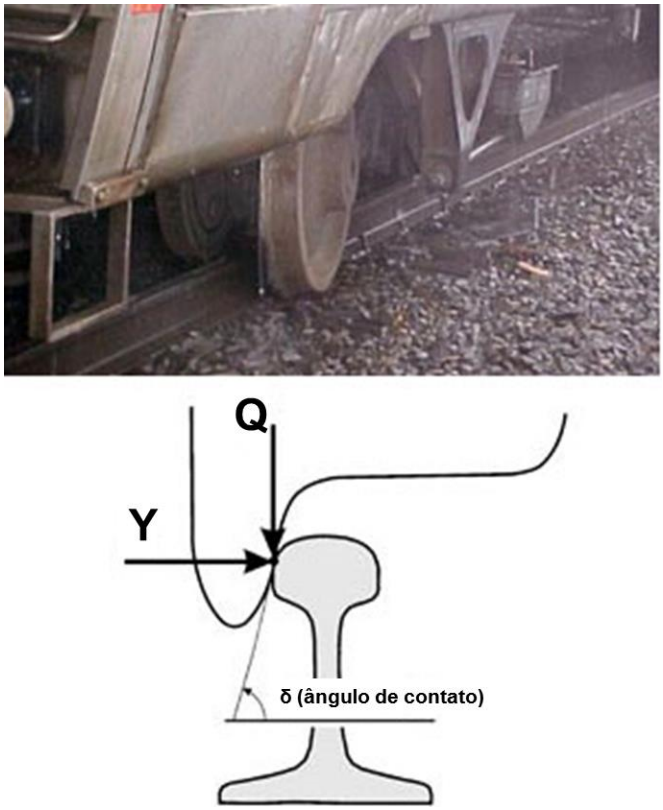


Figura 4.6 – Representação esquemática do descarrilamento por meio da roda subindo no trilho externo (ENSCO, 2013)

Na figura anterior, Y representa a força lateral que a roda externa imprime no trilho externo; Q representa a força vertical que essa roda imprime no mesmo ponto; e δ, o ângulo de contato onde os esforços atuam. Na Figura 4.7, a seguir, são representadas as forças e as reações na via e nas rodas esquerda (índice e) e direita (índice d) do trem conforme este trafega numa curva horizontal com superelevação.

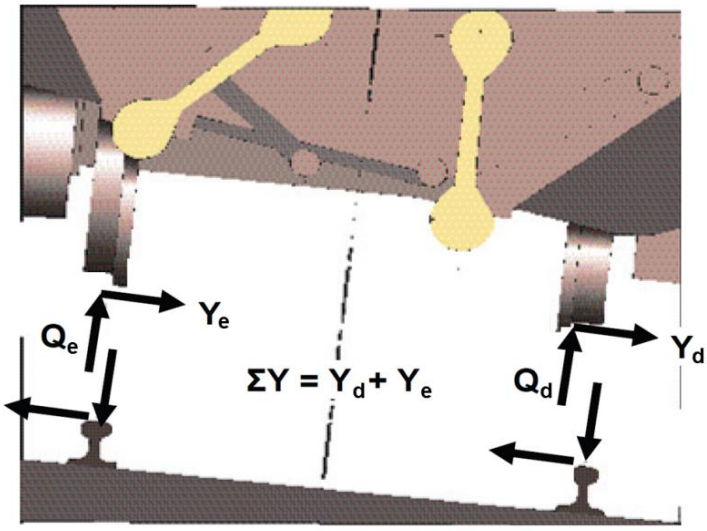


Figura 4.7 – Forças atuantes nos trilhos e nas rodas na curva (PERSSON, 2007)

Para atendimento ao critério de descarrilamento, são considerados valores medidos da razão entre a força lateral Y e a força vertical Q em cada roda. Os valores medidos não devem ultrapassar o seguinte limite:

$$\left({}^{Y}/_{Q}\right)_{max,lim} = 0{,}80$$

Equação 4.10 – Limite da razão entre as forças lateral e vertical na interface roda-trilho (PERSSON, 2007)

O critério de descarrilamento pela subida da roda externa no trilho depende da insuficiência de superelevação I; para os trens pendulares, esta é normalmente maior que para os trens convencionais. Tanto a força lateral quando a vertical crescem conforme a insuficiência I aumenta.

Nas ferrovias o risco de descarrilamento é tipicamente maior em velocidades mais baixas, em trechos com raios de curva menores e sujeitos a maiores irregularidades da via. Em tais trechos, um trem pendular normalmente está com o sistema de inclinação da caixa desativado, pela desnecessidade de compensar a aceleração lateral (esta sendo pequena devido à baixa velocidade). Assim, os trens pendulares não apresentam grandes diferenças em relação aos trens convencionais para o critério de descarrilamento (PERSSON, 2007).

4.2.3.2 Limite de resistência lateral

A segunda causa principal ressaltada pela norma da CEN de falha na operação e que pode comprometer a segurança seria a extrapolação do limite de resistência

lateral da via mediante carregamento. O critério para verificação é conhecido como critério de Prud'homme, conforme seu inventor, sendo seu limite dado na equação a seguir (PERSSON, 2007).

$$\sum Y_{max,lim} = k_1 \cdot \left(10 + \frac{2}{3} \cdot Q_0\right)$$

Equação 4.11 – Limite para o critério de Prud'homme

Onde:

- $\sum Y_{max,lim}$ (kN) representa o limite do somatório das forças laterais agindo no conjunto formado pelas duas rodas e pelo eixo, como na Figura 4.7;
- k_1 (adimensional) é uma constante igual a 1 para qualquer veículo, exceto vagões de carga;
- Q_0 (kN) representa a carga estática vertical sobre cada roda.

Quando o limite para o critério de Prud'homme é sistematicamente ultrapassado, trechos da via podem sofrer deformação plástica e/ou se deslocarem lateralmente. Isso configurará um desalinhamento geométrico da via, que se agravará gradualmente com a passagem sucessiva de veículos. O processo por fim pode levar ao descarrilamento de um comboio.

É destacado nos anexos da norma EN 13803 (CEN, 2010) que o limite de Prud'homme se aplica para uma via que tenha recentemente passado pela socaria, que é o processo onde a brita é empurrada para baixo dos dormentes, sendo em seguida compactada para elevar a resistência mecânica do lastro à passagem do trem. Podem ser feitas restrições de velocidade temporárias até que a via fique consolidada após o processo de socaria.

Além disso, a norma destaca que o limite de Prud'homme também toma como referência um sistema de via em lastro com dormentes de madeira e trilhos de massa linear igual a 46 kg/m. Sistemas de maior resistência, como com dormentes de concreto (mais comuns na atualidade) e/ou trilhos mais robustos (de maior massa linear) podem prover igualmente uma maior resistência aos esforços laterais.

As forças laterais atuantes na via dependem da velocidade e da insuficiência de superelevação. Ambas serão maiores no caso da operação de trens pendulares no lugar dos convencionais. Para verificar esse risco, existem estudos com simulações da interação veículo-via para trens pendulares de alta velocidade por Kufver (2000, apud PERSSON, 2011) e Lindahl (2001, apud PERSSON, 2011). Atestando que a segurança contra o deslocamento lateral fica comprometida para trens pendulares em alta velocidade, em seu estudo Lindahl estipulou o limite de 275 mm para a insuficiência de superelevação para um trem a 360 km/h, assumindo irregularidades típicas de uma via com velocidade máxima de 200 km/h da Suécia.

A velocidade melhorada dos trens pendulares em relação aos veículos convencionais se situa tipicamente abaixo dos 250 km/h. Para esse caso, as forças de deslocamento lateral da via não são limitantes da velocidade melhorada, de modo geral – embora possa ser recomendável uma ligeira melhora no nível admissível de irregularidades em uma dada via.

A velocidade incrementada com a operação de trens pendulares estudada mais adiante no presente trabalho se situa abaixo de 200 km/h, portanto o critério de deslocamento lateral da via não constitui fator limitante.

4.2.3.3 Tombamento do veículo e efeito do vento na transversal

Se a resistência lateral da via for suficiente, a velocidades muito altas surge o terceiro risco, que é o de tombamento do veículo para o lado de fora de uma curva. A aceleração transversal provoca este efeito, onde não há descarrilamento da roda em contato com o trilho externo.

Um acidente recente que tomou notoriedade deveu-se a essa causa: o tombamento do trem de Santiago de Compostela, na Espanha, em 24 de julho de 2013. O acidente resultou em torno de 140 feridos e 79 mortos. O trem em questão, de alta velocidade e fazendo o percurso de Madri a Ferrol, entrou em uma curva fechada com quase o dobro da velocidade permitida de 80 km/h (WIKIPEDIA, 2014e).

O critério determinante do risco de tombamento é o esforço exercido pela roda no trilho mais baixo (interno) – quando este se torna igual a zero, ocorre o tombamento. O risco de tombamento do veículo também pode ser entendido por meio

do equilíbrio de momentos num caso quase-estático[5] conforme representado na Figura 4.8, a seguir.

Para que haja o equilíbrio de momentos, o chamado momento estabilizador (M_e, em N.m) deve ser maior que o momento desestabilizador (M_d, em N.m), ambos gerados pela combinação das componentes das forças peso e centrífuga. Estes momentos são calculados com base na posição do centro de massa (CG) do veículo e nos braços de momento em relação ao topo do trilho externo, em volta do qual pode ocorrer o tombamento.

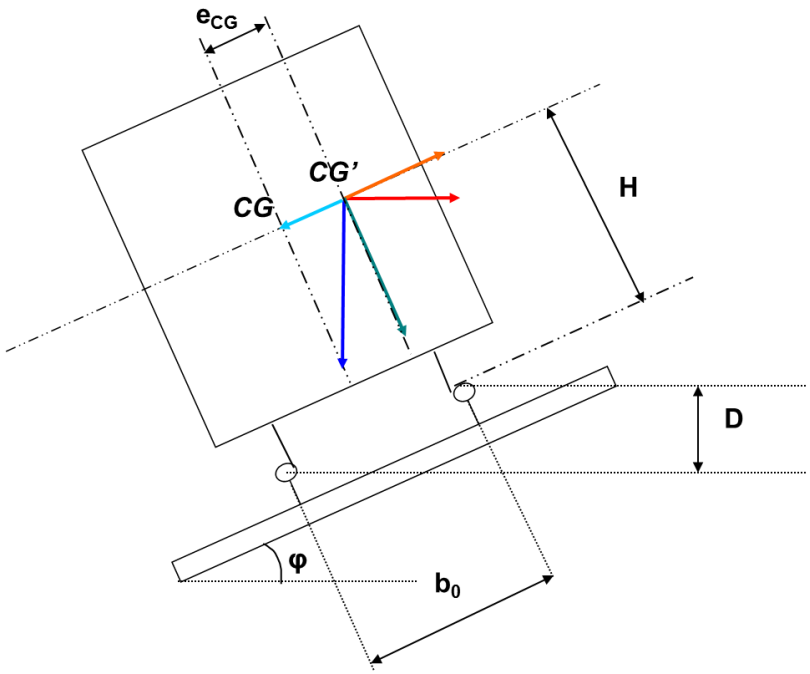


Figura 4.8 – Forças atuantes e critério de segurança contra o tombamento (PORTO e KABBACH JUNIOR, 2002)

No caso quase-estático em que o veículo percorre a curva superelevada, o centro de massa desloca-se de CG para a posição CG' de uma medida e_{CG} (m) devido à ação da força centrífuga. Assim, os momentos devem ser calculados de acordo com os devidos braços de momento:

[5] O caso quase-estático é uma denominação para a situação em que o veículo percorre uma curva horizontal. Nela há a adição da pseudoforça centrífuga atuante, podendo ser estabelecido o equilíbrio para um observador não inercial situado no próprio veículo.

- O momento estabilizador M_e é calculado como a resultante das componentes perpendiculares ao plano da via (seta em verde na Figura 4.8) vezes o braço de momento $b_0/2 - e_{CG}$ (sendo b_0 a distância entre os eixos dos trilhos em m).

- O momento desestabilizador M_d é calculado como a resultante das componentes paralelas ao plano da via (soma das componentes em ciano e laranja na Figura 4.8) vezes o braço de momento H (este sendo a altura em m do centro de massa em relação ao boleto do trilho externo, mais alto).

Finalmente, para o cálculo do equilíbrio de momentos, o momento desestabilizador é em geral majorado por um coeficiente de segurança (n, adimensional), cujo valor normalmente adotado situa-se entre 2 e 5. Assim, configura-se a Equação 4.12 seguinte:

$$M_e = n \cdot M_d$$

Equação 4.12 – Equilíbrio relativo ao critério de segurança do tombamento (PORTO e KABBACH JUNIOR, 2002)

Um fator agravante para os trens em geral quanto ao risco de tombamento são os ventos na direção transversal à via, no sentido de dentro para fora da curva. O vento na transversal pode representar uma força adicional que aumenta o momento desestabilizador M_d, consequentemente aumentando também o risco de tombamento dos veículos. Conforme coloca Persson (2011), a influência do vento na transversal está sendo estudada amplamente, com diferentes métodos para a consideração dessa força adicional.

O caso específico dos trens pendulares é mais uma vez mais grave que o dos trens convencionais. A combinação das forças de inércia laterais (que serão maiores) e da ação do vento na transversal pode resultar numa força vertical igual a zero na interface entre a roda e o trilho internos, o que caracteriza o tombamento do veículo.

Para avaliar a estabilidade de qualquer veículo mediante a ação dos ventos, normalmente são feitas simulações em que deve remanescer certa margem de carga nas rodas do lado interno da curva. A Especificação Técnica de Interoperabilidade (*Technical Specification of Interoperability* – TSI) para o material rodante, feita pela Associação Europeia para a Interoperabilidade Ferroviária (*Association Européenne*

pour l'Interopérabilité Ferroviaire – AEIF) (2008, apud PERSSON, 2011), define uma diretriz porém sem incluir especificamente os trens pendulares.

Para trens convencionais, essa diretriz se baseia em curvas características dos ventos, relacionando a velocidade e insuficiência de superelevação I praticadas com o vento máximo para alguns veículos de referência. O Gráfico 4.2 a seguir mostra essas curvas, para um terreno plano e a bitola normal. Qualquer outro veículo deve ter curvas melhores ou parecidas com essas, correspondentes aos veículos de referência.

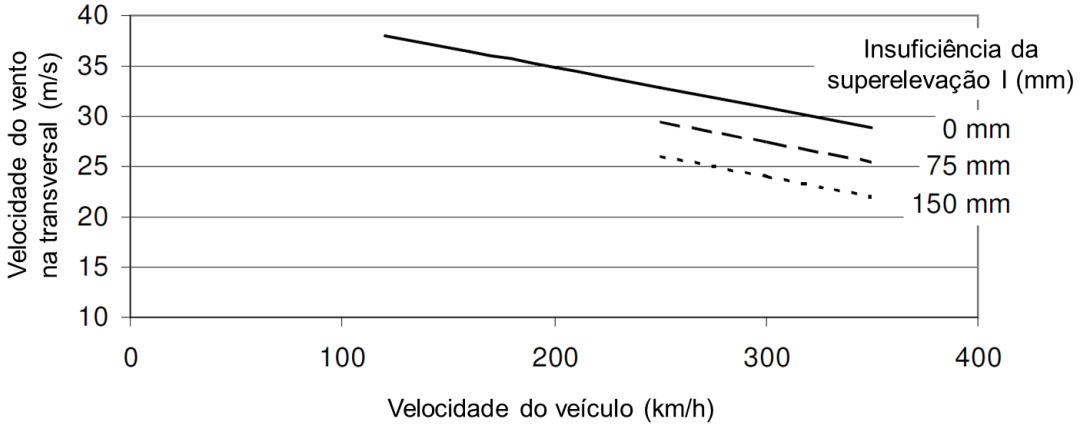


Gráfico 4.2 – Curvas características do vento em função da velocidade (PERSSON, 2011)

Entre as opções que um operador tem para garantir a segurança quanto à instabilidade causada pelo vento na transversal, estão impor restrições locais de velocidade, possivelmente em períodos com risco de tempestades e instalar equipamentos que protejam a via dos ventos em trechos críticos.

Extrapolando os requisitos ilustrados pelo gráfico para o caso dos trens pendulares (onde a insuficiência de superelevação I é de até em torno de 300 mm), chegar-se-ia a ventos críticos menores e/ou menores insuficiências de superelevação I_{lim} permissíveis para altas velocidades. É sugerida por Persson (2011) outra abordagem: adotar e/ou conceber veículos com melhores propriedades em termos da aerodinâmica e resistência aos ventos na transversal.

Persson cita dois estudos com simulações dos efeitos do vento na transversal para trens pendulares em altas velocidades:

- O estudo de Lindahl (2001, apud PERSSON, 2011) encontrou uma relação entre a velocidade do vento e a insuficiência I praticada para os veículos; por exemplo, para uma velocidade de 350 km/h o veículo poderia sustentar um vento constante de 23 m/s, com uma insuficiência I igual a 250 mm. Lindahl usou justamente um veículo teórico, porém cuja concepção seria factível, com propriedades aerodinâmicas para o vento na transversal melhoradas.

- O estudo de Andersson, Häggström, Sima e Stichel (2004, apud PERSSON, 2011), que abordou numa simulação o risco de tombamento numa linha existente e encontrou os mesmos resultados que Lindahl: vento de 23 m/s e insuficiência I de 250 mm, mas para uma velocidade menor, igual a 250 km/h. O veículo utilizado, contudo, possuía as propriedades de um trem pendular atual, o que mostra o potencial de melhoramento dos veículos nesse quesito.

Como regra prática geral, pode-se extrair do Gráfico 4.2 que dada uma velocidade do vento, para um incremento de 1 km/h na velocidade dos trens, a insuficiência de superelevação permissível I_{lim} deve ser reduzida em 1 mm.

A norma EN 13803-1 (CEN, 2010) aborda em seus anexos a questão do efeito do vento na transversal de maneira geral para os trens pendulares. Adota-se o mesmo critério de demonstrar que as cargas nas rodas internas ficam acima de certo valor, para um dado veículo e para a máxima insuficiência de superelevação I praticada.

Na norma supõe-se que a insuficiência de superelevação I que resulta no tombamento de um veículo ferroviário se situe entre 450 e 500 mm tanto para os trens convencionais quanto para os pendulares, considerando também a ação do vento na transversal. Esses valores são da ordem de três vezes os limites máximos de insuficiência de superelevação I_{lim} permitidos pela norma para os trens convencionais (limite normal até 130 mm e excepcional até 183 mm, para velocidade de até 200 km/h). Já para os trens pendulares esses limites são apenas em torno de 1,5 vezes os permitidos (limite normal até 275 mm e excepcional até 306 mm).

Assim, a operação do material rodante de caixa móvel pode exigir cuidados especiais. Em uma curva de raio R igual a 400 m, com superelevação D de 160 mm (para a bitola normal), a insuficiência de superelevação I de 300 mm é alcançada a

uma velocidade de 125 km/h; uma insuficiência I de 450 mm é alcançada a 144 km/h. Ou seja, pode ser necessário um sistema especial para controle de velocidades.

Normas relacionadas (EN 15686 e UIC 518-1) definem um “critério de tombamento” que solicita testes provando que o estado crítico, instável, sem esforços na roda sobre o trilho interno não possa ser alcançado para insuficiências I de superelevação menores que o seguinte limite ilustrado pela Equação 4.13:

$$I \leq 1{,}5 \cdot I_{lim}$$

Equação 4.13 – Critério de tombamento do veículo – norma CEN (2010)

Mais adiante no presente trabalho, é estudada a velocidade incrementada com a operação de trens pendulares, mas abaixo da velocidade de 200 km/h. Assim, a questão do tombamento é aqui abordada apenas de maneira conceitual e conforme as considerações feitas.

4.2.4 Atendimento do gabarito ferroviário

O atendimento do gabarito ferroviário constitui das técnicas usadas de maneira a assegurar que os veículos ferroviários “passem” pela infraestrutura instalada e uns pelos outros de maneira segura (JOHNSON, 2006). A dinâmica do veículo na curva horizontal é um dos aspectos mais importantes a serem analisados com relação a esse atendimento.

Os primeiros gabaritos ferroviários eram chamados de estáticos, como o exemplo da Figura 4.9 a seguir. Com eles, os trens eram projetados de maneira a adequar-se às obras civis e outros equipamentos existentes, e vice-versa. Para esses gabaritos era incluída uma folga razoável.

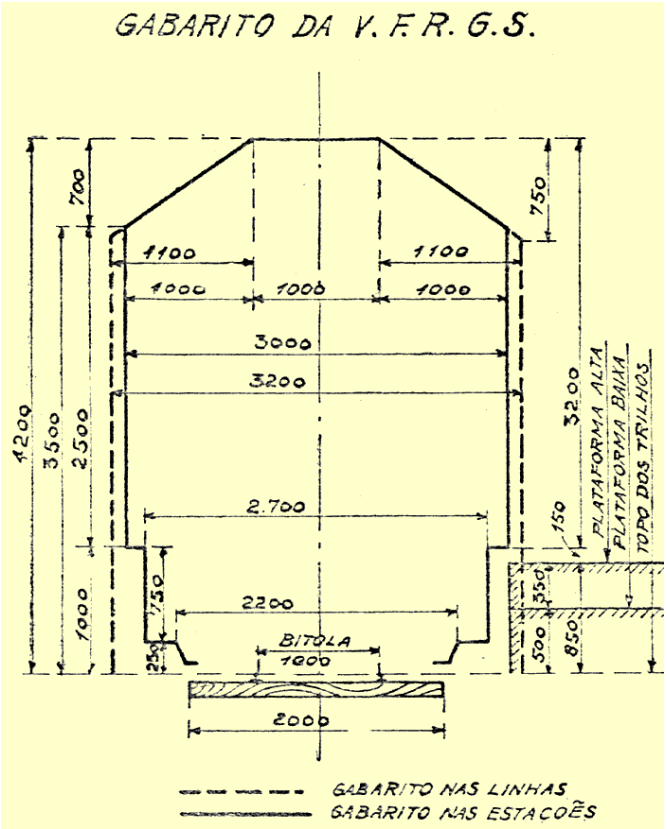


Figura 4.9 - Exemplo de gabarito estático - Viação Férrea/RS, 1931 (CENTRO-OESTE BRASIL: FERREOMODELISMO, TRENS E FERROVIAS DO BRASIL, 2013)

Ao longo do tempo, com o objetivo de melhor aproveitar o espaço e diminuir as folgas adotadas (transportando mais carga e passageiros), as técnicas de análise dos gabaritos foram se aprimorando, na medida em que a dinâmica dos veículos era também melhor entendida. Hoje são utilizados programas de simulação para verificar o atendimento aos gabaritos dinâmicos.

Basicamente, um modelo de gabarito envolve a análise das interações entre três componentes: estruturas do entorno, via e veículo. Uma publicação conhecida como *Design Guide BaSS 501* (1985, apud JOHNSON, 2006) proveu uma metodologia pela qual o envelope cinemático pode ser calculado por meio de alguns parâmetros iniciais, sendo esse envelope o espaço que o veículo pode assumir com seus movimentos.

Um dos conceitos da metodologia proposta pelo BaSS 501 é relacionar os movimentos do veículo nas curvas horizontais com as forças atuantes por meio da superelevação equivalente, D_{eqv} (mm). A superelevação equivalente D_{eqv} provém da soma da superelevação aplicada D, da superelevação teórica D_t (esta em função da

velocidade e do raio), de um terceiro termo considerando os defeitos na via, entre outras considerações (como condição de falha na suspensão).

Em função da superelevação equivalente D_{eqv} pode-se encontrar o deslocamento lateral de pontos de interesse do veículo (*sway*), como no Gráfico 4.3 a seguir.

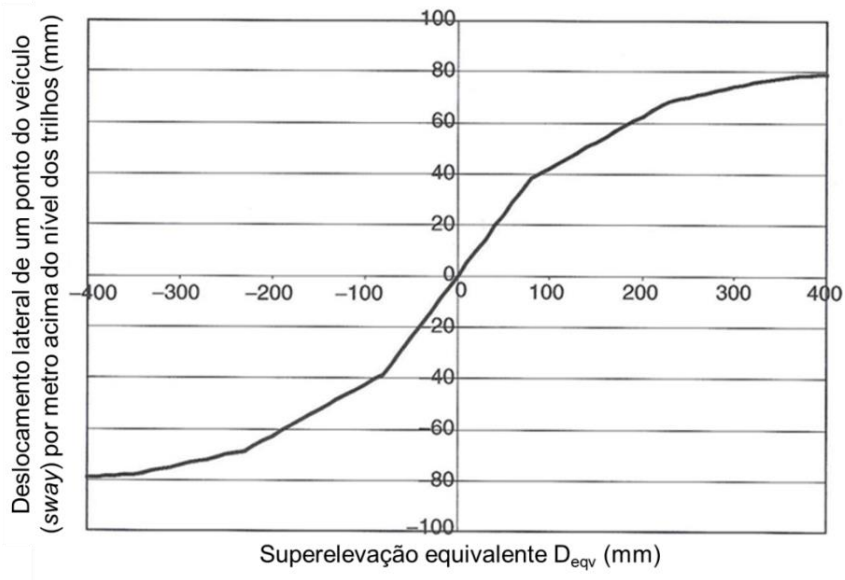


Gráfico 4.3 – Deslocamento (*sway*) em função da superelevação equivalente D_{eqv} (JOHNSON, 2006)

Para o deslocamento lateral *(sway*) de cada ponto, valores positivos significam um deslocamento para fora da curva, enquanto valores negativos significam um deslocamento para dentro da mesma. Os pontos de maior interesse do veículo usualmente são três: o *cantrail*, que é a fronteira entre a face lateral e o teto do veículo; o *waist* ("cintura"), que é a extremidade da maior largura do veículo tomada quando este está parado; e o *step*, que é comumente a parte que mais se aproxima das infraestruturas (como as plataformas).

Os trens pendulares demandam uma análise mais complexa da questão do atendimento ao gabarito dinâmico ferroviário. Os parâmetros iniciais devem considerar a velocidade além da superelevação equivalente D_{eqv}, sendo que os trens pendulares abaixo de certa velocidade operam como os trens convencionais.

Resultam então gráficos tridimensionais, como os exemplos mostrados a seguir para o *sway* do *cantrail* (Gráfico 4.4) e do *step* (Gráfico 4.5). Para uma faixa de velocidades e de superelevação equivalente D_{eqv}, o deslocamento lateral ou *sway*

pode ser contrário (caso do *cantrail*) ou incrementado (caso do *step*) ao que um trem convencional teria.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os detalhes do gabarito dinâmico diferenciado dos trens pendulares de maneira apenas conceitual. Ressalta-se que pode haver diferenças como nos gabaritos de um túnel projetado para um trem pendular no lugar de um convencional (o que poderia refletir nos custos), mas subentende-se que essas diferenças são pequenas, ou mesmo absorvidas pelo próprio projeto do material rodante pendular. Alguns trens pendulares ativos, por exemplo, possuem um sistema que desloca a caixa do veículo quando o mesmo inclina na transversal; enquanto isso, os trens pendulares passivos já assumem espaços menores para a caixa do veículo, que se desloca significativamente nas laterais.

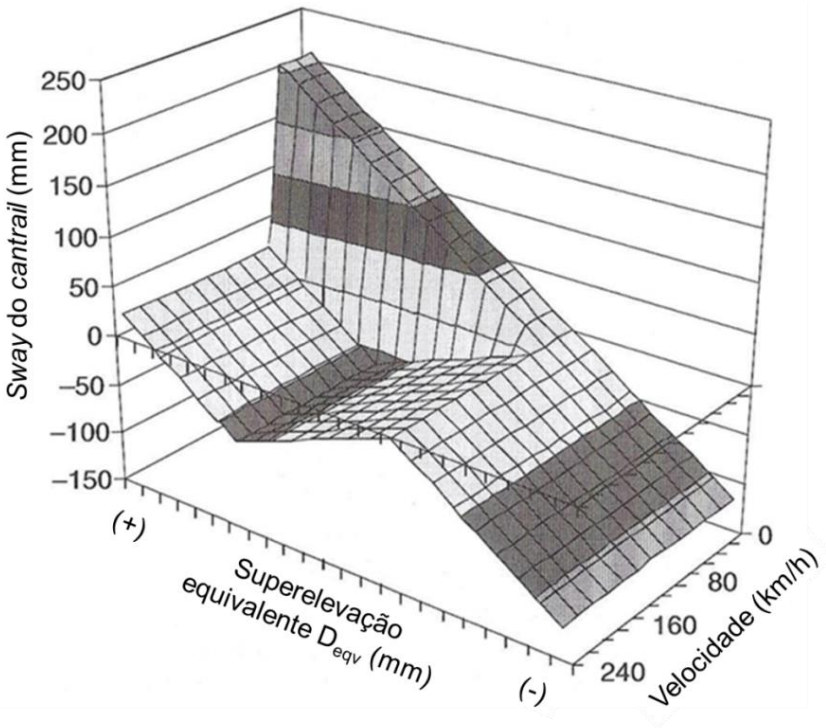


Gráfico 4.4 – Deslocamento (*sway*) do *cantrail* em um trem pendular (JOHNSON, 2006)

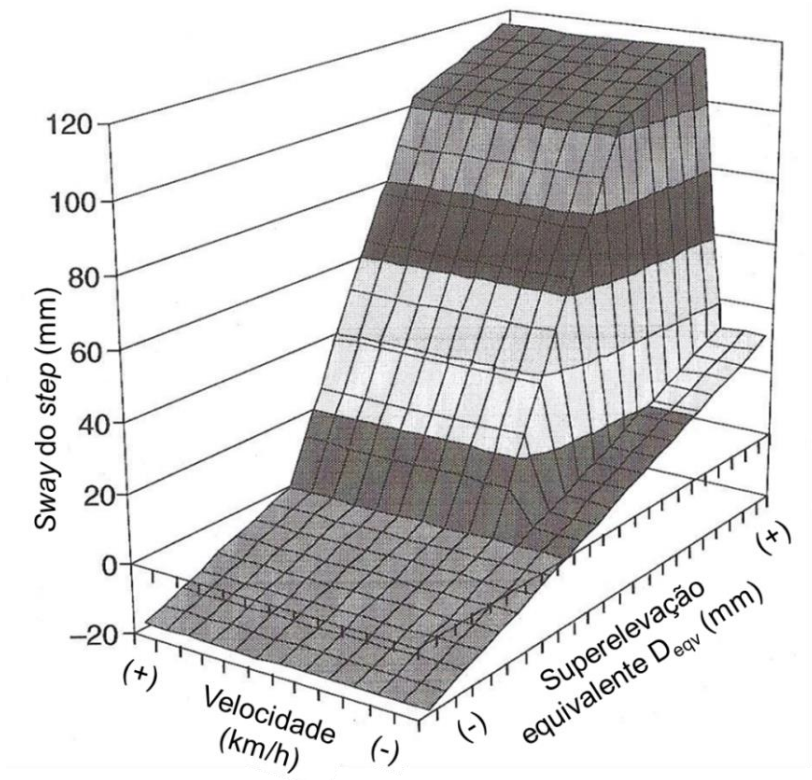


Gráfico 4.5 - Deslocamento (*sway*) do *step* em um trem pendular (JOHNSON, 2006)

5. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL RODANTE PENDULAR

A estabilidade dos trens convencionais ou pendulares depende do sistema de suspensão dos veículos. O funcionamento particular dos trens pendulares e dos diferentes tipos existentes de pendulação está ligado à configuração diferenciada de seus sistemas de suspensão.

A suspensão mecânica em si consiste usualmente de dois componentes, um primário e outro secundário. A suspensão primária conecta os eixos ao truque e é responsável por guiar as rodas e isolar o truque das cargas dinâmicas produzidas pelas irregularidades da via. Já a suspensão secundária, ligando o truque à caixa do veículo, é responsável por reduzir as acelerações dinâmicas atuando no mesmo e que determinam o conforto do passageiro. Como destacam Orlova e Boronenko (2006) é particularmente importante reduzir a influência das acelerações laterais, às quais o passageiro é mais sensível – assim, a rigidez da suspensão secundária especificamente na direção lateral é projetada como a menor possível.

Os tipos de material rodante pendular se dividem, basicamente, em duas categorias: a dos trens de sistema passivo ou natural e a dos trens de sistema ativo. Há variantes dentro das duas categorias, assim como particularidades, vantagens e desvantagens inerentes.

Apesar das variantes, a dinâmica envolvida ao trafegar na curva é basicamente a mesma para todos os trens pendulares. O trem pendular, ao percorrer a curva de transição de entrada, deve inclinar gradualmente as caixas dos carros. No trecho em curva circular, deve trafegar com a inclinação total pretendida. Em seguida, ao percorrer a curva de transição de saída, deve inclinar gradualmente as caixas de volta à posição normal, paralelas ao plano horizontal. Naturalmente, se o traçado possui curvas de transição reversas ou de curvas compostas, deverá haver o movimento de inclinação apropriado para garantir a inclinação da caixa para o próximo trecho em curva circular.

5.1 SISTEMAS PASSIVOS

Os sistemas pendulares chamados de passivos ou naturais dependem, basicamente, do posicionamento do eixo de giro (que é um eixo longitudinal e permite

uma inclinação transversal do veículo) significativamente acima do centro de gravidade da caixa do veículo, e da ação das forças inerciais. O eixo de giro da caixa do veículo pode situar-se mesmo acima do próprio veículo.

Ou seja, a aceleração lateral imposta por meio da aceleração centrífuga provoca o deslocamento da caixa em torno do eixo de giro, gerando a inclinação necessária. Conforme antecipado, nos sistemas passivos essa inclinação é tipicamente de até 4º (com exceção dos sistemas japoneses, que permitem inclinações de 5 a 6º). O deslocamento da caixa é acompanhado pelo deslocamento lateral do centro de gravidade da mesma.

Idealmente, a caixa do veículo poderia se inclinar até compensar totalmente a aceleração lateral, de maneira semelhante ao conceito de uso da superelevação teórica D_t discutido no item 4.2. Porém, na prática, há a rigidez dos componentes envolvidos e é gerado um momento adicional quando o centro de gravidade se desloca, o que provoca um momento resistente, que age em oposição ao giro inicial em torno do eixo longitudinal. Isto faz com que permaneça uma aceleração lateral residual, não compensada, no plano do passageiro.

A pendulação natural provoca um impacto negativo nas condições de segurança, ao passo que o centro de gravidade se desloca lateralmente (para o lado externo da curva). Isso diminui o momento estabilizador M_e, conforme apresentado no item 4.2.3.3, aumentando ligeiramente o risco de tombamento do veículo.

O sistema passivo, apesar de em sua concepção original não incluir um sistema ativamente atuante, hoje frequentemente inclui sistemas de controle de modo a garantir a performance dinâmica. Esse tipo de controle é chamado de suporte ativo à pendulação, sendo encontrado em variantes como as da Hitachi (2013) e da Bombardier (2011).

As principais vantagens do sistema de pendulação natural são (PERSSON, 2011):

- É um sistema simples e confiável;
- Possui custo inicial e de manutenção baixos;

- O sistema de controle, quando existente e que garante a performance dinâmica, é de funcionamento simples;
- Não há como ocorrer a pendulação inversa, ou seja, para o lado de fora da curva.

Já as principais desvantagens inerentes ao sistema passivo são:

- O momento de inércia da caixa do veículo provocará um atraso na ação de pendulação; devido a esse atraso, os passageiros podem sentir uma maior aceleração lateral não compensada em pontos localizados, principalmente na curva de transição, gerando desconforto;
- Conforme mencionado, o deslocamento do centro de gravidade pode aumentar o risco de tombamento;
- Devido ao movimento lateral da caixa do veículo, por razão de atendimento ao gabarito dinâmico deve ser menor a largura da seção do veículo em sua parte inferior (próxima ao piso), onde ela é justamente mais necessária para acomodar os passageiros.

Os diferentes mecanismos de pendulação passiva ou natural são detalhados a seguir.

5.1.1 Sistema com guia em arco circular

O sistema com guia em arco circular foi inventado e ainda hoje é comum no Japão. Como o próprio nome diz, permite o movimento numa trajetória circular, pois a caixa do carro está suspensa nesse arco, como ilustra a Figura 5.1 a seguir.

O centro de gravidade se situa entre 600 e 900 mm abaixo do eixo de giro, que será o centro da trajetória circular. Esse centro de giro acaba por situar-se aproximadamente na altura da cabeça de um passageiro sentado. Conforme mencionado anteriormente, este sistema permite uma inclinação máxima de 5 a 6º. Amortecedores são usados nesse tipo de sistema para evitar que, devido ao momento de inércia, a caixa do veículo se desloque mais do que o necessário (num efeito "chicote"), quando o veículo termina de percorrer uma curva de transição e entra na curva horizontal, por exemplo.

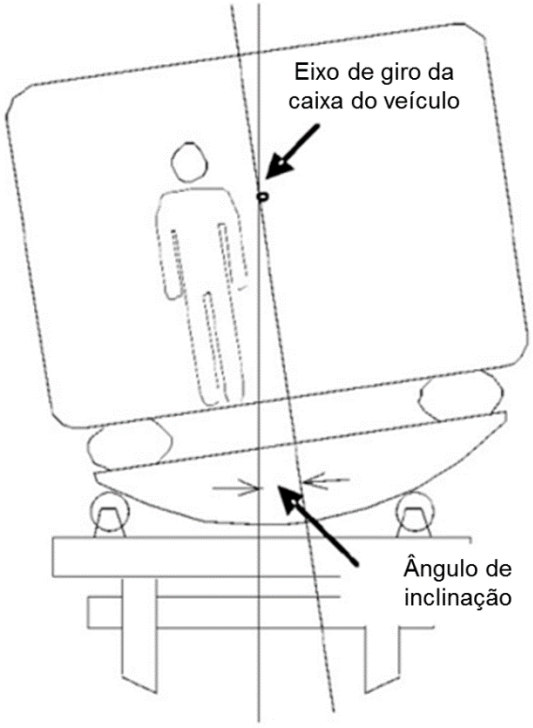


Figura 5.1 – Sistema de pendulação com guia em arco circular (PERSSON, 2011)

Para melhorar o controle dos movimentos do veículo pode ser utilizado, também, o controle ativo da pendulação citado anteriormente (PERSSON, 2011). Um exemplo desse tipo de material rodante pendular com controle ativo é mostrado no subitem a seguir.

5.1.1.1 Sistema com controle ativo – Trens pendulares da Hitachi

Os trens pendulares tipicamente usados no Japão possuem um sistema de pendulação ativa, com um sistema de pendulação passiva que em caso de qualquer falha no sistema de controle garante a inclinação. Este sistema ativo age então como um sistema complementar (ou de falha segura).

A fabricante japonesa Hitachi (2013) utiliza o sistema passivo com controle ativo, por meio do arranjo mecânico com guia em arco circular. O sistema acaba adquirindo características dos sistemas ativos e passivos. As principais diferenças em relação ao sistema ativo são mostradas na Figura 5.2; os sistemas ativos em si serão detalhados posteriormente, no item 5.2.

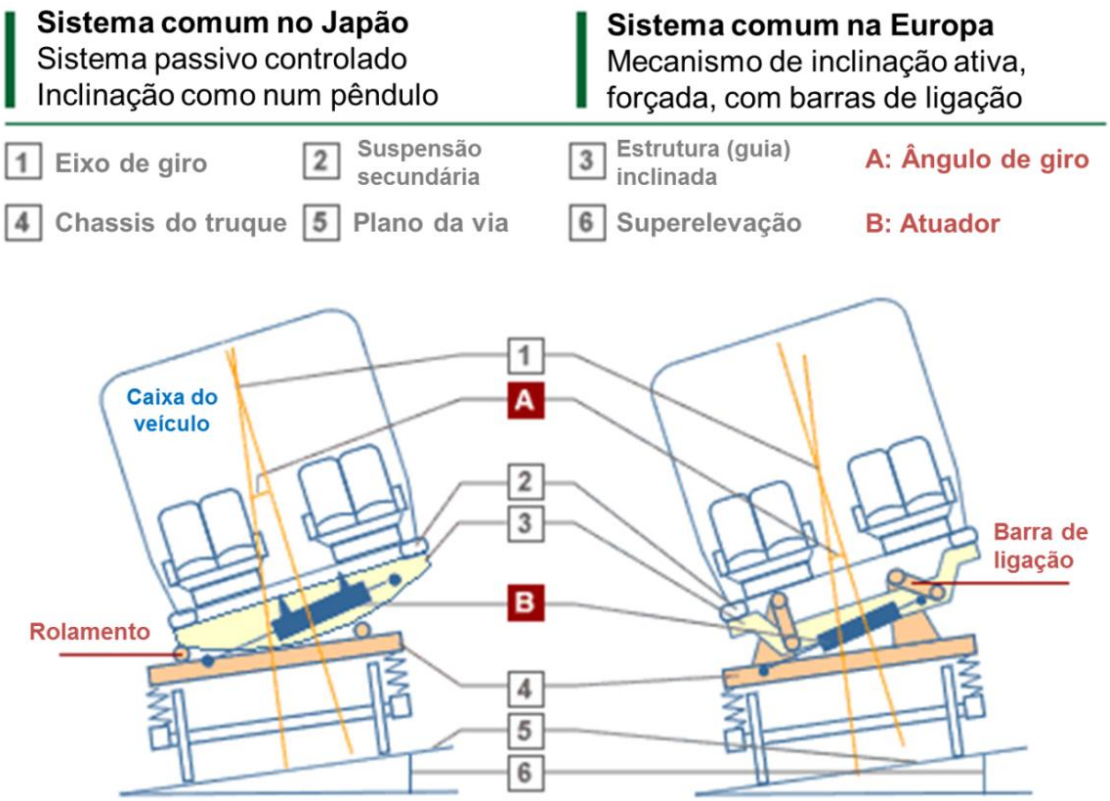


Figura 5.2 – Comparação entre os sistemas japonês (esq.) e europeu (dir.) de pendulação (HITACHI, 2013)

Os trens pendulares com esse sistema foram desenvolvidos de maneira a aumentar as velocidades de operação nas linhas japonesas, de bitola métrica e com traçados em geral bastante sinuosos. A pendulação é fornecida por meio de um atuador pneumático ao invés de hidráulico (que é mais utilizado nos trens pendulares ativos europeus). Alegadamente, esse sistema permite uma manutenção mais fácil e limpa. Além disso, ele é mais compacto e instalado totalmente na parte inferior da caixa do veículo.

O sistema dos trens da Hitachi possibilita uma inclinação máxima de em torno de 5º. O mecanismo de falha segura permite que, se houver algum problema com o controle, seja cortada a pressão nos cilindros de ar do atuador; o sistema de pendulação natural, então, garante que haja a inclinação do veículo percorrendo a curva.

É de destaque nos sistemas japoneses o uso de informações sobre a via estocadas no computador de bordo do veículo, para alimentação do sistema de controle da pendulação. Este sistema de controle é parecido com o dos trens pendulares ativos (nos quais o controle é essencial, como será visto na sequência do

capítulo). Na prática japonesa são utilizadas balizas instaladas ao longo da via, que são detectadas e ajudam a informar a posição do veículo em relação à via, o que é importante para a atuação do sistema. A Figura 5.3 e a Figura 5.4, ambas a seguir, ilustram o funcionamento.

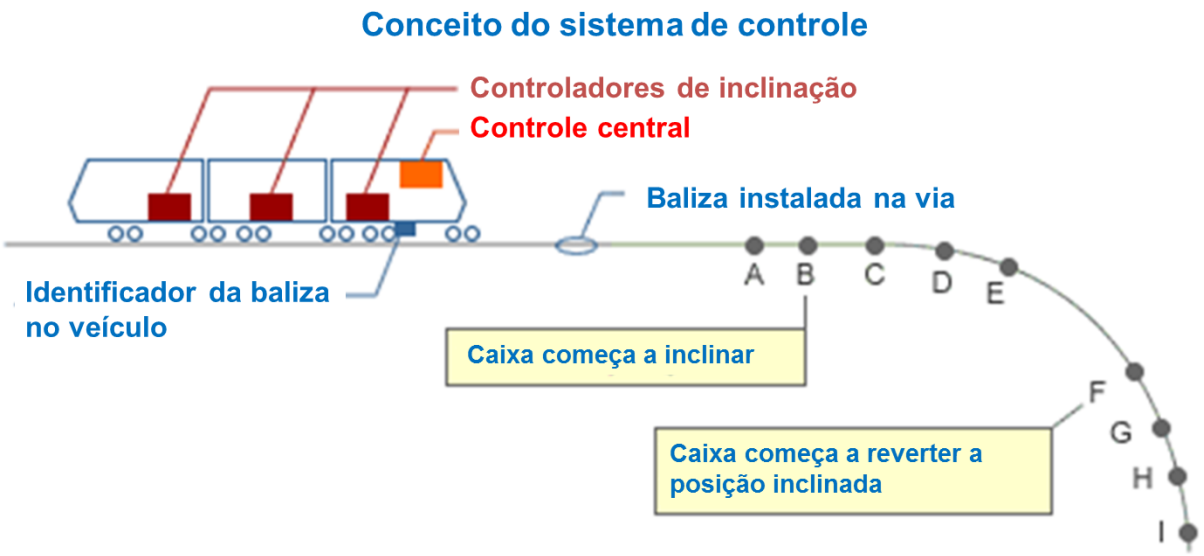


Figura 5.3 – Conceito da pendulação ativa no sistema japonês (HITACHI, 2013)

Por meio desses subsistemas, procura-se ter uma maior precisão e evitar o efeito do atraso na pendulação, presente nos trens pendulares ativos responsivos. Neste sistema preditivo, o trem começa a inclinar pouco antes de entrar na curva de transição (ponto B na figura anterior). Com isso, a velocidade angular de giro é diminuída, tipicamente respeitando-se um limite de 5º/s.

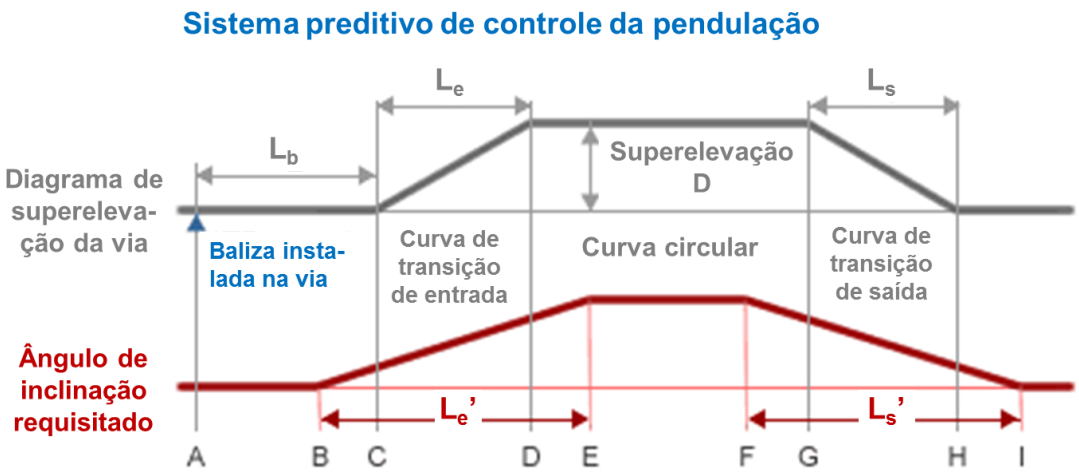


Figura 5.4 – Diagramas de superelevação e do ângulo de pendulação provido ao veículo no sistema japonês (HITACHI, 2013)

Na Figura 5.4, L_b representa o desenvolvimento percorrido desde a baliza instalada na via até o início da curva de transição de entrada; L_e e L_s representam, respectivamente, as extensões das curvas de transição de entrada e saída da curva circular; e L_e' e L_s' designam os desenvolvimentos correspondentes percorridos enquanto a caixa do veículo respectivamente efetua e reverte a inclinação de maneira suave.

A Hitachi (2013) destaca que o sistema passivo controlado se diferencia também do passivo convencional. No sistema passivo convencional, ocorre um atraso devido ao efeito da inércia dos elementos ao adentrar a transição e o efeito "chicote" ao sair da mesma; além disso, a taxa de giro atinge um pico que pode provocar desconforto. O Gráfico 5.1 mostra como o sistema usado no Japão minimiza esses problemas.

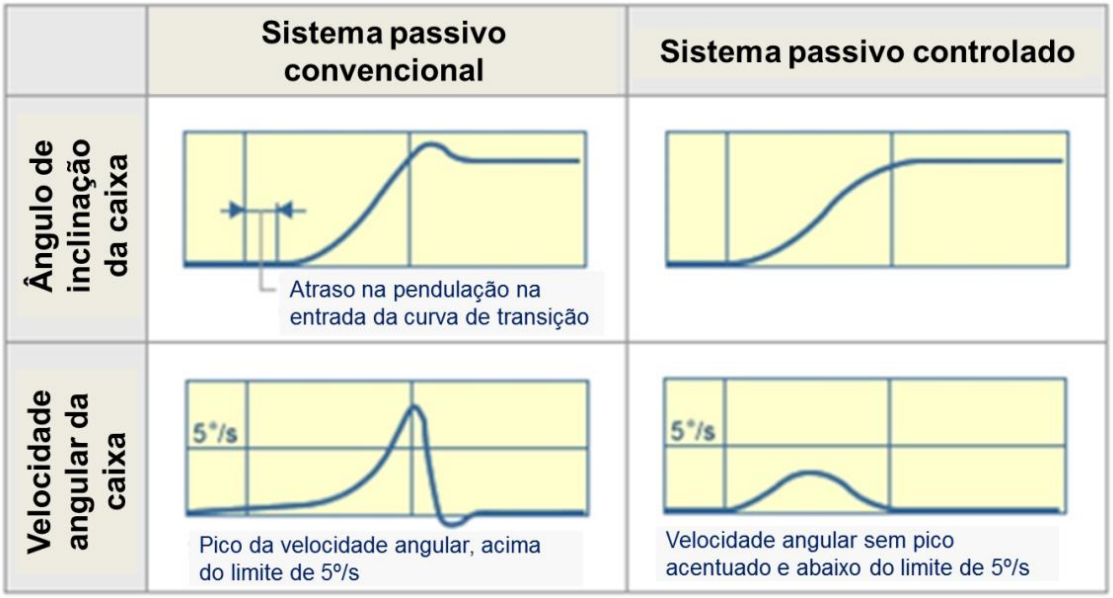


Gráfico 5.1 – Comparação entre os sistemas passivos convencional e controlado (HITACHI, 2013)

5.1.2 <u>Sistema com suspensão elevada</u>

Como visto em 3.3, o mecanismo com a suspensão elevada foi a primeira solução concebida para inclinação da caixa do veículo. O princípio é ainda usado nos trens da Talgo, que também é a única fabricante que aplica a tecnologia.

Na Figura 5.5 a seguir, são mostrados os eixos de giro para um veículo convencional (efeito da flexibilidade da suspensão) e para um trem pendular da Talgo (resultado do sistema pendular natural). As acelerações laterais analisadas em cada

plano – horizontal, da via e do passageiro - resultam da decomposição da resultante R entre a aceleração gravitacional g e a aceleração centrífuga.

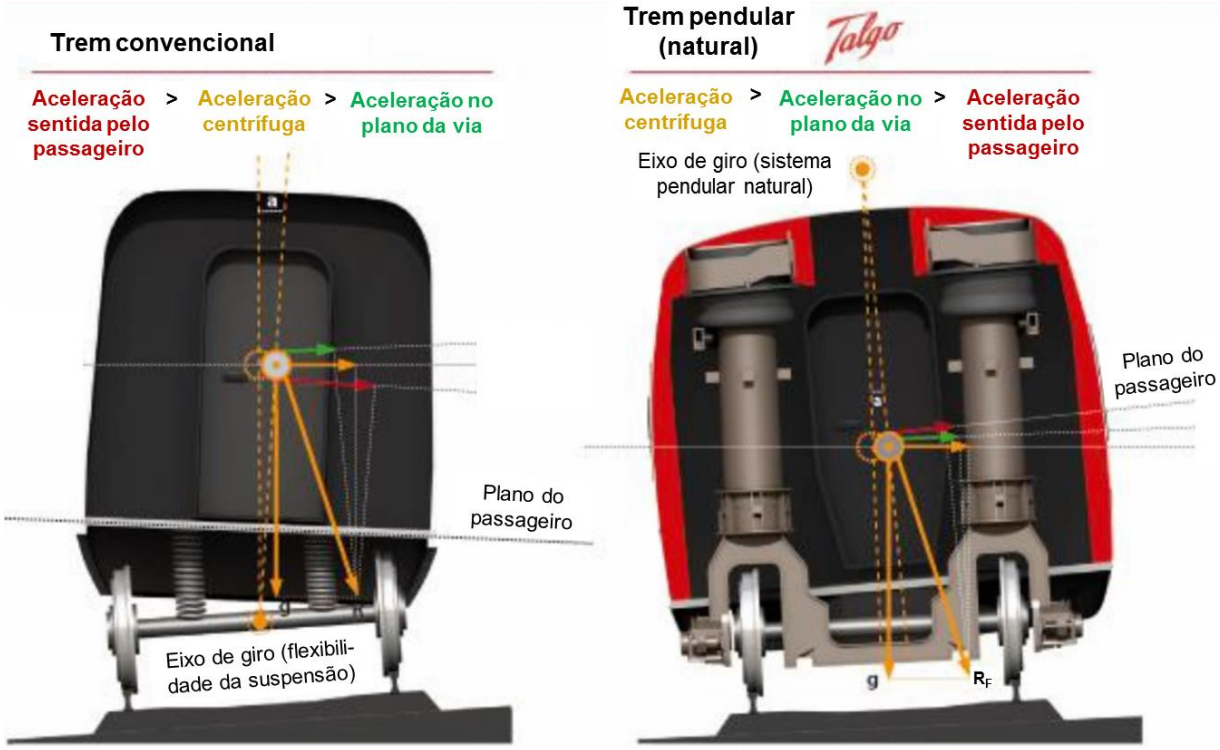


Figura 5.5 – Princípio da pendulação natural nos trens da Talgo (TALGO, 2011)[6]

O sistema com suspensão elevada é constituído por um par de molas pneumáticas instaladas em pilares altos sobre os aparatos das rodas. Substituindo os truques tradicionais, esses aparatos são individuais para cada roda nos trens mais modernos da Talgo (ou seja, não há os eixos tradicionais, cada roda gira separadamente) e posicionados nas extremidades dos carros de passageiros. O par de molas exerce também a função de suspensão secundária do veículo (PERSSON, 2011).

Os mecanismos de rodas independentes e de pendulação com suspensão natural são apresentados a seguir, na Figura 5.6 e na Figura 5.7.

[6] O efeito da flexibilidade da suspensão está exagerado na figura da esquerda (trem convencional), pois provavelmente a brochura comercial tem por objetivo contrastar as vantagens do sistema pendular. A flexibilidade da suspensão, na realidade, reduziria em apenas em torno de 1º a inclinação do plano da passageiro provida pela superelevação (como na representação da Figura 4.4), de modo que a aceleração sentida pelo passageiro (em vermelho) teria valor intermediário entre os valores da aceleração centrífuga (em amarelo) e da aceleração no plano da via (em verde).

Figura 5.6 – Sistema de rodas independentes (TALGO, 2011)

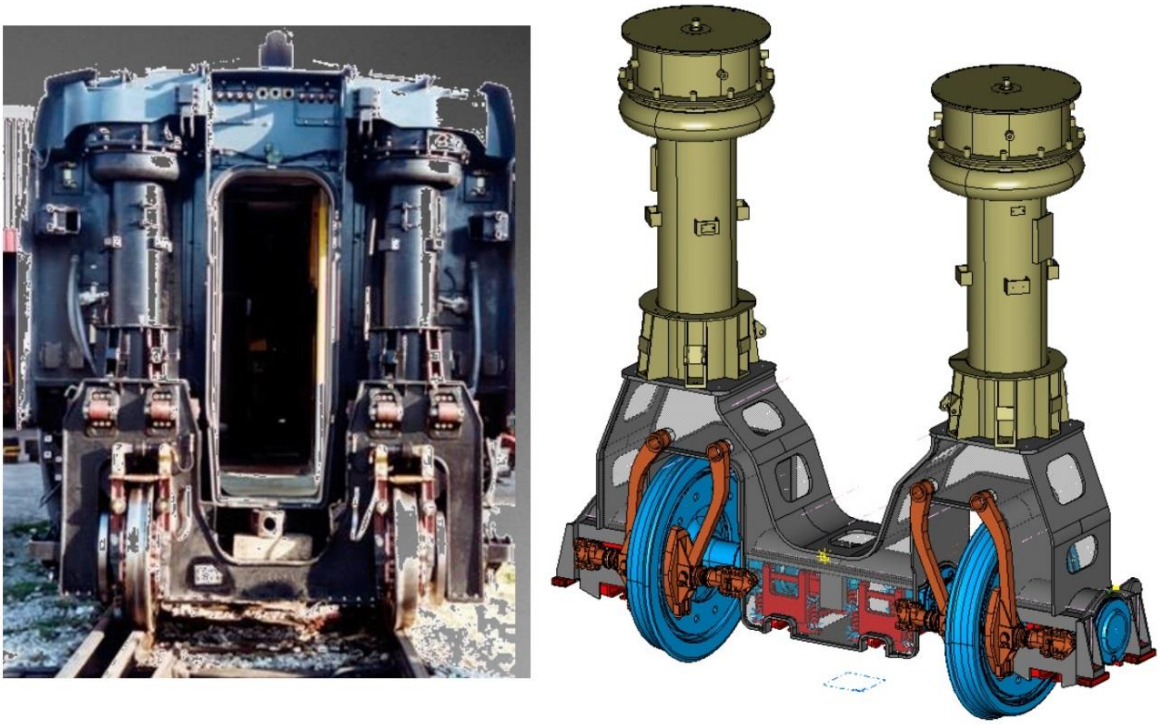


Figura 5.7 – Truque do sistema de pendulação natural com suspensão elevada (TALGO, 2011)

O mecanismo com a suspensão elevada em si é considerado bastante simples, permitindo a pendulação natural facilmente. Para a aplicação desse mecanismo em trens com truques convencionais, porém, ocupar-se-ia demasiado espaço, que a princípio seria destinado ao passageiro.

5.1.3 Sistema com barras inclinadas anti-giro

O mecanismo denominado como *inclined anti-roll bar links* (barras inclinadas anti-giro, em tradução livre) é similar, em funcionamento, ao sistema com suspensão

elevada. Constitui-se de molas pneumáticas como elementos flexíveis, que permitem o giro, mas diferentemente da variante anterior, esses elementos estão instalados na parte inferior da caixa do veículo. A interseção projetada pelas barras (ponto vermelho na figura seguinte) determina o centro de rotação, formando um pêndulo virtual. Um exemplo dessa tecnologia é o sistema FLEXX Tronic WAKO, utilizado pela Bombardier conforme ilustrado na Figura 5.8.

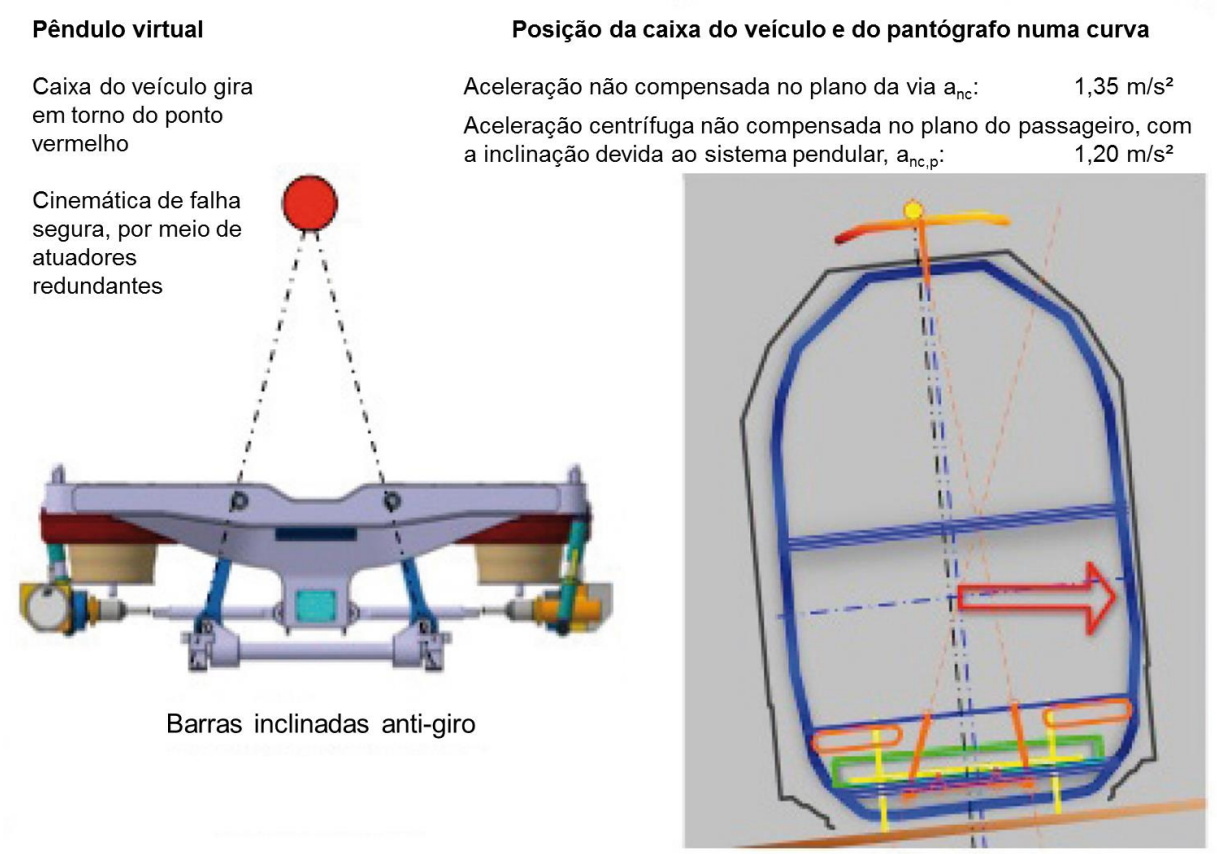


Figura 5.8 – Sistema com barras inclinadas anti-giro – FLEXX Tronic WAKO (BOMBARDIER, 2011)

No caso específico do sistema WAKO, a pendulação está integrada ao sistema de suspensão secundária (BOMBARDIER, 2011). O mecanismo passivo é ainda assistido por atuadores ativos, que previne oscilações do sistema devidas à irregularidades na via. Este sistema é considerado um controlador ativo, de maneira semelhante à tecnologia usada nos trens da Hitachi.

Como afirma Persson (2011), a capacidade de inclinação da caixa nesse tipo de sistema é limitada, menor mesmo que em outros sistemas passivos, devendo ser considerado mais como um meio de compensar os efeitos da flexibilidade da suspensão ao invés de prover a pendulação em si. O fabricante garante, por outro

lado, que o sistema FLEXX Tronic WAKO permite um aumento da velocidade de até 15% nas curvas; além disso, que o controlador ativo da pendulação passiva também evita o efeito do enjoo de movimento ou cinetose (BOMBARDIER, 2011).

5.2 SISTEMAS ATIVOS

O conceito de pendulação ativa pressupõe, essencialmente, o uso de um sistema de suspensão ativa, pelo qual a caixa do veículo inclina; sem a atuação do mesmo, não há inclinação significativa. A suspensão ativa, por sua vez, é composta por sensores, controladores e atuadores adicionados ao sistema de suspensão mecânico e envolvendo retroalimentação, ou seja, a dinâmica do sistema é modificada com a inserção de novos dados.

Um *bogie* ou truque típico é ilustrado pela Figura 5.9.

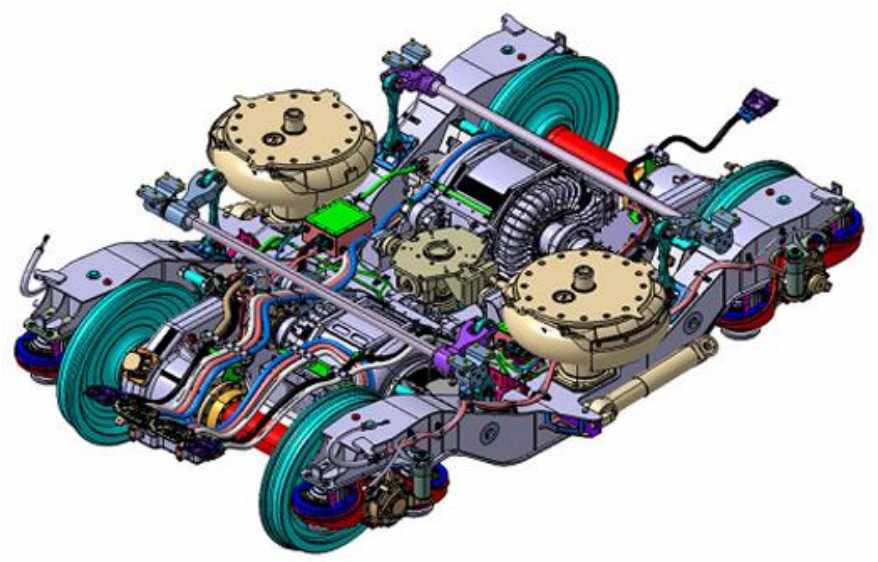


Figura 5.9 – Exemplo de truque motor de trem de passageiros (ALSTOM, 2013)

A tecnologia da suspensão ativa buscou historicamente aplicação em três casos: na suspensão primária, na suspensão secundária e nos sistemas ativos de caixa móvel (trens pendulares). Para os casos da suspensão primária e da secundária, desde o final da década de 1960 houve pesquisas e experiências no sentido de usar o sistema ativo para reduzir vibrações verticais e laterais e aumentar a estabilidade. Apesar de serem comprovados benefícios para o conforto do passageiro, os custos adicionais inibiram a aplicação comercial em larga escala. Atualmente, entretanto, é

previsto que essas técnicas de controle exercerão cada vez maior influência na dinâmica do veículo.

O terceiro caso, a aplicação da suspensão ativa para inclinação da caixa do veículo, surgiu paralelamente às aplicações nas suspensões primária e secundária, sendo que o desenvolvimento da pendulação ativa se deu a partir de 1967. Ao contrário dos outros casos, a suspensão ativa nos sistemas pendulares se estabeleceu consideravelmente bem em operações comerciais. O trem Pendolino, desenvolvido e fabricado pela Fiat Ferroviaria, entrou em operação na Itália em 1988, e a isso se seguiu a operação e desenvolvimento de diversos trens pendulares, em diferentes países (WICKENS, 2006).

Os sistemas pendulares ativos têm a vantagem de prover a rotação da caixa do veículo em torno do centro de gravidade do mesmo. Com isso, evita-se o deslocamento desse ponto, que afeta a segurança do veículo quanto ao tombamento, efeito presente em muitos dos trens pendulares passivos. Além disso, o impacto no gabarito dinâmico ferroviário é menor que o correspondente aos sistemas de pendulação natural. Sistemas ativos como o Tiltronix da Alstom (2010) e o FLEXX Tronic WAKO 8 da Bombardier (2011) são os que apresentam a maior inclinação, de até 8º.

Como detalha Persson (2011) quanto aos sistemas de atuação, inicialmente eram usados sistemas pneumáticos que também faziam o papel da suspensão. Por meio dessa solução tecnológica havia consumo excessivo de ar comprimido. Com a invenção do sistema de rolamentos e pêndulos, o atuador passou a controlar somente a inclinação da caixa, sem precisar suportar sua carga, resultando em um consumo energético muito menor.

Os sistemas de atuação hidráulicos sempre foram a escolha tradicional para os veículos, embora no Japão os sistemas pneumáticos sejam utilizados até hoje. Os atuadores eletromecânicos se tornaram uma alternativa na década de 1990; um exemplo é mostrado na Figura 5.10. Também existe uma tecnologia híbrida, a atuação eletro-hidráulica, apontada como a solução futura a ser aplicada nos sistemas japoneses.

Figura 5.10 - Exemplo de atuador eletromecânico (PERSSON, 2011)

5.2.1 Sistema mecânico

O arranjo mecânico dos sistemas pendulares ativos tipicamente se diferencia pelo posicionamento do controle ativo em relação ao sistema de suspensão secundária. Existem três arranjos mecânicos comumente utilizados: com a pendulação através, acima e abaixo da suspensão secundária (PERSSON, 2011).

A pendulação através da suspensão secundária é uma solução minoritária, e provê a inclinação da caixa aplicando um controle ativo a este elemento. Um dos métodos que foram tentados no passado para conseguir isso foi aplicar um diferencial entre as molas pneumáticas, mas como dito anteriormente isso leva a um consumo elevado de ar comprimido; assim, este método encontrou pouca aplicação prática, embora os japoneses tenham tido certo sucesso com uma variante que transfere o ar entre as molas. Um método alternativo seria o aplicado pelos trens Talent da Bombardier, por meio de uma barra ativa estabilizadora, anti-giro.

Os outros dois esquemas mecânicos são constituídos por um componente "separado" de pendulação (*tilting bolster*) e se diferenciam por onde ele está posicionado em relação à suspensão secundária: acima ou abaixo da mesma. No sistema mecânico com a pendulação acima, a força centrífuga aumentada devido às velocidades incrementadas precisa ser contrabalanceada, no caso pela suspensão secundária em sua componente lateral. Como essa componente precisa ser flexível (de modo a prover mais conforto ao passageiro), há um movimento lateral maior ou mesmo toda a caixa do veículo deve ser deslocada. Essas implicações afetam a aplicabilidade dessa segunda variante, mostrada na Figura 5.11 a seguir.

Figura 5.11 - Exemplo de sistema ativo com atuação acima da suspensão secundária - Alstom, Pendolino italiano ETR610 (PERSSON, 2011)

A terceira variante, com o *tilting bolster* abaixo da suspensão secundária, evita o problema supracitado. Toda a base sobre a qual a suspensão secundária (usualmente composta por molas pneumáticas) se situa é inclinada. Assim evita-se a força centrífuga elevada na suspensão lateral. Este é provavelmente o mais comum dos três esquemas, mostrado em dois exemplos na Figura 5.12.

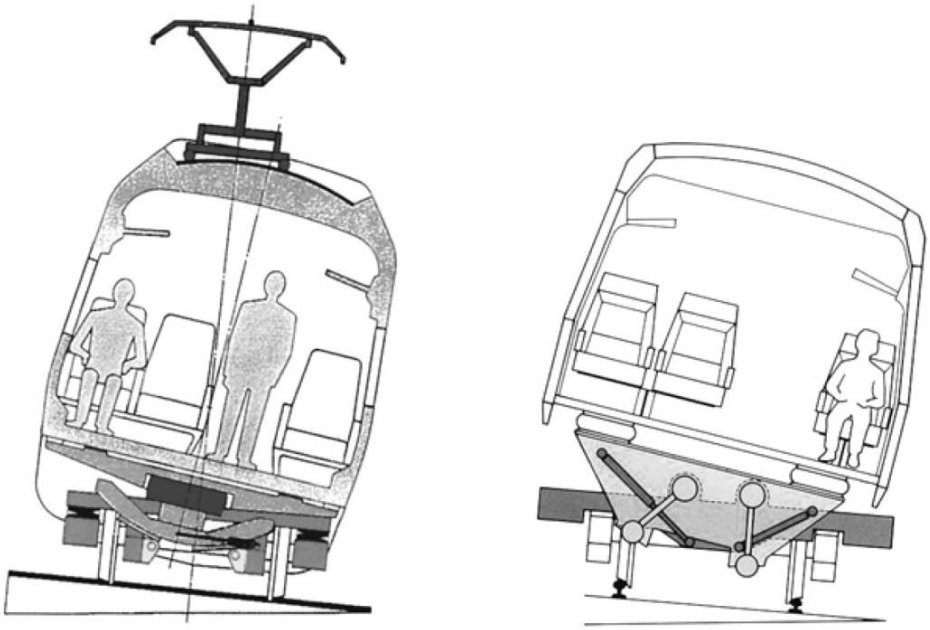


Figura 5.12 - Exemplos de sistemas ativos com atuação abaixo da suspensão secundária - Alstom Pendolino (esquerda) e Bombardier X2 (direita) (PERSSON, 2011)

Em sistemas de pendulação em trens elétricos alimentados por catenária, muitas vezes existe a necessidade de deslocamento do pantógrafo na direção oposta à da caixa do veículo. A Figura 5.13 esquemática a seguir, que mostra um trem pendular de sistema ativo quando em desenvolvimento pela então Fiat Ferroviaria, ilustra o conceito.

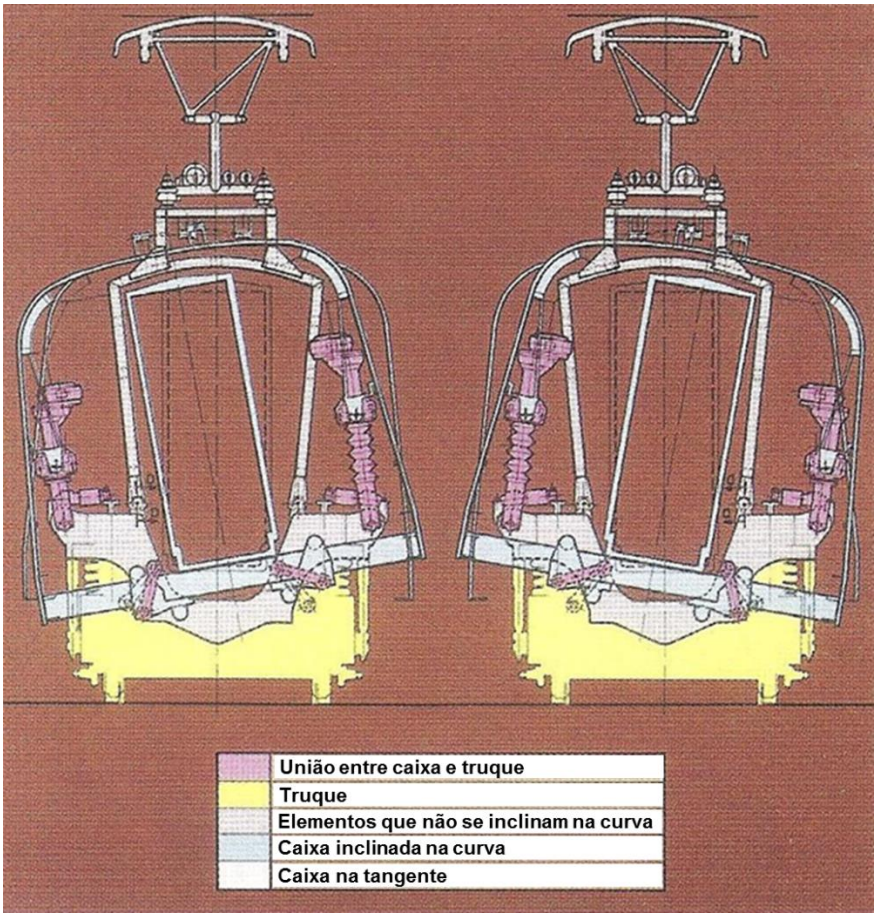


Figura 5.13 - Trem pendular ativo produzido pela Fiat em 1970 - Pantógrafo na mesma posição mesmo após a inclinação da caixa (PITA, 2006)

5.2.2 Sistemas de controle

Os trens pendulares com suspensão ativa podem ser classificados em diferentes categorias, porém em todos eles o sistema de controle da pendulação deve executar as mesmas funções sequenciais (MANCINI et al, 2008):

- Identificar precisamente e sem atrasos a posição inicial da curva de transição, que antecede a curva circular;
- Inclinar transversalmente a caixa móvel de acordo com o algoritmo do sistema;

- Verificar se a inclinação executada corresponde à inclinação requisitada para a curva em questão.

Uma das categorias de sistemas para identificação da posição inicial das curvas é a aplicada tradicionalmente nos trens Pendolino desde sua concepção, e chamada de “solução italiana”. Essa solução em particular consiste do reconhecimento do início da curva por meio de sensores que registram a aceleração lateral por meio de um acelerômetro ($\ddot{y}$) e as velocidades angulares por meio de giroscópios nos eixos longitudinal ($\dot{\varphi}$) e vertical ($\dot{\psi}$) em relação ao trem. Os sensores são posicionados no primeiro truque, que identifica o início da curva e inclina o primeiro carro. O sistema de controle então envia o sinal para o restante dos truques (e consequentemente do trem), requisitando a inclinação transversal.

A inclinação transversal que será requisitada é definida de acordo com a aceleração lateral medida e com o algoritmo pré-estabelecido para o sistema. No caso da solução italiana, o algoritmo utilizado define que uma porcentagem fixa da aceleração lateral seja compensada; essa porcentagem é a mesma para todas as curvas, e também é constante ao longo de cada uma. O ângulo que o trem efetivamente inclina é então medido, e comparado com o valor requisitado – nisso reside a retroalimentação do sistema. Essa mesma verificação é feita nos outros truques, sempre quando a inclinação é efetuada nos atuadores mecânicos.

Um exemplo de arquitetura do sistema de controle pode ser visto a seguir na Figura 5.14.

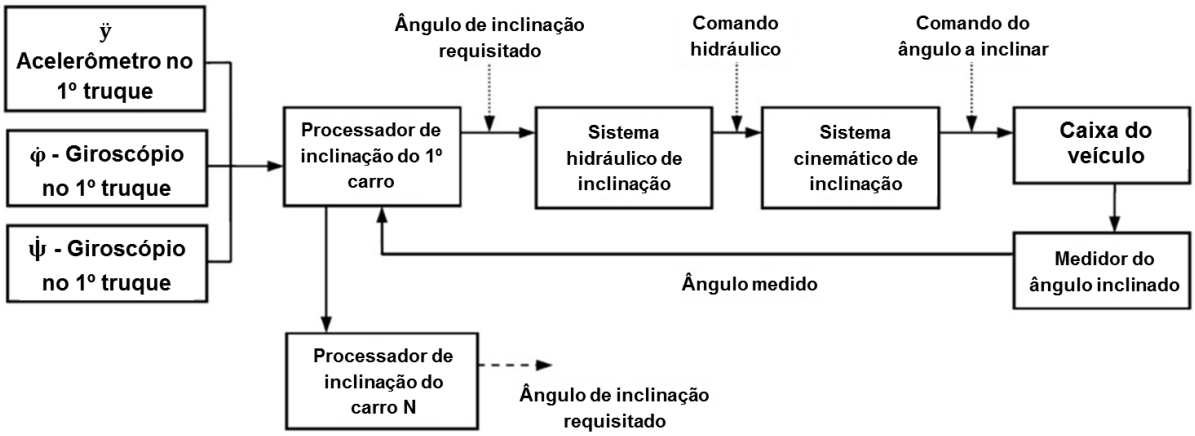


Figura 5.14 – Arquitetura do sistema de pendulação do Pendolino (adaptado de MANCINI et al, 2008)

Os sistemas de controle da pendulação ativa podem provocar um atraso na inclinação da caixa do veículo. Este atraso é inerente ao sistema de controle responsivo. O sistema deve identificar somente as curvas horizontais, sem ativar a pendulação devido a imperfeições na via, por exemplo. Devido à existência de filtros no sistema de controle, a pendulação só é ativada (no primeiro carro) depois de usualmente um período como um segundo já dentro da curva de transição, o que pode acarretar num desconforto localizado para o passageiro.

O Gráfico 5.2 a seguir exemplifica um caso, com um trem a uma velocidade de 50 m/s passando por uma curva de transição de 100 m, com uma superelevação D de 150 mm para a bitola normal (que corresponde a aproximadamente 6º). O gradiente de superelevação, que designa a velocidade com a qual a roda externa sobe ao longo da rampa de superelevação, será igual a 75 mm/s, o que é típico do caso de um trem pendular com velocidade melhorada.

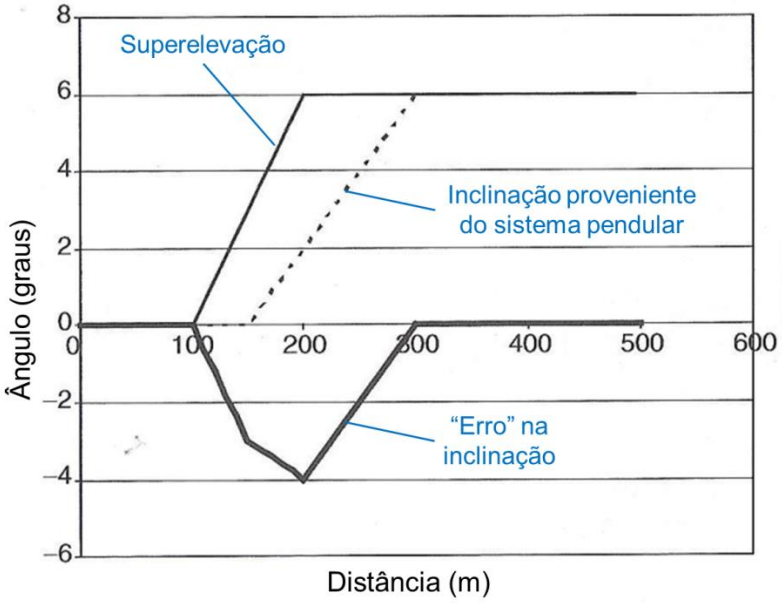


Gráfico 5.2 - Efeito do atraso na pendulação (JOHNSON, 2006)

Suponha-se que a inclinação que o sistema de controle deva fornecer antes que o trem entre na curva seja também de 6º. Idealmente a inclinação deveria se dar na rampa de superelevação (coincidente com a curva de transição), porém o sistema de controle não responde durante o primeiro segundo dentro dela; quando o faz, executa um giro de 2º por segundo. Produz-se, então, um erro ou atraso (representado pela linha cheia mais grossa no gráfico), que designa o quanto a caixa do veículo deveria estar inclinada, e que assume um valor máximo de 4º.

Os chamados sistemas antecipatórios ou preditivos eliminam em parte o problema do atraso na pendulação dos sistemas responsivos, e são a tendência futura para trens pendulares ativos, como o sistema Tiltronix da Alstom (2012). Nesse sistema, o computador de bordo do trem contém as informações sobre o alinhamento da via, podendo compará-las com as informações provenientes dos sensores. Com o uso de mais técnicas de posicionamento em paralelo, como por balizas instaladas ao longo da via e localização por GPS é possível obter uma precisão de 4 metros, suficiente para eliminar o problema do atraso na pendulação (SASAKI, 2005, apud PERSSON, 2007).

6. CONFORTO DO PASSAGEIRO

As considerações sobre o conforto do passageiro são de extrema importância para o projeto ferroviário, na medida em que muitas vezes resultam em critérios de dimensionamento mais restritivos mesmo que as condições de operação segura (que naturalmente também precisam ser avaliadas). No caso específico dos trens pendulares ocorrem implicações adicionais, como a influência da velocidade rotacional mais elevada e a maior incidência de enjoo de movimento (*motion sickness*) ou cinetose associada.

Conforme define Persson (2011), o conforto dos passageiros nos veículos ferroviários de maneira geral é influenciado por fatores como temperatura, barulho, vibração, entre outros. O conforto do passageiro analisado no presente trabalho consiste da parcela dessa definição geral de conforto influenciada pelo comportamento do veículo em movimento.

Serão expostas as influências dos movimentos (e suas variações ao longo do tempo) translacionais e rotacionais no corpo humano que tipicamente ocorrem nos trens (convencionais e pendulares). Posteriormente, os efeitos em si serão discutidos, com foco na geometria da via e como a mesma se relaciona com esses efeitos.

6.1 MOVIMENTOS TRANSLACIONAIS E ROTACIONAIS

Para o estudo do conforto do passageiro, é de interesse convencionar-se um sistema referencial para entender os movimentos aos quais ele está sujeito. A convenção apresentada e adotada a partir daqui, exemplificada pela figura a seguir, é a mesma adotada por Persson, e comum também em outros trabalhos.

O sistema referencial normalmente estará sempre orientado em função da posição do próprio passageiro, sendo assim sempre ortogonal ao plano do piso do trem. Deste modo, inclinações como a imposta ao trem pela superelevação e/ou a devida ao sistema de inclinação da caixa alterarão a orientação desse sistema referencial em relação ao plano horizontal, mas de forma que ele sempre acompanhe o plano do piso e consequentemente do passageiro.

Portanto, conforme a Figura 6.1, convencionar-se-ão os termos e seus símbolos:

- Eixo longitudinal (x): paralelo ao piso do veículo, na direção e sentido do deslocamento de viagem (longitudinal) do trem;
- Eixo lateral (y): paralelo ao piso do veículo, na direção transversal do trem, com sentido para a direita em relação ao deslocamento longitudinal;
- Eixo vertical (z): perpendicular ao piso do veículo;
- *Roll* ou giro (φ): Rotação em torno do eixo longitudinal (x) do veículo;
- *Pitch* (χ): Rotação em torno do eixo lateral (y) do veículo;
- *Yaw* (ψ): Rotação em torno do eixo vertical (z) do veículo.

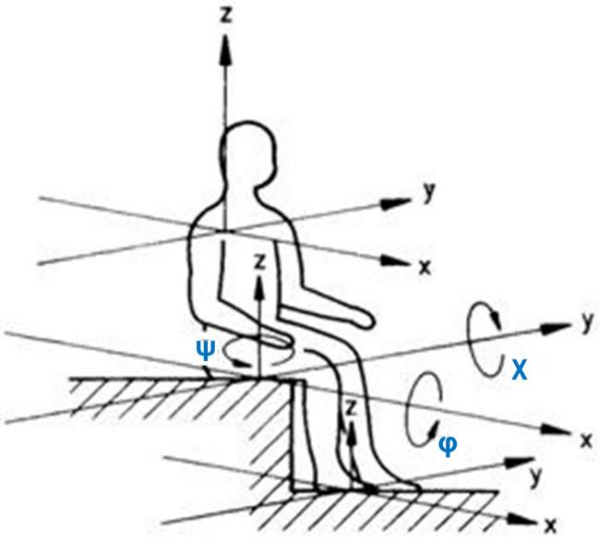


Figura 6.1 – Sistema referencial adotado em relação ao passageiro (NORSONIC, 2013)

As velocidades, acelerações e variações das acelerações relacionadas com cada um dos três eixos e ângulos apresentados serão designadas por meio das derivadas de posição. Para avaliação do conforto do passageiro, as derivadas mais relevantes são: a velocidade no eixo longitudinal $\dot{x}$; a aceleração no eixo lateral $\ddot{y}$; a variação da aceleração no eixo lateral ou *jerk* $\dddot{y}$; e a velocidade de giro $\dot{\varphi}$.

A velocidade nos movimentos translacionais não é, de maneira geral, um problema para o conforto do passageiro. Sistemas de transportes terrestres cada vez mais rápidos são propostos, como trens de muito alta velocidade (com velocidades máximas superiores a 350 km/h). Na aviação comercial, os passageiros estão expostos – logicamente num ambiente fechado, pressurizado e controlado – a

velocidades em torno de Mach 1, a velocidade do som, de 1.230 km/h. Astronautas em órbita da Terra viajam a velocidades da ordem de dezenas de milhares de km/h. Historicamente, pouco ou nenhum efeito de diminuição do conforto pôde ser atribuído somente à velocidade elevada, para estes e outros casos semelhantes.

Já as acelerações, em especial as translacionais são tipicamente causadoras de desconforto e em grandes níveis podem mesmo provocar riscos à saúde do ser humano (embora os níveis relacionados com os veículos ferroviários não cheguem a essas ordens de grandeza). A terceira derivada de posição, ou seja, a variação da aceleração ao longo do tempo também é importante para o conforto do passageiro, em especial quando analisada no eixo lateral y.

As velocidades rotacionais são importantes ao passo que alteram a percepção do plano horizontal do passageiro, como será visto posteriormente no caso do enjoo de movimento ou cinetose. Suas derivadas relacionadas (aceleração de giro $\ddot{\varphi}$, por exemplo) em poucos casos são consideradas relevantes.

A seguir, os seis tipos de movimento e suas derivadas mais relevantes são analisados, principalmente quanto a quando e como ocorrem em função da geometria da via e da dinâmica de operação do veículo, com especial atenção ao que ocorre nos trens pendulares.

6.1.1 Movimento longitudinal

O movimento longitudinal (ao longo do eixo x) geralmente não é problemático para as considerações a respeito do conforto do passageiro. A aceleração longitudinal se manifestará na operação de um trem tanto quando ele inicia sua viagem, partindo por exemplo de uma estação e variando a velocidade de 0 até a velocidade de cruzeiro designada no trecho inicial, assim como no final da viagem, quando a velocidade varia da velocidade de cruzeiro até 0. Eventualmente haverá acelerações e desacelerações longitudinais adicionais em função da necessária redução de velocidade devida ao traçado geométrico horizontal (curvas mais fechadas), passagem por trechos urbanos, entre outras restrições. Também eventualmente haverá a necessidade de paradas de emergência, mediante uma taxa de desaceleração maior que a normal de operação.

As acelerações e desacelerações máximas estipuladas pelas diversas normas variam, restringidas não só pelo conforto do passageiro, mas pelas características dos

veículos (peso próprio, motorização, tipos de freios, entre outros). Os valores considerados por exemplo pela CPTM (2007) para trens suburbanos e de acordo com a média da frota são: aceleração longitudinal de 0,65 m/s²; desaceleração longitudinal de freio de serviço de 0,80 m/s²; e desaceleração máxima de freio de emergência de 1,10 m/s².

Para os movimentos longitudinais não há diferenças significativas entre os trens convencionais e os pendulares, exceto no caso em que o trem pendular desenvolve uma velocidade superior à do convencional numa via existente. Nessa situação, deverão ser respeitados limites semelhantes de aceleração longitudinal, naturalmente com as implicações do trem acelerando e desacelerando por mais tempo (e ao longo de desenvolvimentos maiores).

6.1.2 Movimento lateral

6.1.2.1 Aceleração lateral

Nos veículos ferroviários, a influência do movimento lateral se dará principalmente pela aceleração sentida pelos passageiros nas curvas horizontais. Essa aceleração, chamada de aceleração lateral não compensada a_{nc}, já foi detalhada anteriormente no estudo da dinâmica do veículo em curva. Vale resumir algumas considerações com uma ênfase no conforto do passageiro.

A aceleração lateral não compensada a_{nc} varia em função do quadrado da velocidade, da curvatura (inverso do raio R de uma curva) e da superelevação D conforme a Equação 4.4. A via superelevada acaba por reorientar o plano no qual o passageiro está, diminuindo a componente lateral da resultante das acelerações (gravitacional e centrífuga) que ele sente. A inclinação transversal dos trens pendulares provoca um efeito semelhante e adicional. O valor efetivo da aceleração lateral não compensada ainda sofrerá o efeito da flexibilidade da suspensão do veículo como já discutido.

A aceleração lateral não compensada a_{nc} sentida pelo passageiro historicamente definiu em parte os critérios geométricos de traçado horizontal. O raio mínimo horizontal de projeto em geral é dado em função disso, pois o passageiro é particularmente sensível a essa aceleração lateral.

Como se pode concluir até aqui, a aceleração lateral é a base das considerações acerca do uso de trens pendulares. O trem pendular busca aumentar as velocidades numa dada via, sem ultrapassar o valor máximo estipulado para a aceleração lateral num trem convencional, e por vezes até resultando num valor menor desta e aumentando a condição de conforto.

6.1.2.2 *Jerk* lateral

A variação de uma aceleração ao longo do tempo é chamada de *jerk*, podendo ser entendida também como a terceira derivada da posição em função do tempo. No caso do movimento lateral é expressa como $\dddot{y}$. Na via férrea, a aceleração lateral sofrerá uma variação de 0 ao valor máximo quando o veículo percorre uma curva de transição de entrada, e de maneira inversa quando percorre uma curva de transição de saída, caracterizando assim o *jerk* lateral. Também ocorrerão variações da aceleração lateral na passagem por curvas reversas e compostas.

Normalmente, num traçado de bom padrão, haverá curvas de transição do tipo clotoide, onde o raio varia linearmente em função do desenvolvimento linear. Isso fará com que a variação da aceleração lateral seja aproximadamente constante (embora em casos práticos haja picos locais no *jerk*, devido a efeitos dinâmicos). Essa é, inclusive, uma das razões de uso das curvas de transição, em especial a clotoide, nos alinhamentos horizontais.

Em traçados sem curvas de transição, poder-se-ia supor que o *jerk* apresentaria um valor infinito, já que a passagem da tangente para a curva circular se dá bruscamente. Porém, conforme detalha Schramm (1974), na prática pode-se assumir a existência de uma “transição virtual” com valor correspondente à distância entre os truques dos carros de passageiros, resultando num valor determinado de *jerk*, mas bastante maior que o que haveria com o uso de uma curva de transição.

Os valores normalmente admitidos para o *jerk* lateral se situam entre 0,2 e 0,4 m/s^3. Para uma via existente, se os trens convencionais forem substituídos por trens pendulares trafegando a uma velocidade incrementada e as curvas de transição não forem alteradas, o valor do *jerk* será maior, o que implica numa necessidade de aumento no comprimento das espirais em si (embora o efeito da velocidade de giro requisite aumento até maior, como será visto posteriormente).

6.1.3 Movimento vertical

No eixo vertical, o corpo humano está sempre exposto à aceleração da gravidade g de em torno de 9,81 m/s². Nos veículos ferroviários normalmente é tomada somente a aceleração diferencial a esse valor. A aceleração vertical se manifestará de duas maneiras: devido às variações do alinhamento vertical e da inclinação do veículo em torno do eixo longitudinal.

Primeiramente, devido ao traçado do alinhamento vertical e ao deslocamento do veículo ao longo do mesmo, o passageiro sentirá a aceleração centrífuga “jogando-o para cima” nas curvas verticais convexas, e “esmagando-o” nas curvas verticais côncavas. A CPTM (2007) adota, por exemplo, 0,20 m/s² como valor-limite padrão para a aceleração vertical e com isso em parte determina os comprimentos mínimos adotados para as curvas verticais.

Em segundo lugar, a inclinação da via superelevada nas curvas aumenta a aceleração vertical sentida pelo passageiro, ao provocar a “redistribuição” citada anteriormente da resultante de forças. No caso específico dos trens pendulares, essa aceleração aumentará ainda mais, devido ao efeito adicional da inclinação da caixa do veículo. A Figura 4.5 ilustra esse conceito: a aceleração vertical adicional é dada pela diferença entre as setas verticais, azul e vermelha.

Torna-se importante principalmente no caso dos trens pendulares considerar a composição dos dois efeitos (das curvas inerentes ao alinhamento vertical e da superelevação e inclinação da caixa do veículo) num traçado, evitando projetar curvas verticais que coincidam com curvas horizontais por exemplo, pois isso pode gerar desconforto adicional para o passageiro.

6.1.4 Movimentos rotacionais

Os movimentos rotacionais de *yaw* ψ (em torno do eixo vertical z, ou seja, governados pelas variações no alinhamento horizontal) e *pitch* χ (em torno do eixo lateral y, ou seja, governados pelas variações no alinhamento vertical) apresentam valores pequenos na operação dos veículos ferroviários, não provocando desconfortos significativos ao passageiro.

Já o movimento rotacional de *roll* ou giro φ (em torno do eixo longitudinal x) é mais impactante. Ele estará presente em qualquer tipo de trem quando o veículo percorre uma rampa de superelevação, ao adentrar ou sair de uma curva horizontal, ou entre duas curvas reversas ou compostas. A rampa de superelevação mais aplicada no mundo é a linear; o giro do veículo pode ser representado tanto em mm/s (variação da superelevação à qual ele está sujeito por segundo), como em º/s (graus de inclinação do plano do piso do veículo por segundo).

Nos trens pendulares, haverá o giro adicional do próprio veículo em relação ao plano da via. Normalmente os sistemas são concebidos de modo que esse giro coincida com a rampa de superelevação, que por sua vez é dimensionada coincidindo com a curva de transição. Assim, o veículo pendular, para sua velocidade incrementada e numa dada via, apresentará uma velocidade de giro relativamente maior que os trens convencionais, o que pode causar desconforto do passageiro. Isso leva à necessidade de uso de comprimentos de curvas de transição (e consequentemente comprimentos de rampas de superelevação) maiores para a operação de trens pendulares, sem que se provoque desconforto ao passageiro.

Ou seja, na aplicação do material rodante pendular numa via existente com o objetivo de aumento de velocidades, algumas alterações na geometria acabam por serem necessárias, ao contrário do que o senso comum levaria a acreditar. Em raciocínio semelhante, pode ser interessante projetar novas ferrovias com curvas de transição longas, prevendo a possibilidade de uso de trens pendulares futuramente para aumento de velocidades, mesmo que isso esteja fora do escopo inicial do projeto. As curvas de transição mais longas teriam pouco impacto nos custos construtivos nessa fase da implantação e inclusive contribuem para a condição de conforto do usuário mesmo nos trens convencionais.

Percebe-se que um dos conceitos gerais quando ao conforto nos trens pendulares é que estes permitem velocidades maiores com o mesmo conforto quanto à aceleração lateral, mas há maior desconforto devido à velocidade de giro aumentada, que deve ser levado em conta no projeto geométrico e na operação.

6.2 DEFINIÇÕES E AVALIAÇÃO DO CONFORTO

Com auxílio dos movimentos translacionais e rotacionais e suas derivadas, o conforto do passageiro pode ser definido e avaliado em diversos aspectos. A seguir são discutidos os três aspectos principais de acordo com Förstberg (2000):

- Conforto/desconforto médio de viagem (índice de viagem): aplica-se somente às acelerações translacionais de frequência mais alta. Valores médios mais altos do índice representam desconforto;
- Distúrbios no conforto, como acelerações ou *jerks* laterais elevados e localizados;
- Enjoo de movimento ou cinetose, provocado por exposição prolongada a movimentos translacionais e/ou rotacionais de baixa frequência. Ocorre, portanto em vias sinuosas com sequências longas de curvas reversas. O fenômeno ainda é pouco entendido, e os trens pendulares são usualmente mais associados ao efeito.

6.2.1 <u>Conforto/desconforto médio de viagem</u>

O conforto/desconforto médio de viagem pode ser calculado por procedimentos estabelecidos pela norma UNE-ENV 12299, de 1999, sucessora da norma UIC 513 de 1994 (de caráter recomendatório) (PITA, 2006); a Figura 6.2 auxilia em algumas definições desse procedimento.

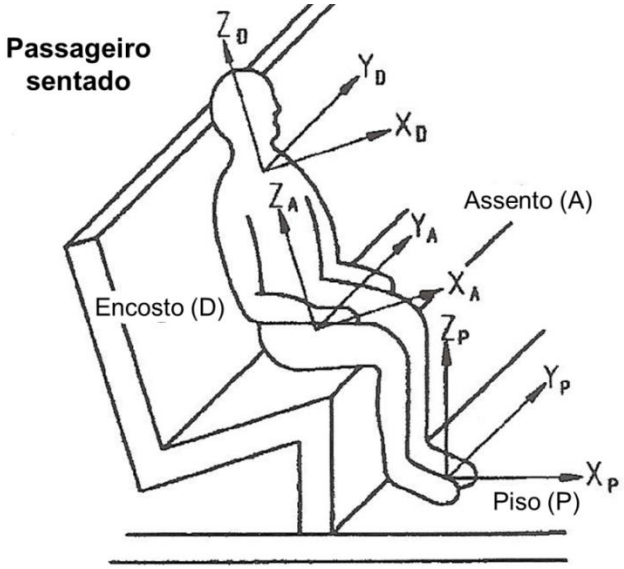


Figura 6.2 - Pontos de medição das acelerações em testes do conforto – Passageiro sentado (PITA, 2006)

Pita detalha os três índices de viagem, que expressam o conforto do passageiro e resultam dos procedimentos:

- O índice de conforto simplificado, N_{MV}, é baseado na medição de acelerações nos três eixos no piso do veículo, conforme a Equação 6.1 a seguir.

$$N_{MV} = 6 \cdot \sqrt{\left(a_{XP95}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{YP95}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{ZP95}^{W_b}\right)^2}$$

Equação 6.1 – Índice de conforto simplificado N_{MV} (PITA, 2006)

- O índice de conforto completo para passageiros sentados, N_{VA}, onde as acelerações são medidas nas interfaces entre os usuários e o veículo, conforme a mesma escala de valores supracitada e segundo a Equação 6.2:

$$N_{VA} = 4 \cdot \left(a_{ZP95}^{W_b}\right) + 2 \cdot \sqrt{\left(a_{YA95}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{ZA95}^{W_b}\right)^2} + 4 \cdot \left(a_{XD95}^{W_c}\right)$$

Equação 6.2 – Índice de conforto completo N_{VA}, para passageiros sentados (PITA, 2006)

- O índice de conforto completo para passageiros em pé, N_{VD}, onde as acelerações são medidas nos três eixos no piso do veículo e também conforme a mesma escala de valores, pela Equação 6.3 a seguir:

$$N_{VD} = 3 \cdot \sqrt{16 \cdot \left(a_{XP50}^{W_d}\right)^2 + 4 \cdot \left(a_{YP50}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{ZP50}^{W_b}\right)^2} + 5 \cdot \left(a_{YP95}^{W_d}\right)$$

Equação 6.3 – Índice de conforto completo N_{VD}, para passageiros em pé (PITA, 2006)

Nos três índices acima, têm-se as seguintes variáveis:

- Os índices N_{MV}, N_{VA} e N_{VD} assumem valores pouco menores que 1 (que representam conforto muito bom) a valores pouco maiores que 5 (que representam conforto muito ruim).

- As acelerações a_i^s (m/s²) são obtidas pelos valores quadráticos médios ou valores eficazes, calculados em períodos de 5 segundos cada.

- Os índices i das acelerações, como por exemplo o XP95, representam o eixo de medição da aceleração (X, Y ou Z), a posição onde ela é medida (P para o piso, A para o assento e D para as costas, como na Figura 6.2), e o percentil

considerado dentre os valores de aceleração dos períodos de 5 segundos medidos (as medições são tomadas em pelo menos 4 blocos de 5 minutos cada, resultando em 1.200 valores no total). Para o exemplo (XP95), ter-se-ia o eixo longitudinal, na posição do piso e com valor não menor que 95% dos medidos.

- O superíndice das acelerações, s = W_i, indica a ponderação dos valores de frequência conforme a curva de ponderação (como no exemplo do Gráfico 6.1) para cada eixo (sendo que no subíndice i dessa variável, por sua vez, b representa o eixo vertical z, d representa o eixo lateral y e c representa o eixo longitudinal x).

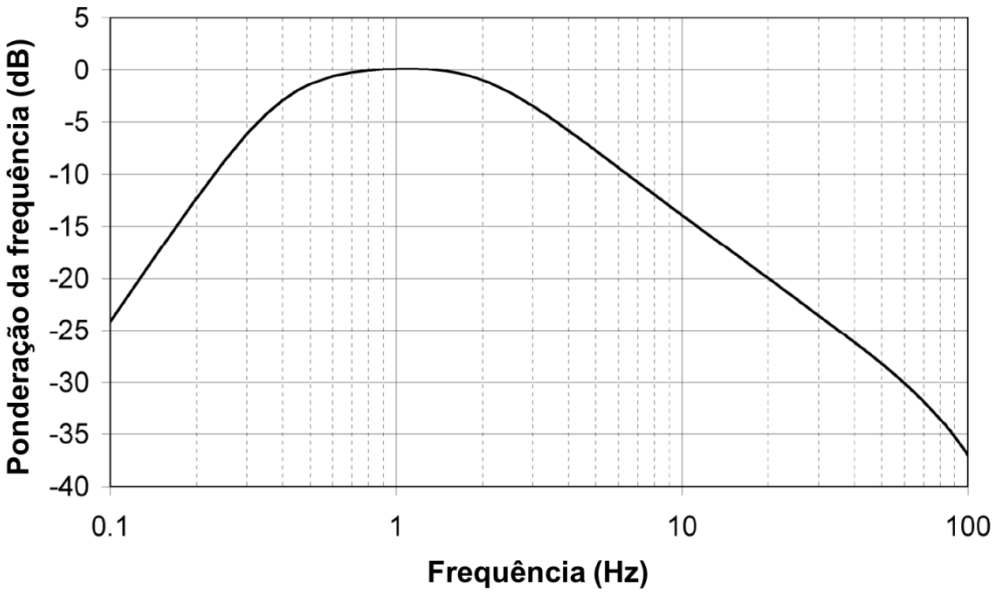


Gráfico 6.1 – Exemplo de função para ponderação dos valores da aceleração lateral - W_d (PERSSON, 2011)

6.2.2 <u>Perturbações eventuais no conforto</u>

Para o conforto médio de viagem, são consideradas as vibrações às quais o passageiro está submetido durante períodos prolongados, de pelo menos alguns minutos e também eventuais acelerações repentinas isoladas. Quando é avaliado o conforto para as chamadas situações eventuais, somente a sensação instantânea é considerada. Isso acontece por exemplo numa curva de transição, onde há uma variação repentina da aceleração lateral. Os índices P_{CT} e P_{DE} quantificam esses desconfortos localizados.

6.2.2.1 Desconforto na curva de transição – Índice P_{CT}

A norma UNE-ENV 12299, como detalha Pita (2006) e Goodall e Mei (2006), fornece a expressão geral (Equação 6.4) derivada empiricamente que retorna a porcentagem de passageiros que sentiria desconforto numa curva de transição, também chamada de índice P_{CT}.

$$P_{CT} = máx(A \cdot \ddot{y} + B \cdot \dddot{y} - C; 0) + D \cdot \dot{\varphi}^E$$

Equação 6.4 – Fórmula geral da porcentagem de passageiros que sente desconforto numa curva de transição (GOODALL e MEI, 2006)

Nessa fórmula empírica, os valores são normalmente inseridos conforme as aferições em operações reais, testes e simulações. As curvas de transição de entrada são as mais relevantes para avaliação do conforto, pois o usuário sente menores níveis de desconforto em curvas de transição de saída ou reversas, já que para estas há uma expectativa de mudança de direção.

As variáveis e coeficientes usados são dados a seguir. O Gráfico 6.2 e o Gráfico 6.3 mostram como se deve dar a aferição dos valores.

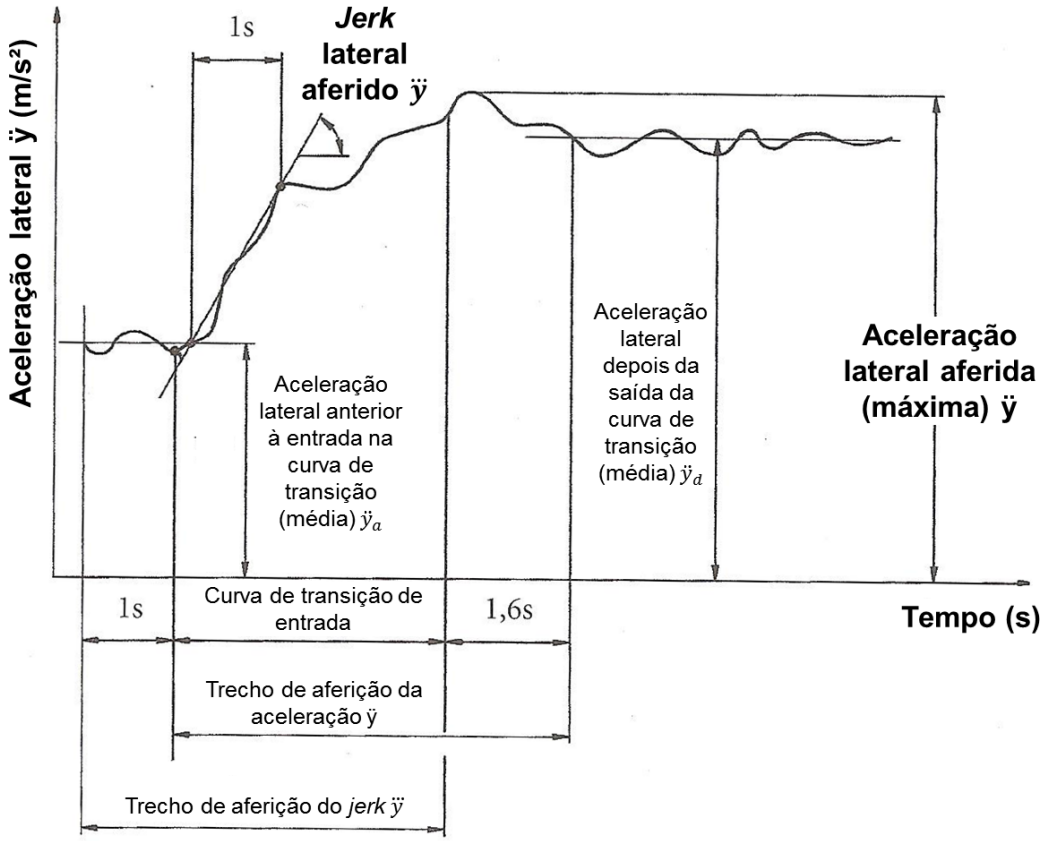


Gráfico 6.2 - Aferição da aceleração lateral e do *jerk* lateral para uso na fórmula P_{CT} (PITA, 2006)

- O valor máximo da aceleração lateral $\ddot{y}$ (m/s²), que deve ser medido entre a entrada do veículo na curva de transição e 1,6 s após a saída dele desta;
- O valor máximo da variação da aceleração lateral ao longo do tempo (ou *jerk* lateral) em um segundo, $\dddot{y}$ (m/s³), que deve ser medido entre um segundo antes da entrada do veículo na curva de transição e a saída dele desta curva;
- O valor máximo da velocidade angular de giro da caixa do veículo, $\dot{\varphi}$ (°/s), medido no período em que o veículo trafega pela curva de transição (ilustrado pelo Gráfico 6.3);

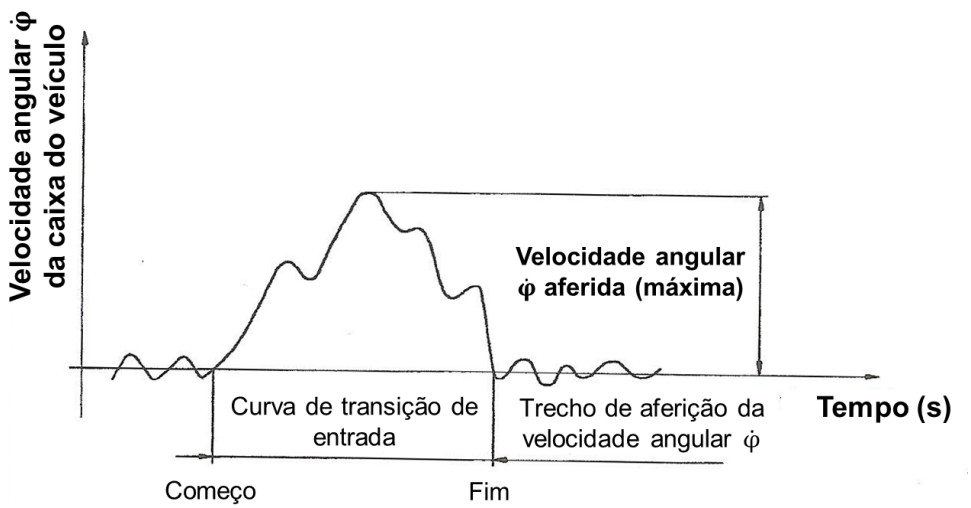


Gráfico 6.3 - Aferição da velocidade máxima de giro para uso na fórmula P_{CT} (PITA, 2006)

- Os coeficientes A, B, C, D e E, que dependem da posição do passageiro (sentado ou em pé), e são relacionados conforme a Tabela 6.1 a seguir.

Tabela 6.1 – Coeficientes da equação do conforto na curva de transição (GOODALL e MEI, 2006)

	Valores atribuídos aos coeficientes				
Posição do passageiro	A	B	C	D	E
Em pé	28,54	20,69	11,1	0,185	2,283
Sentado	8,97	9,68	5,9	0,12	1,626

Poder-se-ia inferir de antemão que a maior velocidade angular dos trens pendulares geraria maiores níveis de desconforto. Entretanto, resultados do indicador na linha Roma-Milão mostram que na verdade o índice P_{CT} retornou níveis menores de desconforto para trens pendulares que para trens convencionais (CANDELA et al, 2005, apud PITA, 2006). Resultados do programa FACT (KUFVER, 2005) também

mostram níveis de desconforto de maneira geral menores para os trens pendulares que para os trens convencionais, como ilustrado no Gráfico 6.4.

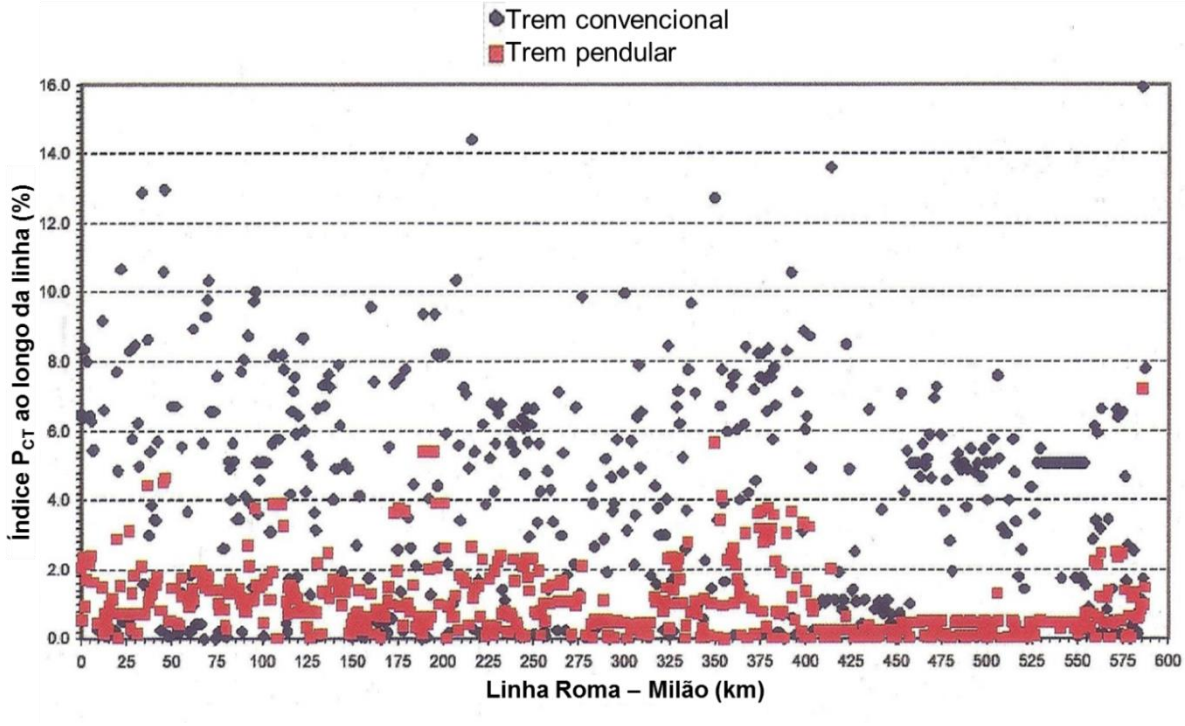


Gráfico 6.4 - Índice de conforto P_{CT} na linha Roma - Milão (CANDELA et al, 2005, apud PITA, 2006)

Como será visto posteriormente, o índice P_{CT} pode servir de instrumento pertinente para o estudo da geometria do traçado e da operação dos veículos convencionais e pendulares. Os outros indicadores dependem da qualidade de marcha do veículo, do estado da via, entre outros – fatores cuja análise pelo presente trabalho é mais dificultosa, e são inerentes à conservação da via e aos aspectos do material rodante em si. Já os fatores que influenciam o P_{CT} são básica e justamente o traçado e os aspectos operacionais, inerentes ao projeto e planejamento da operação. A análise destes ao longo da pesquisa permitirá conclusões sobre o conforto dos usuários nos trens convencionais e pendulares.

Existem outros índices para a avaliação do conforto do usuário na curva de transição. A UIC propôs em 2001 o índice N_{CT} (KUFVER, 2005), cujos valores de entrada são a aceleração lateral, o *jerk* lateral e a velocidade de giro. O índice proposto TC_T (SUZUKI et al, 2000, apud PERSSON, 2011) utiliza também as mesmas variáveis, com a adição da aceleração de giro $\ddot{\varphi}$, e retorna resultados semelhantes

aos do índice P_{CT}. Este último, entretanto, é o mais difundido conforme verificado na literatura.

6.2.2.2 Desconforto em eventos discretos – Índice P_{DE}

Além da curva de transição, os eventos discretos podem provocar uma sensação instantânea de desconforto, estando estes presentes nas curvas circulares e nas tangentes como detalha Förstberg (2000). Sendo que na curva circular há a aceleração lateral no caso quase-estático do veículo trafegando por ela, um exemplo de evento discreto poderia ser uma irregularidade na via tal que houvesse uma redução na superelevação; esta provocaria um aumento repentino da aceleração lateral sentida pelo passageiro.

A mesma norma anteriormente apresentada, UNE-ENV 12299 de 1999, possui uma expressão (Equação 6.5) que fornece a porcentagem de passageiros que sente desconforto nos eventos discretos (PITA, 2006):

$$P_{DE} = A' \cdot \ddot{y}_p + B' \cdot \ddot{y}_m - C'$$

Equação 6.5 – Fórmula geral da porcentagem de passageiros que sente desconforto num evento discreto (PITA, 2006)

Nesta fórmula, as variáveis e coeficientes são:

- A aceleração em m/s², sendo $\ddot{y}_p$ a diferença entre os valores máximo e mínimo aferidos, enquanto $\ddot{y}_m$ representa o valor médio aferido ao longo do evento discreto;
- Os coeficientes A', B' e C' de maneira similar ao índice P_{CT} dependem da posição do passageiro (sentado ou em pé) e assumem os valores conforme a Tabela 6.2 a seguir.

Tabela 6.2 - Coeficientes da equação do conforto em eventos discretos, em função da posição do passageiro (PITA, 2006)

	Valores atribuídos aos coeficientes		
Posição do passageiro	A'	B'	C'
Em pé	8,46	13,05	21,7
Sentado	16,62	27,01	37,0

O conforto em eventos discretos depende basicamente de fatores como os operacionais dos veículos e o estado de conservação da via implantada, sofrendo pouca influência da fase de projeto. Dessa maneira, considerações sobre esse fator estão fora do escopo de análise do presente trabalho.

6.2.3 Enjoo de movimento ou cinetose

O fenômeno do enjoo de movimento ou cinetose é uma resposta do organismo ao movimento real, percebido ou mesmo antecipado (PERSSON, 2011). Essa resposta acredita-se ser gerada por sinais conflituosos dos sistemas sensoriais humanos em razão de movimentos de baixa frequência. Seus principais efeitos são a tontura e a sensação de náusea, embora uma série de outros como: ansiedade, tensão, aumento na taxa de respiração, suor frio, aumento da salivação, exaustão, sonolência e mesmo vômitos sejam relatados na literatura. Passageiros em automóveis, trens, navios, aviões, outros modos de transporte e até em simuladores tipicamente sofrem do enjoo de movimento ou cinetose. O exemplo clássico é o do enjoo sofrido em embarcações no mar.

As causas do enjoo de movimento ou cinetose ainda não são completamente entendidas pela ciência; este campo tem profunda relação com a psicologia. A hipótese mais aceita para as causas do fenômeno é a do conflito sensorial. Por exemplo, um passageiro num trem está sentindo os movimentos de viagem (através dos variados sistemas sensoriais do corpo humano que não a visão), mas ao observar o interior do carro não visualiza esses mesmos movimentos, já que a cabine se move junto com ele.

Em automóveis, relata-se que a incidência do fenômeno é muito maior em passageiros que nos condutores. Isso pode ser parcialmente explicado pela maior antecipação que os motoristas podem ter da via e dos movimentos envolvidos, mostrando a ligação com o fator psicológico do fenômeno. A relação com os movimentos de baixa frequência se dá mais acentuadamente no caso de automóveis e trens em traçados mais sinuosos.

Os trens pendulares, segundo Persson (2011), são algumas vezes associados à maior incidência de enjoo de movimento. Muitos trabalhos do autor abordam esse tema com certa profundidade, que foi inclusive o ponto de partida para o projeto FACT

(KUFVER, 2005). Persson relata evidências conforme outros autores da maior incidência em muitos países que implementaram os trens de caixa móvel, como Japão, Suécia, Suíça e França.

Embora haja evidências, Persson relata que estas às vezes são inconclusivas, por mais que sejam fruto de testes extensos. Um dos estudos mostra, de maneira comparativa, uma incidência da cinetose em trens convencionais numa ferrovia americana de 0,13% entre 370 mil passageiros (KAPLAN, 1964, apud PERSSON, 2011); já outro estudo, no Japão, reporta uma incidência de 18% de cinetose nos trens convencionais (SUZUKI et al, 2005, apud PERSSON, 2011).

Para os trens de caixa móvel, mais um estudo, agora com o trem pendular natural japonês Classe 381, reportou uma incidência de 27% de cinetose nos passageiros, assim razoavelmente maior que os anteriores (UENO et al, 1986, apud PERSSON, 2011). Enquanto isso, na Europa, as evidências mostraram uma incidência menor, de em torno de 10% de cinetose em um teste com trens pendulares ativos (FÖRSTBERG, 1996, apud PERSSON, 2011). Testes em simuladores também são usados, como o mostrado na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Interior da cabine de um simulador para avaliação do conforto (FÖRSTBERG, 2000)

Percebe-se que a questão é complexa. Tanto a cinetose em si quanto a maior associação dela com os trens pendulares que com os trens convencionais são objetos correntes de estudo de especialistas, já que as causas e a incidência do fenômeno ainda não são completamente entendidos.

Na literatura supõe-se que exista uma relação das maiores incidências relatadas com os movimentos exacerbados dos trens pendulares em comparação com os convencionais. Esses movimentos são majorados, pois os trens pendulares normalmente desempenham velocidades maiores nas curvas, inclinam a caixa do veículo mais rapidamente (com uma taxa de giro maior) e a aceleração vertical também é aumentada devido à reorientação do plano do passageiro.

São propostas por Persson (2011) algumas estratégias que podem diminuir a incidência do enjoo de movimento ou cinetose nos passageiros em trens pendulares, podendo estas mesmo serem combinadas para obter melhores resultados.

- Melhorar os sistemas de controle, de modo a obter respostas mais precisas, limitar a velocidade e a aceleração de giro e diminuir a influência das irregularidades da via na atuação do sistema pendular. Como relatado em 5.2.2, a tendência futura é de substituir os sistemas responsivos pelos antecipatórios, que se baseiam no posicionamento por GPS e têm armazenado o traçado no computador de bordo do veículo, dentre outras medidas; isso aumentaria significativamente a precisão.

- Restringir a velocidade, o que embora possa parecer contraditório com a premissa dos trens pendulares, pode ser feito em trechos localizados, onde se saiba pela experiência que ocorra o enjoo de movimento. Isso pode ser efetuado sem grandes prejuízos para os tempos totais de viagem.

- Reduzir o ângulo de giro do veículo, usando fatores de compensação da aceleração lateral menores que 100%. O fator de compensação deve ser estipulado de modo que não haja desconforto nas curvas mais fechadas, mas em curvas de maior raio ele pode ser diminuído. Dessa maneira, é reduzido o giro da caixa e sua velocidade, tornando a operação mais próxima à de um trem convencional.

- Fazer mudanças no traçado geométrico, o que é efetivo principalmente na fase de projeto. É possível reduzir as superelevações nas curvas e tentar-se evitar a coincidência de curvas verticais côncavas e curvas horizontais, que na prática combinam acelerações verticais para baixo.

Persson ainda relata que outras ações, num âmbito diferente, diminuem o risco do enjoo de movimento nos trens pendulares: sugerir que os passageiros bebam muita água, aumentar a ventilação dentro do veículo e também abaixar a temperatura do ambiente.

Visto a complexidade e discussão atual em torno do fenômeno do enjoo de movimento ou cinetose, este é aqui apenas apresentado e detalhado conceitualmente. Considerações posteriores serão feitas pontualmente, não sendo proposta do presente trabalho um aprofundamento no tema.

7. REFERÊNCIAS DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO, MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DOS TRENS PENDULARES

A análise dos custos de implantação e operação é parte fundamental do projeto e exploração de um corredor ferroviário. Esta análise que permite verificar a viabilidade de um empreendimento e operação, seja ele sob responsabilidade integral do poder público, ou com a participação da iniciativa privada.

Há uma relação clara dos custos com o mercado dos transportes, ao passo que o modo ferroviário compete com os modos rodoviário e aeroviário, quando analisado o âmbito do transporte de passageiros em médias e longas distâncias. Como visto no levantamento do contexto histórico do Capítulo 3, as ferrovias passaram a sofrer competição considerável com os outros dois modos a partir de meados da década de 1950, o que levou ao desenvolvimento dos trens de alta velocidade e mesmo dos trens pendulares. A implantação e operação dos serviços, além de oferecer maiores velocidades e menores tempos de viagem que garantam a competitividade, deve também não apresentar custos inviabilizadores.

Uma consideração que deve ser feita também, além dos ganhos de tempo de viagem dos usuários, é quanto aos impactos ambientais que o transporte ferroviário evita quando optado em substituição aos outros modos. Os trens geralmente representam a solução mais sustentável, com menor emissão de poluentes por exemplo, sendo mais eficientes energeticamente. Uma estimativa proveniente de Sato (1980, apud PITA, 2008) indica que o consumo energético em kcal/passageiro-km transportado no trem de alta velocidade japonês, o Shinkansen, é da ordem de 5 vezes menor que o equivalente de automóveis e aviões. O Gráfico 7.1 mostra essa comparação, também em função da velocidade.

No presente capítulo, são apresentados e discutidos de maneira conceitual os principais custos adicionais de implantação, manutenção e operação que o material rodante de caixa móvel apresenta em relação aos trens convencionais. O objetivo é iniciar um entendimento desses custos, que acompanham os ganhos de velocidade e a redução dos tempos de viagem que os trens pendulares proporcionam.

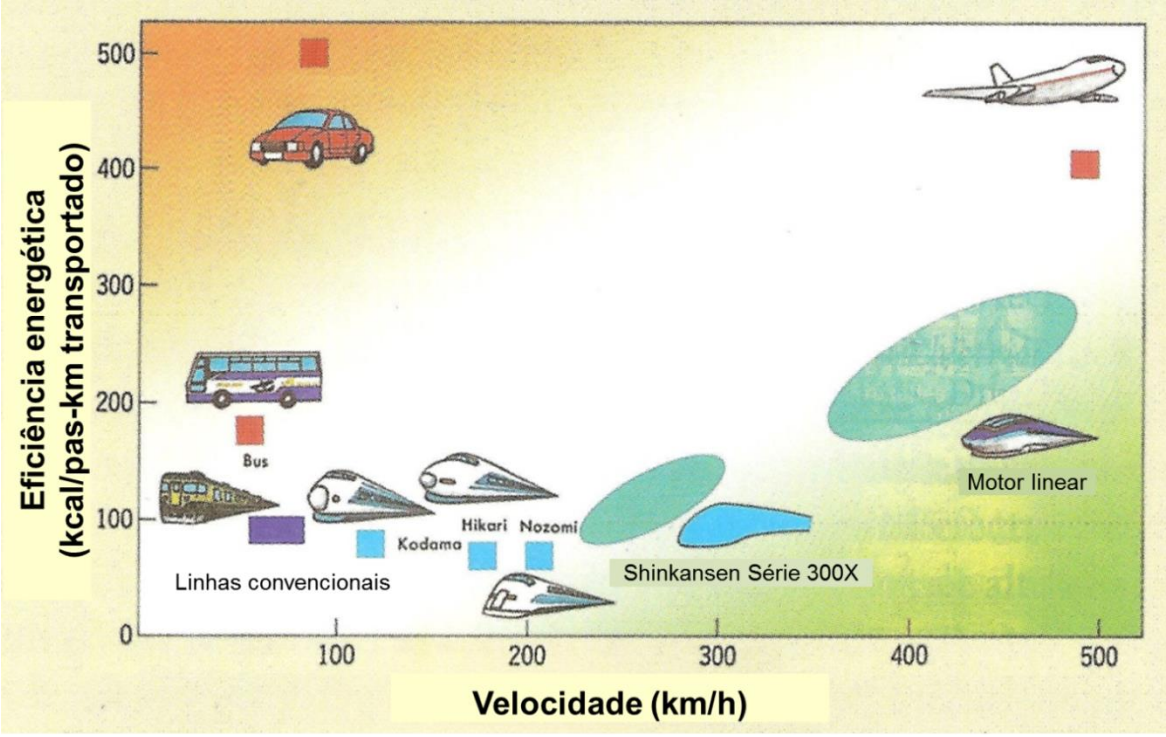


Gráfico 7.1 - Comparação da eficiência energética de vários modos de transporte (SATO, 1980, apud PITA, 2008)[7]

Há que se ressaltar que a experiência com trens de passageiros regionais e intercidades é escassa no Brasil na atualidade. Dados sobre custos são dificilmente encontrados na literatura e muitas vezes não podem ser obtidos junto aos fabricantes e operadores, por questões comerciais estratégicas. Dessa maneira, as comparações e inferências serão feitas de maneira expedita, apenas para fazer referências aos custos, com foco principal nos custos adicionais associados com os trens pendulares.

7.1 PRINCIPAIS CUSTOS ADICIONAIS

7.1.1 <u>Custo de aquisição do material rodante</u>

O material rodante pendular possui uma tecnologia mais complexa que o equivalente convencional, o que resulta num custo de aquisição naturalmente maior. Esse custo adicional, porém, é menor nos trens pendulares de sistema passivo ou natural que nos de sistema ativo, já que os trens pendulares passivos representam uma solução tecnológica simples, que depende essencialmente das forças inerciais para atuar.

[7] Não há detalhes na fonte consultada sobre o trem de motor linear mostrado no gráfico, porém supõe-se que se trata de um trem de levitação magnética (*MagLev*)

Os custos adicionais de aquisição do material rodante pendular ficam na faixa de 9 a 15%, segundo Lichtberger (2011). Conforme dados de Pita (2006), o custo do material rodante pendular de sistema ativo ETR 460 era da ordem de 12 milhões de euros para um veículo de 8 carros. Considerando que esses comboios têm uma capacidade para em torno de 400 passageiros, isso resulta num custo por assento de 30.000 euros. Já dados provenientes do projeto da ferrovia São Paulo – Sorocaba (CPTM, 2011) correspondentes a março de 2007 mostram um custo para o trem Desiro ML da Siemens de em torno de 23.780 euros por assento. Numa comparação apenas para referência entre as duas fontes, isso resultaria num preço relativo de aquisição do material rodante pendular em torno de 26,2% maior. Ressalta-se que essa comparação possui uma significante incerteza inerente, dado as numerosas variáveis envolvidas e as diferenças entre as situações analisadas.

7.1.2 Custo de manutenção do material rodante

Assim como com o custo aquisitivo maior em relação aos trens convencionais, os trens pendulares também possuem custos de manutenção maiores. De acordo com Pita (2006), o custo adicional de manutenção do material rodante pendular é da ordem de 10 a 15%, para o trem pendular de sistema ativo. Já Lichtberger (2011) afirma que a manutenção dos trens de caixa móvel em geral é de 3 a 5% mais cara que a das contrapartes de caixa fixa. Notar mais uma vez que há incertezas envolvidas, dado que mesmo os autores divergem quanto aos valores adicionais.

7.1.3 Custo de implantação e/ou adaptação da via

Para a operação do material rodante pendular numa dada via existente, com o objetivo de incrementar velocidades, algumas adaptações são necessárias por mais que se esteja evitando custos com a retificação da linha ou mesmo a construção de uma nova. Segundo dados de Pita (2006) os investimentos necessários seriam da ordem de 150.000 a 200.000 euros por km, na época. Cabe ressaltar que esses dados levantados por Pita referem-se a um estudo na França, de meados da década de 1990, das primeiras análises sobre a operação de trens pendulares. Os dados podem não corresponder com fidelidade a uma situação no Brasil e na data atual, por exemplo.

Lichtberger (2011) relaciona quais são as principais adaptações demandadas na via permanente:

- Mudanças no sistema de sinalização e possivelmente na catenária (quando a operação e o material rodante preveem alimentação elétrica);
- Remoção de cruzamentos em nível: conforme dados de Pita (2006) a remoção destes resulta num custo de 750.000 a 1.000.000 de euros cada;
- Reforço estrutural de pontes e viadutos;
- Adaptação de curvas de transição e rampas de superelevação.

Os trens pendulares de sistema passivo e os de sistema ativo cujo sistema de controle é responsivo (ou seja, detectando as curvas e acionando de maneira independente a inclinação da caixa) terão custos menores de sinalização e dos sistemas de controle em si. No primeiro caso, o trem só depende das forças inerciais para inclinar a caixa e no segundo o sistema é inerente ao próprio veículo, estando o custo embutido no de sua aquisição.

Vale pontuar que durante a fase de projeto é muito simples e de custo pouco significativo introduzir curvas de transição mais extensas que permitam a operação de trens pendulares posteriormente. Assim, o quarto item relacionado pode ser desconsiderado como custo adicional nessas situações de implantação de novas linhas.

7.1.4 Custo de manutenção da via

Os trens pendulares, por desenvolverem velocidades mais elevadas, naturalmente solicitam mais a via devido às forças inerciais maiores envolvidas.

É interessante ressalvar quão maiores são os esforços laterais na interação roda-trilho: para o trem convencional, na velocidade de 142,6 km/h, a aceleração centrífuga no raio de 1.000 m resulta igual a 1,57 m/s²; para a velocidade incrementada de 195 km/h do trem pendular ativo, a aceleração centrífuga é quase o dobro: 2,93 m/s². Nos trens de alta velocidade não ocorre algo parecido, pois os raios praticados são significativamente maiores.

Apesar da solicitação maior, é afirmado na literatura que os trilhos em uso hoje são adequados aos esforços mais elevados. Apenas haverá, naturalmente, um desgaste maior e mais frequente, que incorrerá em custos um pouco aumentados de manutenção da via. Como afirma Pita (2006), estima-se que esse custo é de até 5% adicionais em relação aos custos de manutenção típicos para trens convencionais. Novamente ressalva-se a incerteza agregada a essa estimativa, devendo-se proceder com cautela na sua consideração; uma linha no Brasil poderia apresentar custos adicionais maiores por exemplo.

7.2 EXEMPLOS DA COMPETITIVIDADE DO MATERIAL RODANTE PENDULAR

De acordo com o visto até aqui, de maneira referencial o emprego do material rodante de caixa móvel pode propiciar ganhos em um ou mais sentidos:

- O ganho de tempo do passageiro, com viagens mais rápidas, o que pode representar um ganho econômico se feita uma análise com respeito ao valor da hora dos usuários;
- O ganho ambiental, conforme mais passageiros trocam outros modos pelo modo ferroviário, devido ao aumento do nível de serviço proveniente do aumento da velocidade;
- A economia ao evitar-se a necessidade de retificação e modernização de um traçado existente; no caso de um novo corredor, a economia pode se refletir na desnecessidade de implantar obras civis onerosas, como trechos extensos em túneis, pontes e viadutos, ao elaborar-se um traçado de raios menores que se adeque melhor ao relevo do corredor.

Sendo a tecnologia do material rodante de caixa móvel estabelecida, porém pouco difundida, são a seguir apresentados exemplos da literatura em que a solução tecnológica mostra-se (ou mostrou-se) viável.

7.2.1 Comparação entre alternativas numa linha sueca: modernização e retificação da linha ou emprego de trens pendulares

O primeiro exemplo é exposto por Persson (2007). A linha sueca de Dalabanan, no trecho entre Borlänge e Uppsala, é de via singela, com as estações distanciadas

em torno de meia hora em termos do tempo de viagem. Se o tempo de viagem for efetivamente inferior a meia hora entre as estações, haverá um benefício de capacidade da linha, pois haverá a possibilidade de cruzamento de trens na região das estações, em paralelo com o embarque e desembarque de passageiros.

Considerando-se o uso de trens convencionais nesse corredor, em dois trechos o benefício descrito não é possível: entre Uppsala e Sala (33 a 38 minutos de viagem, dependendo do número de paradas intermediárias – 0 a 2), e entre Snickarbo e Borlänge (36 minutos de viagem, com 2 paradas intermediárias).

Os trens pendulares modernos atendem à demanda da meia hora de viagem sem alterações na linha, como mostra o Gráfico 7.2. Para que os trens convencionais atendam ao mesmo critério, são necessárias modernizações como a duplicação da via em Snickarbo, o aumento dos raios de cinco trechos com curvas, o aumento da extensão das curvas de transição e da superelevação e a renovação do sistema de sinalização.

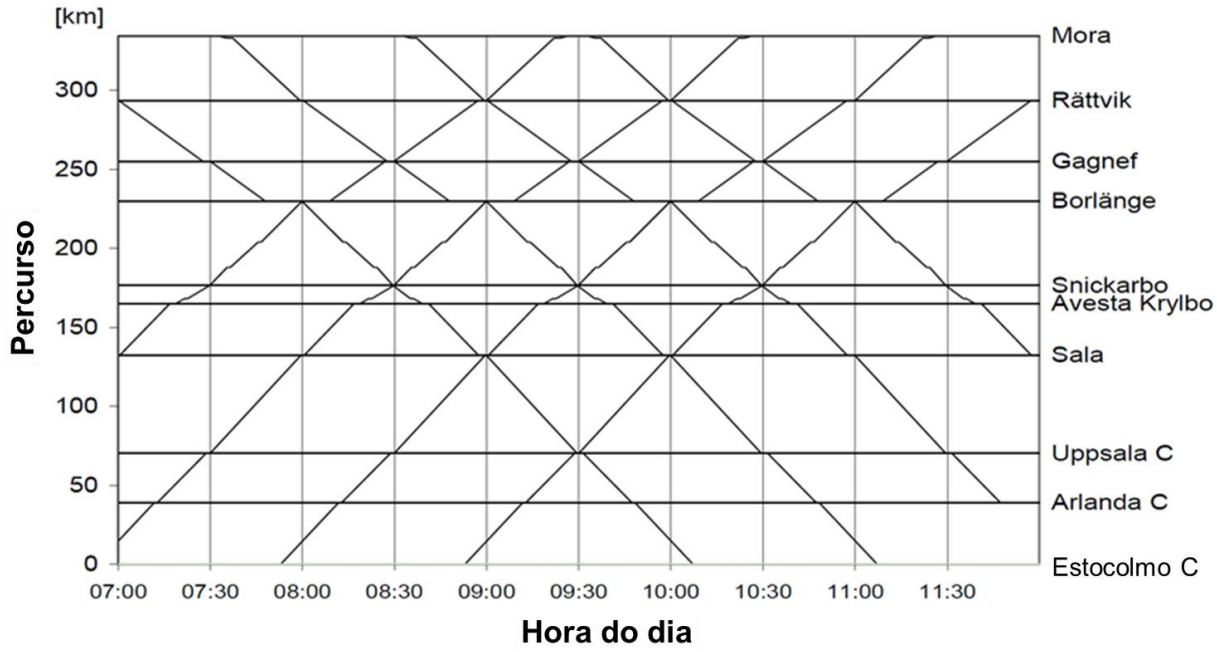


Gráfico 7.2 – Diagrama dos serviços a cada hora em cada direção na linha sueca – Configuração possível com o uso de trens pendulares (PERSSON, 2007)

Persson (2007) faz então uma comparação simplificada dos custos de modernização da linha com os do emprego de trens pendulares. Na análise, estima-se que a modernização da infraestrutura teria um custo de 250 milhões de coroas suecas, ou 250 MSEK (em torno de 35,0 milhões de dólares). Já o custo adicional

total dos trens pendulares, incluindo o adicional de aquisição e de manutenção em relação aos trens convencionais e pressupondo uma vida útil de 25 anos, resulta em aproximadamente 120 MSEK (em torno de 16,8 milhões de dólares). Ou seja, corresponde a menos da metade do custo de implantação.

Persson também aponta que a redução de tempo propiciada pela operação dos trens pendulares é maior que a correspondente à modernização da infraestrutura, o que ajuda a tornar o serviço mais robusto e atrativo para o usuário.

7.2.2 Comparações entre o emprego de trens pendulares e a construção de novas linhas para trens de alta velocidade

São apresentados por Pita (2006) resultados de estudos realizados na França no final da década de 1990. Nestes são mostrados os custos, velocidades e reduções de tempo de viagem com o emprego de trens pendulares e com a construção de uma nova linha para trens de alta velocidade, ambos em relação ao material rodante convencional e conforme a Tabela 7.1 a seguir.

Tabela 7.1 – Opções para aumento de velocidades em relação aos trens convencionais (DUMONT E HERISSÉ, 1997, apud PITA, 2006)

	Trem de caixa móvel	Nova linha (TAV)
Velocidade máxima (km/h)	220	320 a 350
Ganho relativo de tempo em relação aos trens convencionais	9 a 15%	50%
Investimento por minuto ganho (milhões de euros)	V < 160 km/h: 1,5 a 5,0 mi	Aprox. 35,0 mi
	V > 160 km/h: 9,0 a 18,0 mi	

Preliminarmente, esses resultados mostram que o investimento necessário pode ser bem menor com o emprego do material rodante de caixa móvel, com custos adicionais na ordem de 2 a 25 vezes menores que os equivalentes à construção de uma nova linha para TAVs. Pita (2006), entretanto, ressalva que esses levantamentos são referenciais, e novamente não se deve colocar uma solução tecnológica como prioritariamente melhor que a outra, devendo-se analisar cada caso individualmente e usando as referências como ferramenta auxiliar para a tomada de decisões.

Para ilustrar essa ideia, o autor levanta dois exemplos contrastantes:

- O corredor entre Paris e Clermont Ferrand, com 420 km e um tempo de viagem de 3 h 19 min usando-se trens convencionais, possuía uma cota de mercado (em relação aos outros modos) de 40% no final da década de 1980. Com um investimento moderado com o emprego de trens pendulares de sistema ativo, foi possível reduzir o tempo de viagem para 2 h 50 min. Caso tivesse sido construída uma nova linha, o tempo de viagem total seria de 2 h 32 min (somente 18 minutos a menos), porém seria necessário um investimento duas a três vezes maior.

- Quando foi decidido construir a linha de alta velocidade Paris – Lyon, em 1976, os trens pendulares ainda não eram empregados comercialmente. Se estivessem à disposição na época e optasse-se por essa solução, o tempo de viagem passaria de 3 h 45 min para 3 h 10 min. Quando os trens de alta velocidade entraram em operação, o tempo de viagem efetivamente foi reduzido de 3 h 45 min para 2 h 40 min. A ferrovia captou apenas 150.000 passageiros dos serviços aeroviários, o que corresponde a cerca de 15% da demanda deste modo. Comparando as duas reduções de tempo de viagem, o trem pendular teria um impacto comercial praticamente nulo se tivesse sido feita a opção pelo mesmo (naturalmente se a tecnologia estivesse à disposição na época) no lugar do TAV.

7.2.3 Diminuição dos raios mínimos de curva numa nova linha, prevendo operação de trens pendulares

Os estudos de caso ao longo do presente trabalho mostrarão as possibilidades de aumento de velocidades em linhas existentes ou com o traçado já definido. Entretanto, é uma possibilidade discutida na literatura a implantação de linhas com raios de curva horizontal diminuídos, operando-se nestas o material rodante de caixa móvel. Com isso são geradas economias de construção, ao passo que o traçado se adequará melhor ao terreno existente, e são necessárias menos obras civis como pontes, viadutos e túneis.

Como se detalhará posteriormente, essa ideia foi abordada no projeto funcional São Paulo – Sorocaba. A princípio foram gerados traçados alternativos com raios mínimos de 1.000 m (prevendo-se a operação de trens pendulares) e de 1.500 m

(prevendo-se a operação de trens convencionais). Para a alternativa escolhida, entretanto, foi adotado um traçado com raio mínimo de 1.000 m e prevendo-se a operação de trens convencionais. Isso ocorreu pois verificou-se que a velocidade alcançada por esses trens nesse traçado ficava em torno de 140 km/h, esta por sua vez considerada adequada para o serviço regional em questão.

Considerando agora uma velocidade máxima aumentada para 195 km/h (a fim de melhorar o nível de serviço, diminuir os tempos de viagem e atrair maior cota do mercado), para esta mesma linha a se implantar poder-se-ia configurar as seguintes alternativas:

- Traçado de raio mínimo igual a 1.000 m, prevendo-se a operação de trens pendulares de sistema ativo;
- Traçado de raio mínimo igual a 1.500 m, prevendo-se a operação de trens convencionais.

As duas alternativas levantadas provavelmente teriam tempos de viagem parecidos, e a primeira é capaz de fornecer um nível de conforto maior; estes pontos serão aprofundados ao longo dos estudos de caso. Quanto aos custos construtivos, como será mostrado na análise do projeto funcional São Paulo – Sorocaba, observou-se que o custo das obras civis para um traçado com raio mínimo de 1.000 m era em torno de 11% menor que o traçado correspondente com raio mínimo de 1.500 m.

Presume-se, com base nos dados apresentados até aqui, que a diferença no custo de implantação é então consideravelmente maior que a diferença de custo operacional referente à tecnologia entre as duas alternativas, favorecendo pois a primeira delas em termos de viabilidade econômica. Estudos mais detalhados, porém, são incentivados de modo a comprovar essa hipótese.

PARTE 2 – ESTUDOS DE CASO

8. ESTUDO DE CASO PRELIMINAR – CORREDOR SÃO PAULO - SOROCABA

8.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO

Conforme a análise feita da contextualização histórica do surgimento dos trens pendulares, o material rodante de caixa móvel constitui opção relevante para melhora do nível de serviço de uma via construída. O emprego desse material rodante resulta em aumento de velocidades, redução de tempos de viagem e consequente melhora na competitividade com outros modos, como o rodoviário e o aeroviário.

O objeto do Estudo de Caso Preliminar será um trecho do corredor São Paulo – Sorocaba (Figura 8.1). O corredor em si é uma ligação a ser construída nos próximos anos com serviço de característica regional. O projeto funcional já foi elaborado e apresentado à CPTM pelo consórcio formado entre as empresas projetistas, Planservi Engenharia e Oficina Consultores Associados. Os dados apresentados a seguir provêm desse projeto (CPTM, 2011).

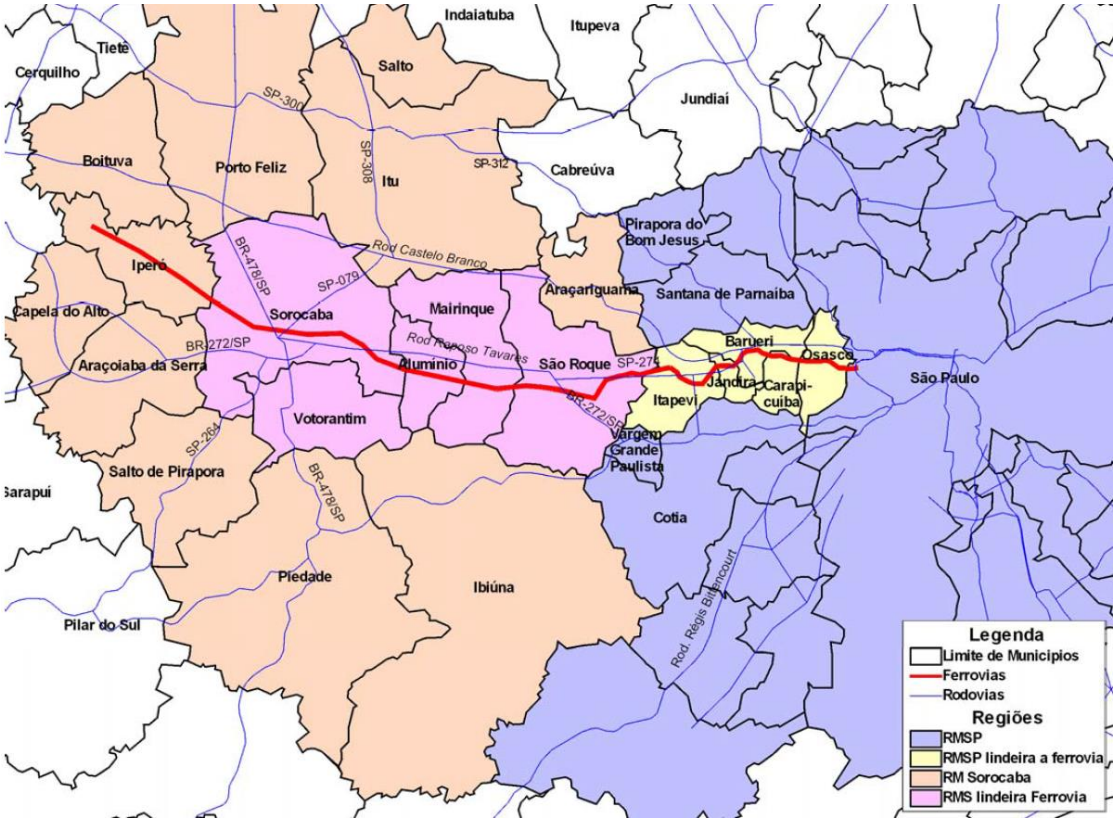


Figura 8.1 – Mapa da área de estudo (CPTM, 2011)

A ligação São Paulo - Sorocaba atenderá a um corredor cuja demanda hoje é atendida pelo modo rodoviário por meio das rodovias SP270 - Raposo Tavares e SP374 – Castelo Branco (Figura 8.2 e Figura 8.3).

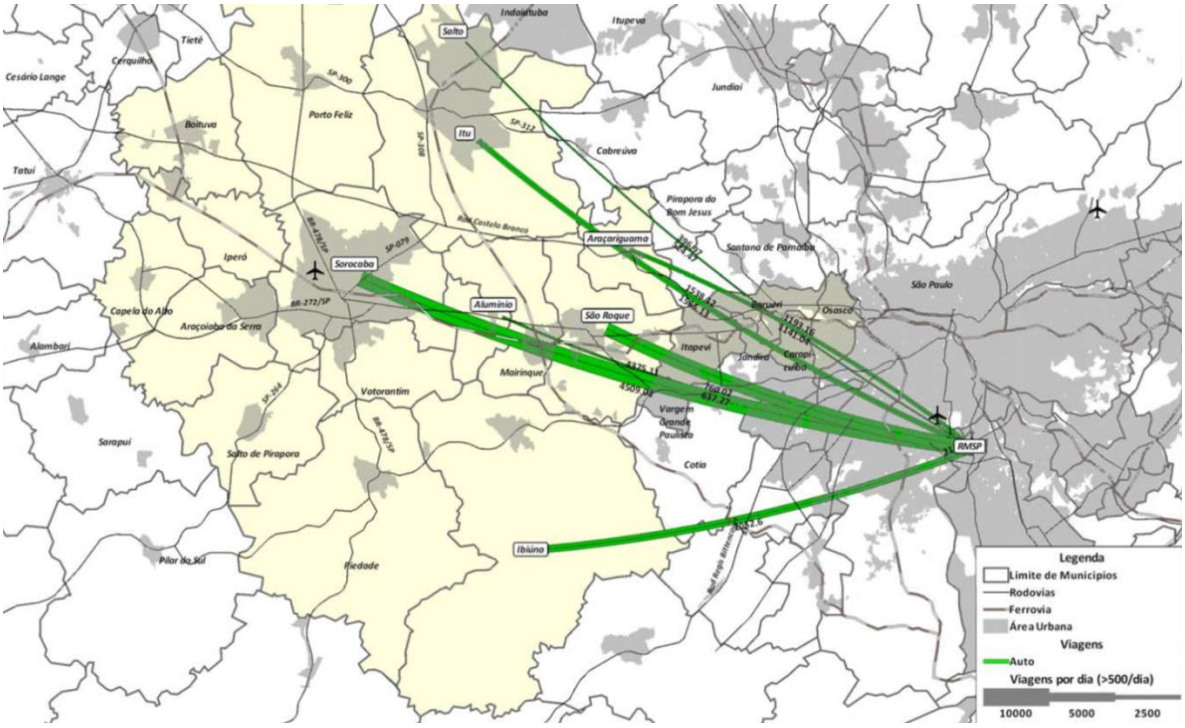


Figura 8.2 – Fluxo de viagens – Modo automóvel (CPTM, 2011)

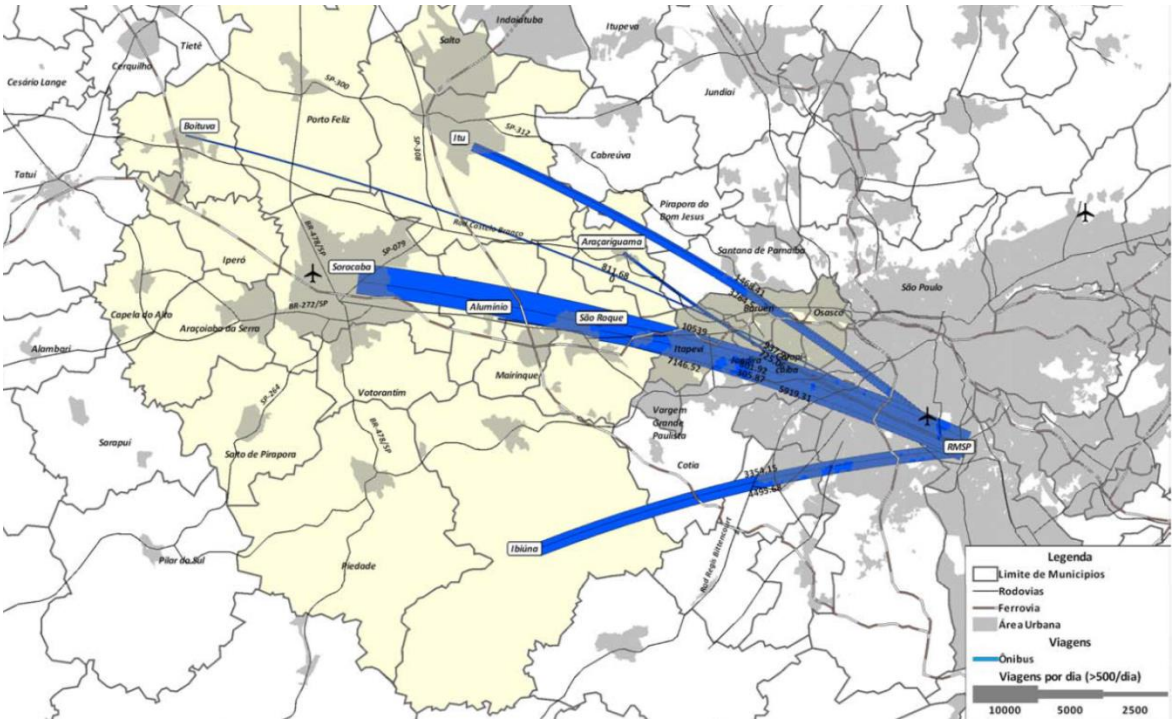


Figura 8.3 – Fluxo de viagens – Modo ônibus (CPTM, 2011)

Dados extraídos da pesquisa Origem Destino 2007 indicam que diariamente há 40 mil viagens com origem nos municípios da área de influência do corredor e destino na Região Metropolitana de São Paulo - RMSP e 37 mil viagens realizando o movimento contrário. A subdivisão dentro do modo rodoviário é de 40% para os automóveis e 60% para os ônibus. Boa parcela das viagens apresenta características de movimento pendular, ou seja, viagens com destino à RMSP por motivo trabalho concentradas em torno da hora-pico manhã e as com destino aos municípios da área de influência concentrados em torno da hora-pico tarde (CPTM, 2011).

Em suma, a ligação é importante e fornecerá uma opção rápida de conexão à RMSP e sua rede metroferroviária. Conforme será visto a seguir, os estudos se concentraram na elaboração de alternativas, exposição de suas características para uma tomada de decisão e posterior elaboração efetiva do projeto funcional. Nesse processo, foi avaliada a possibilidade de emprego do material rodante pendular, que consiste do interesse maior para o presente trabalho.

8.2 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL RODANTE

Para o material rodante, os estudos concentraram-se em expor quais as tecnologias mais apropriadas para o trecho em questão.

A princípio as automotrizes foram relacionadas, cuja propulsão e motorização se encontram em um ou mais dos próprios carros, nos truques (diferentemente dos sistemas com locomotivas). Esse sistema proporciona flexibilidade, pode-se escolher a porcentagem de motorização (porcentagem de carros motorizados) e é o mais indicado para sistemas novos. Sistemas com locomotivas são usados somente em serviços intermunicipais em que não houve descontinuidade do serviço como é o caso do corredor São Paulo - Sorocaba.

Foram considerados também trens com sistema de pendulação; foram relacionados fabricantes e trens com o sistema passivo (com inclinação transversal de até 4°) e com o sistema ativo (inclinação de até 8º). Porém, de maneira conservadora, todas as considerações posteriores sobre a pendulação levaram em conta o limite de 4º para a inclinação da caixa do veículo.

Como será exposto posteriormente, foram escolhidos fabricantes e, mais especificamente, trens com velocidades máximas predominantemente em torno de

160 km/h e sempre superiores a 140 km/h, que por sua vez é a velocidade de projeto para o corredor.

Assim, as tecnologias preferenciais para o material rodante se concentraram primeiramente nas duas possibilidades:

- Trens de caixa fixa, que trafegariam em torno da velocidade máxima desejada de 140 km/h em curvas de raios da ordem de 1.500 m;
- Trens de caixa móvel, que trafegariam nessas mesmas velocidades em curvas de raios da ordem de 1.000 m.

8.3 ELABORAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE TRAÇADO

O estudo de alternativas de traçado efetuado no início do projeto funcional levou em conta uma série de fatores, como as necessidades de atendimento às demandas, as características topográficas do trecho, a inserção urbana (boa parte do corredor está situado em área de leve a fortemente urbanizada), o desempenho desejado para o serviço e as características dos veículos considerados.

É interessante notar para o presente trabalho que os estudos preliminares cogitaram a utilização da ferrovia Sorocabana, com algumas retificações de traçado. Essa linha ferroviária existente, hoje utilizada essencialmente para o transporte de cargas, possui as seguintes características geométricas, conforme apresentado (CPTM, 2010):

- Extensão aproximada de 105 km;
- Perfil relativamente suave, com inclinação média ponderada pela extensão de cada segmento de 0,93%, havendo uma rampa máxima de 2,78% num segmento de 900 m;
- Pelo menos 473 curvas horizontais de raio menor que 1.000 m, dos quais 243 possuem raio entre 600 m e 1.000 m e 230 possuem raio menor que 600 m – o menor raio encontrado tinha 203 m.

Por ser um traçado antigo, do final do século 19, conclui-se que os raios das curvas horizontais são significativamente menores do que os desejáveis num serviço interurbano para transporte de passageiros de média velocidade. Historicamente,

traçados semelhantes a esse na Europa justificaram o surgimento, o desenvolvimento e a operação de trens pendulares, de maneira a aumentar a velocidade comercial dos serviços existentes.

A elaboração das alternativas envolveu, de início, a divisão do corredor em quatro segmentos, apresentados na Tabela 8.1 a seguir.

Tabela 8.1 – Características dos segmentos do corredor (CPTM, 2011)

Segmento	Extensão (km)	Caracterização	Velocidade máxima de operação (km/h)
A	7,0	Inserção na área urbana (Sorocaba)	100
B	47,0	Intermédio	140
C	28,0	Inserção parcial na área urbana (RMSP Oeste)	100/140
D	8,0	Inserção na área urbana (São Paulo)	100

Os segmentos A, D e parte do segmento C estão inseridos em áreas urbanas. Por razões de segurança e conforto (o serviço de média velocidade gera ruído e vibrações consideráveis) dos moradores próximos à via, a velocidade de operação nesses segmentos fica condicionada ao valor máximo de 100 km/h. Além disso, para diminuir as desapropriações e obras viárias dispendiosas nesses segmentos, foi considerada largamente a utilização de faixas de domínio existentes, como a da rodovia Castelo Branco, das margens do rio Tietê, da ferrovia existente, entre outros; essa consideração também influiu na restrição da velocidade citada.

O segmento B, também chamado de intermédio, constitui a maior parte do corredor em extensão (52,2% do mesmo). Por se tratar de uma área rural e não urbana, não há a restrição de velocidade de 100 km/h como nos outros segmentos; a velocidade de operação fica restrita à máxima prevista de projeto, igual a 140 km/h.

Embora tenham sido elaboradas alternativas diversas para cada segmento (com a posterior combinação dessas alternativas em 9 opções gerais de traçado para o corredor), somente serão discutidas daqui em diante aquelas relativas ao segmento B. Esse segmento corta as zonas rurais dos municípios de Alumínio, Mairinque e São Roque, entre as cidades de Sorocaba e Itapevi, na RMSP. Por se situar em área rural, o segmento B permitiria uma operação sob uma velocidade aumentada maior que 140

km/h; o possível incremento futuro de velocidades nesse segmento será objeto do Estudo de Caso 1.

Os traçados elaborados para o estudo de alternativas compreendendo os quatro segmentos envolveram os critérios de geometria apresentados na Tabela 8.2. É interessante notar que para o segmento B, de característica rural, foi possível adotar maiores raios mínimos, pois o traçado apresenta como restrição mais relevante apenas a própria topografia.

Tabela 8.2 – Critérios adotados para elaboração de alternativas de traçado (CPTM, 2011)

Critérios de projeto geométrico adotados	
Raio mínimo (trem convencional)	1.500 m
Raio mínimo (trem pendular)	1.000 m
Raio mínimo (trem pendular - retificação de linha)	800 m
Superelevação máxima	0,14 m
Tangente mínima horizontal entre curvas	100 m
Rampa máxima	2,0 %
Raio mínimo de curva vertical convexa	8.000 m
Raio mínimo de curva vertical côncava	8.000 m
Tangente mínima vertical	0 m

A questão de a topografia ser o fator mais relevante na restrição do traçado é uma justificativa adicional da utilização do segmento B como objeto do presente trabalho, para este Estudo de Caso Preliminar e para o Estudo de Caso 1. Os outros segmentos, urbanizados, possuem particularidades intrínsecas do corredor em que é proposta a nova ligação, enquanto o segmento referido permite uma comparação dos sistemas convencional e pendular levando em conta principalmente (embora não unicamente) as restrições impostas pelo terreno natural. Essas restrições serão encontradas em outros corredores em que serão implantadas novas ferrovias de maneira bastante semelhante, principalmente quando o relevo for da mesma natureza que o do segmento B estudado.

Para as alternativas que envolvessem retificação do traçado da Ferrovia Sorocabana, verificou-se que os raios das curvas existentes são da ordem de 250 a 400 m, o que justamente justificaria a retificação de traçado. Uma análise preliminar mostrou que a retificação utilizando o raio mínimo de 1.000 m era inadequada

tecnicamente, provavelmente incorrendo em custos elevados de obras civis, com grandes extensões em túneis e elevados. Dessa maneira, o raio mínimo igual a 800 m foi utilizado nas alternativas envolvendo retificação, que também previam o uso do material rodante pendular.

Cabe ressaltar que, apesar de ter sido adotada a superelevação máxima de 140 mm, posteriormente no projeto funcional foi utilizado um valor médio correspondente a 50% desse máximo, ou seja, igual a 70 mm. Essa simplificação foi justificada no sentido de que as superelevações, comprimentos de curvas de transição, entre outros, serem definidos somente na fase do projeto básico. Assim, ela foi considerada suficiente para elaborar as simulações de marcha e fazer a escolha da alternativa a ser detalhada.

A primeira alternativa considerada para o intermédio, B1, presumiu o uso do leito da atual Ferrovia Sorocabana com as devidas retificações, a implantação de uma nova superestrutura e o uso do material rodante de caixa móvel como definido anteriormente. Essa alternativa atendia a todas as três cidades consideradas como polos relevantes do intermédio: Alumínio, Mairinque e São Roque.

Em seguida, considerou-se um conjunto B2 de 8 alternativas de novo traçado. Essas 8 alternativas se alinham em 4 grupos de 2 alternativas cada; esses grupos se diferenciam de acordo com as cidades do intermédio que são atendidas pela nova ligação:

- Grupo B21: atendendo aos três municípios (Alumínio, Mairinque e São Roque);
- Grupo B22: atendendo a dois municípios (Mairinque e São Roque);
- Grupo B23: atendendo apenas ao município de São Roque;
- Grupo B24: nenhum dos municípios sendo atendido.

As duas alternativas dentro de cada um dos 4 grupos supracitados se diferenciam considerando as duas possibilidades de traçado e tecnologia de material rodante: caixa fixa (com raios mínimos da ordem de 1.500 m) e caixa móvel (com raios mínimos da ordem de 1.000 m).

A Tabela 8.3 resume todas as alternativas consideradas para o segmento B ou intermédio.

Tabela 8.3 – Resumo de alternativas de traçado para o segmento B (CPTM, 2011)

Alternativa	Municípios atendidos	Material rodante e R_{min}
B1	Alumínio, Mairinque e São Roque	Caixa móvel, R_{min} = 800 m (traçado retificado)
B211	Alumínio, Mairinque e São Roque	Caixa fixa, R_{min} = 1.500 m
B212	Alumínio, Mairinque e São Roque	Caixa móvel, R_{min} = 1.000 m
B221	Mairinque e São Roque	Caixa fixa, R_{min} = 1.500 m
B222	Mairinque e São Roque	Caixa móvel, R_{min} = 1.000 m
B231	São Roque	Caixa fixa, R_{min} = 1.500 m
B232	São Roque	Caixa móvel, R_{min} = 1.000 m
B241	Nenhum	Caixa fixa, R_{min} = 1.500 m
B242	Nenhum	Caixa móvel, R_{min} = 1.000 m

Estando estabelecidas estas nove alternativas para o segmento, seguiu-se a elaboração das mesmas (assim como no restante dos segmentos do corredor). Essa elaboração baseou-se no processo descrito a seguir, cujo objetivo é obter indicadores baseados no custo de execução de obra que permitam uma comparação entre as diferentes alternativas.

- Primeiramente foi feito um levantamento dos custos unitários, como de desapropriações, compactação de aterros, cortes em solo, cortes em rocha, custo linear de túnel e de pontes. Esses custos foram obtidos principalmente da Tabela de Preços Unitários - TPU do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo - DER-SP. O mais relevante na consideração dos custos para a comparação de alternativas não são os valores dos custos unitários em si, mas a proporção entre os mesmos para diferentes obras e serviços. Por exemplo, como é sabido no meio do projeto de infraestruturas viárias, o custo linear de uma obra em túnel é bastante superior, em torno de 5 a 6 vezes maior que o custo linear de uma obra em ponte.

- Posteriormente foi obtido um Modelo Digital do Terreno - MDT através do modelo digital global de elevações (*Global Digital Elevation Model* - GDEM) provido pelo *Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer* -

ASTER. Considerou-se que esse modelo, com uma malha de pontos a cada 30 metros, seria adequado para os estudos de viabilidade.

- Em seguida, com o auxílio de fotos ortorretificadas, foram estabelecidas as restrições, como por exemplo: por onde a ferrovia deveria passar (no caso das alternativas atendendo a determinadas cidades no intermédio), por onde não poderia passar (áreas densamente urbanizadas, áreas de proteção ambiental), rios que exigiriam construções de pontes e estradas que exigiriam cruzamentos em desnível, entre outros.

- As restrições, custos unitários e dados do modelo digital de terreno, assim como os critérios de projeto geométrico foram utilizados para alimentar o programa QUANTM, em conjunto com o software de projeto, AutoCAD Civil 3D. Resumidamente, o programa QUANTM é um software destinado à otimização de traçados, que fornece 25 opções para um determinado cenário, ordenadas pelo custo.

- Finalmente, foi feito o processamento no programa e escolhida a opção de menor custo dentre as 25 possíveis para cada alternativa (nove, no caso do segmento B). As alternativas de traçado para o intermédio ficaram configuradas como na Figura 8.4 e na Figura 8.5 da página a seguir.

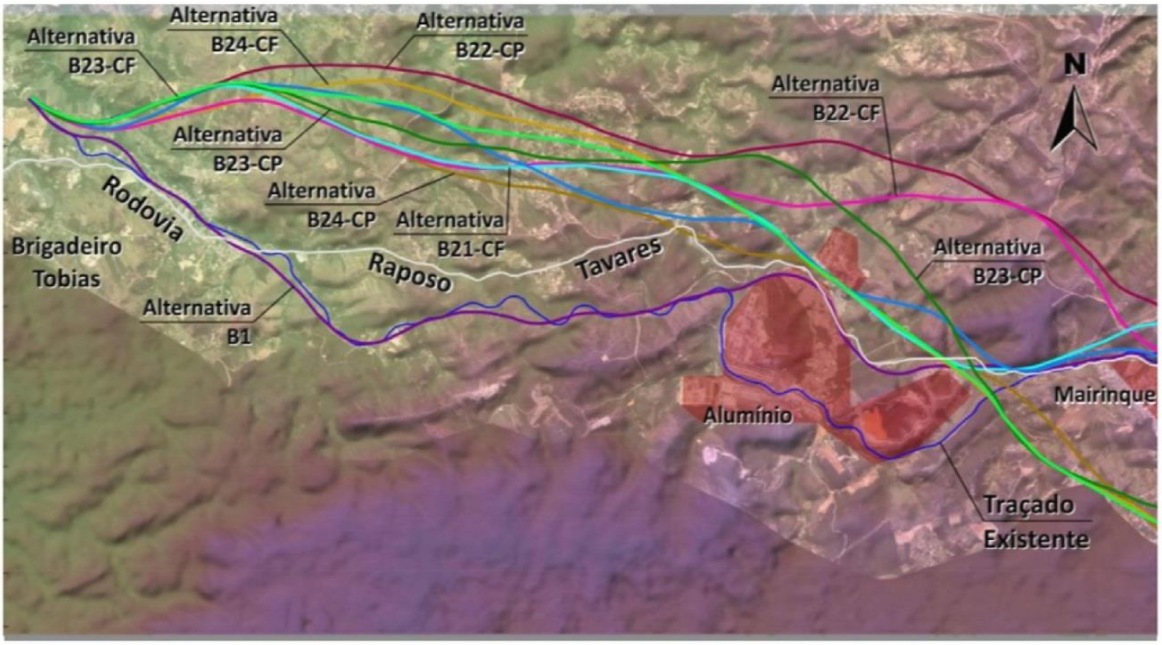


Figura 8.4 – Alternativas de traçado para o segmento B, até Mairinque (CPTM, 2011)

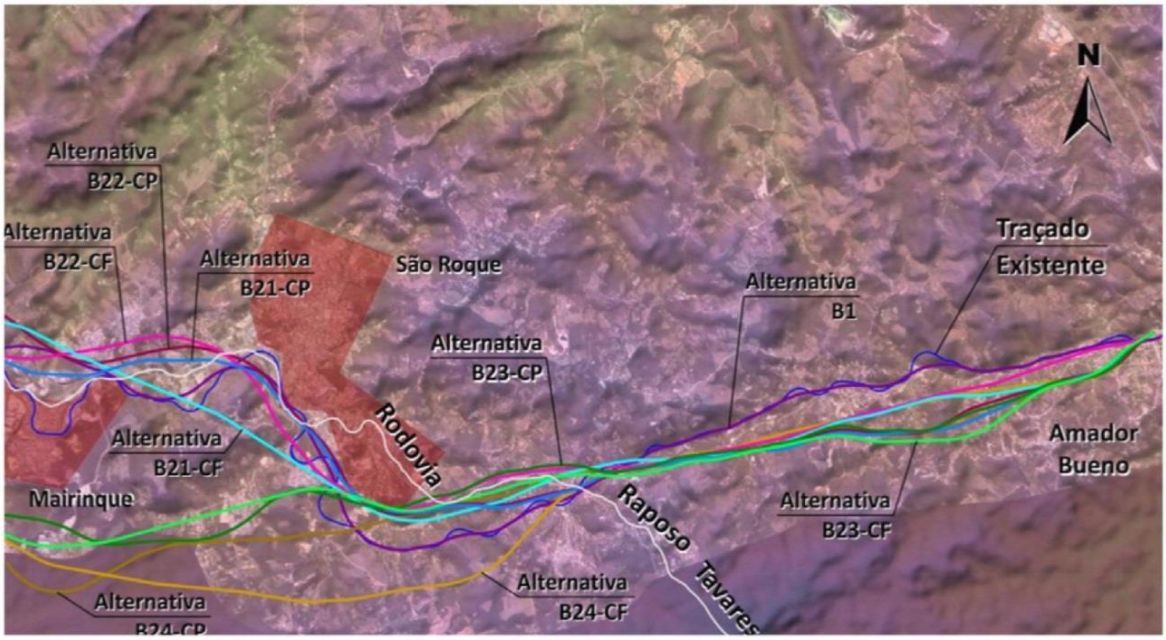


Figura 8.5 - Alternativas de traçado para o segmento B, de Mairinque até Amador Bueno (CPTM, 2011)

8.4 LEVANTAMENTO DE CUSTOS, COMPARAÇÃO E ESCOLHA DE ALTERNATIVAS

Estabelecidas as nove alternativas, foram levantados os quantitativos e os custos em investimento para cada uma, organizados conforme a Tabela 8.4 a seguir.

Tabela 8.4 – Quantitativos e custos de investimento para as alternativas do segmento B (CPTM, 2011)

		Alternativa	**B1**	**B211**	**B212**	**B221**	**B222**	**B231**	**B232**	**B241**	**B242**
		Atendimento	Alumínio, Mairinque, São Roque	Alumínio, Mairinque, São Roque		Mairinque, São Roque		São Roque		Nenhuma	
		Material rodante	Pendular	Caixa fixa	Pendular	Caixa fixa	Pendular	Caixa fixa	Pendular	Caixa fixa	Pendular
Infraestrutura	**Extensão (m)**	*Túnel*	*1.185,0*	*0,0*	*80,0*	*0,0*	*0,0*	*0,0*	*95,0*	*365,0*	*80,0*
		Elevado	*2.940,0*	*7.880,0*	*2.090,0*	*6.410,0*	*2.705,0*	*6.940,0*	*278,0*	*1.120,0*	*1.800,0*
		Desnível (Túnel + Elevado)	4.125,0	7.880,0	2.170,0	6.410,0	2.705,0	6.940,0	373,0	1.485,0	1.880,0
		Corte/aterro	44.095,0	37.620,0	43.630,0	39.390,0	43.315,0	38.760,0	46.187,0	44.615,0	44.420,0
		Total	48.220,0	45.500,0	45.800,0	45.800,0	46.020,0	45.700,0	46.560,0	46.100,0	46.300,0
	Custo (mi R$)		**994,1**	**619,8**	**540,5**	**572,8**	**497,3**	**563,9**	**499,2**	**430,4**	**458,8**
Desapro-priações	**Área desapropriada (m²)**		784.200	790.000	820.700	759.800	726.800	835.000	846.600	827.800	725.800
	Custo (mi R$)		**19,6**	**19,8**	**20,5**	**19,0**	**18,2**	**20,9**	**21,2**	**20,7**	**18,2**
Custo geral, infraestrutura + desapropriações		**(mi R$)**	**1.013,7**	**639,6**	**561,0**	**591,8**	**515,5**	**584,8**	**520,4**	**451,1**	**477,0**
		(mi R$/km)	**21,0**	**14,1**	**12,2**	**12,9**	**11,2**	**12,8**	**11,2**	**9,8**	**10,3**
Diferenças de custo em função do material rodante considerado		**(mi R$)**	-	-78,5		-76,3		-64,4		25,9	
		(%)	-	-12,3%		-12,9%		-11,0%		5,7%	

A análise e comparação dos valores encontrados permite as seguintes observações:

a) Os valores de áreas de desapropriação e consequentemente os custos totais de desapropriação são parecidos para as nove alternativas. O custo médio é de R$ 19,8 milhões, enquanto os valores mínimo e máximo são, respectivamente, de R$ 18,2 e 21,2 milhões. Além disso, esses valores (e suas diferenças) são significativamente pequenos se considerados os custos em infraestrutura, não representando mais que 5% do valor total em investimentos para cada alternativa.

b) Da mesma forma, as extensões apresentam valores parecidos entre si. As oito alternativas do conjunto B2, de novo traçado, apresentam em média 46,0 km, com valores mínimo e máximo de 45,5 e 46,6 km, respectivamente. Por ter um traçado mais sinuoso, por mais que retificado, a extensão da alternativa B1 destoa um pouco desses valores, sendo igual a 48,2 km.

c) O custo total de investimento da alternativa B1 (retificação de traçado), mais de R$ 1,0 bilhão, é significativamente superior ao custo de todas as alternativas restantes. O custo linear, R$ 21,0 milhões/km, é praticamente o dobro em comparação com as alternativas do conjunto de alternativas B2.

A extensão em corte ou aterro é parecida para as nove alternativas, não influindo no custo geral. Enquanto isso, a extensão em elevado da alternativa B1 é menos que 50% da extensão correspondente nas alternativas B211, B221 e B231, como verificado pelo Gráfico 8.1, a seguir.

A extensão em túnel da alternativa B1, entretanto, é bem mais elevada que a das alternativas do grupo B2, de acordo com o Gráfico 8.2. Conforme posto anteriormente, em termos de custo linear a execução de um túnel pesa mais nos custos totais, então a diferença no investimento total pode ser explicada por essa extensão maior de obras em túnel da alternativa B1.

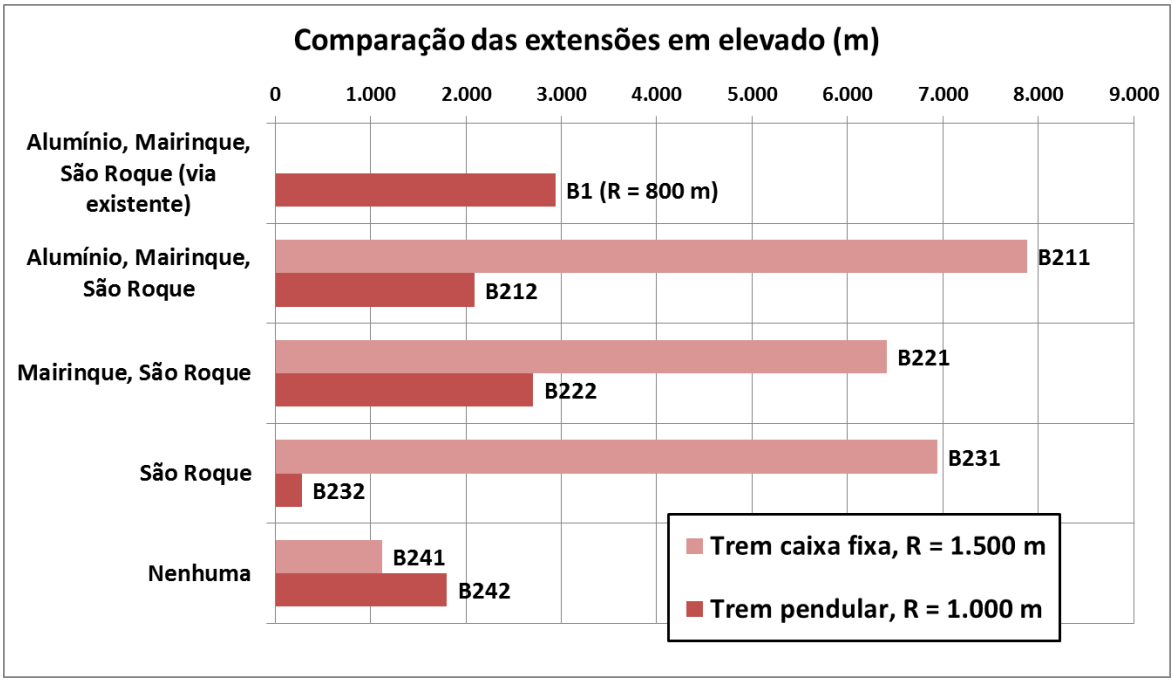


Gráfico 8.1 – Extensões em elevado (ponte ou viaduto) para cada alternativa (CPTM, 2011)

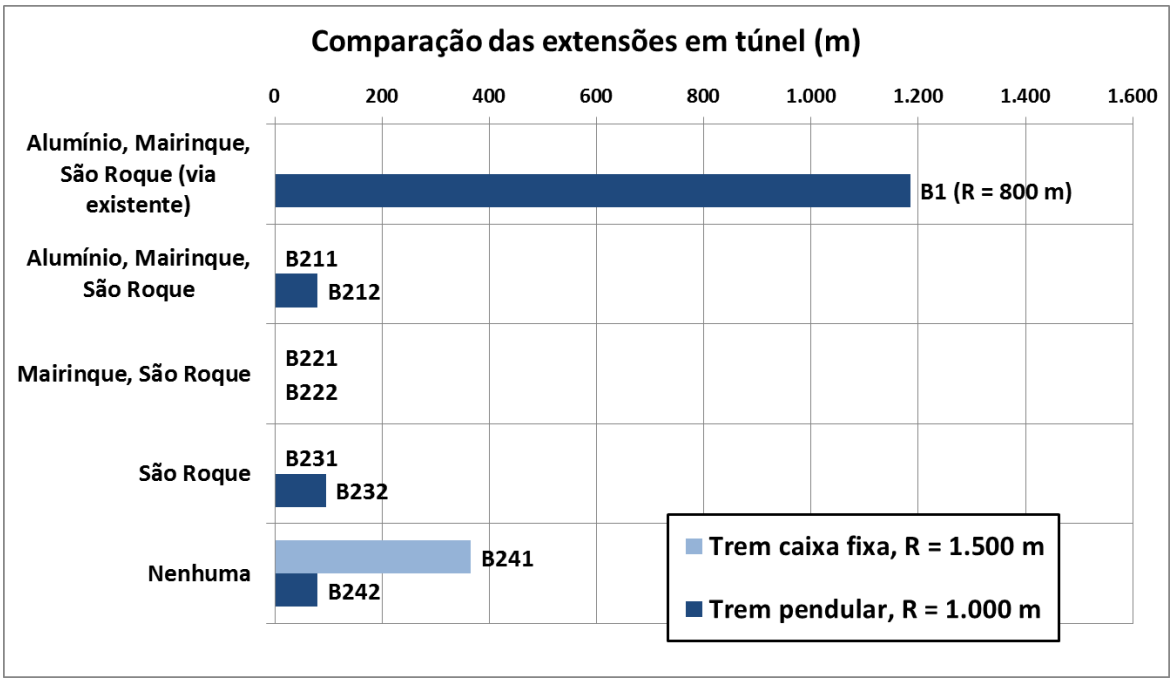


Gráfico 8.2 – Extensões em túnel para cada alternativa (CPTM, 2011)

d) As alternativas do conjunto B2 possuem um custo de investimento crescente conforme maior for o número de cidades atendidas pelo corredor. Isso fica evidente comparando isoladamente os custos das alternativas prevendo trens de caixa fixa (B211, B221, B231 e B241) e prevendo trens pendulares (B212, B222, B232, B242 – com exceção da alternativa B222, que possui um custo um pouco menor que a alternativa B232), como mostra o Gráfico 8.3.

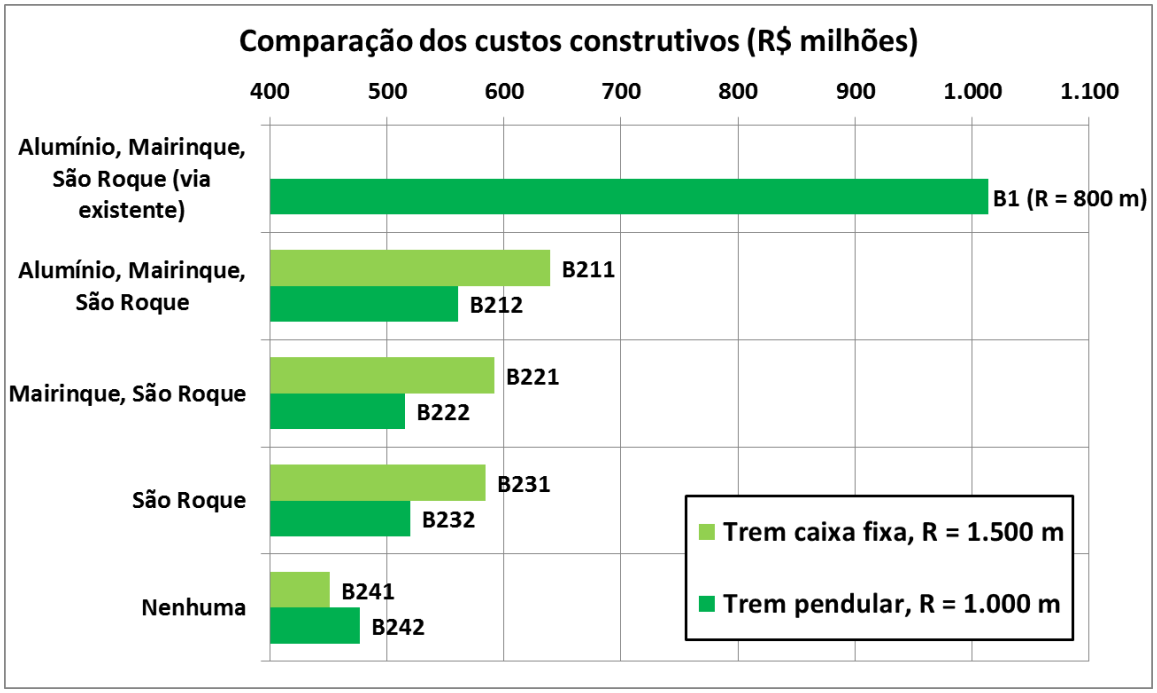


Gráfico 8.3 – Custo total em função do atendimento às cidades (CPTM, 2011)

Conforme avaliado no relatório do projeto funcional, a alternativa B241 desponta inicialmente como a mais atrativa em termos de custo. Porém, levando em conta que o não atendimento a nenhuma das três cidades poderia afetar significativamente a viabilidade do projeto (ao perder-se a demanda das mesmas), as alternativas B231 e B232 se tornaram preferíveis, ao unir um custo menor e atender pelo menos à cidade com maior geração/atração de viagens (São Roque).

e) Para o presente trabalho, é bastante interessante comparar as alternativas constituintes dos pares do conjunto B2 que atendem certo número de cidades (B211 com B212, B221 com B222, B231 com B232 e B241 com B242). Essa comparação mostra as diferenças de custos de execução de obras em função do raio mínimo utilizado, 1.000 m ou 1.500 m.

Conforme indicado na Tabela 8.4 e no Gráfico 8.3, os custos da ferrovia projetada para o trem pendular são em geral menores que os da ferrovia projetada para o trem convencional de caixa fixa. Há a exceção do caso em que não é atendida nenhuma cidade (alternativas B241 e B242), em que a via com menor raio mínimo para o trem pendular é mais cara (5,7% relativamente, o que corresponde a R$ 25,9 milhões). Entretanto, nos outros pares de alternativas, os

custos de implantação das opções levando em conta material rodante de caixa móvel são de 11,0% a 12,3% menores (R$ -64,6 a -78,5 milhões, respectivamente, em valores absolutos) em relação às que levam em conta o uso de trens convencionais.

Sendo as extensões lineares totais das 8 alternativas do conjunto B2 de certa forma equivalentes, assim como as áreas e custos de desapropriação, é relevante comparar as extensões relativas de cada tipo de obra (corte/aterro, elevado e túnel) para cada alternativa, conforme os quatro gráficos a seguir. Isso permitirá inferir quais os fatores que afetam a diferença de custos observada.

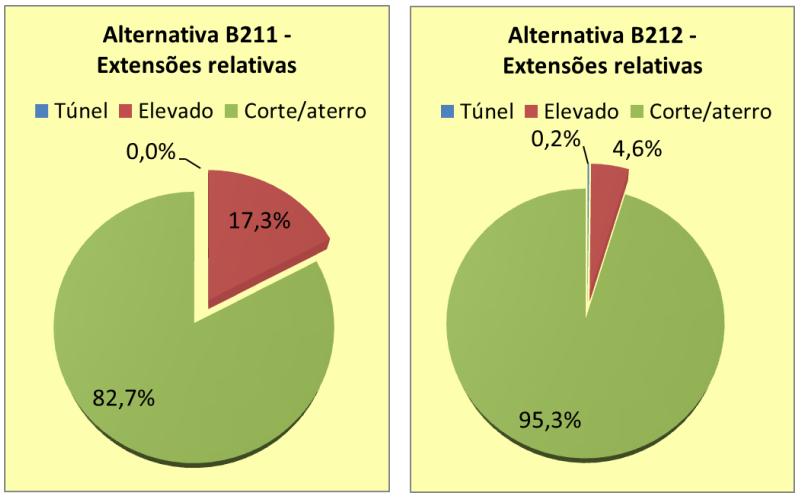


Gráfico 8.4 – Comparação das extensões relativas para cada tipo de obra - Alternativas atendendo a Alumínio, Mairinque e São Roque (CPTM, 2011)

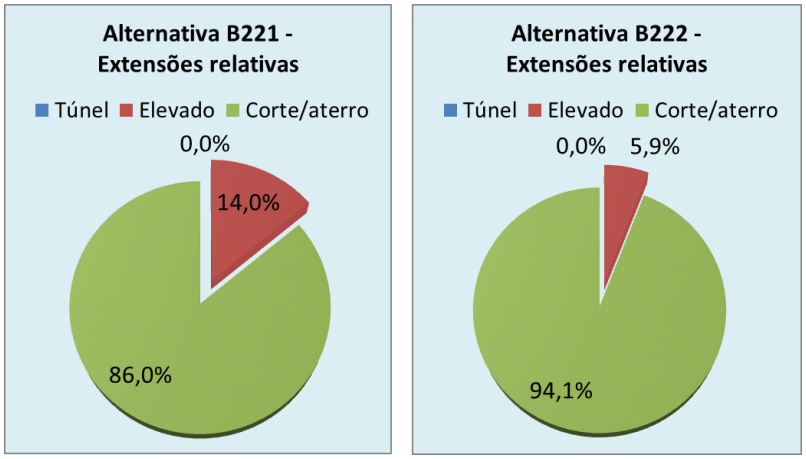


Gráfico 8.5 - Comparação das extensões relativas para cada tipo de obra - Alternativas atendendo a Mairinque e São Roque (CPTM, 2011)

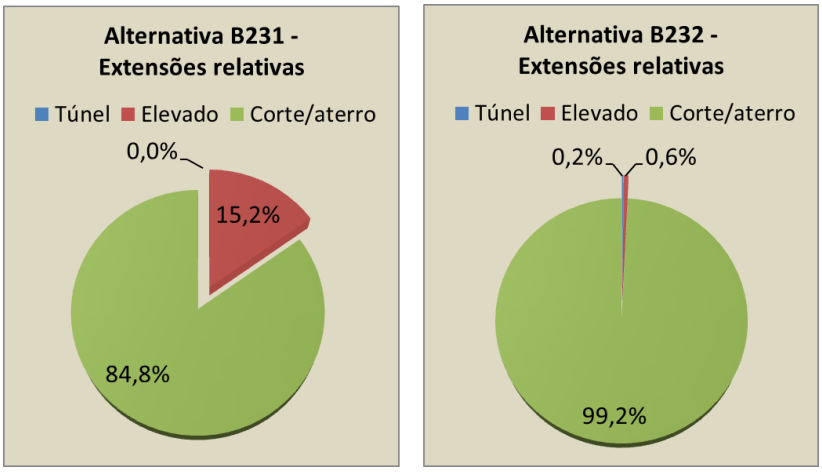


Gráfico 8.6 - Comparação das extensões relativas para cada tipo de obra - Alternativas atendendo apenas a São Roque (CPTM, 2011)

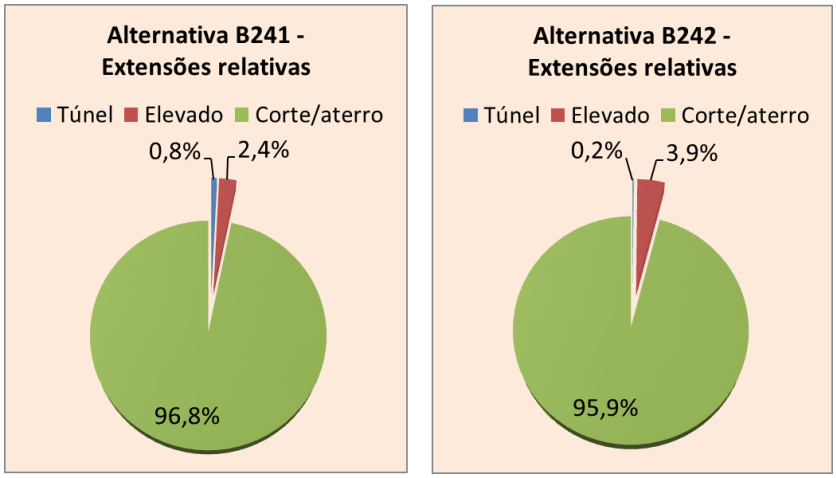


Gráfico 8.7 - Comparação das extensões relativas para cada tipo de obra - Alternativas atendendo a nenhuma das três cidades (CPTM, 2011)

A análise dos gráficos permite entender que, no caso dos três primeiros pares de alternativas, as extensões em elevado são significativamente menores para cada traçado levando em conta o trem pendular. Nessas seis alternativas, as extensões em túnel são pequenas, embora o custo de um túnel, mesmo pequeno, seja encarecido pelo custo dos emboques – ou seja, não é uma relação exatamente linear que possa ser analisada comparando somente as extensões obtidas. Pode-se, de maneira simplificada, atribuir os custos adicionais dos traçados levando em conta o trem convencional a essas extensões de via elevada maiores.

No caso do último par (alternativas B241 e B242), houve o resultado inesperado (do traçado de menor raio mínimo apresentar um custo maior). As

extensões em elevado são maiores na alternativa B242, o que acarreta em custos diretamente também maiores.

Para explicar esse efeito observado, pode-se levantar algumas hipóteses. É possível que a extensão em túnel de 80,0 m na alternativa B242 exigiu mais cortes em rocha, mais caros, que a extensão de mesma natureza, de 365,0 m, da alternativa B241; o efeito supracitado do custo dos emboques pode ter afetado os resultados; os raios menores podem ter passado por regiões que exigissem mais cortes em rocha e/ou mais contenções; entre outras. Vale lembrar que mesmo essas suposições podem ser supérfluas, e que eventualmente a diferença encontrada seja fruto de um efeito localizado (as extensões que causam essas diferenças de custo são pequenas, se comparadas com a extensão total do trecho) que o projeto básico em si, feito por engenheiros e projetistas, poderia superar. O programa QUANTM é apesar de tudo limitado, e pode não ter gerado os resultados realmente ótimos ao se colocar as condições de contorno.

Em suma, as alternativas elaboradas, os custos levantados e as tabelas e gráficos gerados permitem uma série de comparações, indicando principalmente a influência das extensões de elevados e túneis numa infraestrutura. Também fica claro como os critérios de projeto geométrico influenciam, por sua vez, essas extensões – a infraestrutura levando em conta raios menores devido ao uso de trens pendulares gerou economias na maioria dos casos analisados, como era previsto.

Posteriormente à definição das alternativas, foram montadas 9 opções gerais de traçado para todo o trecho analisado (segmentos A, B, C e D). Foram combinadas diversas alternativas relativas a cada segmento nessas opções. Do segmento B, as alternativas utilizadas foram a alternativa B1, com retificações do traçado da ferrovia existente, e as alternativas de novos traçados B231 e B232. As alternativas B231 e B232 são as que atendem à cidade de São Roque (necessidade já esclarecida anteriormente) e cujos alinhamentos levam em conta o material de caixa móvel e de caixa fixa, respectivamente.

O resumo das três alternativas do segmento B selecionas para as 9 opções gerais de traçado é apresentado na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 – Resumo das alternativas do segmento B utilizadas nas 9 opções gerais (CPTM, 2011)

	Alternativa	B1	B231	B232
	Atendimento	Alumínio, Mairinque, São Roque	São Roque	
	Material rodante	Pendular	Caixa fixa	Pendular
Custo geral, infraestrutura + desapropriações	(mi R$)	1.013,7	584,8	520,4
	(mi R$/km)	21,0	12,8	11,2
Diferenças de custo em função do material rodante considerado	(mi R$)	-	-64,4	
	(%)	-	-11,0%	

8.5 SIMULAÇÕES DE MARCHA

Estando definidas as opções gerais de traçado, foram efetuadas diversas simulações de marcha para cada segmento separadamente do corredor estudado. A simulação cinemática de marcha é um processo de cálculo que permite obter o desempenho dos veículos, assim como os tempos de viagem em função de diversos entes.

No caso das simulações de marcha para ferrovias, os seguintes entes foram considerados, assim como seus atributos referentes ao projeto funcional do corredor São Paulo – Sorocaba:

- Características geométricas da linha: alinhamento horizontal (raios de curva, trechos em tangente, curva de transição), alinhamento vertical (curvas verticais, rampas) e superelevação.
- Características do material rodante: trens com caixa móvel ou fixa e motorização, sendo 50 ou 100% dos eixos motorizados. Para os trens de caixa móvel, pode-se atingir a inclinação máxima de 8° adicionais (com o sistema ativo); porém, como antecipado, foi adotada de maneira conservadora uma inclinação máxima adicional de 4° que é típica dos sistemas pendulares passivos.
- Características de desempenho dos trens: taxa de aceleração longitudinal e taxa de frenagem.
- Localização das estações de embarque/desembarque e características operacionais, como tempo de parada nas estações, velocidade inicial, etc.

Com relação às características geométricas da via, foram adotadas algumas simplificações condizentes com o propósito maior dos estudos do projeto funcional, que era determinar o tempo de viagem associado a cada alternativa para cada opção de material rodante e sua respectiva motorização.

As alternativas elaboradas não envolveram a determinação dos comprimentos das curvas de transição. Esses comprimentos são dimensionados na fase de projeto básico e embora sejam determinantes para o conforto do passageiro (especialmente no caso dos trens pendulares) sua influência nos tempos totais de viagem pode ser considerada desprezível.

Da mesma forma, como ressaltado nos critérios de projeto foi considerada uma superelevação D média para todas as curvas ao longo de todo o corredor de 70 mm, independentemente do raio da curva horizontal. Esse valor corresponde a 50% do valor máximo possível (140 mm). Essa simplificação é impactante nas simulações, pois o valor adotado diminui a velocidade máxima que os trens (principalmente os convencionais) poderiam desempenhar nas curvas horizontais, consequentemente afetando os tempos totais de viagem. Como será visto posteriormente na análise do alinhamento horizontal adotado no projeto funcional, muitas das curvas utilizadas no segmento B possuem o raio mínimo de 1.000 m.

A rigor, portanto, deveriam ter sido calculadas as superelevações particulares para cada curva horizontal já para essas simulações de marcha. Porém, há que se considerar que a adoção desse valor parcial pode condizer com a realidade, se por exemplo surgirem outras necessidades operacionais, como o tráfego de trens de carga, que são mais lentos e que provocariam um desgaste maior nos trilhos caso a superelevação aplicada fosse a máxima de 140 mm.

Além disso, como será visto a seguir, para a combinação de velocidade máxima (140 km/h) e raio mínimo (1.000 m) adotados no segmento B a superelevação máxima de 140 mm poderia ser considerada um exagero desnecessário, dependendo das velocidades médias desempenhadas pelas combinações de material rodante e motorização e da diferença entre os tempos de viagem gerados por elas. O uso da superelevação máxima de 140 mm será considerado relevante, todavia, no Estudo de Caso 1. Nesse estudo o objetivo será o incremento das velocidades máximas para

além de 140 km/h, possibilitando também o aumento das velocidades médias e assim reduzindo os tempos totais de viagem.

8.5.1 Motorização e resistências consideradas

As velocidades que os trens conseguem desempenhar ao longo do traçado dependem de fatores que devem ser considerados na simulação de marcha. O primeiro deles, conforme já estabelecido, é o nível de motorização de 50 ou 100% no caso em estudo.

A motorização também depende do tipo de propulsão: diesel ou elétrica (por meio de alimentação externa). Por possibilitar velocidades maiores, foi escolhida para o projeto funcional a alimentação elétrica externa por catenária para as simulações, em detrimento da propulsão por diesel. A via eletrificada representa um investimento maior em termos de obra (adicionando custos com os postes, a catenária, subestações, entre outros), porém além de permitir velocidades mais elevadas, também é uma opção mais sustentável que o uso de combustíveis fósseis, sendo mais eficiente energeticamente.

Para a aceleração inicial foi considerado o valor de até 1,1 m/s^2, enquanto que para o esforço de frenagem considerou-se o valor de desaceleração de 1,0 m/s^2. Como velocidade inicial para o segmento B, considerou-se o valor de 70 km/h (dado que as simulações foram feitas separadamente para cada segmento, foi necessário adotar um valor para a velocidade inicial).

Em função das rampas e da motorização, as velocidades possíveis de serem atingidas podem ser traduzidas por uma curva de motorização como a apresentada no Gráfico 8.8 e que foi também utilizada nas simulações de marcha. Na curva de motorização, o eixo das ordenadas mostra o esforço trator e as resistências envolvidas em função da velocidade.

A curva de motorização é deduzida a partir da fórmula prática de Davis na simulação cinemática de marcha. Pode-se extrair dela que a velocidade máxima dos trens numa rampa de 8% por exemplo seria de em torno de 90 km/h. Tome-se para o projeto funcional a velocidade máxima considerada de 140 km/h, conjugada com a rampa máxima considerada de 2,0%; pode-se verificar que a força de tração é suficientemente maior que a resistência envolvida.

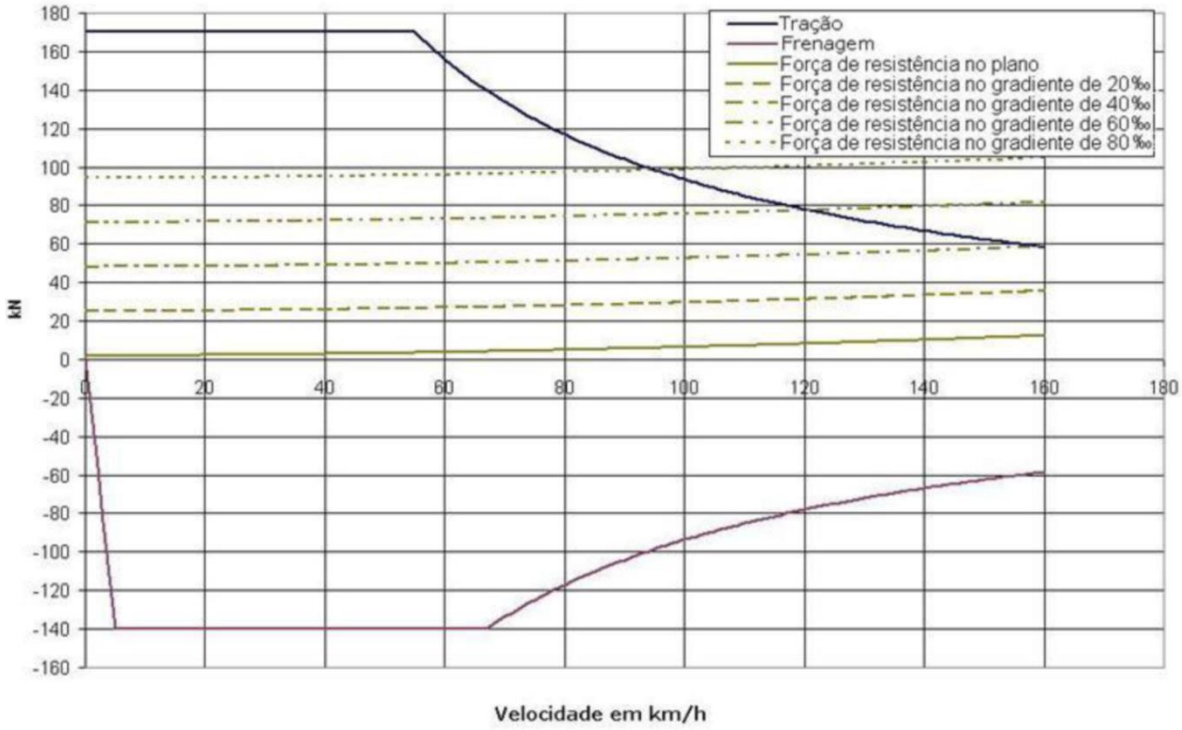


Gráfico 8.8 – Curva de motorização adotada nas simulações de marcha (SIEMENS, 2011)

Nas simulações de marcha foi considerado também o efeito da resistência provocada pelas curvas horizontais. Esse efeito é traduzido pela fórmula empírica de Stevenson (Equação 8.1):

$$R'_c = \frac{500 \cdot b}{R}$$

Equação 8.1 – Resistência devido à curva horizontal

Onde:

- R'_c: Taxa de resistência de curva, em kgf de resistência ao movimento por tf de carga dos trens;
- b: Bitola, em m;
- R: Raio da curva, em m.

Sendo o peso total levando em conta tara e passageiros de um comboio com 4 carros considerado igual a 202 tf, para o raio mínimo de 1.000 m (caso crítico da alternativa B232) e usando a Equação 8.1, a resistência devida às curvas horizontais chega a 1,45 kN. O valor é relativamente pequeno se comparado com as outras resistências envolvidas.

8.5.2 Simulações de marcha efetuadas

Para o segmento B estudado, foram feitas simulações de marcha sobre os traçados como descrito a seguir.

- O traçado da linha férrea existente foi considerado como uma alternativa adicional B0. Foi considerado o traçado sem qualquer retificação, presumindo somente uma reconstrução da superestrutura. As simulações sobre essa alternativa de traçado foram consideradas como referência para as simulações sobre os outros traçados.

- Foi considerada a alternativa B1 com o traçado retificado conforme descrito anteriormente.

- Foram utilizadas as alternativas B231 e B232, com traçados novos, que atendiam à cidade de São Roque no intermédio. Também como descrito anteriormente, a alternativa B231 prevê raios maiores, de 1.500 m, designados para a operação dos trens convencionais, enquanto a alternativa B232 prevê raios menores, de 1.000 m, designados para a operação dos trens pendulares.

Não foram feitas simulações sobre as alternativas restantes de novo traçado do grupo B2. Para cálculo dos tempos totais de viagem dessas alternativas, considerou-se a mesma velocidade média que a encontrada nas simulações sobre os traçados das alternativas B231 e B232. Vale lembrar que as opções gerais de traçado montadas já descartavam essas outras alternativas, devido a uma escolha envolvendo atendimento de pelo menos uma cidade no intermédio (São Roque) e investimentos menores em obras civis.

Sobre cada alternativa considerada foram feitas quatro simulações de marcha, em função das combinações de motorização (50% ou 100%) e do tipo de material rodante, com caixa fixa ou caixa móvel. É interessante notar que as duas opções de operação foram simuladas sobre as alternativas. Por exemplo, para a alternativa B232, com raios mínimos menores, de 1.000 m, designado inicialmente para a circulação de trens pendulares, foi simulada a operação destes, mas também foi feita a simulação empregando trens convencionais.

Os resultados das simulações de marcha (velocidades médias e tempos totais de viagem) são apresentados na Tabela 8.6, a seguir.

Tabela 8.6 – Resultados das simulações de marcha efetuadas (CPTM, 2011)

			Tempo total de viagem (min)			Velocidade média (km/h)		
Alter-nativa	Extensão (km)	Motori-zação	Trem de caixa fixa	Trem pendular	Redução de tempo com o uso do trem pendular	Trem de caixa fixa	Trem pendular	Aumento de velocidade com o uso do trem pendular
B0	51,2	50%	44,4	40,0	-4,4 min (-9,9%)	69,2	76,8	+7,6 km/h (+11,0%)
		100%	43,2	39,0	-4,2 min (-9,8%)	71,1	78,9	+7,8 km/h (+11,0%)
B1	48,2	50%	23,5	22,4	-1,1 min (-4,7%)	122,9	129,0	+6,1 km/h (+5,0%)
		100%	23,8	21,6	-2,2 min (-9,1%)	121,6	133,9	+12,3 km/h (+10,1%)
B231	45,7	50%	20,2	20,2	-0,0 min (-0,0%)	136,0	136,0	+0,0 km/h (+0,0%)
		100%	20,0	20,0	-0,0 min (-0,0%)	137,0	137,2	+0,2 km/h (+0,1%)
B232	46,6	50%	21,4	20,4	-1,1 min (-5,1%)	130,4	137,0	+6,6 km/h (+5,1%)
		100%	21,1	20,3	-0,7 min (-3,5%)	132,7	138,0	+5,3 km/h (+4,0%)

Os valores encontrados permitem tirar algumas conclusões. Primeiramente, pode-se verificar que o aumento no nível de motorização proporciona pouco aumento na velocidade média e redução muito pequena no tempo total de viagem. A máxima redução relativa do tempo de viagem é de 3,64%, aumentando-se a motorização de 50% para 100% no caso do trem pendular utilizado na alternativa B1, o que corresponde a um aumento de velocidade de ordem parecida, 3,80%.

O uso do material rodante de caixa móvel permite reduções pequenas de tempo de viagem em relação aos trens de caixa fixa para cada caso analisado. O maior ganho é verificado no caso da alternativa B0 com 50% de motorização: são 4,4 minutos a menos no tempo de viagem total, o que corresponde a uma redução relativa de 9,9%. A velocidade média, por sua vez, aumentou em 7,6 km/h, de 69,2 para 76,8 km/h.

É constatado nos relatórios, como era de se esperar, que as diferenças de tempos de viagem e velocidades médias nas simulações devido ao uso de trens

pendulares são tão maiores quanto piores forem as condições geométricas dos traçados considerados. Por isso mesmo, a alternativa B0 (da linha férrea existente, que possui os menores raios) apresenta as maiores diferenças, enquanto que para a alternativa B231 (com raios da ordem de 1.500 m) essas diferenças são pouco significativas.

As diferenças de tempos de viagem encontradas são a principal motivação para a utilização ou não do material rodante pendular. Historicamente, conforme visto no Capítulo 3, os trens pendulares foram usados em traçados muitas vezes parecidos com o traçado B0 da linha férrea existente.

Para o projeto funcional do corredor São Paulo – Sorocaba, a CPTM acabou por optar pelo traçado B232 para o intermédio (segmento B) pelos motivos explicados anteriormente (alternativa de menor custo, atendimento a pelo menos uma cidade, entre outros) e pelos resultados provenientes das simulações de marcha.

Foi determinado também que o material rodante seria o convencional, pois os ganhos em velocidade e tempo de viagem foram considerados pequenos com a aplicação dos trens pendulares. Para a alternativa B232, considerando 50% de motorização por exemplo, o tempo de viagem reduziu-se de 21,4 para 20,3 minutos (-1,1 minuto ou -5,1% relativamente) enquanto a velocidade aumentou de 130,4 para 137,0 km/h (+6,6 km/h ou +5,1% relativamente) mediante a operação do material rodante de caixa móvel.

Uma análise mais profunda pode ser feita a partir dos diagramas de simulação de marcha. As quatro simulações sobre a alternativa de traçado B231, de raio mínimo maior (1.500 m) apresentaram feições bastante parecidas: os trens conseguem desempenhar a velocidade máxima de 140 km/h em grande parte do trecho em todos os casos. Apenas há pequenas diferenças no início do trecho, pois a aceleração depende do nível de motorização.

Quanto à alternativa B232, escolhida para o segmento, as simulações de marcha mostram diferenças visíveis. As duas simulações sobre essa alternativa para o nível de motorização de 50% são aqui apresentadas (Gráfico 8.9 e Gráfico 8.10).

Alternativa B232 com tecnologia Caixa Fixa e motorização de 50%

Extensão:	46.560	m
Tempo	1285,51	s
Vel. Média:	130,4	km/h

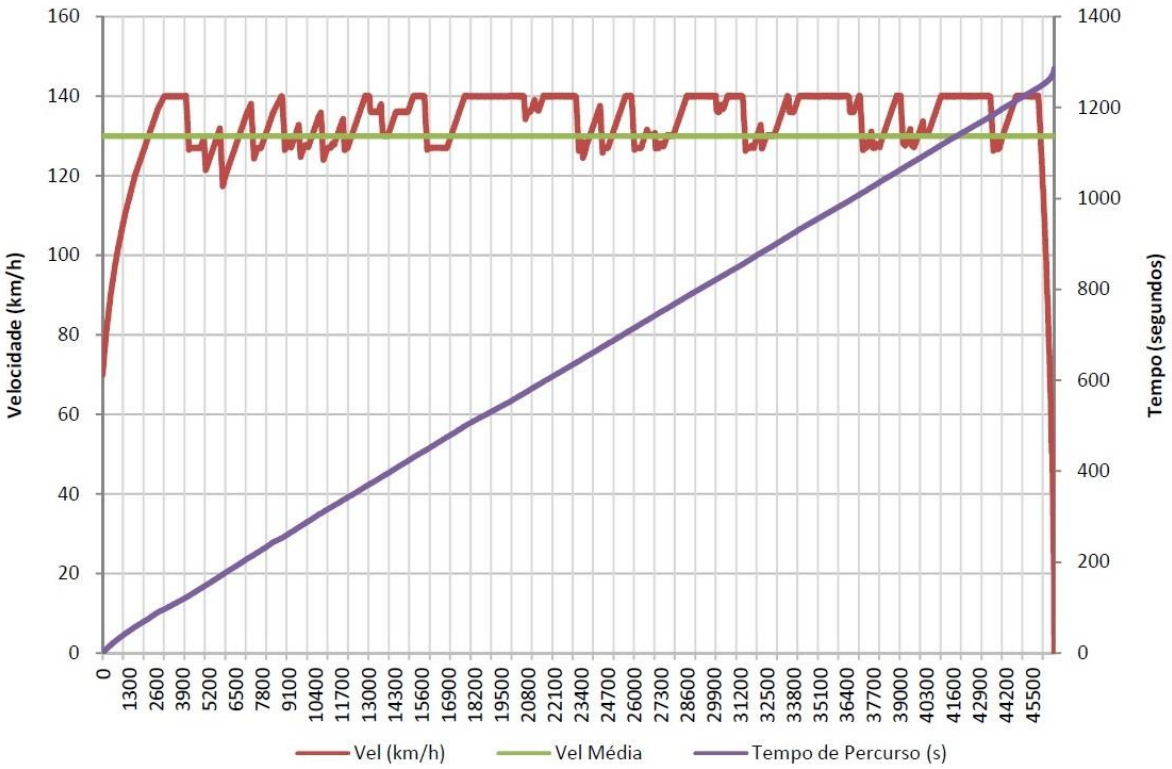


Gráfico 8.9 – Simulação de marcha – Alternativa B232, caixa fixa, 50% de motorização (CPTM, 2011)

Pode-se perceber conforme mostra o gráfico que a velocidade máxima de 140 km/h em muitos pontos não é alcançada, variando entre os 125 e os 140 km/h aproximadamente. A partir da Equação 4.9, é possível determinar a velocidade máxima que pode ser praticada numa dada curva, estando todos os outros fatores determinados, através da Equação 8.2:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{(I + D) \cdot R}{C}}$$

Equação 8.2 – Velocidade que pode ser praticada numa curva (CEN, 2010)

Onde:

- V_{max}: Velocidade máxima permitida na curva, em km/h;
- I: Insuficiência de superelevação praticada, em mm;

- D: Superelevação aplicada, em mm;
- R: Raio da curva horizontal, em m;
- C: Fator de conversão de unidades, igual a 11,8 mm.m.h²/km².

Nas simulações, para a aceleração lateral máxima não compensada foi adotado o valor de 0,65 m/s², correspondente ao limite estipulado pela CPTM em via corrida sem interferências (CPTM, 2007). A este valor corresponde uma insuficiência de superelevação I de 100 mm, aproximadamente. Quanto ao raio de curva mínimo, para a alternativa em questão ele é de 1.000 m.

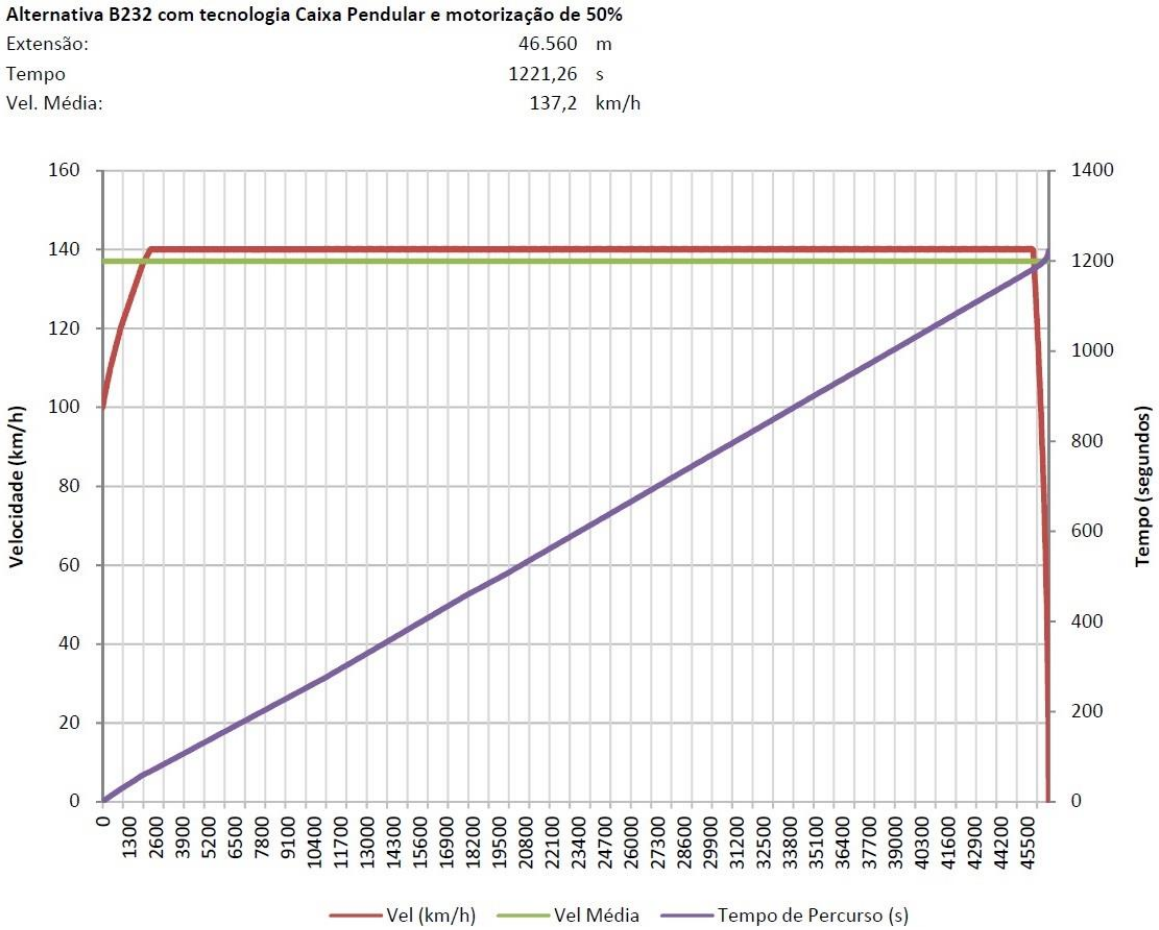


Gráfico 8.10 - Simulação de marcha – Alternativa B232, caixa pendular, 50% de motorização (CPTM, 2011)[8]

Usando o valor de superelevação adotado de 70 mm, a Equação 8.2 retorna um valor de velocidade máxima de 120,0 km/h. Caso tivesse sido utilizado o valor

[8] Aparentemente houve um erro nessa simulação, ao considerar-se a velocidade inicial como 100 km/h, quando esta deveria ser 70 km/h. A diferença devida a esse erro no tempo total de viagem e na velocidade média é, entretanto, pouco significativa.

máximo de superelevação de 140 mm, a mesma equação retornaria uma velocidade máxima admissível de 142,6 km/h.

Ou seja, pode-se conjecturar que a velocidade nessa simulação está limitada pela superelevação adotada. Com a superelevação máxima, o diagrama talvez apresentasse resultados parecidos com os das outras simulações, como a mostrada no Gráfico 8.10: o trem percorreria grande parte do trecho na velocidade máxima, sem as variações mostradas ao longo do Gráfico 8.9. Assim sendo, conclui-se que após efetivamente dimensionadas as superelevações, as diferenças em tempos de viagem e velocidades devido à aplicação do material rodante pendular ou de caixa fixa seriam ainda menores que as verificadas para a alternativa B232. Provavelmente essas diferenças seriam pouco significativas ou mesmo nulas, tal qual se verifica na alternativa B231 com raios maiores (1.500 m).

A proposta do estudo de caso seguinte, que é do incremento de velocidades para além do limite de 140 km/h estipulado para o intermédio, deverá verificar a efetividade de reduções de tempo de viagem e aumento de velocidades de uma maneira parecida. Para isso, serão adotados valores de superelevação dimensionados em função do traçado e dos critérios de projeto (como num projeto básico) de modo a encontrar resultados suficientemente precisos para que seja feita a verificação de uma possível melhora dos tempos de viagem.

8.6 PROJETO GEOMÉTRICO FUNCIONAL

O projeto funcional do trem São Paulo-Sorocaba envolveu, primeiramente, uma escolha entre alternativas de traçado, material rodante, entre outros fatores.

Como já descrito, para o segmento B (intermédio) optou-se pela alternativa B232, que envolvia um novo traçado atendendo à cidade de São Roque e possuía raios mínimos da ordem de 1.000 m. Mediante a análise das simulações de marcha optou-se pelo uso de trens convencionais (de caixa fixa), pois foi considerado que os ganhos em velocidade e tempo de viagem nesse mesmo traçado com o emprego de trens pendulares eram pouco significativos.

A seguir é apresentado o alinhamento horizontal utilizado no projeto funcional para o intermédio (segmento B), conforme a Tabela 8.7.

Tabela 8.7 – Alinhamento horizontal do intermédio (segmento B) - Projeto geométrico funcional (PLANSERVI, 2012)

Elemento	Nº da curva	Est. Início	Est. Final	Desenvol-vimento L (m)	Raio R (m)	Direção da curva	Ângulo central AC (°)
Tangente		24+800,000	24+931,685	131,7			
Curva circular	1	24+931,685	25+285,667	354,0	400	Esquerda	50,7
Tangente		25+285,667	25+334,264	48,6			
Curva circular	2	25+334,264	25+708,706	374,4	400	Direita	53,6
Tangente		25+708,706	26+443,085	734,4			
Curva circular	3	26+443,085	26+619,086	176,0	1.000	Direita	10,1
Tangente		26+619,086	26+879,529	260,4			
Curva circular	4	26+879,529	27+396,497	517,0	1.500	Esquerda	19,7
Tangente		27+396,497	27+724,216	327,7			
Curva circular	5	27+724,216	27+819,543	95,3	1.000	Direita	5,5
Tangente		27+819,543	28+302,336	482,8			
Curva circular	6	28+302,336	28+583,489	281,2	1.000	Esquerda	16,1
Tangente		28+583,489	28+727,829	144,3			
Curva circular	7	28+727,829	29+371,908	644,1	1.000	Direita	36,9
Tangente		29+371,908	30+226,096	854,2			
Curva circular	8	30+226,096	30+419,230	193,1	1.000	Direita	11,1
Tangente		30+419,230	30+688,773	269,5			
Curva circular	9	30+688,773	31+484,399	795,6	1.000	Esquerda	45,6
Tangente		31+484,399	32+184,410	700,0			
Curva circular	10	32+184,410	32+979,974	795,6	1.000	Direita	45,6
Tangente		32+979,974	33+434,796	454,8			
Curva circular	11	33+434,796	33+956,476	521,7	1.000	Esquerda	29,9
Tangente		33+956,476	34+235,635	279,2			
Curva circular	12	34+235,635	34+479,193	243,6	1.000	Esquerda	14,0
Tangente		34+479,193	34+803,956	324,8			
Curva circular	13	34+803,956	35+329,023	525,1	1.000	Direita	30,1
Tangente		35+329,023	35+783,788	454,8			
Curva circular	14	35+783,788	35+970,338	186,6	2.000	Esquerda	5,3
Tangente		35+970,338	36+724,364	754,0			
Curva circular	15	36+724,364	36+942,056	217,7	1.000	Esquerda	12,5
Tangente		36+942,056	37+185,144	243,1			
Curva circular	16	37+185,144	37+779,692	594,5	1.000	Direita	34,1
Tangente		37+779,692	38+344,510	564,8			
Curva circular	17	38+344,510	38+801,561	457,1	1.000	Direita	26,2
Tangente		38+801,561	38+986,675	185,1			
Curva circular	18	38+986,675	39+584,886	598,2	1.000	Esquerda	34,3
Tangente		39+584,886	40+253,587	668,7			
Curva circular	19	40+253,587	40+521,438	267,9	1.000	Direita	15,3
Tangente		40+521,438	41+038,166	516,7			
Curva circular	20	41+038,166	41+835,373	797,2	1.000	Esquerda	45,7
Tangente		41+835,373	42+868,725	1033,4			
Curva circular	21	42+868,725	43+368,660	499,9	1.000	Esquerda	28,6
Tangente		43+368,660	43+564,152	195,5			
Curva circular	22	43+564,152	43+774,663	210,5	1.000	Direita	12,1
Tangente		43+774,663	44+339,536	564,9			

Elemento	Nº da curva	Est. Início	Est. Final	Desenvol-vimento L (m)	Raio R (m)	Direção da curva	Ângulo central AC (°)
Curva circular	23	44+339,536	45+199,416	859,9	1.000	Direita	49,3
Tangente		45+199,416	46+421,009	1221,6			
Curva circular	24	46+421,009	46+720,065	299,1	1.000	Esquerda	17,1
Tangente		46+720,065	47+054,865	334,8			
Curva circular	25	47+054,865	47+556,110	501,2	1.000	Direita	28,7
Tangente		47+556,110	47+906,592	350,5			
Curva circular	26	47+906,592	48+639,293	732,7	1.000	Direita	42,0
Tangente		48+639,293	48+922,675	283,4			
Curva circular	27	48+922,675	49+990,536	1067,9	1.000	Esquerda	61,2
Tangente		49+990,536	50+285,708	295,2			
Curva circular	28	50+285,708	51+159,737	874,0	1.000	Direita	50,1
Tangente		51+159,737	52+599,179	1439,4			
Curva circular	29	52+599,179	53+130,979	531,8	1.000	Direita	30,5
Tangente		53+130,979	53+347,996	217,0			
Curva circular	30	53+347,996	54+226,303	878,3	1.000	Esquerda	50,3
Tangente		54+226,303	54+846,026	619,7			
Curva circular	31	54+846,026	55+387,602	541,6	1.000	Direita	31,0
Tangente		55+387,602	55+781,872	394,3			
Curva circular	32	55+781,872	56+650,527	868,7	1.000	Esquerda	49,8
Tangente		56+650,527	57+277,294	626,8			
Curva circular	33	57+277,294	57+974,606	697,3	1.000	Direita	40,0
Tangente		57+974,606	58+224,546	249,9			
Curva circular	34	58+224,546	59+186,138	961,6	1.000	Esquerda	55,1
Tangente		59+186,138	59+525,733	339,6			
Curva circular	35	59+525,733	59+843,489	317,8	1.000	Direita	18,2
Tangente		59+843,489	60+282,878	439,4			
Curva circular	36	60+282,878	61+000,738	717,9	1.000	Esquerda	41,1
Tangente		61+000,738	61+979,489	978,8			
Curva circular	37	61+979,489	62+650,367	670,9	1.000	Direita	38,4
Tangente		62+650,367	63+611,926	961,6			
Curva circular	38	63+611,926	64+221,603	609,7	2.000	Direita	17,5
Tangente		64+221,603	64+631,136	409,5			
Curva circular	39	64+631,136	64+790,410	159,3	1.000	Esquerda	9,1
Tangente		64+790,410	65+161,176	370,8			
Curva circular	40	65+161,176	65+548,816	387,6	1.000	Direita	22,2
Tangente		65+548,816	65+798,707	249,9			
Curva circular	41	65+798,707	66+511,440	712,7	1.000	Esquerda	40,8
Tangente		66+511,440	67+535,685	1024,2			
Curva circular	42	67+535,685	67+698,275	162,6	1.000	Direita	9,3
Tangente		67+698,275	68+567,121	868,8			
Curva circular	43	68+567,121	69+120,947	553,8	1.000	Esquerda	31,7
Tangente		69+120,947	71+397,113	2276,2			
Curva circular	44	71+397,113	71+874,348	477,2	600	Direita	45,6
Tangente		71+874,348	72+200,000	325,7			

8.6.1 Análise do traçado geométrico

Dada a natureza do presente trabalho, faz-se útil analisar o traçado geométrico do intermédio, que é o principal objeto deste estudo de caso e servirá como base para o Estudo de Caso 1. A análise se dará principalmente quanto às extensões de tangentes e curvas horizontais e aos raios utilizados.

O estaqueamento adotado parte de São Paulo, indo na direção de Sorocaba. O trecho analisado possui 44 curvas circulares, sendo que apenas três possuem raio menor que 1.000 m. Destas, duas são justamente as primeiras do traçado, mais próximas a São Paulo, enquanto a terceira é justamente a última, mais próxima a Sorocaba. Ou seja, as curvas de raio menor ou igual a 1.000 m estão ou no início ou no final do intermédio. Nas simulações de marcha, admitiu-se que o trem teria a velocidade inicial de 70 km/h no intermédio e pararia ao final do trecho na estação prevista, de nome Brigadeiro Tobias. Assim, estes são subtrechos em que o trem pode estar numa velocidade consideravelmente menor que a máxima.

Apenas três curvas apresentam raio maior que 1.000 m, sendo elas a curva de número 4 (raio de 1.500 m) e as curvas de números 14 e 38 (raios de 2.000 m). Todas as outras curvas apresentam o raio de 1.000 m, considerado como raio mínimo de projeto do traçado – 38 curvas do total de 44 possuem esse raio.

As curvas de raio menor que 1.000 m representam casos particulares onde o trem possivelmente trafegará a velocidades menores (por estar acelerando ou desacelerando) e as curvas de raio maior representam uma situação mais indiferente ao emprego ou não dos trens pendulares. Logo, o presente trabalho se concentrará na situação típica, do raio mínimo de 1.000 m, que é empregado na grande maioria das curvas.

O trecho efetivamente projetado do intermédio que será analisado possui uma extensão de 47,4 km. É interessante enxergar que este trecho é ligeiramente mais extenso que as alternativas B231 e B232, analisadas por meio de simulações de marcha no projeto funcional, com suas respectivas extensões de 45,7 e 46,6 km.

Da extensão total do intermédio, em torno de 24,5 km em desenvolvimento (51,6%) são de via em tangente, enquanto em torno de 22,9 km (48,4%) são de via em curva circular – lembrando que trata-se de um alinhamento de projeto funcional,

sem estarem inseridas as curvas de transição que alterariam esta distribuição. Mesmo assim, essa divisão revela muito sobre o traçado e o próprio terreno em que se situa. Um terreno considerado de topografia montanhosa talvez tivesse uma porcentagem substancialmente maior de trechos em curva, enquanto um terreno considerado de topografia plana provavelmente apresentaria uma porcentagem maior de trechos em tangente. Sem uma análise pormenorizada, mas ainda assim com cautela, o próprio traçado poderia resultar na classificação da topografia do terreno deste intermédio como medianamente ondulado.

Para melhor visualizar as curvas do traçado, o Gráfico 8.11, com os desenvolvimentos das curvas horizontais dispostos em ordem decrescente (semelhante a um histograma) é apresentado.

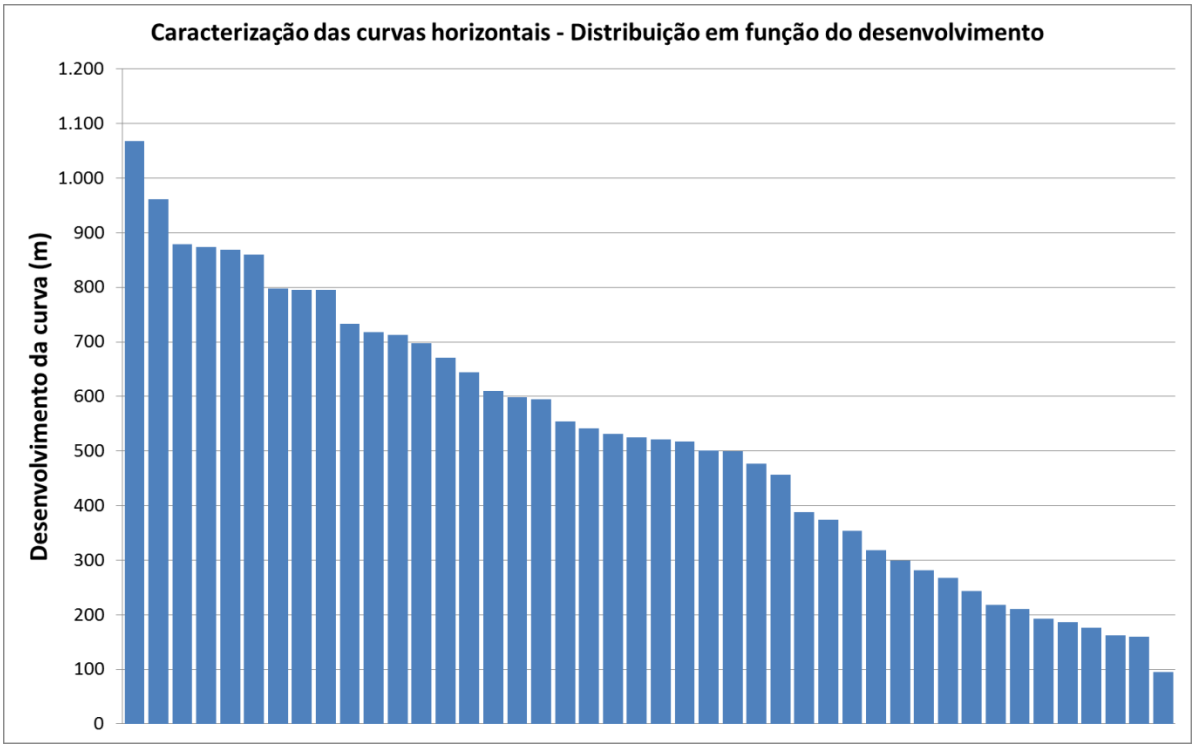


Gráfico 8.11 – Desenvolvimento das curvas horizontais ao longo do intermédio

Esses valores serão relevantes posteriormente, no Estudo de Caso 1, para o dimensionamento das curvas de transição. O Gráfico 8.12 complementar, mostrado a seguir, apresenta as extensões de todos os elementos (tangentes e curvas) na ordem do estaqueamento, representando ainda mais claramente o traçado. Este gráfico será ferramenta útil para estudar os comprimentos disponíveis para inserção das curvas de transição.

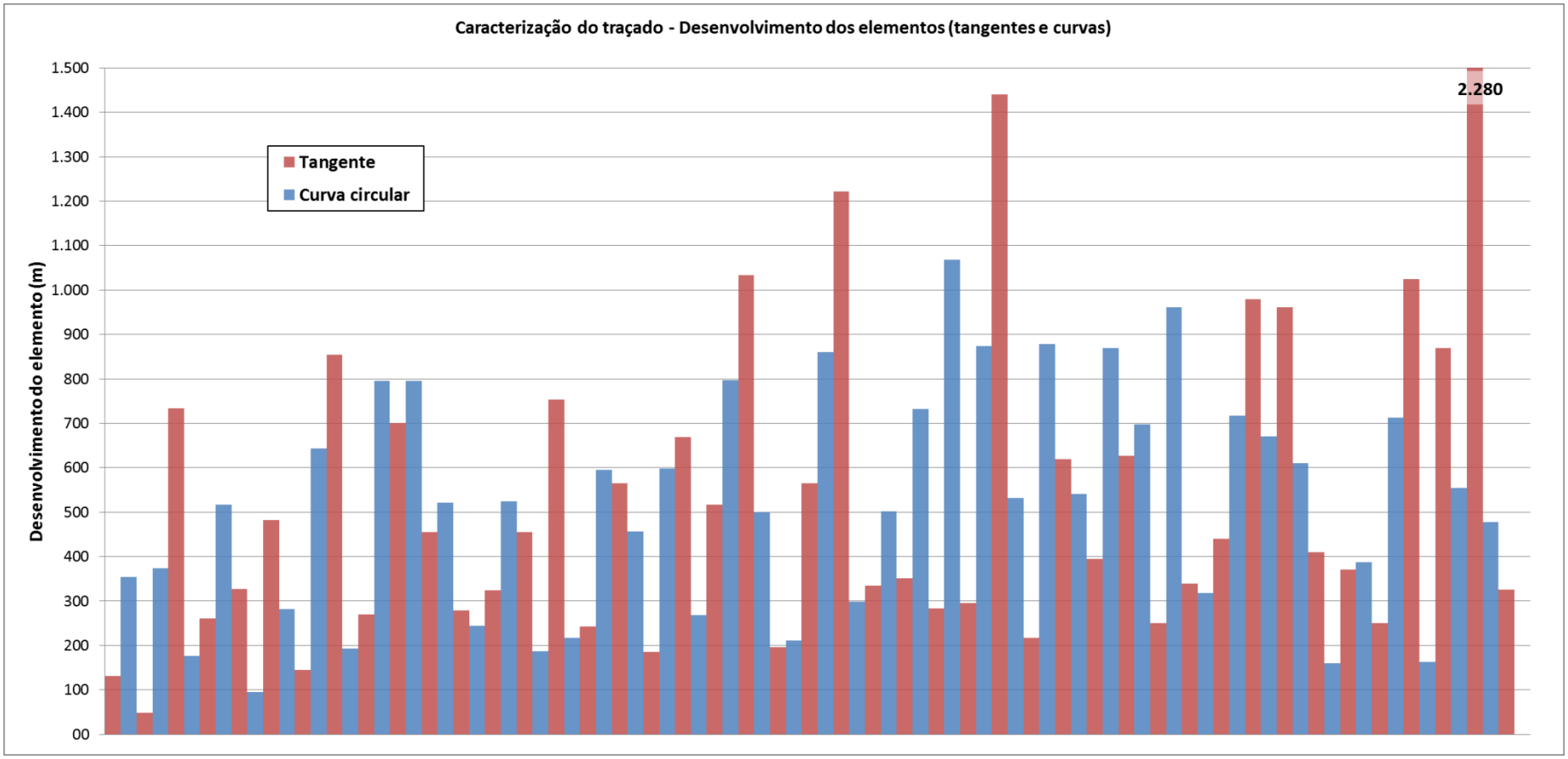


Gráfico 8.12 – Desenvolvimento dos elementos do traçado – Tangentes e curvas (PLANSERVI, 2012)

9. ESTUDO DE CASO 1 – INCREMENTO DE VELOCIDADES NO CORREDOR SÃO PAULO - SOROCABA

O Estudo de Caso Preliminar do Capítulo 8 concentrou-se na análise do projeto funcional da ferrovia São Paulo – Sorocaba, que estudou alternativas de traçado de menor e maior raio e cogitou o uso do material rodante de caixa móvel ao invés dos trens convencionais. A análise dos estudos realizados permitiu algumas discussões e conclusões no que concerne a tecnologia dos trens pendulares e sua influência na implantação e operação da nova ferrovia.

O Estudo de Caso 1 será uma continuação do Estudo de Caso Preliminar. Seu objeto será o corredor São Paulo – Sorocaba e o projeto funcional já caracterizado pelo estudo de caso anterior. O principal objetivo será avaliar o potencial de incremento das velocidades na linha com o emprego do material rodante pendular e as principais implicações decorrentes disso, partindo do projeto funcional já elaborado e por meio da proposição de diferentes opções de operação.

Primeiramente, será estabelecido um conjunto de premissas que orientarão uma série de decisões, em grande parte racionais, mas também algumas vezes subjetivas. Na sequência, será apresentada uma primeira opção de operação de referência (F-R) prevendo trens convencionais com a mesma velocidade máxima adotada nos estudos e simulações de marcha do projeto funcional, 140 km/h. Ou seja, ela se aproximará do trabalho desenvolvido posteriormente para o projeto básico, subsequente ao projeto funcional. Essa opção definirá um dimensionamento de curvas de transição e de superelevação específicos, assim como resultará num determinado nível de conforto dos passageiros.

Passar-se-á então às três opções de operação com velocidade incrementada, que serão comparadas com a opção operacional de referência F-R. Essas opções com velocidade incrementada diferenciar-se-ão pelo material rodante empregado:

- Opção F-0: Uso de trens convencionais;
- Opção F-1: Uso de trens pendulares de sistema passivo;
- Opção F-2: Uso de trens pendulares de sistema ativo.

Como o traçado será único, o dimensionamento das curvas de transição e da superelevação deverá ser apenas um, atendendo a todos os casos conforme as normas. Além disso, o conforto do passageiro não poderá ser comprometido, ponto em que será relevante a comparação com os níveis de conforto verificados para a opção operacional de referência F-R.

9.1 PREMISSAS E ORIENTAÇÕES

Um dos objetivos do presente trabalho é atestar, de maneira prática, qual pode ser a redução efetiva de tempos de viagem por meio da operação de trens pendulares, uma tecnologia estabelecida, porém não tão difundida de material rodante.

Muitas vezes a literatura e a prática corrente em diferentes países apresentam divergências quanto aos valores praticados, como o do efetivo ângulo máximo de giro a ser considerado nos trens pendulares de sistema ativo. Em situações como essa, optar-se-á por aplicar, no presente estudo de caso e nos posteriores, valores que resultem nas maiores velocidades e consequentemente nas maiores reduções de tempo de viagem, para criar uma referência do maior benefício que pode ser conseguido com a tecnologia.

Nas análises será dado um destaque especial ao conforto do passageiro, e serão preferidos valores conservadores quanto a esse ponto, como menores valores máximos admissíveis para a aceleração lateral sentida pelo passageiro ÿ, por exemplo. Inicialmente isso pode parecer contraditório com a premissa inicial de atestar o máximo aumento possível de velocidades e a maior redução dos tempos de viagem em cada caso. Essa orientação de prover um serviço mais confortável para o passageiro, porém, se justifica pelas necessidades na atual conjectura do transporte ferroviário: o modal precisa atrair o usuário, afetando a sua escolha e o meio para isso é fornecer um serviço não só mais rápido, como tanto quanto ou mais confortável que os modos rodoviário e aeroviário. Também pode ser considerado um compromisso da engenharia de transportes promover a implantação e operação de serviços progressivamente mais confortáveis para os usuários ao longo do tempo.

9.2 COMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO FUNCIONAL – OPÇÃO DE REFERÊNCIA F-R

No projeto geométrico funcional, como é típico não foram dimensionadas curvas de transição. Mesmo a superelevação não foi propriamente dimensionada, tendo somente sido adotado um valor para que fossem efetuadas as simulações de marcha.

A seguir são adotados e justificados valores para a superelevação D nas curvas, o valor máximo admissível para a aceleração lateral sentida pelo passageiro e para sua variação (*jerk* lateral), o tipo e o comprimento das curvas de transição, dentre outros. Também será levantada a questão do conforto.

Desse modo poderá ser composta a opção operacional de referência F-R, que servirá de base para análises e comparações posteriores.

9.2.1 Máxima aceleração lateral não compensada admissível

Como retratado anteriormente, a aceleração lateral sentida pelo passageiro é uma condição de contorno importante para o projeto geométrico. Seu valor máximo admissível define o raio mínimo, ou seja, na prática acaba sendo uma condição mais restritiva que critérios de segurança contra o tombamento, descarrilamento, entre outros.

Também conforme citado anteriormente, o valor máximo admissível dessa aceleração, por si só, é uma questão muitas vezes subjetiva; cada órgão e cada país pode adotar um valor diferente. A Tabela 9.1 apresenta valores adotados a partir da experiência francesa (ALIAS, 1984, apud PITA, 1997).

Tabela 9.1 – Critério de conforto segundo a SNCF - Ferrovia francesa (ALIAS, 1984, apud PITA, 1997)

	Aceleração lateral sentida pelo passageiro $a_{nc,f}$ (m/s²)		Variação da aceleração transversal sentida pelo passageiro - *Jerk* lateral (m/s³)
Nível de conforto	Passageiro sentado	Passageiro em pé	
Muito bom	1,00	0,85	0,30
Bom	1,20	1,00	0,45
Aceitável	1,40	1,20	0,70
Aceitável, excepcionalmente	1,50	1,40	0,85

Esses valores já consideram o ajuste devido à flexibilidade da suspensão (aceleração $a_{nc,f}$), como detalhado em 4.2.1. A norma UIC-703R – *Layout characteristics for lines used by fast passenger trains* (UIC, 1989) recomenda para a aceleração lateral a_{nc} (sem considerar o efeito da flexibilidade da suspensão) os valores a seguir:

- Limite normal de 0,67 m/s²;
- Limite máximo de 0,80 m/s²;
- Limite excepcional de 1,00 m/s².

Estes valores são para via corrida, para trens entre 120 e 200 km/h e no plano da via. Quanto à consideração do efeito da flexibilidade da suspensão, a norma recomenda a aplicação de um fator (como o fator f_R discutido em 4.2.1). O valor máximo aceitável da aceleração lateral $a_{nc,f}$, considerado o efeito, deve ficar na faixa de 1,00 a 1,50 m/s² segundo a norma.

Já a norma EN 13803-1:2010 (CEN, 2010) apresenta outros valores. Primeiramente, esta norma trata da aceleração lateral no plano da via em termos da insuficiência de superelevação I, sem considerar o efeito da flexibilidade da suspensão do veículo. Como descrito em 4.2, os dois valores apresentam uma relação linear, conforme a Equação 9.1; é aplicado o valor correspondente ao da bitola internacional (distância entre os eixos dos trilhos b_0 igual a 1500 mm).

$$I = a_{nc} \cdot \frac{b_0}{g} = 152{,}9 \cdot a_{nc}$$

Equação 9.1 – Relação linear entre a aceleração lateral a_{nc} e a insuficiência de superelevação I (CEN, 2010)

Onde:

- I: Insuficiência de superelevação (mm);
- a_{nc}: Aceleração lateral não compensada (m/s²);
- b_0: Distância entre os eixos dos trilhos (mm) – assumida como 1.500 mm;
- g: Aceleração gravitacional (m/s²), considerada como 9,81 m/s².

Essa mesma norma assume os seguintes limites então para a insuficiência de superelevação I, correspondentes à via corrida e trens entre 80 e 200 km/h:

- Limite normal de 130 mm, que corresponderia a a_{nc} = 0,85 m/s²;
- Limite excepcional de 168 mm, que corresponderia a a_{nc} = 1,10 m/s².

A norma EN 13803-1 ressalta em nota que nos trens convencionais a aceleração lateral para o passageiro será um pouco maior devido ao efeito da flexibilidade da suspensão, devendo para isso ser aplicado um fator como o fator de rolamento f_R.

Como último exemplo, coloca-se novamente o valor adotado pela experiência na ferrovia alemã (DB) segundo Schramm (1974), de a_{nc} = 0,65 m/s², que pode ser considerado conservador pelo visto até agora. O projeto funcional da ferrovia São Paulo – Sorocaba, em suas simulações de marcha, assumiu esse mesmo valor.

Para a presente opção de operação de referência, F-R, seguindo a orientação supracitada de ser-se conservador quanto ao conforto, será considerada a máxima aceleração lateral admissível a_{nc} = 0,65 m/s² como no projeto funcional. Este valor corresponde a uma insuficiência de superelevação I = 99,4 mm ≈ 100 mm, conforme a Equação 9.1. Manter o mesmo valor que o adotado no projeto funcional também pode permitir eventuais comparações.

Esse valor pode ser respaldado se seguida a linha de raciocínio detalhada por Pita (2006). O autor calcula qual seria a aceleração lateral que o passageiro sentiria num trem convencional, levando em conta tanto o efeito da flexibilidade da suspensão como também a eventual presença de defeitos na via – ambos os efeitos majoram a aceleração lateral sentida pelo passageiro.

A Equação 9.2 exprime essas ideias. Pita aplica valores típicos para o efeito da flexibilidade da suspensão e para defeitos na via baseados na experiência.

$$a_{nc,f,d} = a_{nc} \cdot f_R + a_d = a_{nc} \cdot \left(1 + s_f\right) + 0{,}20 = a_{nc} \cdot 1{,}20 + 0{,}20$$

Equação 9.2 – Cálculo da aceleração lateral não compensada sentida pelo passageiro no caso crítico (PITA, 2006)

- $a_{nc,f,d}$: Aceleração lateral não compensada sentida pelo passageiro, no caso crítico que leva em conta o efeito da flexibilidade da suspensão e eventuais defeitos na via (m/s²);

- f_R: Fator de rolamento referente à flexibilidade da suspensão nos trens convencionais (adimensional);

- s_f: Componente do fator de rolamento supracitado (adimensional) – assumido tipicamente como 0,20 segundo Pita (2006);

- a_d: Termo correspondente à aceleração lateral adicional provocada por irregularidades na via, que resultariam numa superelevação menor (m/s²) – assumido tipicamente como 0,20 m/s² segundo Pita (2006).

Aplique-se na equação o valor que se pretende adotar para a aceleração lateral não compensada no presente estudo de caso, a_{nc} = 0,65 m/s². Considerando os mesmos fatores assumidos por Pita (2006) para o efeito da flexibilidade da suspensão e dos defeitos na via, resulta numa aceleração $a_{nc,f,d}$ = 0,98 m/s², válida para o caso crítico quase-estático localizado. Esse valor caracterizaria conforto de nível “muito bom” para um passageiro sentado e conforto de nível “bom” para um passageiro em pé, se consultada a classificação oriunda da experiência francesa (conforme a Tabela 9.1).

A adoção desse valor conservador se justificará também por permitir flexibilidade dentro da questão do conforto do passageiro, principalmente no emprego dos trens pendulares. Por exemplo, se para a aceleração lateral sentida pelo passageiro no trem pendular foi adotado um valor conservador, e for verificado o problema do enjoo de movimento ou cinetose (como detalhado em 6.2.3), ainda é possível diminuir os ângulos de giro da caixa do veículo como proposto por Persson (2011) e mesmo assim remanesceria um valor aceitável para a aceleração lateral.

Outra justificativa para o uso dos valores conservadores é que por meio deles pode-se verificar um potencial um pouco maior do aumento das velocidades com o emprego dos trens pendulares, que se fossem usados valores mais estritos. O seguinte exemplo ilustra o caso, aplicando-se a Equação 4.9 para uma dada curva com superelevação D igual a 150 mm:

- Uma insuficiência I de 100 mm para o trem convencional e de 300 mm para o trem pendular (valores conservadores) leva a um aumento de 34,2% da velocidade na curva;
- Uma insuficiência I de 150 mm para o trem convencional e de 350 mm para o trem pendular (valores estritos, com maior desconforto associado) leva a um aumento de velocidade na curva menor, igual a 29,1%.

Dessa maneira segue-se a premissa de criar uma referência que indique qual o maior benefício que pode ser conseguido por meio da tecnologia pendular.

9.2.2 Superelevação máxima

Como detalhado em 4.2, ao adotar-se um valor alto de superelevação D nas curvas permite-se que os trens de passageiros trafeguem a velocidades maiores, embora isto incorra em problemas para trens de carga usando a mesma via. Todavia a operação dos mesmos não será suposta; o objeto de estudo será de uso exclusivo de trens de passageiros, apesar de as ferrovias europeias adotarem essa prática.

A superelevação máxima prevista para o projeto funcional da ferrovia São Paulo – Sorocaba foi de 140 mm; entretanto na prática, nos estudos efetuados de simulação de marcha, um valor médio de 70 mm foi adotado para todas as curvas, como visto em 8.5.2. Esse valor adotado pode ser justificado pelo uso misto da linha, como é feito pela CPTM com a adoção da superelevação equilibrada, como descrito em 4.2.

Para via corrida e trens de 120 a 200 km/h, a norma UIC-703R estipula os seguintes limites para a superelevação D adotada para bitola internacional (1989):

- Limite normal de 120 mm;
- Limite máximo de 150 mm;
- Limite excepcional de 160 mm.

Enquanto isso, a norma EN 13803-1 determina valores um pouco maiores (CEN, 2010). Disto deduz-se que houve uma flexibilização quanto aos valores máximos adotados nos 20 anos entre as duas publicações.

- Limite normal de 160 mm;

- Limite excepcional de 180 mm.

No presente trabalho, optar-se-á por adotar a superelevação máxima D_{max} igual a 140 mm como no projeto funcional – por mais que as normas admitam limites superiores. Por simplificação, será adotada para a presente opção operacional de referência (F-R) essa superelevação máxima em todas as curvas, independentemente do raio.

Esse valor se justifica primeiramente por manter as premissas do projeto funcional. Além disso, o valor representa a superelevação necessária para que o trem convencional trafegue na velocidade máxima planejada inicialmente também no projeto funcional como será demonstrado a seguir. Essa velocidade é de 140 km/h nas curvas de raio igual a 1.000 m, que são grande maioria das curvas no trecho.

Vale ressaltar que na presente opção de referência estudada F-R deve-se fazer um dimensionamento das curvas de transição de maneira “natural”. Ou seja, o que seria feito normalmente nos eventuais projetos básico e executivo que sucederão o projeto funcional, seguindo premissas iguais ou ao menos parecidas com as dele (quanto à máxima aceleração lateral não compensada admissível e à superelevação máxima, por exemplo). Dessa forma, poderá ser verificado como se dá o conforto do passageiro para a ferrovia em questão com a operação de trens convencionais na velocidade prevista inicialmente.

A segurança será garantida por meio da restrição de velocidade máxima conforme a norma EN 13803 (2010), e até mesmo uma restrição de velocidade mínima poderia ser necessária para atender ao conforto devido ao excesso de superelevação E. Como apenas três curvas apresentam raios menores que 1.000 m no traçado analisado, essa questão em particular não será aprofundada.

9.2.3 Velocidade máxima permitida em cada curva

Estando tanto a superelevação (D = 140 mm) quanto a máxima aceleração lateral não compensada (a_{nc} = 0,65 m/s² ou I = 100 mm) estabelecidas para todas as curvas, passa-se à determinação da velocidade máxima admissível, que será função desses valores e do raio de cada curva.

Como a velocidade máxima prevista está restrita inicialmente a 140 km/h, as curvas de raio maior ou igual a 1.000 m podem inclusive exigir uma superelevação menor que a máxima. Os valores de superelevação foram assim recalculados, e arredondados para cima de 10 em 10 mm.

Aplicando-se os valores na Equação 4.9 para as curvas do trecho conforme a Tabela 8.7, tem-se a Tabela 9.2:

Tabela 9.2 – Velocidade máxima nas curvas para a opção de referência F-R

Nº das curvas	Raio (m)	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade máxima prevista (km/h)	Superelevação recalculada, adotada (mm)
1, 2	400	90,2	-	-
44	600	110,5	-	-
Restantes (38 curvas)	**1.000**	**142,6**	**140,0**	**140,0**
4	1.500	174,7	140,0	60,0
14, 38	2.000	201,7	140,0	20,0

9.2.4 Curvas de transição – Tipo adotado

A curva de transição permite que os trens, como o próprio nome indica, façam uma transição suave ao passar entre dois elementos de raios (e curvaturas) diferentes do traçado horizontal. Sem ela haveria uma variação brusca da aceleração lateral sentida pelo passageiro, por exemplo (efeito já discutido sobre a questão do *jerk* lateral em 6.1.2.2).

Entre os tipos de curvas de transição (clotoide, parábola cúbica e quatro outros tipos de curvas “superiores”), será adotada a clotoide para o dimensionamento da opção de referência, com a rampa de superelevação coincidindo com esta.

No Apêndice A, é abordado o conceito da curva de transição, os tipos de curvas existentes e a justificativa para a adoção da clotoide no presente trabalho.

9.2.5 Curvas de transição – Comprimento

Com a clotoide definida como a curva de transição a ser utilizada e os outros parâmetros também definidos, pode-se encontrar o comprimento desejável para as

curvas de transição da opção de referência, o que virá a partir das seguintes restrições. São relacionados os valores limite normais referentes à norma EN 13803-1 (CEN, 2010):

- Gradiente de superelevação máximo, em função do desenvolvimento $\left(\frac{dD}{ds}\right)_{lim} = 2{,}25\ mm/m$;
- Taxa máxima de variação da superelevação ao longo do tempo $\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} = 50\ mm/s$;
- Taxa máxima de variação da insuficiência de superelevação ao longo do tempo $\left(\frac{dI}{dt}\right)_{lim} = 55\ mm/s$;

Calculando-se então, para cada raio de curva encontrado no trecho (como na Tabela 9.2) e os valores já definidos, desenvolve-se a Tabela 9.3:

Tabela 9.3 – Comprimento mínimo das clotoides para a opção de referência (F-R)

				Comprimento mínimo da clotoide, segundo cada critério (m)			
Nº das curvas	**Raio (m)**	**Velocidade máxima (km/h)**	**Superelevação (mm)**	**Máximo gradiente de superelevação 2,25 mm/m**	**Máxima taxa de variação da superelevação 50 mm/s**	**Máxima taxa de variação da insuficiência de superelevação 55 mm/s**	**Comprimento mínimo da clotoide (m)**
1, 2	400	90,2	140	62,2	70,2	63,8	70,2
44	600	110,5	140	62,2	85,9	78,1	85,9
Restantes (38 curvas)	**1.000**	**140,0**	**140**	**62,2**	**108,9**	**99,0**	**108,9**
4	1.500	140,0	60	26,7	46,7	42,4	46,7
14, 38	2.000	140,0	20	8,9	15,6	14,1	15,6

9.2.6 Inserção das clotoides no alinhamento horizontal

Quando são inseridas as clotoides numa sequência de uma tangente, uma curva circular e outra tangente, naturalmente resulta uma nova sequência: uma tangente (diminuída em desenvolvimento), a primeira clotoide, a curva circular “remanescente” (diminuída em desenvolvimento), a segunda clotoide, e a outra tangente (diminuída em desenvolvimento). O processo mais comum de inserção das clotoides, de afastar-

se a curva antes de inseri-las conservando-se o raio é mostrado graficamente na Figura 9.1.

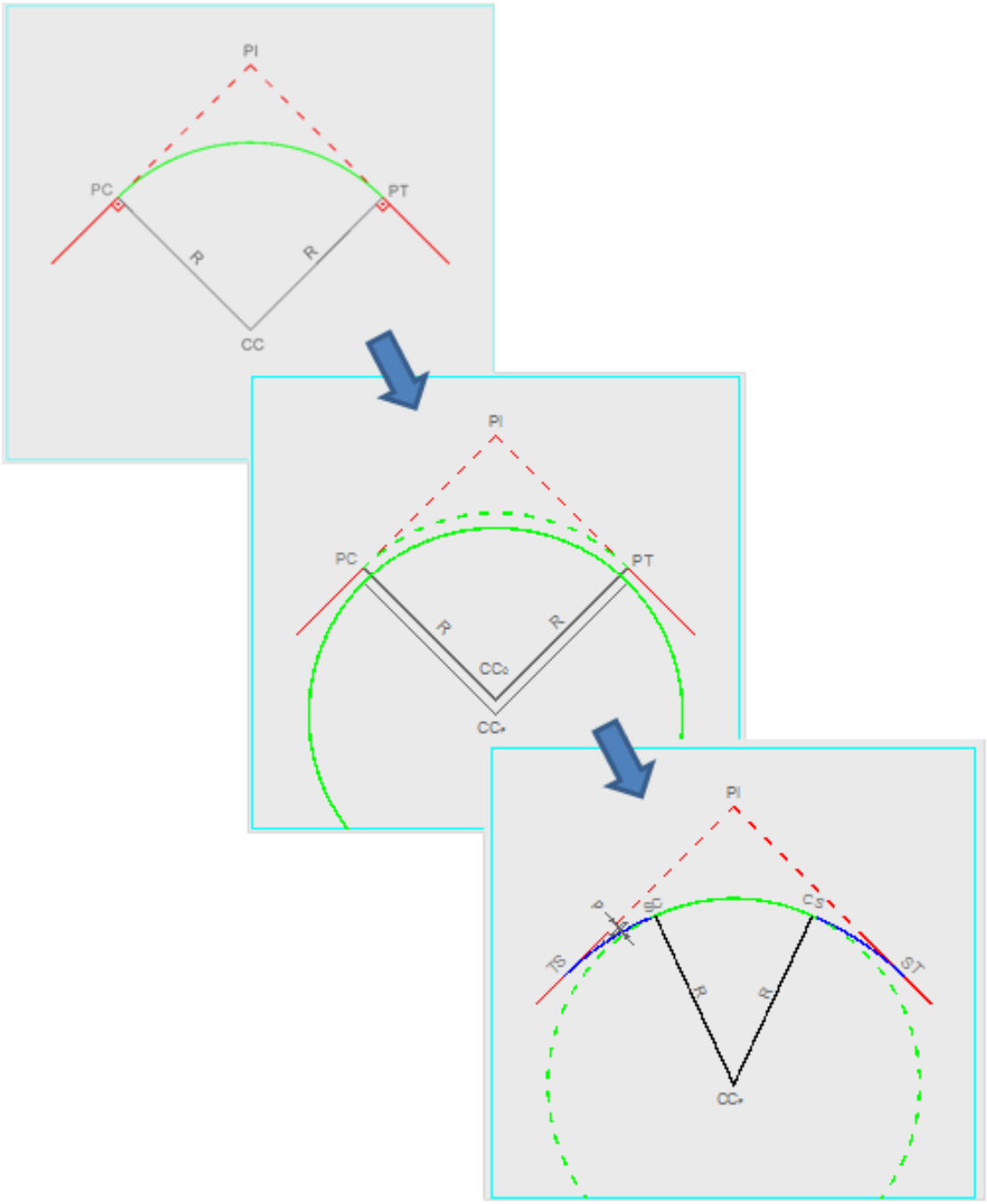


Figura 9.1 – Inserção de clotoides num traçado horizontal (KABBACH JUNIOR, 2013)

Quando a nova sequência é inserida, o desenvolvimento total do traçado diminui um pouco. De maneira prática, o desenvolvimento da clotoide “toma” partes iguais do trecho em tangente e do trecho em curva, ou seja, metade em desenvolvimento da clotoide fica “situada” aproximadamente onde antes era parte da tangente e a outra metade onde antes era uma parte igual da curva horizontal. Disso decorre que, para

grandes desenvolvimentos de clotoide, pode não haver um desenvolvimento suficiente de algumas curvas circulares para encaixar as curvas de transição de entrada e saída.

Para os trechos restantes de curva horizontal e tangente onde a curvatura não muda, ou seja, entre duas curvas de transição, a norma EN 13803-1 (CEN, 2010) define alguns limites. Primeiramente é sugerido um limite normal para o desenvolvimento do elemento (curva horizontal ou tangente) de $L_i \geq 20$ m. Porém é ressalvado que, alternativamente, o elemento de pequeno desenvolvimento pode ser omitido, dessa forma ligando diretamente as duas curvas de transição.

No anexo B da mesma norma é mostrado mais um método alternativo, mais elaborado. Neste anexo ressalta-se que é desejável unir duas curvas de transição quando da combinação de curvas horizontais reversas numa única e longa transição (fazendo com que o desenvolvimento da tangente entre as clotoides se torne zero). Também é determinado no anexo o limite normal para o elemento entre as curvas de transição (tangente ou curva circular), para trens com velocidade entre 80 e 200 km/h: maior ou igual a 20 m e maior ou igual à velocidade máxima prevista dividida por três.

Por simplificação, apenas o caso mais comum será verificado na opção de referência F-R, que é o da curva de raio igual a 1.000 m e clotoide de 108,9 m (conforme a Tabela 9.3). Apenas outras três curvas possuem raios menores e pequenos desenvolvimentos associados. Como solução para estas, poder-se-ia por exemplo restringir a velocidade e usar clotoides menores.

Para a velocidade máxima prevista do trecho, de 140 km/h, corresponde um comprimento de 46,7 m do elemento que deve “restar” entre as curvas de transição segundo o anexo da norma supracitada. Considere-se a curva de 1.000 m, a mais comum no trecho. Mais uma vez de maneira prática, pode-se provar que se dois elementos sucessivos (tangente e curva horizontal) tiverem desenvolvimentos iguais a esse comprimento mais o necessário para a clotoide (108,9 m), ou seja, de pelo menos 155,6 m, as curvas de transição poderão ser inseridas sem problemas.

De fato, dos elementos associados às curvas de raio igual a 1.000 m, apenas a curva 5 e a tangente entre as curvas 6 e 7 possuem desenvolvimentos menores que o limite estipulado, de 95,3 m e 144,3 m respectivamente. Como solução para a

primeira situação poder-se-ia ainda aumentar o raio da curva; para a segunda, poder-se-ia juntar as curvas de transição como recomenda o anexo da norma EN 13803-1.

Entre todos os outros elementos associados às curvas de raio igual ou maior que 1.000 m os desenvolvimentos são superiores. Assim, pode-se afirmar com segurança que as clotoides podem ser inseridas sem a necessidade de um estudo mais detalhado para a opção de operação de referência F-R.

9.2.7 Avaliação do conforto na curva de transição

Estando o comprimento da clotoide definido, pode-se avaliar o conforto associado às curvas de transição de entrada, através do uso do índice P_{CT}, que retorna a porcentagem de passageiros que sentiria desconforto nela.

A avaliação feita será montada a partir somente dos dados de projeto (alinhamento horizontal). Normalmente a avaliação do conforto se dá também com o uso de outros índices, como apresentado no capítulo sobre o conforto do passageiro, no item 6.2. Além disso, a avaliação completa é feita por testes em campo e/ou simulações dos movimentos do veículo, podendo somente o índice P_{CT} ser objeto de considerações na fase de projeto em que só estão disponíveis os parâmetros do traçado e da seção transversal.

Como o comprimento das curvas de transição foi definido de acordo com as normas vigentes, a avaliação do conforto no presente trabalho terá caráter apenas de referência, sendo apresentada no Apêndice B – Avaliação do conforto na curva de transição, especificamente no item B.1.

9.3 COMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO FUNCIONAL – OPÇÕES PREVENDO INCREMENTO DE VELOCIDADE (F-0, F-1 E F-2)

Estando a opção operacional de referência F-R estabelecida, passa-se à complementação do projeto funcional que contemple o incremento de velocidades, objetivo principal do presente estudo de caso. Recapitulando, será definido um único traçado que permita um incremento da velocidade máxima permitida para as três seguintes opções de operação:

- Trem convencional, que trafegará nas curvas de menor raio com velocidade em torno de 140 km/h – Opção F-0;

- Trem pendular de sistema passivo, que trafegará nas curvas de menor raio com velocidade aumentada – Opção F-1;
- Trem pendular de sistema ativo, que trafegará nas curvas de menor raio com velocidade aumentada ainda mais – Opção F-2.

Como apenas um traçado será definido, as particularidades inerentes a cada opção serão analisadas em paralelo e ao mesmo tempo comparadas. Destaca-se que o dimensionamento será definido prioritariamente pela opção F-2 – por ser uma opção para trens pendulares ativos, esta demandará os maiores comprimentos de curvas de transição, por exemplo.

9.3.1 Máxima aceleração lateral não compensada admissível

Procurar-se-á, nas três opções de operação agora analisadas, restringir a aceleração lateral não compensada sentida pelo passageiro a um valor máximo em torno de 0,65 m/s², como feito para a opção de referência F-R e pelos mesmos motivos. Dessa forma, ter-se-ia uma mesma insuficiência de superelevação I associada de 100 mm. Os sistemas pendulares, todavia, permitem justamente que os trens trafeguem a uma insuficiência de superelevação I maior, pois uma parcela significativa desta é compensada pela inclinação da caixa do veículo.

O limite normal da insuficiência de superelevação para trens pendulares é definido como 275 mm, sendo o limite excepcional igual a 306 mm, ambos segundo a norma EN 13803-1 (CEN, 2010) para trens de velocidade entre 80 e 260 km/h. Na mesma norma é ressalvado que para tais insuficiências de superelevação, ou mesmo maiores, o gestor da infraestrutura ferroviária deve atestar a qualificação da mesma para a operação nessas condições. Fatores como o vento e irregularidades na via tornam-se mais relevantes na questão da segurança quando trens trafegam nessa situação (insuficiência de superelevação I consideravelmente maior que o normal), como visto no item sobre critérios de segurança, 4.2.3.

A norma UIC-705RI – *Infrastructure for Tilting Trains* (UIC, 2003), embora anterior à especificação da CEN, designa diretamente as características das vias para trens pendulares. Nela, retrata-se o mesmo limite de 275 mm para a insuficiência de superelevação I, porém ressaltam-se limites praticados maiores, de até 300 mm como o utilizado pela ferrovia alemã (DB).

No presente trabalho, será adotado o limite máximo de I_{lim} igual a 300 mm, seguindo a premissa do Estudo de Caso 1 de verificação das máximas velocidades possíveis. Para os próximos entendimentos, valem os conceitos já estabelecidos quanto à superelevação teórica, insuficiência de superelevação, entre outros.

Para entendimento do funcionamento dos sistemas pendulares, a insuficiência de superelevação I será desmembrada em dois termos, como apresentado na Equação 9.3: a compensação da insuficiência I_C, em mm; e a insuficiência residual I_R, também em mm e que não poderá ultrapassar 100 mm.

$$I = I_C + I_R$$

Equação 9.3 – Insuficiência de superelevação decomposta

- Na opção do trem convencional F-0, continua-se com a mesma insuficiência de superelevação associada I de 100 mm, como na opção de referência, e que corresponde à máxima aceleração lateral sentida pelo passageiro de 0,65 m/s². O incremento de velocidade só terá efeito prático nas tangentes.

- Para a opção do trem pendular de sistema passivo F-1 será considerado o trem Talgo 250, da própria Talgo, com o ângulo de giro máximo dado como 4°. A partir da Equação 4.4 e da relação linear entre o ângulo de giro e a insuficiência I apresentada em 4.2, pode-se chegar a uma compensação da insuficiência de superelevação I_C de em torno de 103,7 mm[9]. Em outros termos:

    - A insuficiência de superelevação I praticada nessa opção será igual a 200 mm;

    - A compensação da insuficiência de superelevação I_C será igual a 103,7 mm (51,9% de compensação), equivalente a um giro da caixa do veículo em relação ao plano da via de 4°;

    - A insuficiência de superelevação residual I_R após a compensação será igual a 96,3 mm, o que equivale a uma máxima aceleração lateral

[9] A relação anteriormente indicada mostrava que a cada 1º de inclinação correspondiam 25 mm de insuficiência, mas para os estudos de caso optou-se por usar o valor exato. É possível também deduzir a insuficiência compensada I_C correspondente através somente da Equação 4.4, adotando-se um raciocínio parecido com o feito no Apêndice B, item B.1.

sentida pelo passageiro de 0,63 m/s², valor ligeiramente inferior ao correspondente no trem convencional.

- Já para a opção do trem pendular de sistema ativo F-2 será considerado o trem Pendolino ETR 600 da Alstom (a chamada “nova geração” desta linha de trens, em operação desde 2006). O ângulo de giro máximo será tomado como 8°. De maneira parecida com o caso do trem pendular passivo, ao ângulo corresponde uma compensação da insuficiência de superelevação I_C de 206,3 mm. Mais uma vez, em outros termos:
    - A insuficiência de superelevação I praticada será de 300 mm, igual ao limite permitido;
    - A compensação da insuficiência de superelevação I_C será igual a 206,3 mm (68,8% de compensação), equivalente a um giro da caixa do veículo em relação ao plano da via de 8°;
    - A insuficiência de superelevação residual I_R, após a compensação, será igual a 93,7 mm, o que equivale a uma máxima aceleração lateral de 0,61 m/s² sentida pelo passageiro; assim como no caso anterior, esse valor é ligeiramente inferior ao correspondente no trem convencional.

Ou seja, para as três opções F-0, F-1 e F-2 e assim como na opção de referência F-R, no caso quase-estático quando o trem se encontra trafegando pela curva horizontal, a aceleração lateral sentida pelo passageiro $a_{nc,p}$ (com o efeito da compensação provido pelos sistemas pendulares) não ultrapassa 0,65 m/s². Vale lembrar que não está aqui contabilizado o efeito da flexibilidade da caixa do veículo.

Os trens pendulares estão sujeitos a maiores acelerações centrífugas, portanto o efeito da flexibilidade da suspensão pode ser mais proeminente neles (MANCINI et al, 2008). Seguindo a premissa do maior conforto, torna-se interessante que no caso F-2, por exemplo, a aceleração lateral sentida pelo passageiro seja um pouco menor, como será visto a seguir.

Resumindo na Tabela 9.4:

Tabela 9.4 – Insuficiências de superelevação e aceleração sentida pelo passageiro, $a_{nc,p}$ para as três opções de operação F0, F-1 e F-2

		Opção de operação		
		Trem convencional (F-0)	**Trem pendular passivo (F-1)**	**Trem pendular ativo (F-2)**
Insuficiência de superelevação	I (mm)	100,0	200,0	300,0
Giro da caixa do veículo em relação ao plano da via	(°)	0,0	4,0	8,0
Compensação de I	I_C (mm)	-	103,7	206,3
Compensação relativa	(%)	-	51,9%	68,8%
Insuficiência residual	I_R (mm)	100,0	96,3	93,7
Aceleração lateral no plano do passageiro	$a_{nc,p}$ (m/s²)	0,65	0,63	0,61

9.3.2 Superelevação máxima

Para a superelevação máxima D_{max} das três opções aqui analisadas (F-0, F-1 e F-2), será adotado o valor de 150 mm, ligeiramente superior ao adotado para a opção de referência (F-R), de 140 mm. O valor de 150 mm representa 10% da distância entre os eixos dos trilhos. Como mostrado em 9.2.2, esse valor está dentro dos limites aceitados pela norma EN 13803-1.

Independentemente do raio, a princípio será aplicada a mesma superelevação D de 150 mm para todas as curvas – isso permitirá que os trens trafeguem na velocidade máxima possível nos três casos. Posteriormente, a superelevação será reduzida onde possível, contanto que isso não afete as velocidades para qualquer opção.

9.3.3 Velocidade máxima permitida no trecho e em cada curva

Com a superelevação D, a insuficiência de superelevação I e os raios, é possível definir a velocidade máxima permitida em cada curva ao longo do traçado.

Aplicando-se a Equação 4.9, tem-se os resultados conforme a Tabela 9.5:

Tabela 9.5 – Máximas velocidades para as três opções de operação (D = 150 mm em todas as curvas)

		Velocidade máxima nas curvas para cada opção de operação (km/h)		
		Trem convencional (F-0)	Trem pendular passivo (F-1)	Trem pendular ativo (F-2)
Insuficiência de superelevação I (mm)		100,0	200,0	300,0
Nº das curvas	Raio (m)			
1, 2	400	92,1	108,9	123,5
44	600	112,7	133,4	151,3
Restantes (38 curvas)	**1.000**	**145,6**	**172,2**	**195,3**
4	1.500	178,3	*210,9*	*239,2*
14, 38	2.000	*195,3*	*243,6*	*276,2*

Percebe-se que o incremento de velocidades, em grande parte do trecho (onde estão as 38 curvas de raio 1.000 m), não poderá ultrapassar a velocidade de 195,3 km/h. Nem mesmo o trem pendular ativo consegue superar essa velocidade sem degradar o conforto do usuário. A velocidade de 195 km/h, sublinhada na tabela, será tomada como a velocidade máxima V_{max} para todo o trecho e para as três opções de operação analisadas (F-0, F-1 e F-2).

Ou seja, o trem convencional e o pendular passivo poderão acelerar somente até 195 km/h nas tangentes (enquanto o trem pendular ativo provavelmente manterá essa velocidade nas tangentes e nas curvas em boa parte do trecho). Naturalmente os trens deverão obedecer às restrições de velocidades nas curvas de acordo com suas limitações particulares (material rodante) e os próprios raios das curvas.

Nas curvas de raios maiores, que são casos de exceção, como visto as velocidades poderiam ser até acima de 195 km/h (valores em vermelho na tabela). A velocidade máxima ainda será 195 km/h e os trens deverão respeitá-la. Como existe essa limitação, a superelevação D das curvas 14 e 38 por exemplo poderia ser um pouco menor. A saber, esta pode ser mudada para D = 125 mm (e isto de fato será adotado deste ponto em diante), que mesmo o trem convencional poderá atingir a velocidade de 195 km/h.

9.3.4 Curvas de transição –Tipos discutidos e tipo adotado

Como em 9.2.4 (opção de referência, F-R), será adotada a clotoide como tipo de curva de transição a ser utilizada no complemento do projeto funcional, visando atender aos requisitos de dimensionamento para operação dos trens com velocidade incrementada até em torno de 195 km/h.

As colocações do Apêndice A quanto à justificativa para o tipo de curva de transição adotado, que foram ressaltadas para a adoção da clotoide na opção de referência F-R, valem do mesmo modo para as opções com velocidade incrementada (F-0, F-1 e F-2).

9.3.5 Curvas de transição – Comprimento

Para definir o comprimento das clotoides que serão dimensionadas para o traçado, seguir-se-á o raciocínio já utilizado em 9.2.5, respeitando-se os mesmos limites normais relativos à norma EN 13803:2010 introduzidos. São adotados os maiores comprimentos requisitados e a Tabela 9.6 a seguir é constituída.

As velocidades apresentadas em verde na tabela denotam onde houve uma redução na velocidade máxima possível para o limite estipulado de V_{max} = 195 km/h. Para as curvas 14 e 38 foi adotada a superelevação de 125 mm e a velocidade de 195 km/h é consideravelmente menor que a possível, assim como na curva 4 (que continua com superelevação de 150 mm). Portanto, a insuficiência de superelevação resultante nessas curvas será menor também, acarretando nos pequenos comprimentos necessários (devido ao critério de variação da insuficiência) para as clotoides, com os valores expressos na cor roxa.

Tabela 9.6 – Comprimento mínimo das clotoides para as opções F-0, F-1 e F-2

		Comprimento da clotoide - L (m)												Comprimento mínimo da clotoide - Lc
		Trem convencional (F-0)				Trem pendular passivo (F-1)				Trem pendular ativo (F-2)				
		l (mm)	$\left(\frac{dD}{ds}\right)_{lim}$	$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim}$	$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{lim}$	l (mm)	$\left(\frac{dD}{ds}\right)_{lim}$	$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim}$	$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{lim}$	l (mm)	$\left(\frac{dD}{ds}\right)_{lim}$	$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim}$	$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{lim}$	
Nº das curvas	**Raio (m)**	**100**	**2,25**	**50**	**55**	**200**	**2,25**	**75**	**100**	**300**	**2,25**	**75**	**100**	
		(mm)	**(mm/m)**	**(mm/s)**	**(mm/s)**	**(mm)**	**(mm/m)**	**(mm/s)**	**(mm/s)**	**(mm)**	**(mm/m)**	**(mm/s)**	**(mm/s)**	
1, 2	400	**92,1**	66,7	76,7	46,5	**108,9**	66,7	60,5	60,5	**123,5**	66,7	68,6	102,9	102,9
44	600	**112,7**	66,7	94,0	56,9	**133,4**	66,7	74,1	74,1	**151,3**	66,7	84,0	126,1	126,1
Restantes (38 curvas)	**1.000**	**145,6**	**66,7**	**121,3**	**73,5**	**172,2**	**66,7**	**95,7**	**95,7**	**195,0**	**66,7**	**108,3**	**162,5**	**162,5**
4	1.500	**178,3**	66,7	148,6	90,0	***195,0***	66,7	108,3	*80,8*	***195,0***	66,7	108,3	*80,8*	148,6
14, 38 (D = 125 mm)	2.000	***195,0***	55,6	135,4	98,5	***195,0***	55,6	90,3	*53,8*	***195,0***	55,6	90,3	*53,8*	135,4
		Vmax (km/h)				**Vmax (km/h)**				**Vmax (km/h)**				

Os resultados encontrados mostram uma exigência de clotoides de desenvolvimento considerável para as curvas mais comuns no trecho, as de raio igual a 1.000 m. Essa exigência deve-se principalmente, como mostra a tabela, ao requisito para operação do trem pendular ativo quanto à variação da insuficiência de superelevação ao longo do tempo. O comprimento L_C de 162,5 metros representa um aumento de 49,2% em relação ao comprimento correspondente de 108,9 m encontrado para a opção de referência F-R.

Como visto anteriormente, serão adotados os comprimentos de clotoide para o caso crítico – marcados com o fundo em amarelo na tabela – e o traçado definido a ser implantado será um só, que valerá para as três opções de velocidade incrementada (F-0, F-1 e F-2).

9.3.5.1 Avaliação preliminar do conforto – Caso crítico

Dado que o comprimento da clotoide para a curva mais frequente (de raio igual a 1.000 m) foi redefinido para um comprimento maior, de 162,5 m de modo a permitir a operação de trens pendulares, cabe uma avaliação preliminar do conforto resultante dessa mudança.

Essa avaliação será feita com as mesmas premissas do item 9.2.7, que endereçava o conforto na curva de transição para a opção de referência F-R. Da mesma maneira, considerando-se que o comprimento da clotoide foi definido de acordo com as normas, o conforto do usuário será avaliado apenas de maneira qualitativa, permitindo uma comparação entre as opções operacionais.

Essa avaliação pode ser verificada no Apêndice B, conforme o item B.2.

9.3.6 Inserção das clotoides no alinhamento horizontal

Os comprimentos mínimos para as clotoides encontrados e expressos através da Tabela 9.6 são referentes a todas as curvas encontradas ao longo do traçado do intermédio, agrupadas para os raios iguais a 400, 600, 1.000, 1.500 e 2.000 m. Essas clotoides, entretanto, não necessariamente poderão ser simplesmente inseridas no alinhamento horizontal do projeto funcional como foi feito para a opção de referência F-R.

Conforme abordado anteriormente, algumas tangentes e curvas horizontais do alinhamento horizontal possuem pequeno desenvolvimento. No caso das curvas horizontais, como os raios são relativamente grandes, o efeito está associado a ângulos centrais (AC) das curvas pequenos. O pequeno desenvolvimento desses elementos dificulta a inserção das clotoides calculadas, pois além do desenvolvimento que as mesmas "tomam", a prática de projeto geométrico ainda recomenda que em geral se mantenha segmentos mínimos de tangente ou de curva circular entre as transições.

Diante dessa dificuldade, uma primeira solução seria diminuir o comprimento das clotoides adotadas. Isso, todavia, implicaria numa necessária redução de velocidades, a fim de respeitar os limites impostos pelas normas, em especial a EN 13803-1. Estar-se-ia indo contra a premissa de incremento das velocidades citada em 9.1 para o presente estudo de caso.

A solução adotada, então, será a de fazer algumas alterações no alinhamento horizontal antes de calcular e inserir as clotoides para cada curva. Essas alterações serão feitas com o auxílio do programa AutoCAD Civil 3D 2012, específico para projetos viários. Esse software permite construções complexas com certa facilidade, como a união e modificação de duas curvas horizontais reversas por uma única transição.

O processo de modificação do traçado é característico do projeto geométrico, e pode ser tanto auxiliado por cálculos como também pode ser realizado por "tentativa e erro". O processo em si não será aprofundado, sendo apresentadas as premissas adotadas e os casos de maneira geral, seguidos de um resumo do alinhamento horizontal modificado e com as clotoides já inseridas.

9.3.6.1 Premissas de projeto complementares

Para fazer as modificações no alinhamento horizontal, primeiramente é necessário definir as premissas de projeto referentes ao comprimento dos elementos entre as transições (tangentes ou curvas circulares).

Seguir-se-á uma metodologia parecida com a adotada para a inserção das clotoides na opção de referência F-R, no item 9.2.6. Desse modo, o método alternativo colocado pelo Anexo B da norma EN 13803-1 (CEN, 2010) exige que os

elementos de curva circular e tangente tenham um comprimento mínimo normal igual à velocidade dividida por três, e ainda recomenda que no caso de curvas reversas faça-se a junção por uma única e mais longa transição. A saber, a curva horizontal remanescente no caso mais comum, da curva de raio igual a 1.000 m, deve a princípio ter um desenvolvimento mínimo igual à velocidade máxima para a opção F-2 de 195 km/h dividida por três, o que resulta num elemento de pelo menos 65,0 m.

De maneira geral, decorre que as modificações no alinhamento horizontal seguirão três premissas básicas:

- Os afastamentos produzidos pelas alterações e pela inserção das clotoides deverão ser os mínimos possíveis, de modo a não alterar significativamente o traçado concebido originalmente, o que incorreria em custos de terraplenagem e obras civis aumentados.

- As curvas horizontais que porventura não comportariam as clotoides terão seus raios aumentados, sem modificação das tangentes associadas. Essas curvas, como já explicado, geralmente possuem ângulos centrais AC pequenos. Com o aumento do raio, o desenvolvimento da curva circular aumenta conjuntamente, numa relação linear. Ao mesmo tempo, o comprimento de clotoide necessário diminui, pois ao aumentar-se o raio da curva circular, diminui-se a insuficiência de superelevação I à qual o veículo está sujeito. Ambos os efeitos combinados fazem com que o desenvolvimento da curva circular remanescente aumente, de modo a possuir o mínimo recomendado.

- As tangentes remanescentes após a inserção das clotoides podem não satisfazer ao critério da velocidade máxima dividida por três. Nesse caso elas serão ligeiramente modificadas, assim como as duas curvas circulares associadas a cada uma delas. Essa modificação decorrerá de maneira que as transições que estiverem se sobrepondo sejam unificadas numa única e longa transição, conforme recomendado pelo anexo da norma EN 13803-1.

9.3.6.2 Tabela-resumo e casos exemplificados

A Tabela 9.7 a seguir resume as modificações efetuadas no alinhamento horizontal, já com as clotoides finais adotadas. As três figuras na sequência (Figura 9.2, Figura 9.3 e Figura 9.4) são exemplos dos casos em que houve alterações,

mostrando o alinhamento original proveniente do projeto funcional e o final, modificado.

Em termos gerais, as oito curvas: 3, 5, 8, 14, 15, 22, 39 e 42 tiveram os raios aumentados, sendo o maior ângulo central entre elas de apenas 12,5º. Nas curvas 5, 14 e 38, pode-se adotar superelevação D menor que 150 mm - elas possuem raios tão grandes que mesmo o trem convencional (opção F-0) poderia trafegar nas mesmas na velocidade máxima estipulada de 195 km/h. Entre os cinco pares de curvas: 1 e 2, 6 e 7, 17 e 18, 21 e 22, e 29 e 30, a tangente foi modificada e as duas clotoides centrais unidas numa única curva de transição.

Na Tabela 9.7, os raios R com o texto em verde representam os valores finais adotados, ou seja, onde o raio teve que ser aumentado. Da mesma forma, as superelevações D também em verde mostram onde essas puderam ser diminuídas, com reflexo no comprimento das clotoides. Em algumas curvas a velocidade máxima permitida deve ser restringida, assumindo valores menores que o limite estipulado V_{max} de 195 km/h, e sendo o valor representado em vermelho. Finalmente, os valores de afastamento lateral f em azul representam aferições aproximadas nos locais onde as tangentes originais foram alteradas e duas clotoides em curvas reversas unidas num única transição.

Tabela 9.7 – Alterações no alinhamento horizontal e inserção das clotoides

Curva	*Raio (proj. funcional)* *(m)*	Raio (adotado) (m)	Super. D (adotada) (mm)	Vmáx (adotada) (km/h)	Lclotoides (m)		Afastamento lateral aproximado, f (m)			Observações
					Opção F-R	Adotado (opção F-2)	*Opção F-R*	Efetivo (opção F-2)	*Δf*	
1, 2	*400*	**400**	**150**	**123,5**	*70,2*	**102,9**	*0,51*	**3,30**	2,79	Tangente entre as curvas ajustada Clotoides reversas unidas entre as curvas
3	*1.000*	**1.150**	**150**	**195,0**	*108,9*	**130,1**	*0,49*	**1,20**	0,71	Curva com AC pequeno - Raio aumentado para que coubessem as clotoides
4	*1.500*	**1.500**	**150**	**195,0**	*46,7*	**148,6**	*0,06*	**0,62**	0,56	
5	*1.000*	**2.100**	**115**	**195,0**	*108,9*	**124,6**	*0,49*	**1,56**	1,07	Curva com AC pequeno - Raio aumentado para que coubessem as clotoides
6, 7	*1.000*	**1.000**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,60**	1,11	Tangente entre as curvas ajustada Clotoides reversas unidas entre as curvas
8	*~~1.000~~*	**1.100**	**150**	**195,0**	*108,9*	**139,7**	*0,49*	**1,21**	0,72	Curva com AC pequeno - Raio aumentado para que coubessem as clotoides
9 a 13 (5 curvas)	*1.000*	**1.000**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,11 a 1,19**	0,62 a 0,70	
14	*~~2.000~~*	**2.100**	**115**	**195,0**	*15,6*	**124,6**	*0,01*	**0,42**	0,41	Curva com AC pequeno - Raio aumentado para que coubessem as clotoides
15	*~~1.000~~*	**1.050**	**150**	**195,0**	*108,9*	**150,2**	*0,49*	**1,20**	0,71	Curva com AC pequeno - Raio aumentado para que coubessem as clotoides
16	*1.000*	**1.000**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,15**	0,66	
17, 18	*1.000*	**1.000**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,00**	0,51	Tangente entre as curvas ajustada Clotoides reversas unidas entre as curvas
19, 20	*1.000*	**1.000**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,11 a 1,19**	0,62 a 0,70	
21	*1.000*	**1.000**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,10**	0,61	Tangente entre esta curva e a próxima ajustada Clotoides reversas unidas entre as curvas
22	*~~1.000~~*	**1.100**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,10**	0,61	Curva com AC pequeno - Raio aumentado para que coubessem as clotoides Tangente entre esta curva e a anterior ajustada Clotoides reversas unidas entre as curvas
23 a 28 (6 curvas)	*1.000*	**1.000**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,11 a 1,28**	0,62 a 0,79	
29, 30	*1.000*	**1.000**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,40**	0,91	Tangente entre esta curva e a próxima ajustada Clotoides reversas unidas entre as curvas
31 a 37 (7 curvas)	*1.000*	**1.000**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,11 a 1,24**	0,62 a 0,75	
38	*2.000*	**2.000**	**125**	**195,0**	*15,6*	**135,4**	*0,01*	**0,39**	0,38	
39	*~~1.000~~*	**1.300**	**150**	**195,0**	*108,9*	**138,3**	*0,49*	**1,57**	1,08	Curva com AC muito pequeno - Raio aumentado para que coubessem as clotoides
40, 41	*1.000*	**1.000**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,12 a 1,17**	0,63 a 0,68	
42	*~~1.000~~*	**1.250**	**150**	**195,0**	*108,9*	**135,6**	*0,49*	**1,44**	0,95	Curva com AC muito pequeno - Raio aumentado para que coubessem as clotoides
43	*1.000*	**1.000**	**150**	**195,0**	*108,9*	**162,5**	*0,49*	**1,14**	0,65	
44	*600*	**600**	**150**	**151,3**	*85,9*	**126,1**	*0,51*	**1,20**	0,69	

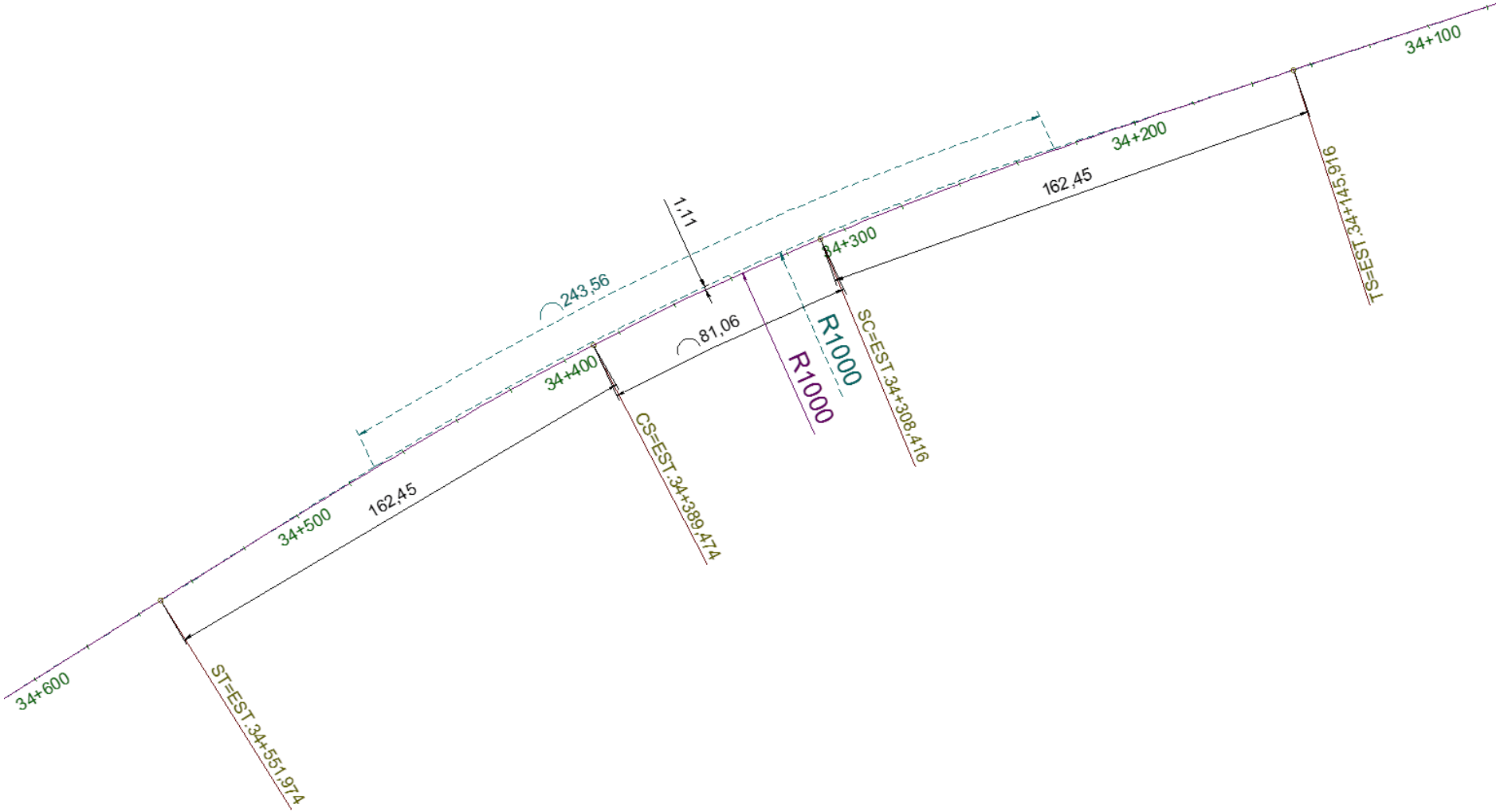


Figura 9.2 – Curva 12: Exemplo de alterações no traçado geométrico (caso típico) com a inserção das clotoides

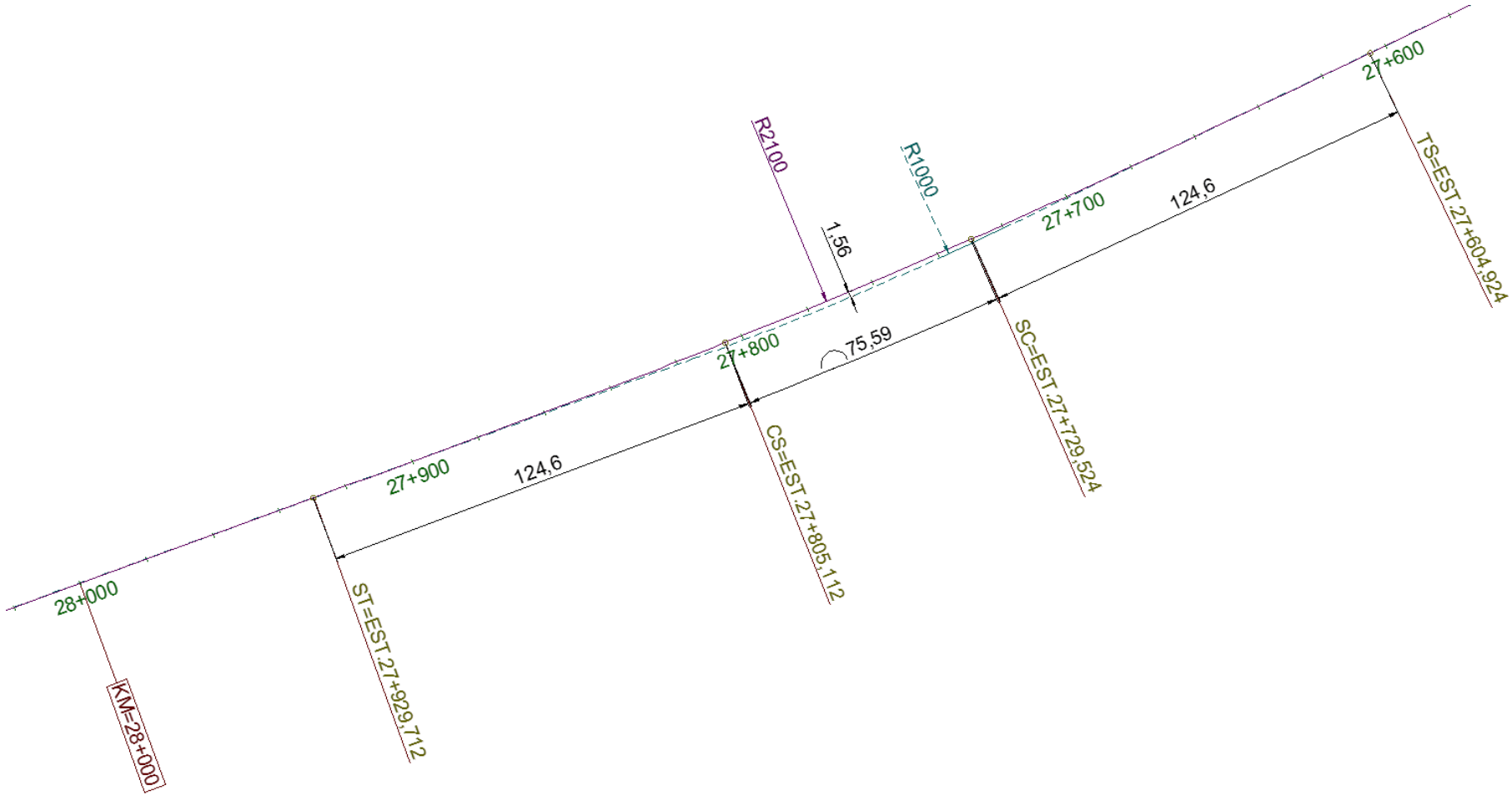


Figura 9.3 – Curva 5: Exemplo de alterações no traçado geométrico, com aumento do raio (de 1.000 m para 2.100 m) e inserção das clotoides

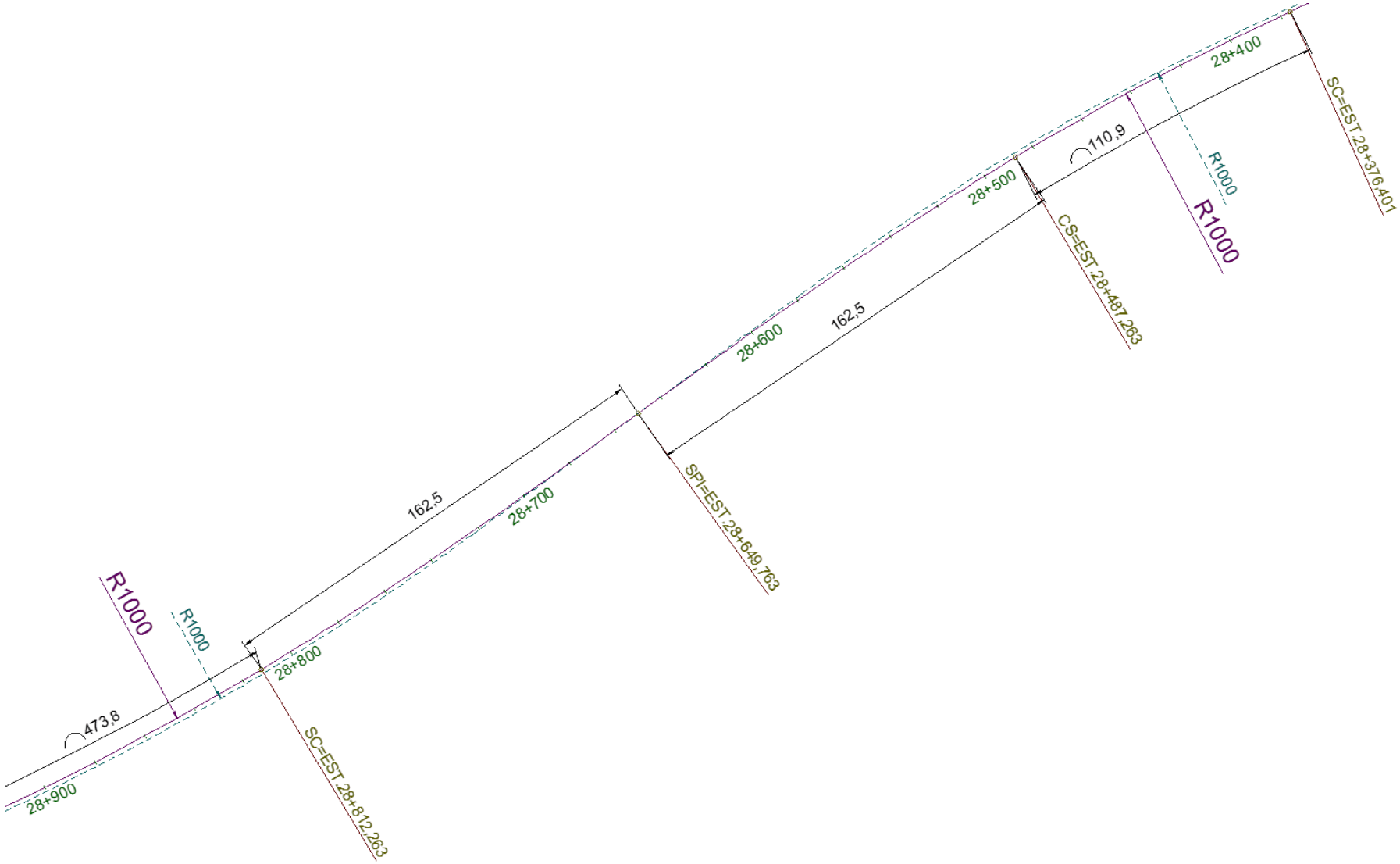


Figura 9.4 – Curvas 6 e 7: Exemplo de alterações no traçado geométrico, com modificação na tangente e inserção das clotoides unidas numa só transição

9.3.6.3 Discussão das alterações

As alterações necessárias e efetuadas no alinhamento horizontal mostraram as implicações da inserção de curvas de transição longas de modo a atender as necessidades de um veículo do tipo pendular. Além da inserção das clotoides longas em si, verificou-se a necessidade de alterações em curvas com ângulos centrais pequenos (e consequentemente desenvolvimentos curtos) e tangentes curtas.

Todas as alterações provocaram afastamentos laterais em relação ao alinhamento horizontal original proveniente do projeto funcional. Se fossem inseridas clotoides “normais”, para a velocidade de projeto prevista de 140 km/h (opção F-R) e que não previssem a operação de trens a uma velocidade incrementada, os afastamentos laterais resultantes seriam de em torno de 0,50 m.

Com a previsão de incremento de velocidades e as clotoides mais longas, esses mesmos afastamentos são da ordem de 1,10 m a 1,30 m para o caso mais frequente, da curva de raio R igual a 1.000 m. Para os outros casos, onde foi necessária alteração da tangente em curvas reversas e/ou aumento do raio, o afastamento lateral chega a 1,60 m. Em um caso específico no início do trecho, onde as curvas reversas de raio 400 m tiveram a tangente alterada e suas clotoides unidas por uma única transição, o afastamento chega a 3,30 m.

Apesar dos valores relativamente maiores de afastamentos laterais, essa ordem de grandeza ainda pode ser considerada pequena, não refletindo significativamente nos custos de implantação da futura ferrovia. Essa situação seria bastante diferente se a ferrovia já estivesse implantada – e dimensionada prevendo-se a velocidade de 140 km/h - e se desejasse fazer as alterações referidas de modo a incrementar a velocidade de operação. As modificações acarretariam então em desapropriações, cortes e aterros adicionais, implicações nas pontes, túneis e viadutos existentes, entre outros. Como mencionado pelos estudos do FACT (KUFVER, 2005), as alterações geométricas necessárias podem ser significativas em vias existentes.

Enquanto isso, conforme verificado pelo presente trabalho, na fase de projeto a inserção das clotoides mais longas é facilitada e sem implicações significativas nos custos de implantação, bastando fazer um estudo mais aprofundado. Ressalta-se a importância de fazer esse estudo e suas consequentes alterações no projeto

geométrico, de modo a prever um futuro aumento de velocidades por meio do uso de trens pendulares. Isso deve ser feito mesmo que o futuro emprego de trens pendulares esteja fora do escopo inicial de um dado projeto de nova linha, como também apontado pelas pesquisas do FACT (KUFVER, 2005).

9.3.6.4 Tabela e traçado do alinhamento horizontal modificado

A seguir, é mostrada a Tabela 9.8, contendo o alinhamento horizontal já com as modificações efetuadas, e as curvas de transição (clotoides) inseridas. Também é apresentado, em seguida, o desenho do traçado do intermédio (segmento B) em uma planta geral e em perfil (Figura 9.5).

Notar que as alterações provocaram uma mudança de apenas 25,7 m no desenvolvimento total do trecho, o que pode ser considerado pouco significativo. O alinhamento resultante, inclusive, será “alongado” em 25,7 m justamente para igualar o desenvolvimento do alinhamento original. Nas tabelas, os raios são mostrados com um sinal indicando sua direção (negativo correspondendo à esquerda, no sentido do estaqueamento). Os ângulos centrais mostrados são dos trechos em curva horizontal.

É relevante realçar que a divisão relativa em extensão dos elementos foi modificada com a inserção das clotoides. Anteriormente, 51,6% do alinhamento horizontal do projeto funcional era composto por tangentes, enquanto 48,4% era composto por curvas horizontais. Agora, ao longo dos 47.400 m de alinhamento horizontal, a divisão tornou-se:

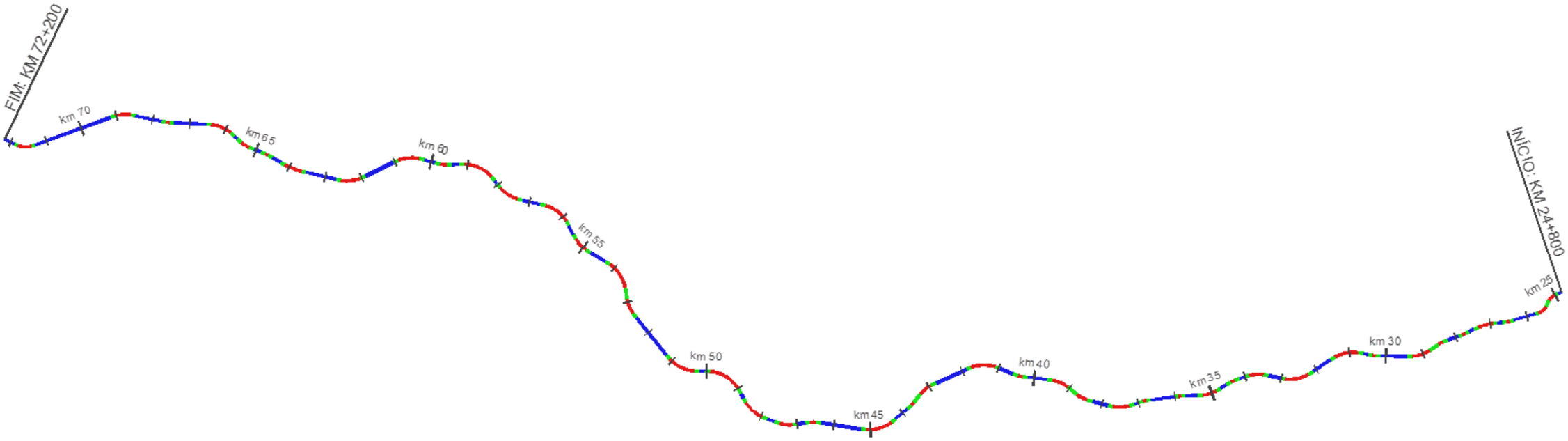
- Em torno de 17,4 km (36,7% do total) de via em tangente;
- Em torno de 13,5 km (28,5% do total) de via em curvas de transição (clotoides);
- Em torno de 16,5 km (34,7% do total) de via em curva horizontal.

Tabela 9.8 – Alinhamento horizontal do intermédio modificado

Elemento	Nº da curva	Est. Início	Est. Final	Desen-volvi-mento	Raio (início do elemento)	Direção da curva	Ângulo central (curva hor.)
				L	R'		AC
				(m)	(m)		(°)
Tangente		24+800,000	24+876,545	76,5	Inf.		
Espiral		24+876,545	24+979,445	102,9	Inf.		
Curva circular	1	24+979,445	25+204,940	225,5	-400	Esquerda	32,3
Espiral		25+204,940	25+307,840	102,9	-400		
Espiral		25+307,840	25+410,740	102,9	Inf.		
Curva circular	2	25+410,740	25+656,695	246,0	400	Direita	35,2
Espiral		25+656,695	25+759,595	102,9	400		
Tangente		25+759,595	26+360,608	601,0	Inf.		
Espiral		26+360,608	26+490,708	130,1	Inf.		
Curva circular	3	26+490,708	26+563,010	72,3	1.150	Direita	3,6
Espiral		26+563,010	26+693,110	130,1	1.150		
Tangente		26+693,110	26+800,821	107,7	Inf.		
Espiral		26+800,821	26+949,421	148,6	Inf.		
Curva circular	4	26+949,421	27+317,789	368,4	-1.500	Esquerda	14,1
Espiral		27+317,789	27+466,389	148,6	-1.500		
Tangente		27+466,389	27+604,924	138,5	Inf.		
Espiral		27+604,924	27+729,524	124,6	Inf.		
Curva circular	5	27+729,524	27+805,112	75,6	2.100	Direita	2,1
Espiral		27+805,112	27+929,712	124,6	2.100		
Tangente		27+929,712	28+213,901	284,2	Inf.		
Espiral		28+213,901	28+376,401	162,5	Inf.		
Curva circular	6	28+376,401	28+487,263	110,9	-1.000	Esquerda	6,4
Espiral		28+487,263	28+649,763	162,5	-1.000		
Espiral		28+649,763	28+812,263	162,5	Inf.		
Curva circular	7	28+812,263	29+286,051	473,8	1.000	Direita	27,1
Espiral		29+286,051	29+448,551	162,5	1.000		
Tangente		29+448,551	30+140,659	692,1	Inf.		
Espiral		30+140,659	30+280,359	139,7	Inf.		
Curva circular	8	30+280,359	30+353,107	72,7	1.100	Direita	3,8
Espiral		30+353,107	30+492,807	139,7	1.100		
Tangente		30+492,807	30+601,056	108,2	Inf.		
Espiral		30+601,056	30+763,556	162,5	Inf.		
Curva circular	9	30+763,556	31+396,682	633,1	-1.000	Esquerda	36,3
Espiral		31+396,682	31+559,182	162,5	-1.000		
Tangente		31+559,182	32+095,804	536,6	Inf.		
Espiral		32+095,804	32+258,304	162,5	Inf.		
Curva circular	10	32+258,304	32+891,368	633,1	1.000	Direita	36,3
Espiral		32+891,368	33+053,868	162,5	1.000		
Tangente		33+053,868	33+345,470	291,6	Inf.		
Espiral		33+345,470	33+507,970	162,5	Inf.		
Curva circular	11	33+507,970	33+867,150	359,2	-1.000	Esquerda	20,6
Espiral		33+867,150	34+029,650	162,5	-1.000		
Tangente		34+029,650	34+145,916	116,3	Inf.		
Espiral		34+145,916	34+308,416	162,5	Inf.		
Curva circular	12	34+308,416	34+389,474	81,1	-1.000	Esquerda	4,6
Espiral		34+389,474	34+551,974	162,5	-1.000		
Tangente		34+551,974	34+713,843	161,9	Inf.		
Espiral		34+713,843	34+876,343	162,5	Inf.		
Curva circular	13	34+876,343	35+238,909	362,6	1.000	Direita	20,8
Espiral		35+238,909	35+401,409	162,5	1.000		
Tangente		35+401,409	35+707,667	306,3	Inf.		
Espiral		35+707,667	35+832,267	124,6	Inf.		
Curva circular	14	35+832,267	35+903,546	71,3	-2.100	Esquerda	1,9
Espiral		35+903,546	36+028,146	124,6	-2.100		
Tangente		36+028,146	36+634,543	606,4	Inf.		
Espiral		36+634,543	36+784,743	150,2	Inf.		
Curva circular	15	36+784,743	36+863,119	78,4	-1.050	Esquerda	4,3
Espiral		36+863,119	37+013,319	150,2	-1.050		

Elemento	Nº da curva	Est. Início	Est. Final	Desen-volvi-mento	Raio (início do elemento)	Direção da curva	Ângulo central (curva hor.)
				L	R'		AC
				(m)	(m)		(°)
Tangente		37+013,319	37+094,189	80,9	Inf.		
Espiral		37+094,189	37+256,689	162,5	Inf.		
Curva circular	16	37+256,689	37+688,737	432,0	1.000	Direita	24,8
Espiral		37+688,737	37+851,237	162,5	1.000		
Tangente		37+851,237	38+254,650	403,4	Inf.		
Espiral		38+254,650	38+417,150	162,5	Inf.		
Curva circular	17	38+417,150	38+721,302	304,2	1.000	Direita	17,4
Espiral		38+721,302	38+883,802	162,5	1.000		
Espiral		38+883,802	39+046,302	162,5	Inf.		
Curva circular	18	39+046,302	39+491,616	445,3	-1.000	Esquerda	25,5
Espiral		39+491,616	39+654,116	162,5	-1.000		
Tangente		39+654,116	40+161,505	507,4	Inf.		
Espiral		40+161,505	40+324,005	162,5	Inf.		
Curva circular	19	40+324,005	40+429,356	105,4	1.000	Direita	6,0
Espiral		40+429,356	40+591,856	162,5	1.000		
Tangente		40+591,856	40+945,508	353,7	Inf.		
Espiral		40+945,508	41+108,008	162,5	Inf.		
Curva circular	20	41+108,008	41+742,715	634,7	-1.000	Esquerda	36,4
Espiral		41+742,715	41+905,215	162,5	-1.000		
Tangente		41+905,215	42+775,413	870,2	Inf.		
Espiral		42+775,413	42+937,913	162,5	Inf.		
Curva circular	21	42+937,913	43+282,987	345,1	-1.000	Esquerda	19,8
Espiral		43+282,987	43+445,487	162,5	-1.000		
Espiral		43+445,487	43+607,987	162,5	Inf.		
Curva circular	22	43+607,987	43+685,451	77,5	1.100	Direita	4,0
Espiral		43+685,451	43+847,951	162,5	1.100		
Tangente		43+847,951	44+245,291	397,3	Inf.		
Espiral		44+245,291	44+407,791	162,5	Inf.		
Curva circular	23	44+407,791	45+105,171	697,4	1.000	Direita	40,0
Espiral		45+105,171	45+267,671	162,5	1.000		
Tangente		45+267,671	46+326,130	1058,5	Inf.		
Espiral		46+326,130	46+488,630	162,5	Inf.		
Curva circular	24	46+488,630	46+625,186	136,6	-1.000	Esquerda	7,8
Espiral		46+625,186	46+787,686	162,5	-1.000		
Tangente		46+787,686	46+959,574	171,9	Inf.		
Espiral		46+959,574	47+122,074	162,5	Inf.		
Curva circular	25	47+122,074	47+460,819	338,7	1.000	Direita	19,4
Espiral		47+460,819	47+623,319	162,5	1.000		
Tangente		47+623,319	47+810,633	187,3	Inf.		
Espiral		47+810,633	47+973,133	162,5	Inf.		
Curva circular	26	47+973,133	48+543,334	570,2	1.000	Direita	32,7
Espiral		48+543,334	48+705,834	162,5	1.000		
Tangente		48+705,834	48+825,679	119,8	Inf.		
Espiral		48+825,679	48+988,179	162,5	Inf.		
Curva circular	27	48+988,179	49+893,541	905,4	-1.000	Esquerda	51,9
Espiral		49+893,541	50+056,041	162,5	-1.000		
Tangente		50+056,041	50+187,584	131,5	Inf.		
Espiral		50+187,584	50+350,084	162,5	Inf.		
Curva circular	28	50+350,084	51+061,613	711,5	1.000	Direita	40,8
Espiral		51+061,613	51+224,113	162,5	1.000		
Tangente		51+224,113	52+504,677	1280,6	Inf.		
Espiral		52+504,677	52+667,177	162,5	Inf.		
Curva circular	29	52+667,177	53+060,514	393,3	1.000	Direita	22,5
Espiral		53+060,514	53+223,014	162,5	1.000		
Espiral		53+223,014	53+385,514	162,5	Inf.		
Curva circular	30	53+385,514	54+125,358	739,8	-1.000	Esquerda	42,4
Espiral		54+125,358	54+287,858	162,5	-1.000		
Tangente		54+287,858	54+747,222	459,4	Inf.		

Elemento	Nº da curva	Est. Início	Est. Final	Desen-volvi-mento	Raio (início do elemento)	Direção da curva	Ângulo central (curva hor.)
				L	R'		AC
				(m)	(m)		(°)
Espiral		54+747,222	54+909,722	162,5	Inf.		
Curva circular	31	54+909,722	55+288,797	379,1	1.000	Direita	21,7
Espiral		55+288,797	55+451,297	162,5	1.000		
Tangente		55+451,297	55+682,288	231,0	Inf.		
Espiral		55+682,288	55+844,788	162,5	Inf.		
Curva circular	32	55+844,788	56+550,943	706,2	-1.000	Esquerda	40,5
Espiral		56+550,943	56+713,443	162,5	-1.000		
Tangente		56+713,443	57+176,836	463,4	Inf.		
Espiral		57+176,836	57+339,336	162,5	Inf.		
Curva circular	33	57+339,336	57+874,148	534,8	1.000	Direita	30,6
Espiral		57+874,148	58+036,648	162,5	1.000		
Tangente		58+036,648	58+123,150	86,5	Inf.		
Espiral		58+123,150	58+285,650	162,5	Inf.		
Curva circular	34	58+285,650	59+084,742	799,1	-1.000	Esquerda	45,8
Espiral		59+084,742	59+247,242	162,5	-1.000		
Tangente		59+247,242	59+423,622	176,4	Inf.		
Espiral		59+423,622	59+586,122	162,5	Inf.		
Curva circular	35	59+586,122	59+741,378	155,3	1.000	Direita	8,9
Espiral		59+741,378	59+903,878	162,5	1.000		
Tangente		59+903,878	60+180,214	276,3	Inf.		
Espiral		60+180,214	60+342,714	162,5	Inf.		
Curva circular	36	60+342,714	60+898,075	555,4	-1.000	Esquerda	31,8
Espiral		60+898,075	61+060,575	162,5	-1.000		
Tangente		61+060,575	61+876,064	815,5	Inf.		
Espiral		61+876,064	62+038,564	162,5	Inf.		
Curva circular	37	62+038,564	62+546,943	508,4	1.000	Direita	29,1
Espiral		62+546,943	62+709,443	162,5	1.000		
Tangente		62+709,443	63+521,630	812,2	Inf.		
Espiral		63+521,630	63+657,030	135,4	Inf.		
Curva circular	38	63+657,030	64+131,307	474,3	2.000	Direita	13,6
Espiral		64+131,307	64+266,707	135,4	2.000		
Tangente		64+266,707	64+515,349	248,6	Inf.		
Espiral		64+515,349	64+653,649	138,3	Inf.		
Curva circular	39	64+653,649	64+722,407	68,8	-1.300	Esquerda	3,0
Espiral		64+722,407	64+860,707	138,3	-1.300		
Tangente		64+860,707	65+056,890	196,2	Inf.		
Espiral		65+056,890	65+219,390	162,5	Inf.		
Curva circular	40	65+219,390	65+444,529	225,1	1.000	Direita	12,9
Espiral		65+444,529	65+607,029	162,5	1.000		
Tangente		65+607,029	65+693,831	86,8	Inf.		
Espiral		65+693,831	65+856,331	162,5	Inf.		
Curva circular	41	65+856,331	66+406,564	550,2	-1.000	Esquerda	31,5
Espiral		66+406,564	66+569,064	162,5	-1.000		
Tangente		66+569,064	67+423,455	854,4	Inf.		
Espiral		67+423,455	67+559,055	135,6	Inf.		
Curva circular	42	67+559,055	67+626,693	67,6	1.250	Direita	3,1
Espiral		67+626,693	67+762,293	135,6	1.250		
Tangente		67+762,293	68+461,383	699,1	Inf.		
Espiral		68+461,383	68+623,883	162,5	Inf.		
Curva circular	43	68+623,883	69+015,208	391,3	-1.000	Esquerda	22,4
Espiral		69+015,208	69+177,708	162,5	-1.000		
Tangente		69+177,708	71+308,839	2131,1	Inf.		
Espiral		71+308,839	71+434,939	126,1	Inf.		
Curva circular	44	71+434,939	71+786,074	351,1	600	Direita	33,5
Espiral		71+786,074	71+912,174	126,1	600		
Tangente		71+912,174	72+200,000	287,8	Inf.		



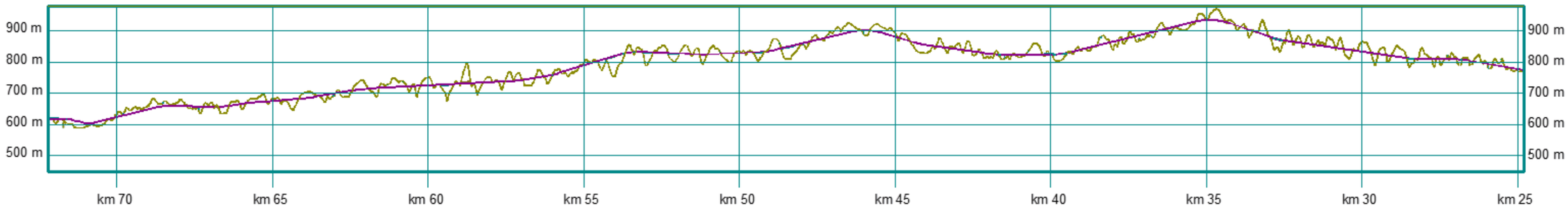


Figura 9.5 – Planta e perfil do trecho do intermédio (segmento B) modificado, com as clotoides inseridas

9.3.7 Alinhamento vertical

O alinhamento vertical original do projeto funcional deverá sofrer pouca ou nenhuma alteração em função do incremento de velocidades. O perfil do terreno e o alinhamento vertical podem ser verificados pela

Figura 9.5, anterior.

Como ressaltado por Pita (2006), as ferrovias de trens de passageiros habitualmente devem ter rampas máximas desejáveis de 2%, com rampas máximas excepcionais em trechos localizados montanhosos de até 4%. De fato, o projeto funcional do intermédio segue premissas parecidas, com uma rampa máxima desejável de 2,5% e um caso localizado com uma rampa de 3,36%, efetivamente num subtrecho especialmente montanhoso. Por conta disso não serão feitas alterações no alinhamento vertical.

Assim como acontece nas curvas horizontais, as curvas de concordância vertical resultam numa aceleração centrífuga agindo sobre o passageiro. A aceleração centrífuga nas curvas verticais é geralmente avaliada com relação ao diferencial imposto à aceleração gravitacional, que naturalmente sempre atua. Essa aceleração depende, então, se a curva é côncava (somando-se ao valor da gravidade) ou convexa (subtraindo-se do valor da gravidade). A aceleração centrífuga na curva vertical é mais desconfortável para o passageiro nas curvas convexas.

Pita (2006) afirma que, de acordo com a experiência corrente, as acelerações verticais referidas devem se situar no intervalo de 0,2 a 0,4 m/s², não devendo este último valor ser excedido.

Exprimindo isto por fórmulas, tem-se a Equação 9.4:

$$a_c^v = \ddot{z} = \frac{V^2}{12{,}96 \cdot R_v}$$

$$R_v = \frac{V^2}{12{,}96 \cdot \ddot{z}}$$

Equação 9.4 – Aceleração centrífuga numa curva vertical e raio mínimo correspondente

Sendo acima a velocidade V em km/h, o raio vertical R_v em m e a aceleração vertical à qual o passageiro estará sujeito a_c^v ou $\ddot{z}$ em m/s².

O parâmetro K_v numa curva vertical parabólica representa o comprimento necessário em metros que comporte uma variação de 1% no greide. Sabe-se que, de maneira prática, pode-se obter o menor raio vertical local R_v bastando-se multiplicar o parâmetro K_v por 100. A curva vertical parabólica se aproxima da curva circular e é comum no meio ferroviário usar esta última no lugar da parábola para fazer a concordância entre as tangentes.

As curvas verticais do traçado original apresentam seus parâmetros K_v geralmente acima de 200, com alguns casos em torno de 140, e dois casos excepcionais com um mínimo de 78,1 no final do trecho. Esses valores correspondem, respectivamente, a raios R_v iguais a 20.000, 14.000 e 7.810 m. Considerando-se a velocidade máxima incrementada de 195 km/h, a Equação 9.4 retorna valores para a aceleração $\ddot{z}$ de, respectivamente, 0,15 m/s², 0,21 m/s² e 0,38 m/s² para esses três raios.

Resulta assim que os valores decorrentes dos raios verticais estão dentro dos limites aceitáveis expressos por Pita, não sendo necessárias alterações nas curvas verticais por conta disso. A norma EN 13803-1 (CEN, 2010) apresenta limites mais flexíveis, conforme deduzido:

- Limite normal de 0,22 m/s² para os dois tipos de curva vertical;
- Limites excepcionais de 0,59 m/s² para curvas côncavas e 0,48 m/s² para curvas convexas.

É importante ressaltar que os trens pendulares apresentam uma implicação adicional, interveniente com o alinhamento vertical. A inclinação da caixa do veículo nas curvas faz com que uma componente maior da resultante incida verticalmente sobre o passageiro, em relação ao plano em que ele se situa. Picos de aceleração vertical podem influenciar no fenômeno do enjoo de movimento ou cinetose (PERSSON, 2011). Essa implicação é analisada nas considerações sobre o conforto do passageiro, no item B.2.2 do Apêndice B.

A Tabela 9.9 a seguir apresenta o alinhamento vertical. Por convenção, os valores de K_V e R_V negativos representam curvas verticais convexas; os valores positivos representam curvas verticais côncavas.

Tabela 9.9 – Alinhamento vertical do intermédio modificado

Elemento	Nº da curva	Est. Início	Est. Final	Desenvol-vimento	Parâmetro da curva vertical	Raio da curva vertical	i% (entrada)	i% (saída)
				L	Kv	Rv		
				(m)	(m)	(m)		
Tangente		24+800	26+618	1.818,0			1,74	-
Curva vertical	V1	26+618	26+968	350,0	-222,6	-22.262	1,74	0,17
Tangente		26+968	28+293	1.325,0			0,17	-
Curva vertical	V2	28+293	28+593	300,0	234,5	23.452	0,17	1,44
Tangente		28+593	32+483	3.890,0			1,44	-
Curva vertical	V3	32+483	32+883	400,0	209,0	20.901	1,44	3,36
Tangente		32+883	34+202	1.319,0			3,36	-
Curva vertical	V4	34+202	35+402	1.200,0	-205,9	-20.592	3,36	-2,47
Tangente		35+402	39+305	3.902,5			-2,47	-
Curva vertical	V5	39+305	39+970	665,0	269,3	26.929	-2,47	0,00
Tangente		39+970	41+527	1.557,5			0,00	-
Curva vertical	V6	41+527	42+147	620,0	444,6	44.463	0,00	1,39
Tangente		42+147	43+862	1.715,0			1,39	-
Curva vertical	V7	43+862	44+412	550,0	344,6	34.464	1,39	2,99
Tangente		44+412	45+357	945,0			2,99	-
Curva vertical	V8	45+357	46+457	1.100,0	-203,6	-20.359	2,99	-2,41
Tangente		46+457	48+837	2.380,0			-2,41	-
Curva vertical	V9	48+837	49+337	500,0	246,7	24.671	-2,41	-0,39
Tangente		49+337	51+037	1.700,0			-0,39	-
Curva vertical	V10	51+037	51+237	200,0	272,5	27.250	-0,39	0,35
Tangente		51+237	53+277	2.040,0			0,35	-
Curva vertical	V11	53+277	53+777	500,0	-147,4	-14.744	0,35	-3,04
Tangente		53+777	55+827	2.050,0			-3,04	-
Curva vertical	V12	55+827	56+027	200,0	140,1	14.015	-3,04	-1,62
Tangente		56+027	57+037	1.010,0			-1,62	-
Curva vertical	V13	57+037	57+537	500,0	457,3	45.728	-1,62	-0,52
Tangente		57+537	61+957	4.420,0			-0,52	-
Curva vertical	V14	61+957	62+457	500,0	-420,8	-42.081	-0,52	-1,71
Tangente		62+457	63+647	1.190,0			-1,71	-
Curva vertical	V15	63+647	64+147	500,0	501,4	50.144	-1,71	-0,71
Tangente		64+147	65+257	1.110,0			-0,71	-
Curva vertical	V16	65+257	65+757	500,0	-692,0	-69.199	-0,71	-1,44
Tangente		65+757	66+367	610,0			-1,44	-
Curva vertical	V17	66+367	66+867	500,0	309,8	30.976	-1,44	0,18
Tangente		66+867	68+287	1.420,0			0,18	-
Curva vertical	V18	68+287	68+787	500,0	-186,7	-18.672	0,18	-2,50
Tangente		68+787	70+687	1.900,0			-2,50	-
Curva vertical	V19	70+687	71+087	400,0	79,1	7.906	-2,50	2,56
Tangente		71+087	71+437	350,0			2,56	-
Curva vertical	V20	71+437	71+637	200,0	-78,1	-7.815	2,56	0,00
Tangente		71+637	72+200	563,0			0,00	-

O alinhamento vertical originário do projeto funcional não sofreu alterações no seu desenvolvimento com a inserção das clotoides. A inserção, todavia, causa uma discrepância entre os alinhamentos horizontal e vertical, que no final corresponde a uma diferença de posicionamento do greide original de 25,7 m em relação ao traçado em planta. Para corrigir esse efeito sem precisar dimensionar novamente o alinhamento vertical, todas as estacas do greide original foram acrescidas de 13 m, ou seja, em torno de metade dessa diferença. Ao adotar essa solução prática, no pior caso visto (da curva vertical com K_v = 78,1) haveria uma diferença local de até 0,17% na inclinação, o que não é significativo.

9.3.8 Avaliação do conforto

Até este ponto foram feitas modificações no alinhamento horizontal, envolvendo por exemplo a alteração de alguns raios de curvas e o consequente encurtamento das curvas de transição associadas. Foi mencionada uma análise preliminar do conforto para o caso típico em 9.3.5.1, sendo esta detalhada no Apêndice B (item B.2.1) e sendo este caso típico o da curva de transição de 162,5 m para um raio igual a 1.000 m.

Essa análise do caso típico permanece válida, porém faz-se necessária uma análise caso a caso, para cada curva. A verificação do conforto dessa maneira seguirá as mesmas premissas usadas nas duas avaliações anteriores. Adicionalmente, haverá a consideração das implicações no conforto do passageiro decorrentes do alinhamento vertical e sua interação com o material rodante de caixa móvel.

A análise do conforto supracitada mais uma vez pode ser verificada no Apêndice B, pelo item B.2.2.

9.4 NOVAS SIMULAÇÕES DE MARCHA

O traçado do projeto geométrico funcional foi complementado, modificado e otimizado de maneira a possibilitar a operação tanto de trens convencionais como pendulares de sistema passivo e ativo (opções F-0, F-1 e F-2), principalmente com o dimensionamento das curvas de transição. Passa-se agora à verificação dos tempos de viagem possibilitados por cada opção. Essa verificação é feita através das simulações de marcha.

A simulação de marcha é um processo de verificação do desempenho de um veículo ao longo de todo um traçado (alinhamento horizontal e vertical). Para um caso específico de exemplo da operação de um veículo ferroviário, pode-se partir do estado inicial parado, acelerando-se até a velocidade de cruzeiro, fazendo acelerações e desacelerações pontuais (em curvas mais fechadas, paradas em estações, etc) e finalmente desacelerando-se até a parada final.

Essa simulação depende então de diversos fatores, como as características do traçado, os aspectos da composição como a potência instalada, os limites máximos de velocidade, aceleração e desaceleração, entre outros. Analisando de um modo semelhante, podem ser contabilizados o esforço trator e as resistências envolvidas. A partir da simulação de marcha, pode-se chegar a diversas conclusões, como o tempo total de viagem e o consumo energético da operação.

No presente trabalho, serão feitas simulações de marcha de uma maneira simplificada, pois o principal objetivo será verificar e comparar o desempenho das três opções de trens segundo as velocidades, obtendo-se a velocidade média no trecho do intermédio (segmento B) modificado e o tempo total de viagem.

As simulações de marcha foram efetuadas com o auxílio de planilhas do Excel, conforme o processo descrito a seguir. Foram extraídos os dados dos alinhamentos horizontal e vertical usando-se os programas AutoCAD Civil 3D e Bentley InRoads (PLANSERVI, 2012).

9.4.1 Restrições de velocidade devidas ao traçado geométrico

Primeiramente, os alinhamentos horizontal e vertical foram organizados de maneira que cada linha na planilha correspondesse a um trecho de até 1,0 m. Em cada um desses trechos, foram relacionados todos os fatores locais relevantes dos alinhamentos horizontal e vertical, e as estacas correspondentes.

Os fatores locais relativos ao alinhamento horizontal são o tipo de elemento geométrico horizontal (tangente, curva horizontal ou curva de transição), o raio R (m), a curvatura K local correspondente (m^{-1}) e a superelevação D (mm). Já os fatores locais relativos ao alinhamento vertical são o tipo de elemento geométrico vertical (tangente, ou curva de concordância vertical côncava ou convexa), o parâmetro de

curva vertical parabólica K_V (m), o raio mínimo correspondente R_V (m) e a inclinação do greide i (%).

Com os fatores organizados ao longo de todo o alinhamento, inicialmente foram construídos gráficos que determinassem as chamadas restrições de velocidade civil para cada opção de operação. Essas velocidades máximas foram calculadas seguindo as mesmas premissas usadas anteriormente para o dimensionamento do alinhamento horizontal. Ou seja, para cada opção de operação, calculou-se a restrição de velocidade em cada ponto, usando-se na Equação 4.9 as insuficiências de superelevação I (mm) determinadas para cada opção no item 9.3.1 (através da Tabela 9.4). Notar que os parâmetros do alinhamento vertical não influenciam nesta definição da velocidade civil.

Os resultados encontrados foram corrigidos, de modo a considerar o comprimento dos trens – ou seja, embora a parte frontal do trem pudesse acelerar ao entrar numa tangente, sua parte traseira ainda poderia estar numa curva horizontal ou de transição e a velocidade aumentada provocaria desconforto aos passageiros que lá estivessem. Foi considerado um comprimento médio de 93,5 m da composição, o mesmo usado no projeto funcional.

São mostrados a seguir a planilha de trabalho (parcial) com as restrições de velocidade calculadas (Tabela 9.10) e o Gráfico 9.10 resultante, com as restrições de velocidade ao longo de todo o trecho do intermédio.

Tabela 9.10 – Exemplo parcial da planilha de trabalho para cálculo das restrições de velocidade

Est. Início	ALINHA-MENTO VERTICAL	i% local	ALINHA-MENTO HORI-ZONTAL	Curva-tura K local (x1000)	Raio local (m)	Superele vação D local	Opções de Operação - Restrição de velocidade (km/h)					
							Convencional		Pendular passivo		Pendular ativo	
							F-0		F-1		F-2	
							Máxima insuficiência de superelevação I (mm)					
							100		200		300	
34+304,000	Curva vert	2,863	Espiral	-0,973	-1027,9	-145,9	146,4	146,4	173,6	173,6	195,0	195,0
34+305,000	Curva vert	2,858	Espiral	-0,979	-1021,5	-146,8	146,2	146,2	173,3	173,3	195,0	195,0
34+306,000	Curva vert	2,853	Espiral	-0,985	-1015,1	-147,8	146,0	146,0	173,0	173,0	195,0	195,0
34+307,000	Curva vert	2,848	Espiral	-0,991	-1008,8	-148,7	145,8	145,8	172,7	172,7	195,0	195,0
34+308,000	Curva vert	2,843	Espiral	-0,997	-1002,6	-149,6	145,6	145,6	172,3	172,3	195,0	195,0
34+308,416	Curva vert	2,841	Curva circ	-1,0	-1000,0	-150,0	145,6	145,6	172,2	172,2	195,0	195,0
34+309,000	Curva vert	2,838	Curva circ	-1,0	-1000,0	-150,0	145,6	145,6	172,2	172,2	195,0	195,0
34+310,000	Curva vert	2,834	Curva circ	-1,0	-1000,0	-150,0	145,6	145,6	172,2	172,2	195,0	195,0
34+311,000	Curva vert	2,829	Curva circ	-1,0	-1000,0	-150,0	145,6	145,6	172,2	172,2	195,0	195,0
34+312,000	Curva vert	2,824	Curva circ	-1,0	-1000,0	-150,0	145,6	145,6	172,2	172,2	195,0	195,0

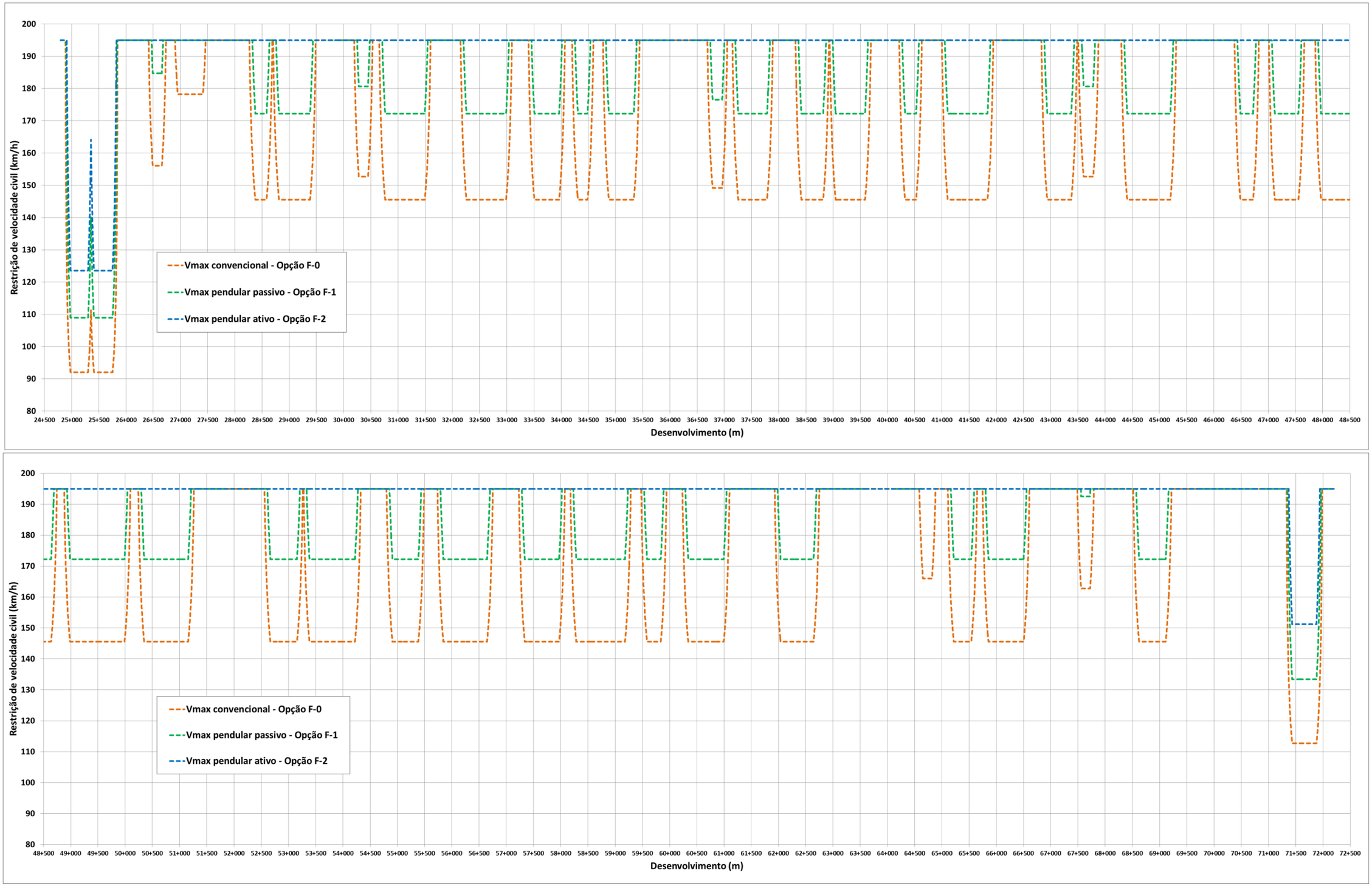


Gráfico 9.1 - Restrições de velocidade ao longo do trecho analisado, para as três opções de operação F-0, F-1 e F-2

Nota-se que as restrições de velocidade fazem com que haja apenas alguns trechos – na região das tangentes – onde os trens convencionais e os trens pendulares de sistema passivo podem desempenhar a velocidade máxima, estipulada para o incremento de velocidade como igual a 195 km/h. Os trens pendulares de sistema ativo, ao contrário, podem trafegar na velocidade máxima de 195 km/h ao longo de praticamente todo o trecho analisado.

9.4.2 Potência instalada

A potência instalada numa composição é essencial para a simulação de marcha, pois principalmente em função dela que será definido o esforço trator ao qual a mesma estará sujeita, o que afeta as acelerações alcançáveis. As desacelerações alcançáveis também sofrem influência da potência instalada, dada a disposição de freios elétricos nos trens modernos.

Os trens regionais e intercidades necessitam de uma potência instalada menor quando comparados com os trens de alta velocidade. Isso ocorre pois os TAVs só conseguem chegar às suas velocidades máximas com uma potência maior instalada. Por exemplo, o SNCF TGV 2N2 ou Euroduplex, um trem de alta velocidade da Alstom em serviço desde 2011 na França e em Marrocos, tem uma potência instalada de 9.400 kW. Este trem também tem uma grande relação de potência por quilograma quando vazio, de 24,74 W/kg, e atinge a velocidade máxima de 320 km/h (WIKIPEDIA, 2014h).

De maneira semelhante, os trens regionais e intercidades têm potência instalada tipicamente menor que os trens pesados urbanos, como os do Metrô. Isso se deve ao fato de que os trens urbanos necessitam de uma potência elevada para desenvolver altas acelerações e desacelerações entre as estações, de modo a trafegar na velocidade de cruzeiro por mais tempo e possibilitar *headways* cada vez menores. Fora isso, é consideravelmente maior o número de passageiros no trem urbano, aumentando consequentemente seu peso, que no trem regional.

No projeto funcional, foi adotada uma potência instalada de até 2.600 kW para as simulações de marcha. Foi prevista alimentação elétrica externa, que possibilita alcançar velocidades superiores que a alimentação diesel autônoma, além de ser uma solução menos poluente (embora mais cara, com a instalação da catenária). Foram

simulados cenários com 50% de motorização (correspondendo a 1.300 kW de potência instalada) e 100% de motorização (2.600 kW de potência instalada).

Para referência da potência de um trem pendular de sistema ativo, o chamado novo Pendolino de modelo ETR 600 da Alstom (Figura 9.6) tem uma potência instalada de 5.500 kW. Este trem está em operação desde 2008 e é considerado um trem de alta velocidade, atingindo 250 km/h de velocidade máxima. A composição no caso é formada por 7 carros, sendo 4 motores e 3 trailers (WIKIPEDIA, 2014d).

Figura 9.6 – Trem pendular ativo da Alstom – Novo pendolino, ETR 600 (LEFERROVIE.IT, 2014)

Já para referência de um trem pendular de sistema passivo, tem-se o Talgo 250 (Figura 9.7). Este tem uma potência instalada total de 4.800 kW, por meio de duas locomotivas em suas extremidades (cada qual com uma potência de 2.400 kW), atingindo uma velocidade máxima de 250 km/h – podendo portanto também ser considerado um trem de alta velocidade (TALGO, 2011).

Figura 9.7 – Trem pendular passivo da Talgo – Talgo 250 (REVISTA ELETRÔNICA TAV, 2014)

Quanto a uma referência para o trem convencional, tem-se o Desiro ML, que foi usado no projeto funcional com até 2.600 kW de potência instalada e que atinge 160 km/h de velocidade máxima. Para as considerações a seguir, entretanto, serão levados em conta também trens convencionais de maior potência, que estão disponíveis no mercado e atingem velocidades de até 200 km/h.

Dadas essas referências, e considerando que o objetivo do trabalho é verificar as velocidades incrementadas de 140 km/h para até 195 km/h, resulta necessário analisar potências maiores nas composições que as adotadas no projeto funcional, contudo sem chegar aos níveis de potência instalada dos trens de alta velocidade. Dessa maneira, trabalhar-se-á nas simulações de marcha com 4 alternativas de motorização para cada opção operacional, resultando em 12 cenários a serem simulados, constituindo a Tabela 9.11.

Tabela 9.11 – Potências instaladas adotadas[10]

Alternativa de motorização (para qualquer uma das opções de operação)	Potência instalada na composição		Aceleração longitudinal inicial (máxima)
	(kW)	(%)	(m/s²)
a	1.300	50%	0,70
b	2.600	100%	0,80
c	3.900	150%	0,90
d	5.200	200%	1,00

Foram verificados valores de referência de aceleração longitudinal inicial (máxima) em brochuras comerciais como a do trem Desiro ML da Siemens (2011). Esse valor pode variar dependendo do projeto do material rodante; trens urbanos, por exemplo, são projetados para terem acelerações iniciais elevadas, devido ao grande número de paradas em sua operação.

[10] A enunciação dos valores de potência instalada para as alternativas c e d como “150%” e “200%” pode parecer estranha ou mesmo errada, pois normalmente o valor de 100% já representa a motorização de todos os truques da composição. Entretanto, essa pequena corruptela de valores será adotada, de modo a dar continuidade ao raciocínio iniciado no projeto funcional, facilitando comparações e evidenciando que a potência instalada é maior que as adotadas anteriormente.

Para as simulações, foram associados valores estimados da aceleração em função da potência com base nas referências das brochuras comerciais. Como visto na Tabela 9.11, quanto maior a potência, maior a aceleração inicial (máxima). Há uma imprecisão inerente a essa estimativa, porém como será visto a seguir, a relevância da aceleração inicial é pequena nas simulações de marcha, sendo mais impactante o valor da potência instalada. Além disso, será considerada a velocidade inicial no trecho do intermédio igual a 70 km/h, do mesmo modo que foi feito para as simulações originais no projeto funcional.

Será definido um esforço de frenagem de serviço, de maneira que a composição freie sempre em 1,00 m/s² em todos os casos, o que será possível por meio da frenagem elétrica (dinâmica) complementada quando necessário por freio de atrito (CPTM, 2011). Isso corresponde mais uma vez ao que foi adotado nas simulações do projeto funcional.

9.4.3 Especificações técnicas adotadas

Para os 12 cenários, por simplicidade, adotar-se-ão especificações técnicas parecidas para os trens, estas semelhantes ao que foi adotado para o projeto funcional, e reunidas na Tabela 9.12 a seguir. Essencialmente, os trens associados a cada cenário diferirão em função da restrição de velocidade imposta, da potência instalada e, portanto, das acelerações possibilitadas. Como justificativa tem-se que os trens são em geral bastante parecidos quanto às outras características.

Tabela 9.12 – Especificações técnicas válidas para todos os trens (CPTM, 2011)

Velocidade máxima	200 km/h
Aceleração inicial máxima	0,7 a 1,0 m/s²
Desaceleração	1,0 m/s²
Número de carros	4
Peso (vazio)	176,0 t
Assentos	384
Peso por passageiro	70 kg
Peso total	202,9 t
Carga máxima por eixo	17 t
Potência de tração elétrica	1.300 a 5.200 kW

9.4.4 Curvas de motorização

As curvas de motorização permitem comparar o esforço trator com as forças resistentes envolvidas no movimento da composição e assim determinar velocidades e acelerações na simulação de marcha.

Serão elaboradas curvas de motorização usando-se as definições anteriores para cada cenário. Essas curvas serão baseadas na correspondente ao trem Desiro ML da Siemens, apresentada no Estudo de Caso Preliminar em 8.5.1 (Gráfico 8.8) e usada no projeto funcional. As novas curvas, porém, serão elaboradas considerando-se velocidades superiores, chegando a 200 km/h.

Simplificadamente, para encontrar o esforço trator, será considerada a massa da composição carregada (202,9 t) limitada pela aceleração inicial (0,7 a 1,0 m/s²) e levando em conta a fórmula da potência da física clássica.

Assim, sendo a potência P_t (W), a força F (N) e a velocidade V (m/s), tem-se como na Equação 9.5:

$$P_t = F \cdot V$$

Equação 9.5 – Potência conforme a física clássica

Quanto às resistências ao movimento inerentes aos trens, dever-se-ia adotar a fórmula de Davis. Entretanto, mais uma vez por simplificação, serão construídas retas baseadas no exemplo do trem da Siemens que retornem a resistência em função da velocidade. Para a consideração do efeito do aclive ou declive, pode-se trabalhar com a componente da gravidade (ou da força peso), bastando multiplicar esta pela declividade longitudinal (i%), criando as retas paralelas como no gráfico de exemplo.

É constituído então o Gráfico 9.2 a seguir, mostrando o esforço trator e a resistência ao movimento em função da velocidade, do greide e da potência instalada. No eixo secundário são mostradas as acelerações e desacelerações longitudinais impostas à composição também em função dos mesmos fatores. Estas podem ser encontradas dividindo-se o esforço trator ou a resistência ao movimento pela massa da composição carregada (202,9 t).

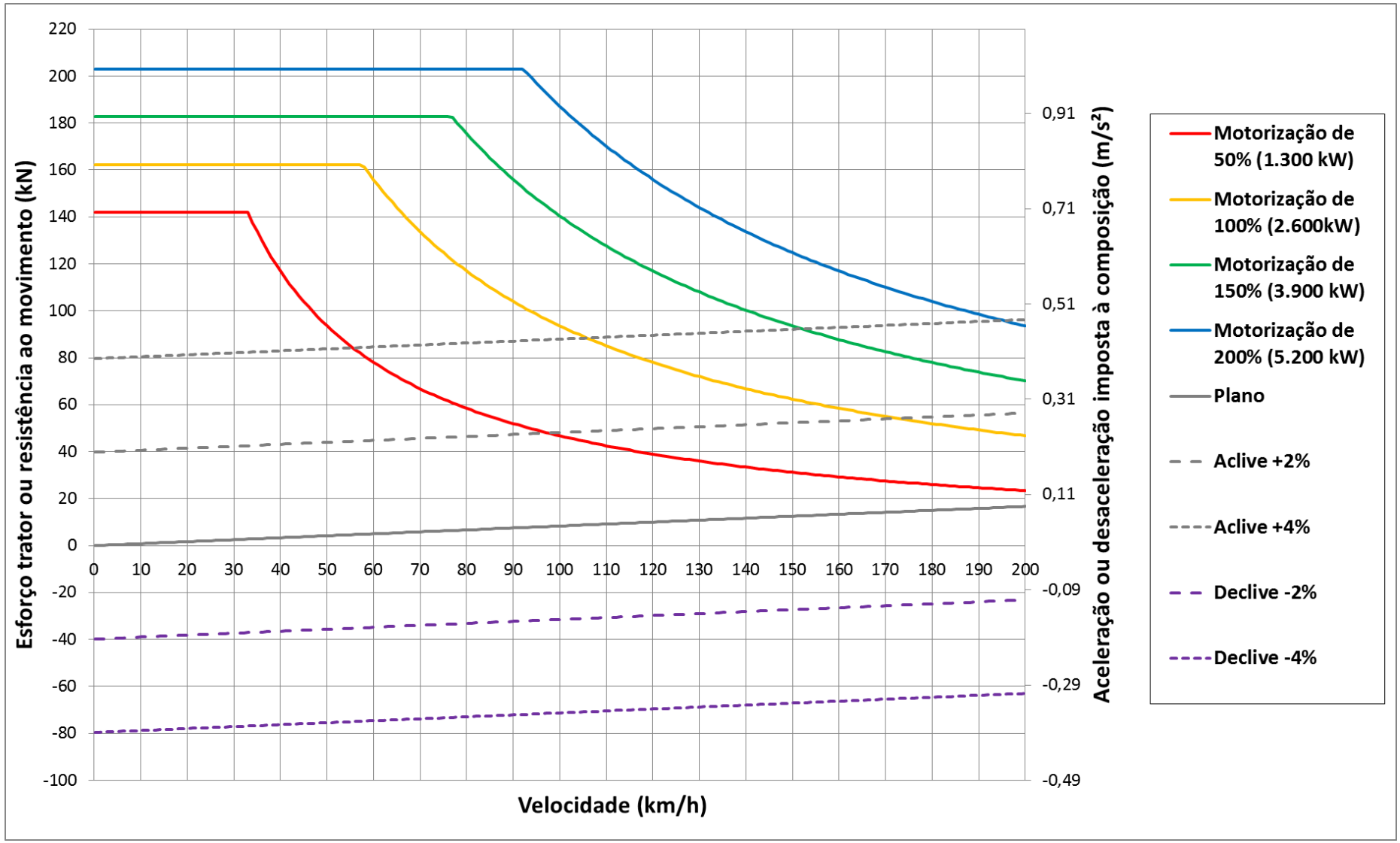


Gráfico 9.2 – Curvas de motorização – Esforço trator e resistência ao movimento (kN) – Acelerações e desacelerações impostas (m/s²)

9.4.5 Processo de simulação

Para gerar os gráficos de velocidade em função da posição e com isso calcular a velocidade média e o tempo total de viagem para cada opção, as simulações de marcha foram feitas conforme o processo descrito a seguir. O mesmo foi adotado nas 12 opções operacionais.

Com as restrições de velocidade determinadas a cada metro, em função do tipo de trem e organizadas em uma planilha, considerou-se que os trens partiam a 70 km/h da estaca inicial (km 24+800), correspondente à estação Brigadeiro Tobias, como no projeto funcional. Também conforme este, foi considerado que o trem para ao final do trajeto (km 72+200), na estação Amador Bueno.

A partir da estaca inicial, a velocidade foi progressivamente incrementada a cada metro, em função da aceleração máxima possível e respeitando-se as restrições de velocidade locais. As acelerações em cada ponto foram determinadas em função do esforço trator (que por sua vez é função principalmente da motorização adotada e suas limitações) e das resistências envolvidas (essas influenciadas pela resistência natural da composição e principalmente pelo greide). Isso foi feito até a estaca final do trecho.

Faltaria a consideração sobre as desacelerações máximas, pois neste ponto a simulação de marcha apresentaria desacelerações irreais ou extremamente desconfortáveis para o passageiro, somente seguindo as restrições de velocidade. Para restringir a desaceleração ao limite de 1,0 m/s², as desacelerações foram ajustadas desde a estaca final até a inicial, diminuindo assim as velocidades.

Finalmente, com a velocidade a cada metro, foi possível construir os gráficos das simulações de marcha e calcular o tempo total de viagem, este acumulado progressivamente. Com este tempo, foi calculada a velocidade média de viagem. Estes dois resultados, além dos gráficos em si, são os mais importantes para o presente estudo de caso.

9.4.6 Gráficos e resultados das simulações

9.4.6.1 Opção operacional F-0 – Trem convencional

A opção operacional com o trem convencional gerou o Gráfico 9.3 apresentado na página a seguir, onde constam as quatro alternativas de motorização (a, b, c e d) nas quais a potência instalada varia de 1.300 a 5.200 kW.

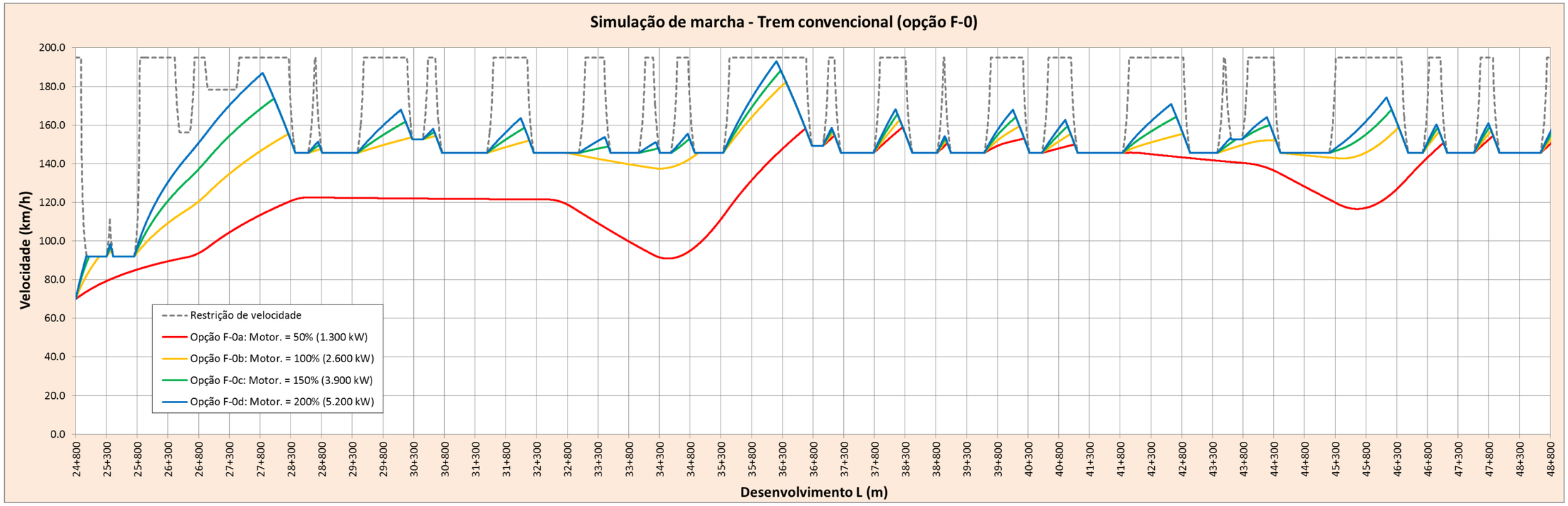
Neste ponto vale uma recapitulação das simulações de marcha efetuadas originalmente para o projeto funcional da ferrovia São Paulo - Sorocaba. Nestas, a velocidade máxima era de 140 km/h, e para os trens convencionais (caixa fixa) foram feitas simulações com 50% de motorização (potência instalada igual a 1.300 kW) e 100% de motorização (potência instalada igual a 2.600 kW). Estas simulações foram feitas em cima de alternativas de traçado sendo então analisadas, que naquele momento não estavam refinadas; o refinamento viria no projeto geométrico funcional, que foi utilizado como base do presente trabalho.

A Tabela 9.13 na sequência apresenta os resultados encontrados naquele estudo quanto ao tempo de viagem e velocidade média para a alternativa B232 do intermédio, que foi levada adiante para detalhamento. Ressalta-se que essa alternativa é um pouco menor em extensão, tendo 46,56 km, quando comparada com a utilizada no presente estudo de caso, que possui 47,4 km. Pode-se verificar novamente o Gráfico 8.9 no caso da opção com 50% de motorização.

Tabela 9.13 – Resumo das simulações de marcha originárias do projeto funcional – Trem convencional e traçado da alternativa B232 (CPTM, 2011)

Motorização		Tempo total de viagem	Veloci-dade média
(%)	kW	(min)	(km/h)
50%	1.300	21,4	130,4
100%	2.600	21,1	132,6

As novas simulações de marcha efetuadas no presente estudo de caso para a situação prevendo trens convencionais diferem das simulações de marcha originais em dois pontos: quanto às opções de maior motorização verificadas e quanto ao limite superior de velocidade adotado (195 km/h), embora haja as restrições de velocidade. O Gráfico 9.3 mostra as simulações para a primeira opção.



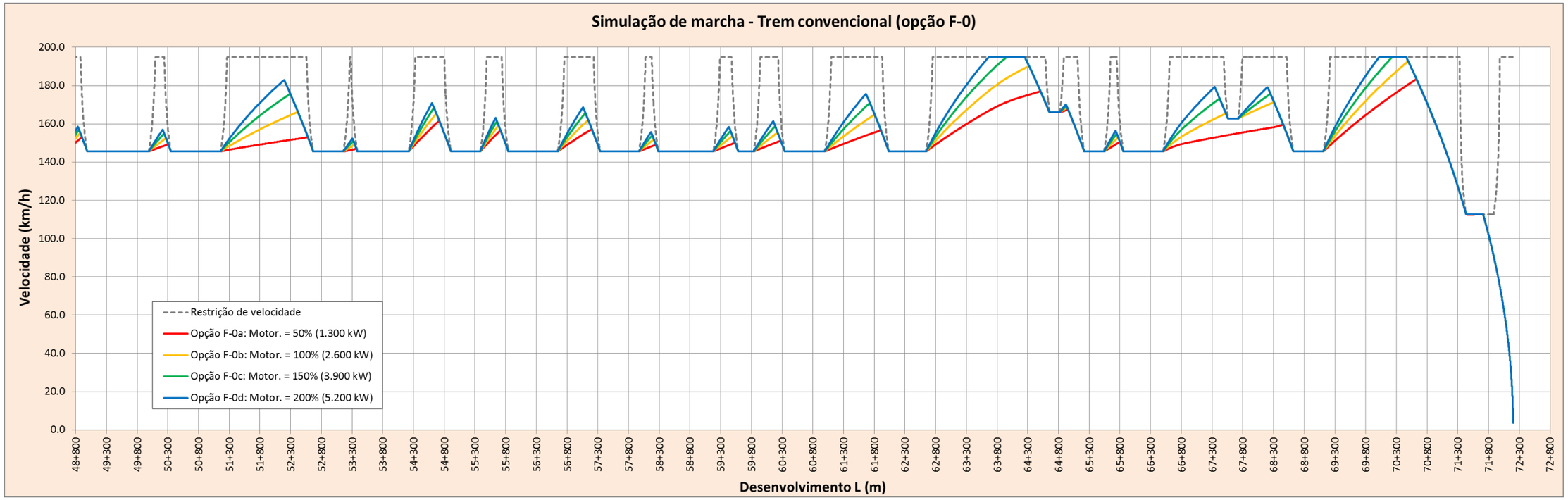


Gráfico 9.3 – Simulações de marcha para a opção operacional F-0 (trem convencional)

Resumem-se na Tabela 9.14 os tempos totais de viagem e as velocidades médias encontradas para as quatro alternativas da opção operacional F-0:

Tabela 9.14 – Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção F-0, com trem convencional)

Opção de operação	Motorização		Tempo total de viagem	Velocidade média
	(%)	(kW)		(km/h)
F-0a	50%	1.300	1.282 s 21,4 min	133,1
F-0b	100%	2.600	1.180 s 19,7 min	144,6
F-0c	150%	3.900	1.159 s 19,3 min	147,2
F-0d	200%	5.200	1.147 s 19,1 min	148,8

Comparando-se a Tabela 9.13 e a Tabela 9.14, conclui-se que o aumento do limite de velocidade por si só, de 140 km/h para 195 km/h, possibilita um aumento significativo da velocidade média no percurso e redução dos tempos de viagem, mas para isso é necessário um aumento da potência instalada na composição.

Para a opção F-0a, com 50% de motorização (1.300 kW de potência instalada), houve um aumento pouco significativo da velocidade média em relação à simulação equivalente estudada no projeto funcional, de +2,7 km/h ou +2,1%. O tempo total de viagem inclusive resultou o mesmo, apesar do alinhamento modificado em análise ser ligeiramente maior (em +840 m, ou +1,8%). Isso demonstra que apenas o aumento do limite de velocidade não implica imediatamente em velocidades médias maiores quando a potência instalada é mantida a mesma. Além disso, para o projeto funcional e com o limite de 140 km/h, a potência instalada designada de 50% de motorização é suficiente, como já havia sido avaliado nos estudos.

Já para a opção F-0b, com 100% de motorização (2.600 kW de potência instalada) percebe-se um salto significativo na velocidade média comparada com a contraparte do projeto funcional de mesmo nível: esta aumentou em +12,0 km/h ou 9,0%. Comparando-se as opções F-0b e F-0a entre si, o aumento foi semelhante, em +11,5 km/h ou +8,6%, com o tempo total de viagem variando em -1,7 min ou em -7,9%. Pode-se notar isso também através do Gráfico 9.3, onde as opções aparentam

um “descolamento” significativo entre si, principalmente até o km 36+800. No projeto funcional, o aumento da motorização de 50% para 100% não havia gerado aumento significativo da velocidade média, resultando em apenas +2,2 km/h ou +1,7%. Isso prova que para o traçado analisado o aumento do limite de velocidade permite que se explore como opção um aumento da potência instalada. Isto por sua vez resulta em uma maior velocidade média e um menor tempo total de viagem, por mais que ainda haja restrições significativas de velocidade aqui devidas à opção de operar com o trem convencional.

As opções operacionais com motorização ainda mais elevada (F-0c e F-0d) mostraram ganhos pouco significativos de velocidade média, o que pode ser verificado dessa vez pelo pouco “descolamento” nos gráficos. Isso revela uma perda de sensibilidade; o ponto ótimo quanto à motorização para a opção operacional F-0 estaria um pouco acima dos 2.600 kW de potência instalada.

9.4.6.2 Opção operacional F-1 – Trem pendular de sistema passivo

Como com o trem convencional, foi gerado o Gráfico 9.4 na página a seguir a partir das simulações de marcha prevendo a operação com o trem pendular de sistema passivo. Mais uma vez têm-se as alternativas de motorização a, b, c e d, de potência instalada variando de 1.300 kW a 5.200 kW. A Tabela 9.15, por sua vez, resume os tempos totais de viagem e as velocidades médias encontradas para cada alternativa.

Tabela 9.15 – Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção F-1, com trem pendular passivo)

Opção de operação	Motorização		Tempo total de viagem	Velocidade média
	(%)	(kW)		(km/h)
F-1a	50%	1.300	1.161 s 19,3 min	147,0
F-1b	100%	2.600	1.030 s 17,2 min	165,7
F-1c	150%	3.900	1.010 s 16,8 min	169,0
F-1d	200%	5.200	1.001 s 16,7 min	170,5

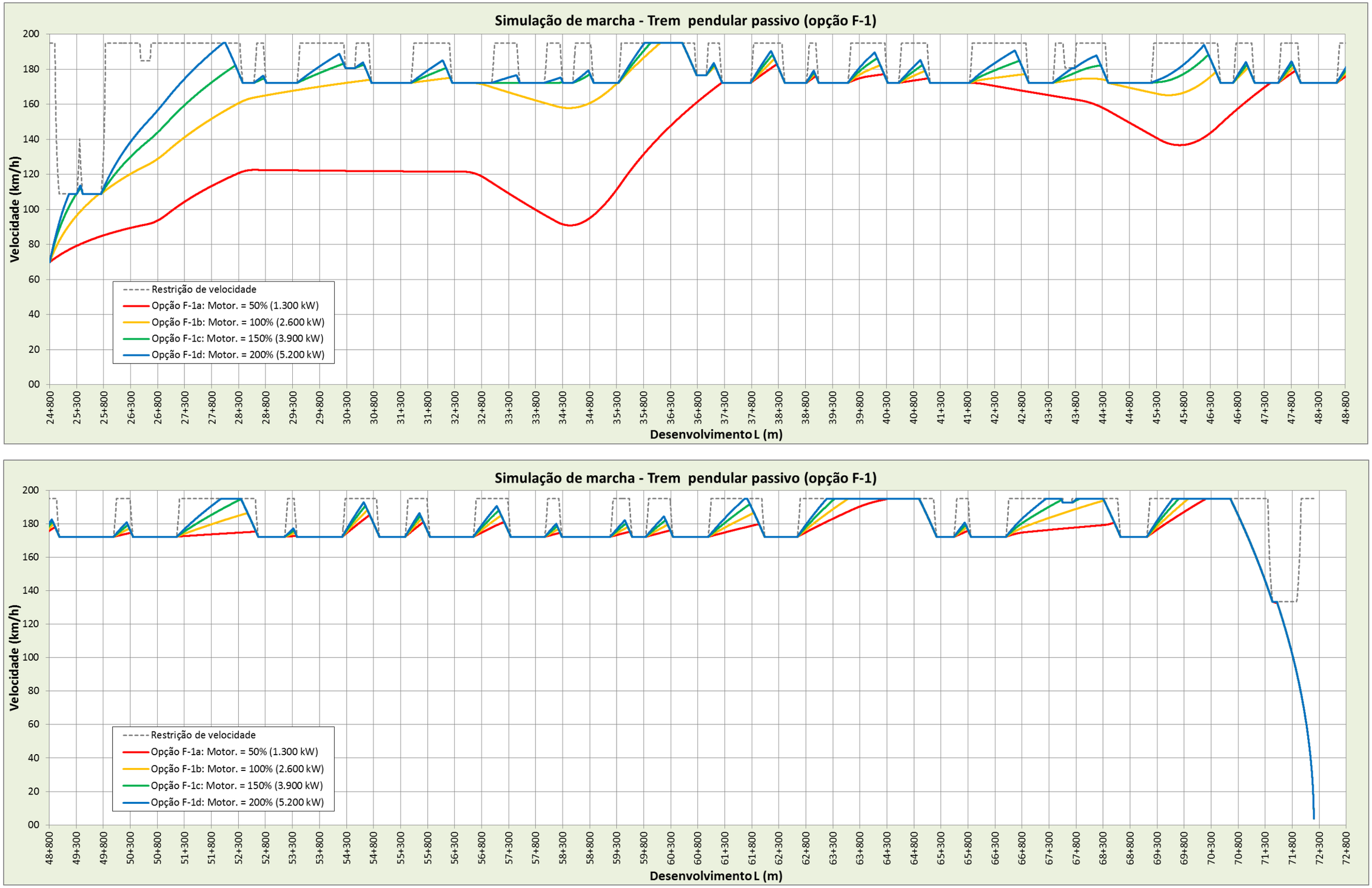


Gráfico 9.4 – Simulações de marcha para a opção operacional F-1 (trem pendular de sistema passivo)

Em relação à opção de operação com o trem convencional F-0, a opção F-1 diferencia-se basicamente quanto à restrição de velocidade aplicada. Como avaliado ao longo do trabalho, o trem pendular passivo pode trafegar ao longo das curvas de raio 1.000 m com uma velocidade de até 172,2 km/h, enquanto o trem convencional está limitado a 145,6 km/h.

Avaliando-se a tabela e o gráfico apresentados, podem ser verificados resultados internos semelhantes aos encontrados para a opção F-0. Mais uma vez a alternativa de menor motorização (F-1a, com 50% e 1.300 kW de potência instalada) apresenta um “descolamento” visível em relação aos outros três níveis no gráfico. A velocidade média, em função da motorização, apresenta então um salto significativo apenas se comparadas as opções F-1a e F-1b, como com o trem convencional. Isso representa um aumento de velocidade média de +18,7 km/h ou +12,7% de F-1a para F-1b. Enquanto isso, o tempo de viagem total em função da motorização é diminuído de 19,3 min para 17,2 min, o que representa uma variação de -2,1 min ou -10,9%. Para maiores motorizações, o aumento marginal de velocidade média é pequeno.

Comparando as opções F-1 e F-0 entre si, para cada nível de motorização, percebe-se um aumento significativo em todos os casos da velocidade média. Com 50% de motorização (1.300 kW de potência), o aumento da velocidade média da opção F-1a em relação à opção F-0a é de +13,9 km/h, ou +10,4%. Já para 100% de motorização (2.600 kW de potência), o aumento de velocidade média da opção F-1b em relação à opção F-0b é ainda maior, de +21,1 km/h ou +14,6%.

É interessante verificar que a velocidade média com a opção operacional prevendo o trem pendular passivo, mesmo para o menor nível de motorização (50%), ou seja, para a opção F-1a, é de 147,0 km/h. Essa velocidade é superior à do trem convencional com 100% de motorização (opção F-0b) e praticamente igual à deste com 150% de motorização (opção F-0c), que é de 147,2 km/h. Isso demonstra o potencial de usar o material rodante pendular ao invés de um material rodante convencional de maior motorização, quando da necessidade de aumentar a velocidade média num dado corredor. Naturalmente deve ser feita uma avaliação mais profunda de custos comparados.

9.4.6.3 Opção operacional F-2 – Trem pendular de sistema ativo

Por terceiro foi gerado o Gráfico 9.5, na página a seguir, a partir da simulação de marcha prevendo a operação do trem pendular de sistema ativo, e contemplando novamente os níveis de motorização de 1.300 kW a 5.200 kW (alternativas a, b, c e d). A Tabela 9.16 resume os resultados encontrados.

Tabela 9.16 - Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção F-2, com trem pendular ativo)

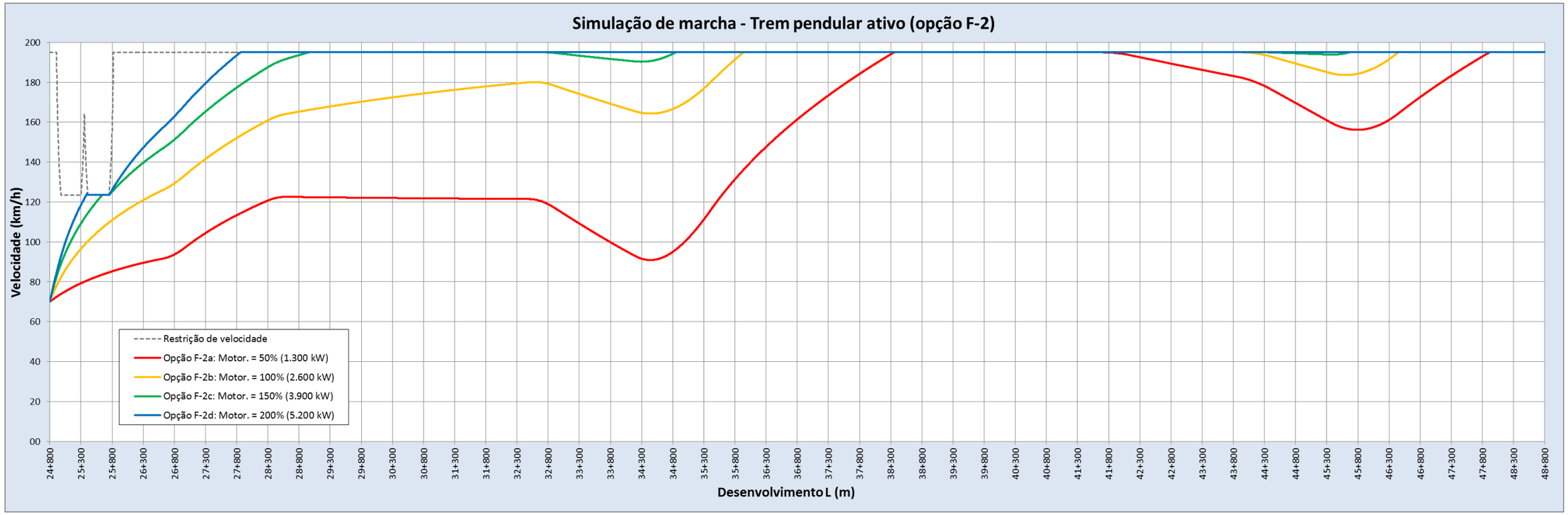
Opção de operação	Motorização		Tempo total de viagem	Velocidade média
	(%)	(kW)		(km/h)
F-2a	50%	1.300	1091 s 18,2 min	156,4
F-2b	100%	2.600	961 s 16,0 min	177,6
F-2c	150%	3.900	929 s 15,5 min	183,7
F-2d	200%	5.200	923 s 15,4 min	184,8

Como acontecido com a opção F-1, para a opção F-2 as diferenças são resultantes da restrição de velocidade devido ao sistema pendular ativo, que pelo gráfico é de 195 km/h ao longo de praticamente todo o trecho.

Os resultados internos desta opção operacional são semelhantes aos encontrados nas opções F-1 e F-0, com um salto mais significativo da velocidade média com o aumento da motorização somente da opção F-2a para a opção F-2b (conforme visível no gráfico). Neste caso, a velocidade média aumenta em +21,2 km/h ou +13,6%.

Comparando a opção F-2 com a opção F-0 (trem convencional) como referência, têm-se aumentos consideráveis da velocidade média. Para o nível de motorização de 50% (opções F-0a e F-2a), o aumento é de +23,4 km/h ou +17,6%. Já para o nível de 100% (opções F-0b e F-2b), o aumento chega a +33,0 km/h ou +22,9%; para níveis maiores de motorização, os aumentos são semelhantes.

Como com o material rodante de sistema passivo, o uso do material com sistema ativo apresenta aumento da velocidade média considerável em relação aos trens convencionais e ainda maior que no caso anterior.



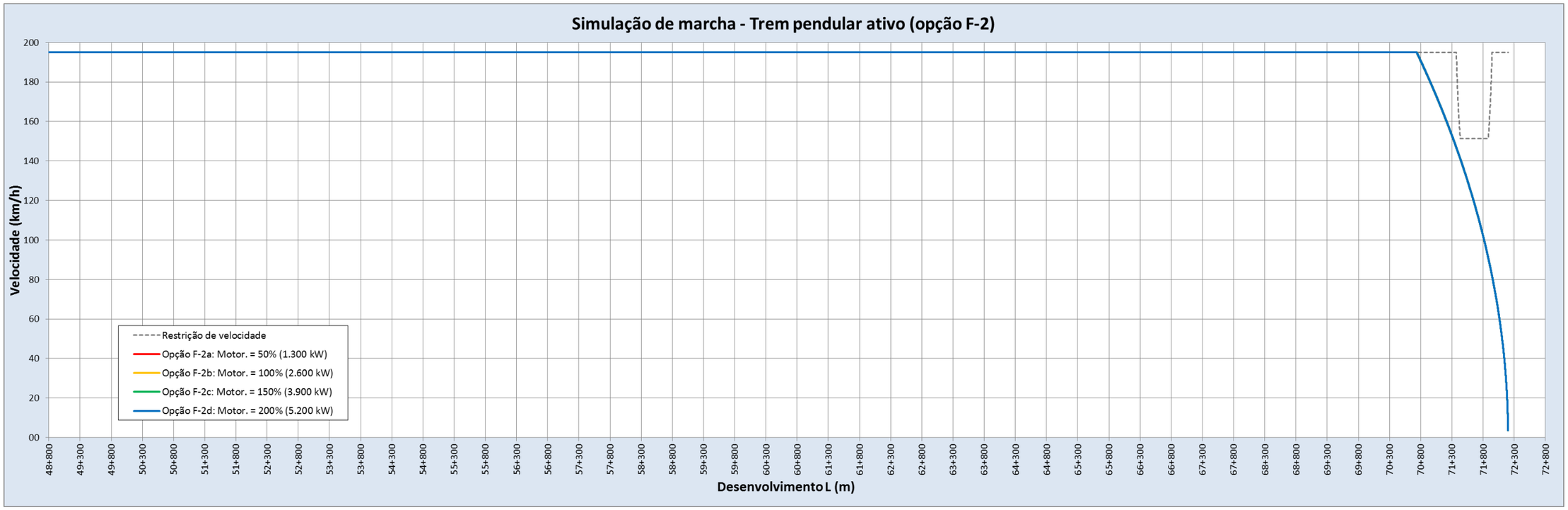


Gráfico 9.5 – Simulações de marcha para a opção operacional F-2 (trem pendular de sistema ativo)

Para o menor nível de motorização, de 50%, a velocidade média é de 156,4 km/h. Essa velocidade é maior que as avaliadas para as opções com trem convencional (F-0) mesmo com os maiores níveis de motorização, que chegam a 148,8 km/h. Novamente verifica-se o potencial de uso do material rodante pendular, no caso ativo, para aumento da velocidade média num dado percurso, devendo-se também avaliar os custos comparados – que, no caso do trem pendular ativo, podem ser mais pronunciados que os do material rodante de sistema passivo.

9.4.6.4 Comparação geral entre as diferentes opções operacionais

Para visualizar melhor a diferença entre as opções operacionais entre o material rodante convencional e os do tipo pendular (passivo e ativo), são apresentadas nas páginas seguintes os gráficos sobrepostos para os níveis de motorização igual a 50% e igual a 100% (Gráfico 9.6 e Gráfico 9.7). As diferenças observadas são então produto principalmente da restrição de velocidade associada a cada opção operacional. Os resultados de todos os cenários simulados são também organizados na Tabela 9.17 e na Tabela 9.18, a seguir. Nestas, é tomado o cenário F-0a como referência para os aumentos de velocidade média e diminuição do tempo total de viagem, este que representa a opção com trem convencional e 50% de motorização (1.300 kW).

Tabela 9.17 – Comparação das velocidades médias nos cenários simulados

		Nível de motorização			
		a	b	c	d
Opção de operação	Velocidade média (km/h)	1.300 kW	2.600 kW	3.900 kW	5.200 kW
		50%	100%	150%	200%
F-0	Trem convencional	133,1	144,6	147,2	148,8
F-1	Trem pendular passivo	147,0	165,7	169,0	170,5
F-2	Trem pendular ativo	156,4	177,6	183,7	184,8

		Nível de motorização			
		a	b	c	d
Opção de operação	Aumento da velocidade média em relação à referência (%)	1.300 kW	2.600 kW	3.900 kW	5.200 kW
		50%	100%	150%	200%
F-0	Trem convencional	100,0%	108,6%	110,6%	111,8%
F-1	Trem pendular passivo	110,4%	124,5%	127,0%	128,2%
F-2	Trem pendular ativo	117,6%	133,5%	138,0%	138,9%

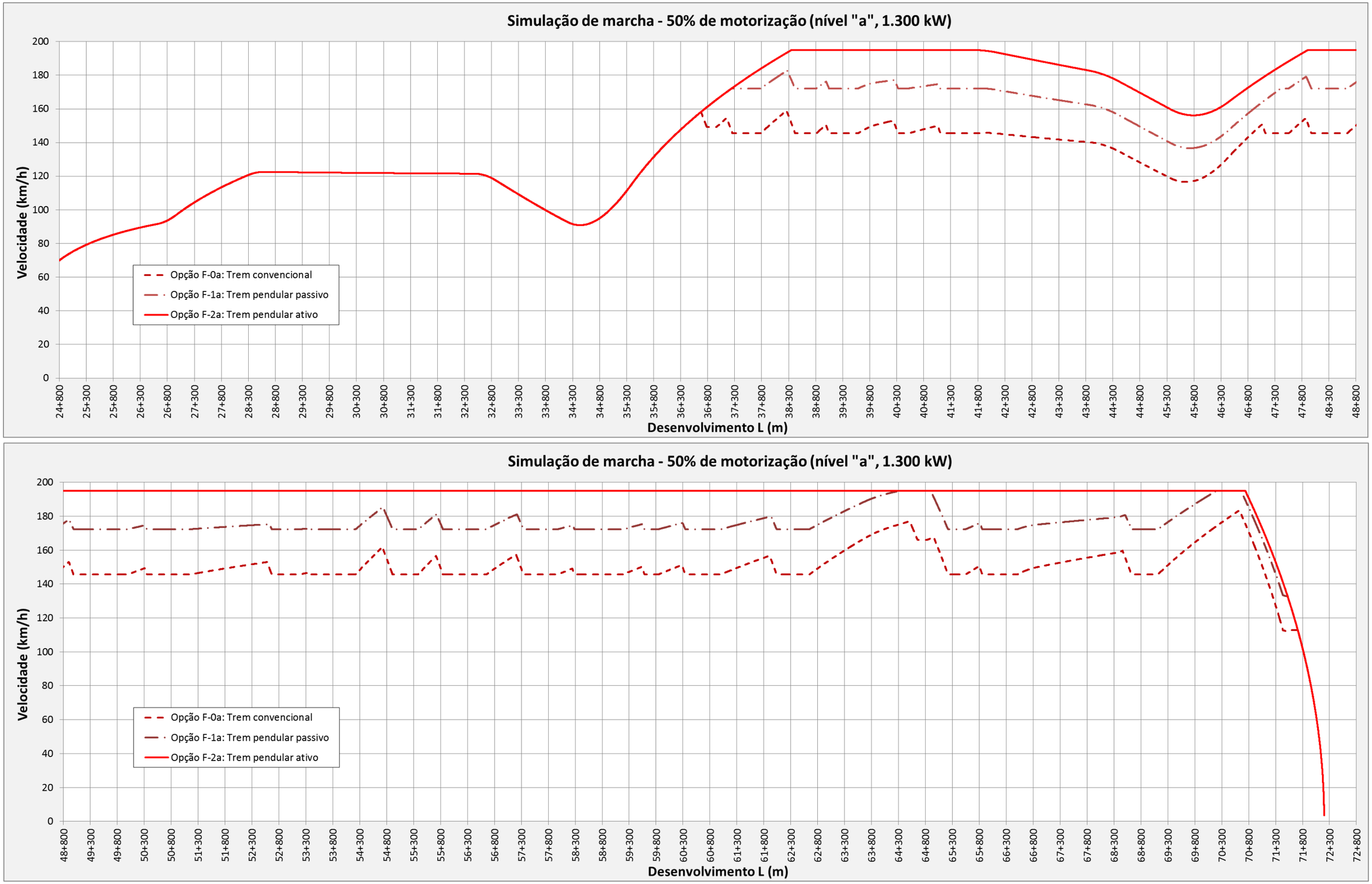


Gráfico 9.6 – Simulações de marcha das três opções operacionais comparadas para o nível de motorização de 50% (1.300 kW)

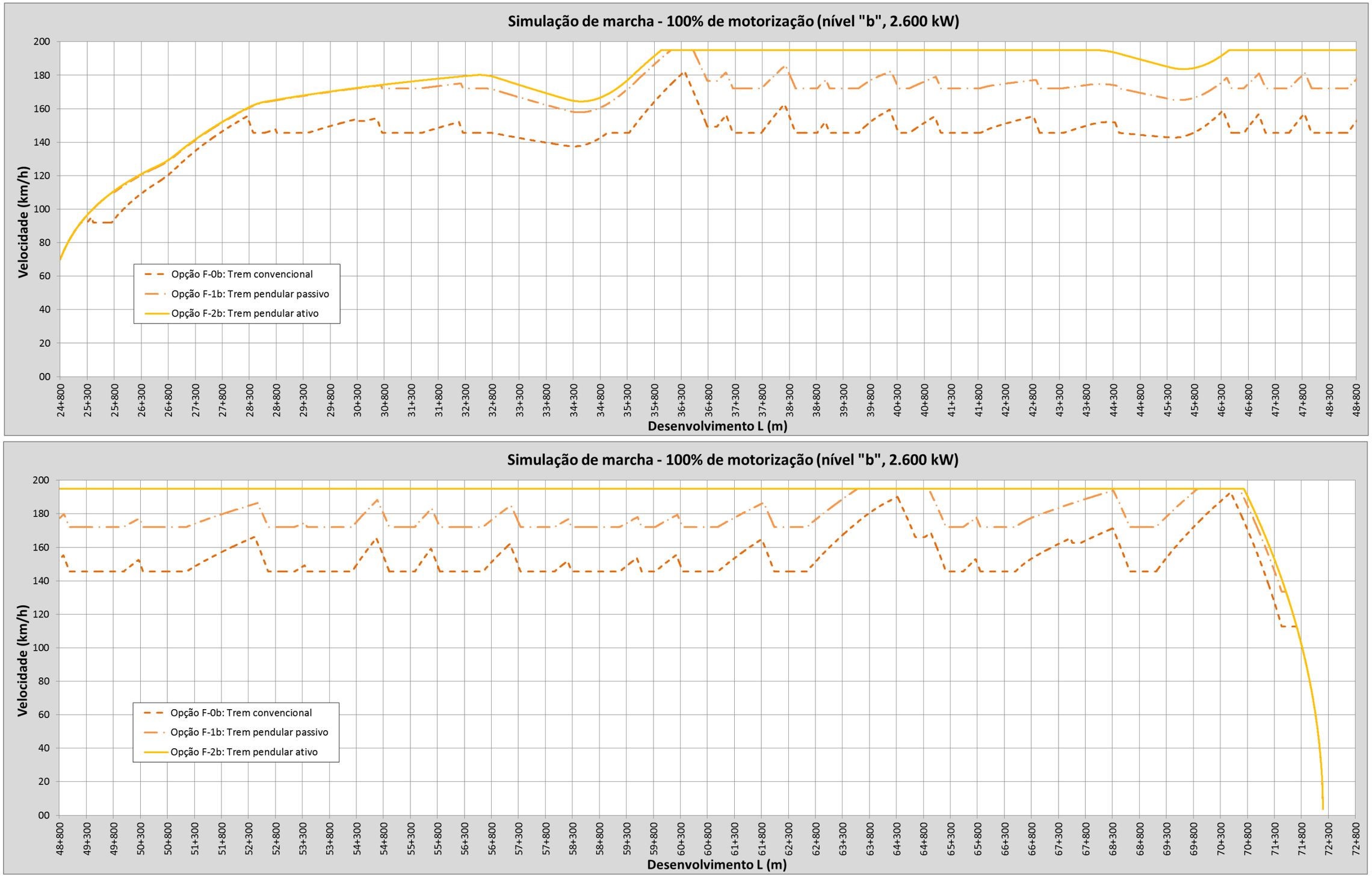


Gráfico 9.7 - Simulações de marcha das três opções operacionais comparadas para o nível de motorização de 100% (2.600 kW)

Tabela 9.18 – Comparação dos tempos totais de viagem nos cenários simulados

Opção de operação	Tempo de viagem (minutos)	Nível de motorização			
		a	b	c	d
		1.300 kW	2.600 kW	3.900 kW	5.200 kW
		50%	100%	150%	200%
F-0	Trem convencional	21,4	19,7	19,3	19,1
F-1	Trem pendular passivo	19,3	17,2	16,8	16,7
F-2	Trem pendular ativo	18,2	16,0	15,5	15,4

Opção de operação	Tempo de viagem em relação à referência	Nível de motorização			
		a	b	c	d
		1.300 kW	2.600 kW	3.900 kW	5.200 kW
		50%	100%	150%	200%
F-0	Trem convencional	100,0%	92,1%	90,4%	89,4%
F-1	Trem pendular passivo	90,5%	80,3%	78,7%	78,0%
F-2	Trem pendular ativo	85,1%	74,9%	72,4%	72,0%

Com os tempos totais de viagem, tem-se o Gráfico 9.8 e o Gráfico 9.9:

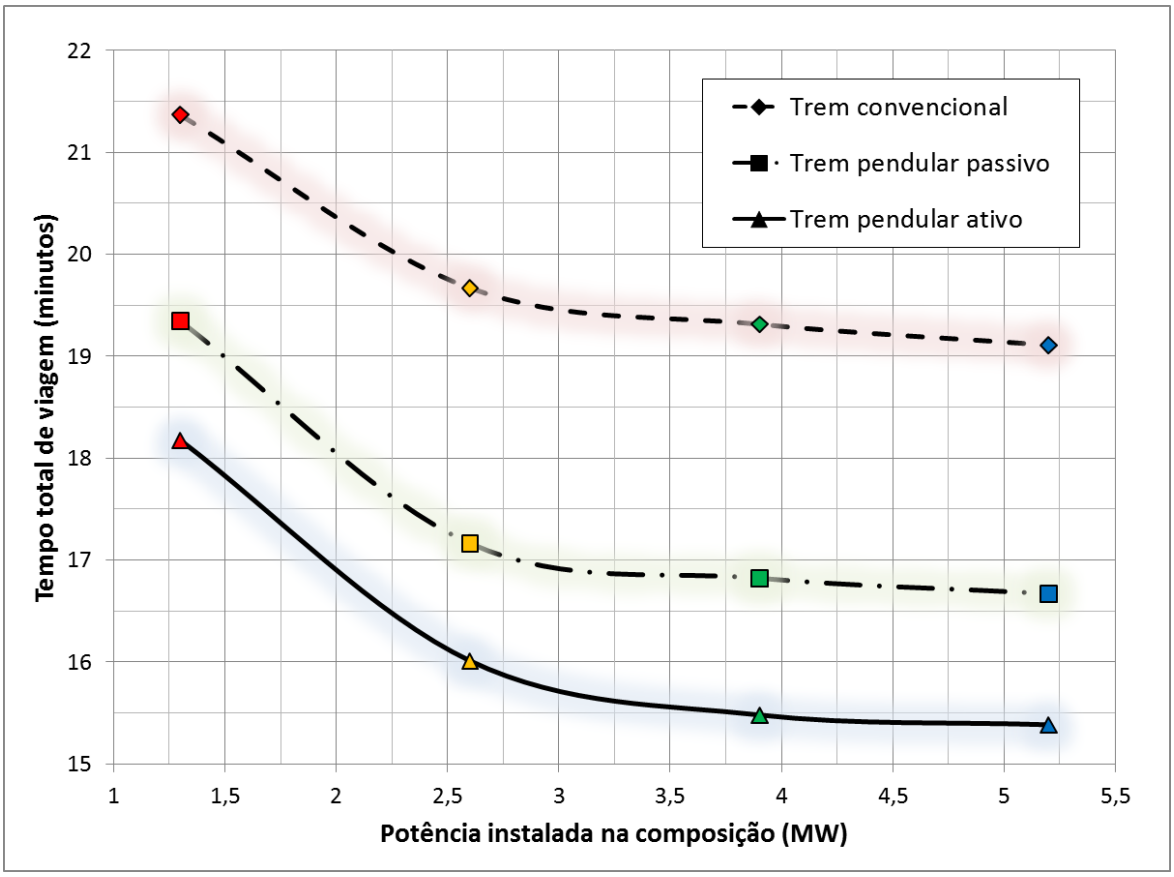


Gráfico 9.8 – Tempo total de viagem em função da potência instalada, para cada tipo de material rodante

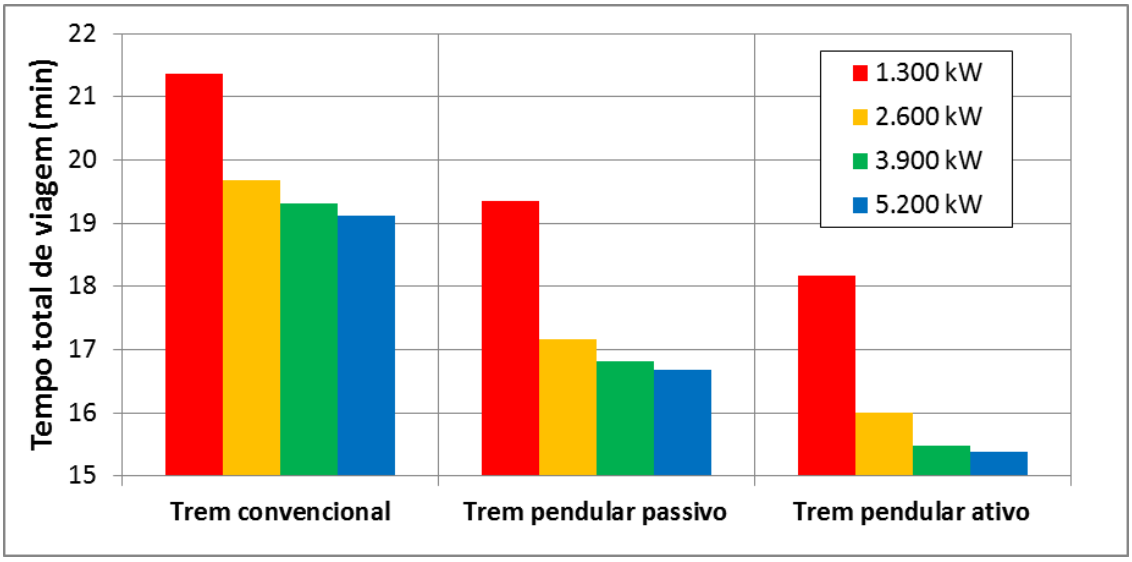


Gráfico 9.9 – Tempo total de viagem em função do material rodante, para cada nível de motorização

A superelevação teórica D_t praticada nas curvas é a mesma ao longo de grande parte do intermédio, para cada opção operacional até aqui analisada. Isso se deve ao fato da grande incidência da curva típica de raio R igual a 1.000 m e superelevação D igual a 150 mm. Com os resultados das simulações, pode-se agora construir um gráfico com o tempo total de viagem em função da superelevação teórica D_t de cada opção de material rodante.

Primeiro soma-se a superelevação D com a insuficiência de superelevação I para encontrar a superelevação teórica D_t em cada caso. Resgatando-se os valores da Tabela 9.4, tem-se dessa maneira:

- Para o trem convencional (opção F-0), D_t = 250 mm;
- Para o trem de sistema pendular passivo (opção F-1), D_t = 350 mm;
- Para o trem de sistema pendular ativo (opção F-2), D_t = 450 mm.

Elabora-se finalmente o Gráfico 9.10, a seguir. A partir dele pode ser estimado o potencial de diminuição do tempo total de viagem em função da superelevação teórica D_t, que alternativamente pode ser interpretada como a velocidade permissível nas curvas de raio igual a 1.000 m. Os valores mais altos de insuficiência I somente podem ser alcançados mediante a operação do material rodante com sistema pendular.

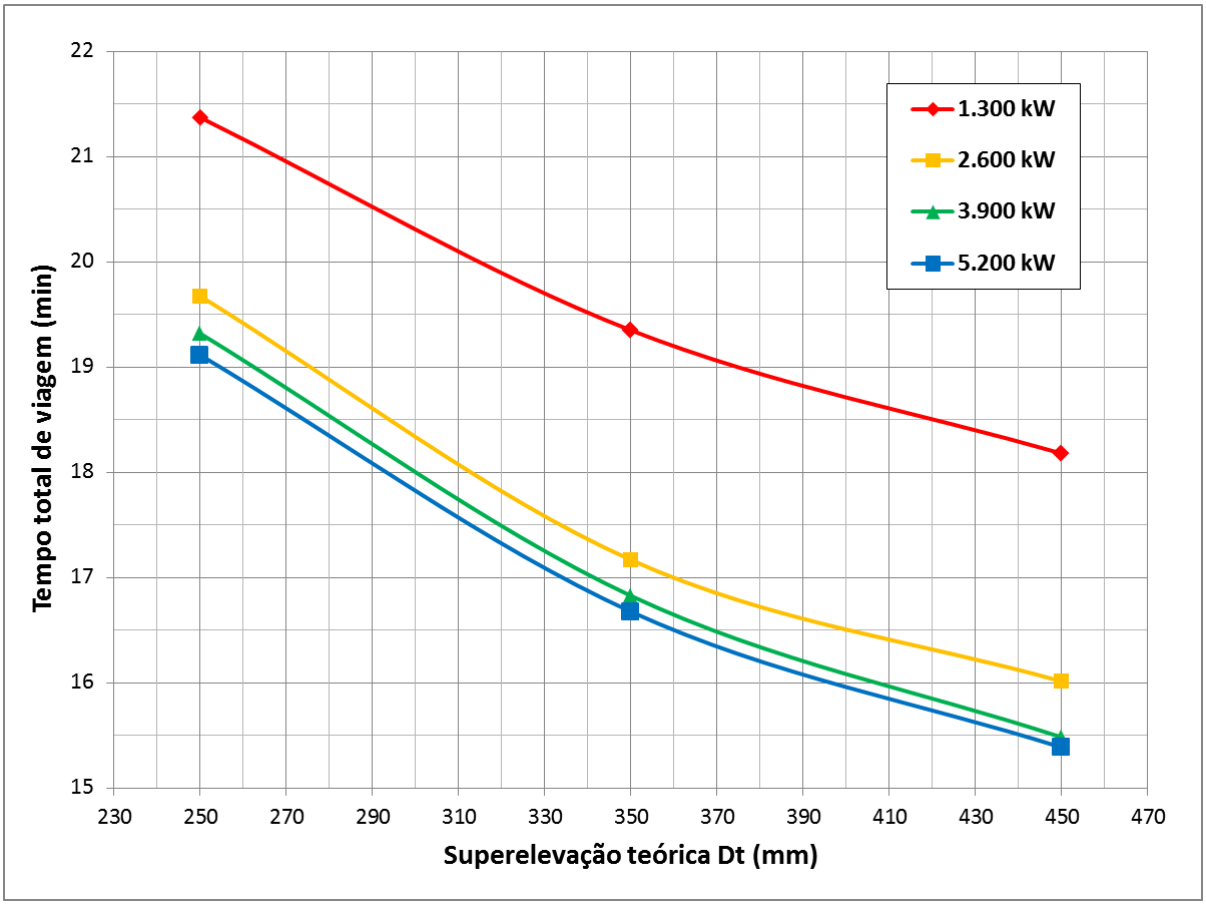


Gráfico 9.10 – Tempo total de viagem em função da superelevação teórica Dt, para cada nível de motorização

A partir deste último gráfico fica aparente como o aumento da motorização provoca ganhos em tempo de viagem em qualquer um dos casos, porém o uso do material rodante pendular apresenta ganhos significativos e relativamente maiores.

As curvas encontradas do tempo total de viagem em função da superelevação teórica D_t e da potência instalada na composição apresentam aspecto bastante semelhante às curvas encontradas num estudo de Persson (2008). Este estudo, por sua vez, é para o corredor entre Estocolmo e Gotemburgo, um dos mais importantes da Suécia, cujos resultados inclusive são discutidos no Estudo de Caso 2 do capítulo a seguir.

Por fim, com base no Gráfico 9.8 e nas planilhas de simulação elaboradas, foi efetuada uma análise de sensibilidade a fim de determinar um valor ótimo de potência instalada, para o caso do trem pendular ativo. Esta opção foi priorizada em relação às outras duas pois é a que possibilita os menores tempos de viagem, muito embora o ponto ótimo seja bastante parecido para as três curvas, dado que elas têm o mesmo

aspecto. Essa inferência do valor ótimo será importante posteriormente, quando os três estudos de caso do trabalho são comparados entre si.

Visualmente pode-se verificar pelo gráfico referido que o ponto ótimo se encontra entre 2.500 e 3.500 kW de potência instalada. Para uma determinação mais precisa, estipulou-se que o ponto ótimo no gráfico se daria quando o aumento marginal de 100 kW provocasse uma redução do tempo total de viagem menor que 5 segundos. Em seguida, por meio de aplicações sucessivas de valores de potência, encontrou-se o valor de 2.600 kW de potência instalada ótima (por coincidência, valor este igual ao do nível “b” de motorização verificado).

Assim, considerando a potência instalada ótima de 2.600 kW:

- Para o trem convencional (D_t = 250 mm), tem-se 19,7 minutos de viagem;
- Para o trem pendular de sistema passivo (D_t = 350 mm), tem-se 17,2 minutos de viagem;
- Para o trem pendular de sistema ativo (D_t = 450 mm), tem-se 16,0 minutos de viagem.

10. ESTUDO DE CASO 2 - DISCUSSÃO DE RESULTADOS PARA UM TRAÇADO POUCO SINUOSO

10.1 JUSTIFICATIVA

O Estudo de Caso 2 do presente trabalho primeiramente tem por propósito apresentar e discutir os resultados encontrados num estudo da literatura para um corredor com um traçado pouco sinuoso, em terreno plano ou levemente ondulado. Em segundo lugar, este estudo de caso se justifica para melhor compreender os resultados encontrados no Estudo de Caso 1, que por sua vez se caracteriza por um traçado medianamente sinuoso, em terreno presumido como medianamente ondulado.

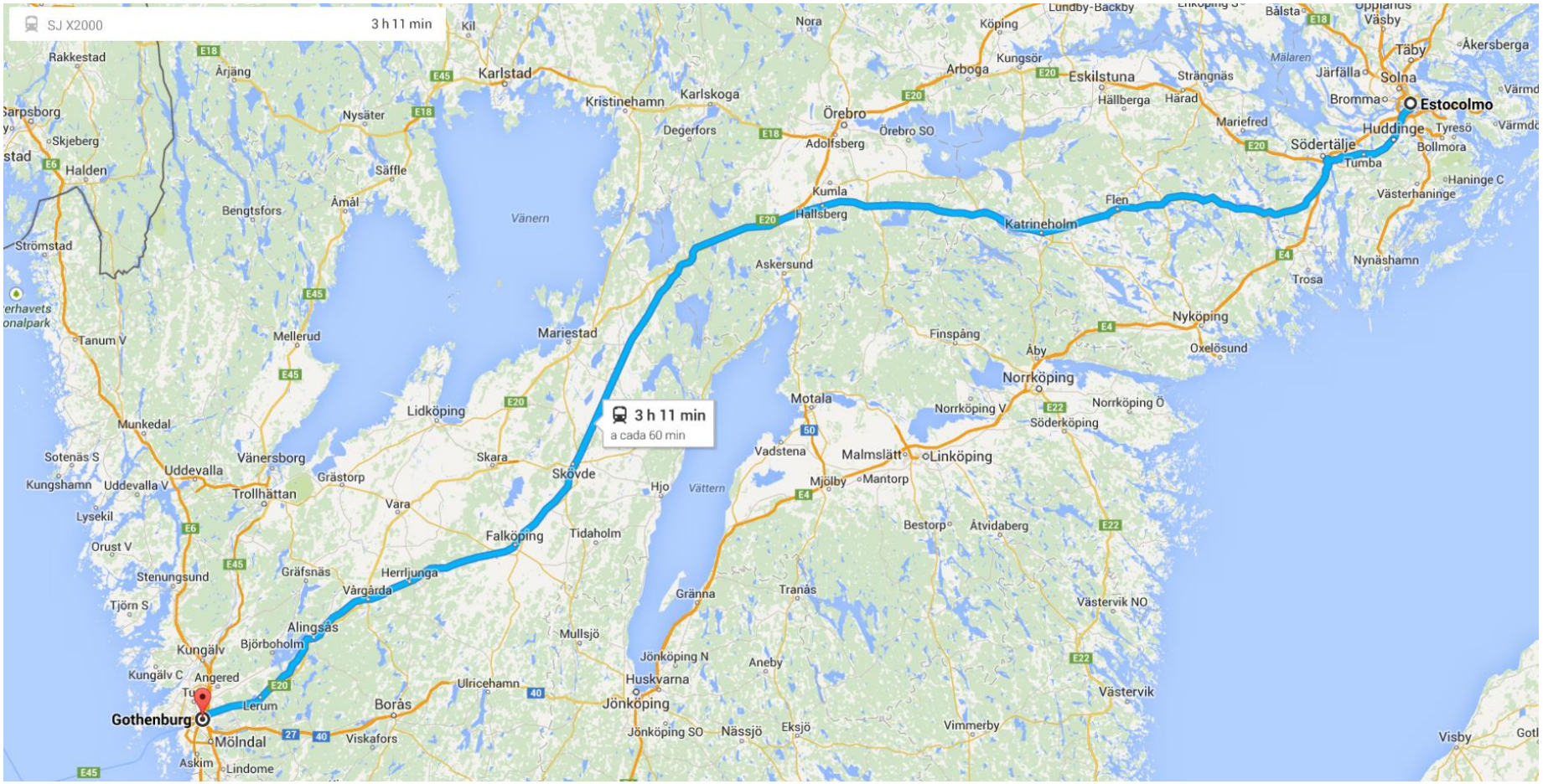
Este estudo referido, elaborado por Persson (2008), apresenta semelhanças claras com o estudo central do presente trabalho, incluindo objetivos parecidos. Além disso, os resultados apresentam os mesmos aspectos, o que torna relevante a comparação geral feita posteriormente.

10.2 OBJETO DO ESTUDO DE CASO

O objeto do presente estudo de caso, que é o mesmo objeto do trabalho de Persson, é um corredor ligando a capital da Suécia, Estocolmo, à cidade de Gotemburgo. Essa é considerada uma das ligações mais importantes do país, com 457 km de extensão, sendo ilustrada pela Figura 10.1.

O traçado da linha é pouco sinuoso, devido ao terreno de topografia relativamente plana (WIKIPEDIA, 2014f). Os trechos em curva, com raio menor que 6.000 m excluindo-se as curvas de transição, constituem 19% da extensão total da linha. O menor raio possui 352 m, e a maior parte das curvas tem raios com em torno de 1.000 m, como no traçado do projeto funcional abordado no Estudo de Caso 1.

A distribuição das curvas circulares, desconsiderando-se as curvas de transição e em relação à extensão total da linha, pode ser vista no Gráfico 10.1.


SJ X2000
3 h 11 min
Estocolmo
Gothenburg
3 h 11 min
a cada 60 min
Karlstad
Kristinehamn
Karlskoga
Örebro
Adolfsberg
Degerfors
Kumla
Hallsberg
Katrineholm
Flen
Södertälje
Huddinge
Solna
Täby
Järfälla
Bromma
Eskilstuna
Arboga
Köping
Nora
Askersund
Mariestad
Lidköping
Skara
Skövde
Falköping
Tidaholm
Herrljunga
Vårgårda
Alingsås
Borås
Mölndal
Lerum
Angered
Kungälv
Trollhättan
Uddevalla
Vänersborg
Grästorp
Vara
Vänern
Vättern
Motala
Vadstena
Mjölby
Mantorp
Malmslätt
Linköping
Norrköping
Finspång
Åby
Nyköping
Oxelösund
Trosa
Nynäshamn
Tumba
Bollmora
Tyresö
Haninge C
Västerhaninge
Mälaren
Åkersberga
Bålsta
Väsby
Strängnäs
Hällberga
Härad
Mariefred
Arjäng
Nysäter
Säffle
Åmål
Bengtsfors
Strömstad
Halden
Skjeberg
Rakkestad
Mellerud
Munkedal
Tanum V
Sotenäs S
Kungshamn
Uddevalla V
Lysekil
Orust V
Stenungsund
Tjörn S
Gräfsnäs
Björboholm
Kungälv C
Ulricehamn
Mullsjö
Gränna
Tranås
Jönköping N
Huskvarna
Jönköping
Jönköping SO
Nässjö
Eksjö
Aneby
Vimmerby
Bestorp
Åtvidaberg
Norrköping V
Norrköping Ö
Söderköping
Västervik NO
Västervik
Visby
Viskafors
Askim
Lindome
Kil
Karlstad
Nora
Köping
Kungsör
Arboga
Eskilstuna
Strängnäs
Hällberga
Härad
Mariefred
Järfälla
Solna
Bromma
Huddinge
Tyresö
Bollmora
Tumba
Haninge C
Flen
Katrineholm
Hallsberg
Kumla
Askersund
Mariestad
Finspång
Åby
Norrköping
Nyköping
Oxelösund
Trosa
Nynäshamn
Motala
Vadstena
Mjölby
Mantorp
Malmslätt
Linköping
Norrköping V
Norrköping Ö
Söderköping
Bestorp
Åtvidaberg
Gränna
Tranås
Mullsjö
Jönköping N
Huskvarna
Jönköping
Jönköping SO
Nässjö
Eksjö
Aneby
Vimmerby
Ulricehamn
Viskafors
Borås
Lerum
Mölndal
Lindome
Askim
Kungälv
Kungälv C
Angered
Alingsås
Björboholm
Vårgårda
Herrljunga
Falköping
Tidaholm
Skara
Skövde
Hjo
Vara
Grästorp
Trollhättan
Uddevalla
Vänersborg
Lysekil
Orust V
Stenungsund
Tjörn S
Gräfsnäs
Munkedal
Mellerud
Tanum V
Sotenäs S
Kungshamn
Uddevalla V
Säffle
Åmål
Bengtsfors
Strömstad
Halden
Skjeberg
Rakkestad
Arjäng
Nysäter
Karlstad
Kristinehamn
Karlskoga
Degerfors
Örebro
Adolfsberg
Örebro SO

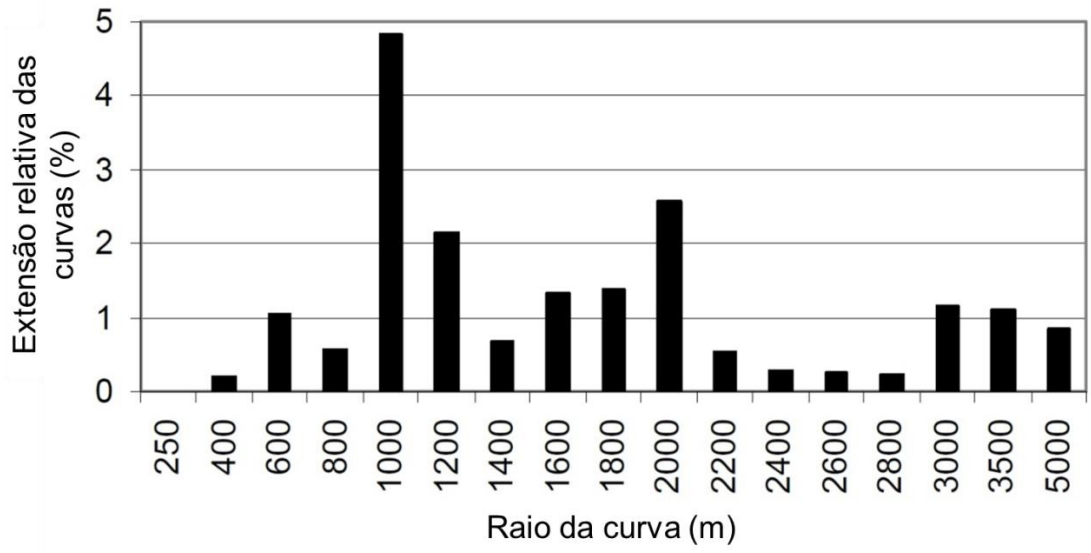


Gráfico 10.1 – Distribuição dos raios em extensão relativa ao total da linha Estocolmo - Gotemburgo (PERSSON, 2008)

Neste gráfico, os raios indicados representam o raio médio de cada grupo reunido, cada um destes representando uma devida faixa (onde se lê “1.200” estão agrupadas as curvas de raios 1.100 a 1.300, por exemplo).

Cabe neste ponto resgatar para comparação prévia o alinhamento readequado do intermédio do Estudo de Caso 1. Neste, a distribuição de curvas, se organizada do mesmo modo que a apresentada no estudo de Persson (ou seja, excluindo-se a extensão em curvas de transição), resulta no que é ilustrado no Gráfico 10.2. A extensão relativa total de trechos em curva circular é de 34,7%, para um alinhamento de extensão total de 47,4 km.

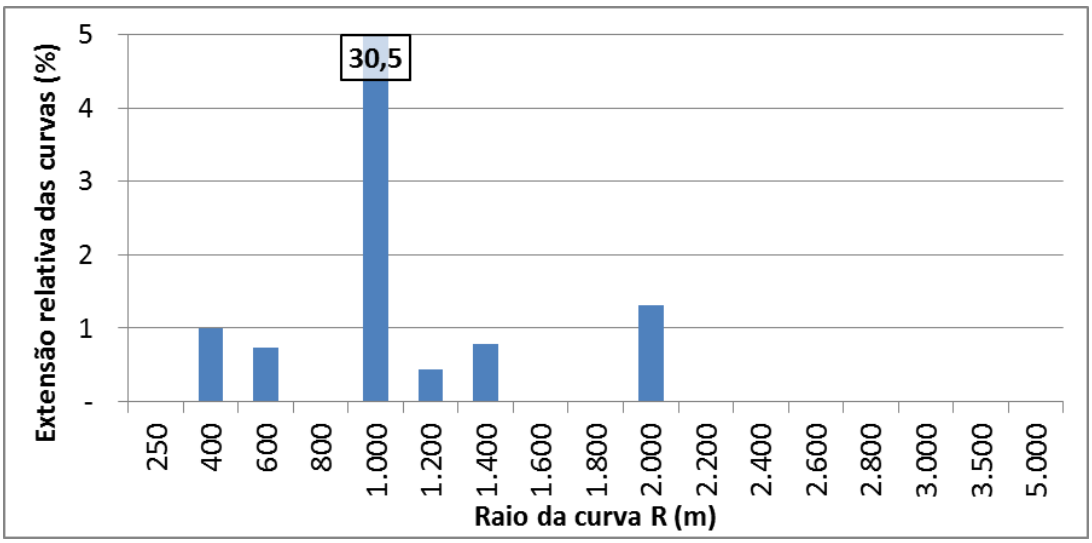


Gráfico 10.2 – Distribuição dos raios em extensão relativa ao total do trecho do intermédio modificado do Estudo de Caso 1

Comparando-se os dois gráficos apresentados, percebe-se que em ambos a maior parte das curvas tem raio em torno de 1.000 m, embora no traçado do Estudo de Caso 1 as diferenças sejam mais acentuadas. A distribuição das curvas na linha sueca é mais uniforme, com porcentagens significativas em extensão de curvas com raios acima de 1.000 m. Esta linha, porém, possui uma extensão total relativa em curvas menor que a correspondente do alinhamento analisado no primeiro estudo de caso.

As extensões das curvas analisadas mostram que o alinhamento da linha sueca é pouco sinuoso, característico de um terreno plano ou levemente ondulado. Vale colocar que as características topográficas do corredor não são exaltadas no estudo de Persson.

10.3 PROCEDIMENTO

O trabalho de Persson (2008) concentrou-se na determinação de serviços compatíveis com a operação de trens pendulares. Para isso, o autor descreve os tempos totais de viagem como dependentes de muitos fatores, dentre os quais três são principais:

- Velocidade máxima V_{max} permitida;
- Insuficiência de superelevação I (dependente do conforto do passageiro e da natureza do material rodante);
- Performance dos trens, caracterizada pelo esforço trator (dependente da potência instalada).

Além disso, Persson analisa dois outros fatores de menor influência: a aceleração inicial que os comboios são capazes de prover, e o número de paradas ao longo do trajeto.

Para o autor, estes diversos fatores estão inter-relacionados quando são avaliados a velocidade e o tempo de viagem num dado corredor. Mesmo assim, ele consegue com sucesso isolar alguns deles, um por vez, e determinar a influência de cada um nos tempos de viagem para o corredor referido entre as cidades de Estocolmo e Gotemburgo.

Persson então fez simulações na linha considerada, retornando tempos totais de viagem nela. O trem levado em conta em suas análises tinha as seguintes características, com algumas delas sendo variadas nas simulações (Tabela 10.1):

Tabela 10.1 - Especificações técnicas do trem considerado nas simulações (PERSSON, 2008)

Número de carros	6
Insuficiência de superelevação	150 a 300 mm
Peso total (com passageiros sentados)	360,0 t
Velocidade máxima em serviço	180 a 280 km/h
Potência de tração	2,7 a 9,0 MW
Aceleração inicial	0,6 a 1,0 m/s²
Desaceleração de frenagem	0,6 m/s²
Resistência ao movimento	R = 2400 + 60*v + 6,5*v² (v em m/s) N

Comparando-se agora as especificações técnicas com as utilizadas no Estudo de Caso 1 (Tabela 9.12), percebe-se que o trabalho é no âmbito dos trens de alta velocidade, dado tanto as potências instaladas maiores consideradas como os limites de velocidade em si maiores. Pode-se dizer que a natureza do traçado e sua extensão possibilitam esses maiores níveis de serviço considerados. Para o primeiro estudo de caso tais níveis provavelmente não poderiam ser alcançados, dado a característica do traçado, que é relativamente mais sinuoso.

10.4 RESULTADOS

Os resultados encontrados por Persson podem ser resumidos através dos gráficos elaborados e apresentados em seu trabalho.

O primeiro gráfico mostra a influência da insuficiência de superelevação I nos tempos de viagem (Gráfico 10.3), onde combinações da superelevação D (de 150 ou 160 mm) com a insuficiência de superelevação I (de 150 a 300 mm) foram avaliadas, ou seja, um espectro compreendendo o emprego também do material rodante pendular. Para este estudo, foram consideradas 8 paradas intermediárias ao longo do trajeto, porém relata-se que isto provoca poucas diferenças entre as combinações analisadas. As curvas mostram também a influência da potência instalada e da velocidade máxima de operação adotada.

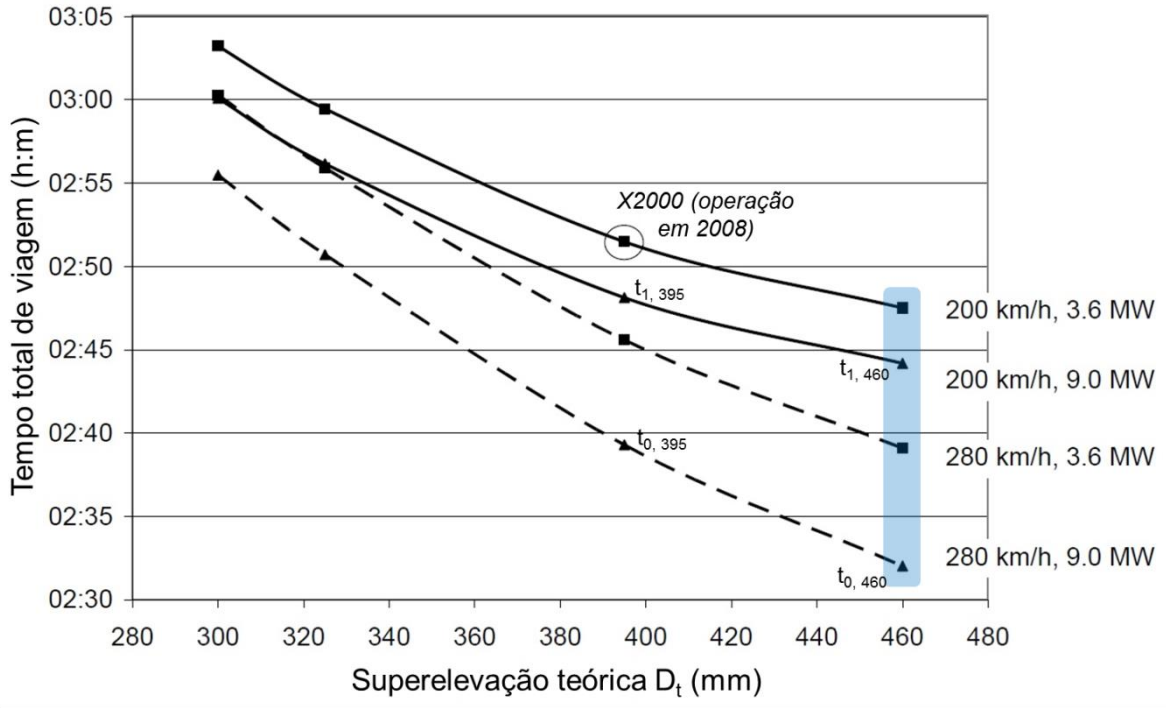


Gráfico 10.3 – Tempos totais de viagem (linha Estocolmo – Gotemburgo) em função da superelevação teórica D_t (PERSSON, 2008)[12]

O segundo gráfico busca mostrar a influência particular do limite de velocidade (Gráfico 10.4, na página a seguir). Para isso, são compilados os valores correspondentes à superelevação teórica D_t que gerou os menores tempos de viagem, ou seja, para D_t = 460 mm (com a marcação em azul no gráfico anterior). Essa superelevação teórica por sua vez provém da soma da insuficiência de superelevação I igual a 300 mm e de uma superelevação D igual a 160 mm.

A superelevação teórica D_t utilizada pelo trem pendular ativo X2000 na época de publicação do estudo, em 2008, era de 395 mm. Este valor resulta de uma superelevação de 150 mm e uma insuficiência de 245 mm. A redução significativa de tempo de viagem é possibilitada, então, pela exploração de um nível de insuficiência maior (ou ótimo) igual a 300 mm pelo trem X2000.

Assim, para o caso ótimo, são apresentados no Gráfico 10.4 os tempos de viagem em função da velocidade máxima estipulada V_{max}, esta sendo variada de 200 km/h até 280 km/h. Mais uma vez os diferentes níveis de motorização são representados, um para cada curva.

[12] As designações $t_{j,I} = t_{0,\ 395}$, $t_{1,\ 395}$, $t_{0,\ 460}$ e $t_{1,\ 460}$ terão uso posteriormente, na adaptação dos resultados do item 10.6.

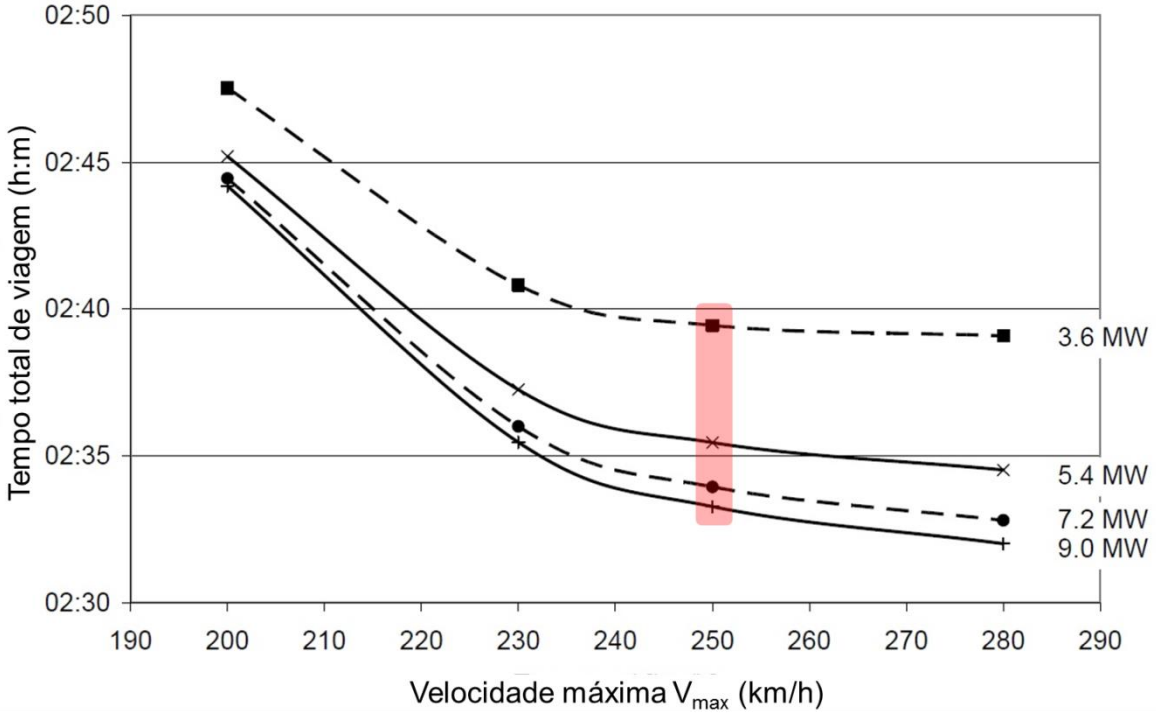


Gráfico 10.4 – Tempos totais de viagem (linha Estocolmo – Gotemburgo) em função da velocidade máxima V_{max} permitida (PERSSON, 2008)

Finalmente, o terceiro gráfico, na página a seguir, mostra os tempos totais de viagem em função da potência instalada, esta variada de 2,7 a até 9,0 MW (Gráfico 10.5). São considerados apenas os resultados para a maior superelevação teórica D_t, igual a 460 mm e para o que foi considerado o nível ótimo da velocidade máxima V_{max} permitida, que é de aproximadamente 250 km/h (correspondente à marcação em vermelho no gráfico anterior).

Neste gráfico, também são mostradas três curvas adicionais, considerando menos que oito paradas. Também é mostrado o efeito de uma aceleração inicial aumentada de 1,0 m/s² ao invés de 0,6 m/s², valor este último que foi usado em todas as outras simulações, quando previstas quatro paradas. É ressaltado que essa mudança é naturalmente mais efetiva quando se prevê na operação um maior número de paradas ao longo do trecho. Pode-se ver que para a linha analisada esse aumento da aceleração inicial tem pouco efeito nos tempos totais de viagem.

O ponto ótimo encontrado para esses gráficos é ressaltado por Persson como entre 4 e 6 MW de potência instalada, o que pode ser verificado pelo Gráfico 10.5.

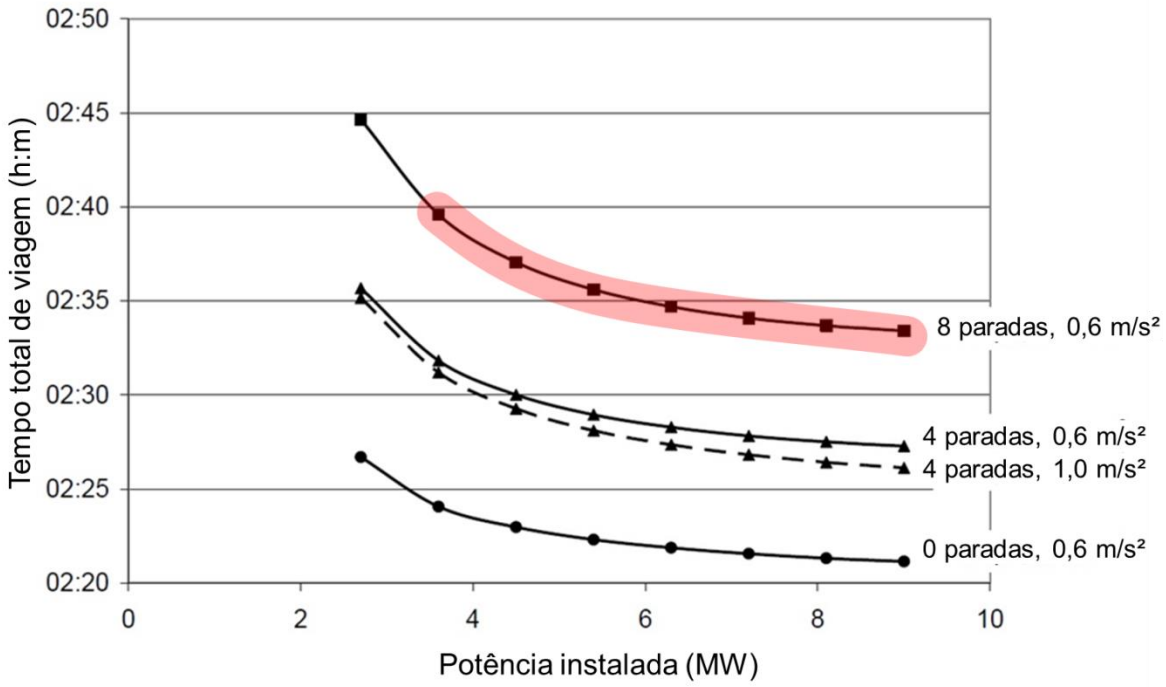


Gráfico 10.5 – Tempos totais de viagem (linha Estocolmo – Gotemburgo) em função da potência instalada (PERSSON, 2008)

10.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS APRESENTADOS

As conclusões feitas por Persson (2008) provêm da análise dos gráficos apresentados. O autor conclui que a operação em maiores insuficiências de superelevação I, o que está naturalmente relacionado com a operação de material rodante do tipo pendular, melhora os tempos totais de viagem na linha. Também é colocado que os aumentos da velocidade máxima permitida e da potência instalada apresentam ganhos de tempo, porém ressalta-se que esses ganhos são pequenos acima de certo nível, ou seja, nesses dois casos há um ponto ótimo a ser explorado como visto nos gráficos.

Aumentando para os níveis ótimos a potência instalada e a velocidade máxima, o autor ressalta que é possível uma redução de 15 minutos no tempo total de viagem, ou de 9% relativamente ao trem convencional com D_t = 300 mm. Isso se for adotada uma superelevação teórica D_t maior nos trens pendulares ativos do que a que era empregada na época da publicação em 2008 (passando-se de 395 mm para 460 mm como visto).

Considere-se o trem pendular com a velocidade máxima de 200 km/h e potência instalada de apenas 3,6 MW. Mesmo essa opção apresenta um tempo total de

viagem menor que qualquer trem convencional que operasse na linha, independentemente da velocidade máxima e potência instalada neste consideradas.

Fazendo uma comparação com o Estudo de Caso 1, nota-se como as curvas elaboradas nos gráficos apresentam aspecto geral semelhante. Tanto o Gráfico 9.10 quanto o Gráfico 10.3 mostram a redução contínua com o aumento da superelevação teórica D_t considerada. Além disso, tanto o Gráfico 9.8 como o Gráfico 10.5 apresentam também a redução conforme o aumento da potência, e em ambos pode-se identificar um ponto ótimo de potência instalada. Essa semelhança entre os pares de gráficos se dá mesmo que os corredores tenham características diferentes, como a sinuosidade do traçado e os níveis de velocidade praticados em cada um.

10.6 ADAPTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para uma posterior comparação geral no Capítulo 12, será feita uma adaptação dos resultados encontrados por Persson (2008). Essa comparação geral é interessante, pois até aqui as tendências dos resultados encontrados são semelhantes, mas cada um deles permite conclusões somente em cima de cada corredor separadamente, dado que cada um possui suas próprias características. A comparação englobante pode possibilitar conclusões generalizadas para o material rodante pendular, eventualmente permitindo a análise da influência deste em qualquer corredor.

A adaptação dos resultados é necessária, pois o estudo de Persson apresenta diferenças significativas em relação ao objeto do Estudo de Caso 1, e aos serviços considerados no presente trabalho de maneira geral. Variáveis como as velocidades e potências instaladas estão em patamares mais elevados, fora o desconhecimento de alguns valores.

É importante ressaltar que as adaptações e as extrapolações matemáticas que serão feitas a seguir apresentam uma incerteza significativa agregada. Assim, o resultado final é designado mais como uma referência do que uma estimativa calculada, para permitir a comparação geral a ser feita posteriormente. Serão ressaltados os passos dos processos que mais agregam incertezas aos resultados finais que serão encontrados.

Os processos adotados são então descritos a seguir, na medida em que os resultados adaptados são apresentados.

O chamado primeiro processo se sucedeu do seguinte modo:

- Usando-se o Gráfico 10.4, extrapolaram-se os tempos de viagem seguindo a tendência das quatro curvas apresentadas (uma para cada nível de potência instalada), aferindo-se então os valores correspondentes à velocidade máxima de 195 km/h (a mesma do Estudo de Caso 1). Esses quatro "novos" tempos de viagem referem-se somente à superelevação teórica D_t de 460 mm. Ressalve-se que:
    - O tempo de viagem para a velocidade de 195 km/h, potência instalada de 9,0 MW e D_t = 460 mm é de 2 h 45,7 min, ou 165,7 min.
- O tempo de viagem sempre aumenta em torno de 3,4 minutos quando é diminuída a potência instalada de 9,0 MW para 3,6 MW, independentemente da superelevação teórica D_t analisada. As diferenças de tempo para as outras potências (5,4 e 7,2 MW) também podem ser consideradas constantes. Pode-se visualizar isto no Gráfico 10.3, comparando-se as duas linhas cheias. É preciso encontrar os 12 tempos de viagem para a velocidade de 195 km/h correspondentes aos outros três níveis de superelevação teórica D_t exaltados nesse gráfico: 300 mm, 325 mm e 395 mm.
- O Gráfico 10.4 possui os valores marcados em azul no Gráfico 10.3. Poder-se-ia mesmo imaginar um gráfico tridimensional que juntasse esses dois gráficos. Para encontrar os tempos de viagem necessários referidos, é necessário inferir como seriam as curvas de tempo em função da velocidade máxima correspondentes aos outros três valores de D_t (300, 325 e 395 mm).
- Assumir-se-á que as curvas referidas que se quer encontrar apresentam o mesmo aspecto que as curvas que se tem conhecimento (para o caso de D_t = 460 mm, do Gráfico 10.4). Os valores de tempos de viagem estão mais próximos para os três valores menores de D_t. Objetivamente, tomar-se-á que as curvas desconhecidas são semelhantes às curvas conhecidas para D_t, só que "esmagadas" na direção vertical.
- Finalmente, o efeito prático dessas considerações é que podem ser usadas relações lineares para calcular os 12 tempos de viagem faltantes, baseando-se no tempo de viagem extrapolado chamado aqui de $t_{2,\ 460}$ e igual a 165,7 min

(para V = 195 km/h, D_t = 460 mm e potência de 9,0 MW). Por exemplo, para encontrar $t_{2,\ 395}$ (V = 195 km/h, D_t = 395 mm e potência de 9,0 MW), basta de maneira prática resolver a seguinte regra de três (na Equação 10.1 a seguir), com a ajuda dos valores do Gráfico 10.3. Para outros níveis de potência instalada, são usadas as diferenças consideradas constantes no segundo passo deste processo.

$$\frac{t_{2,\ 460} - t_{1,\ 460}}{t_{1,\ 460} - t_{0,\ 460}} = \frac{t_{2,\ 395} - t_{1,\ 395}}{t_{1,\ 395} - t_{0,\ 395}}$$

Equação 10.1 – Regra de três, das relações entre os tempos de viagem

Por meio desse processo encontram-se então os 16 tempos de viagem para a velocidade de 195 km/h, organizados conforme o Gráfico 10.6.

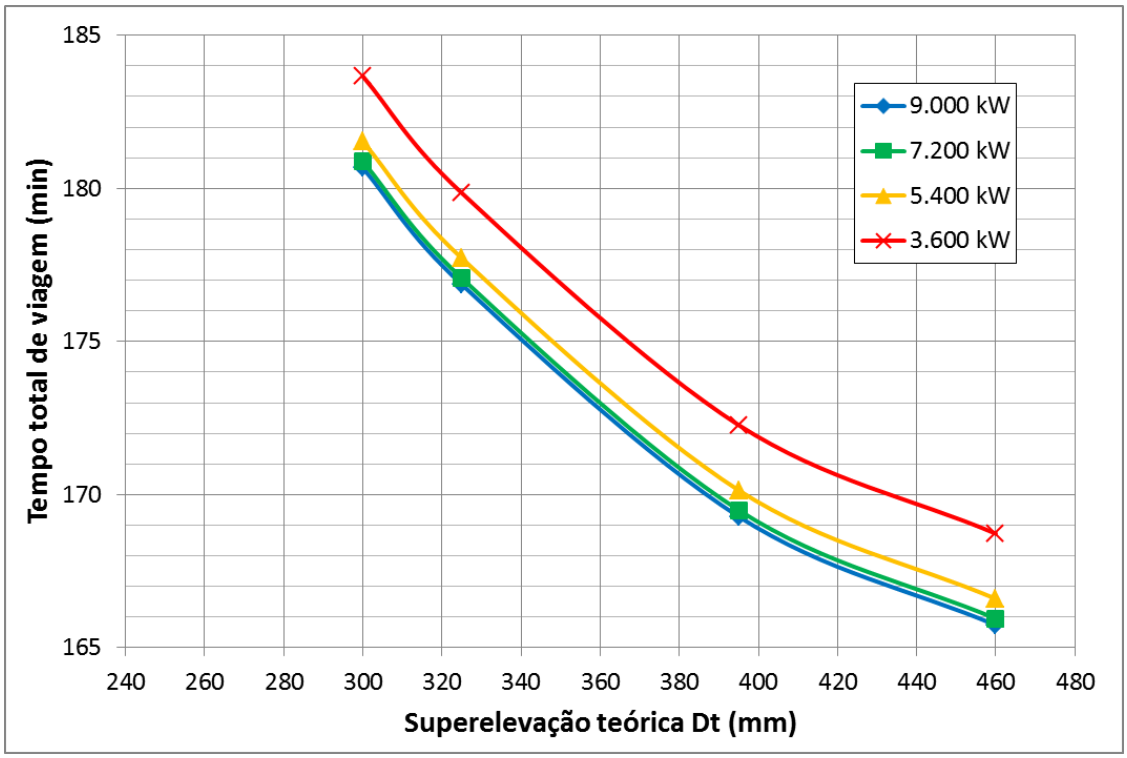


Gráfico 10.6 – Tempos de viagem extrapolados no Estudo de Caso 2

Ressalta-se que nos passos finais deste primeiro processo, principalmente quando da consideração da semelhança das curvas, está um dos pontos onde provavelmente ter-se-á agregado incerteza significativa aos resultados finais, embora as diferenças de tempo trabalhadas sejam pequenas.

Os tempos de viagem encontrados ainda referem-se a um traçado longo, de 457 km de extensão, enquanto no Estudo de Caso 1 o traçado tinha 47,4 km. Além disso, o comboio analisado no Estudo de Caso 2 é de 6 carros e 360 toneladas, com potências instaladas maiores. O estudo de caso referente ao projeto funcional São Paulo – Sorocaba adotou comboios de 4 carros e 202,9 toneladas no total. Isso exige outra adaptação para a posterior comparação geral, pois os serviços apresentam-se bastante diferentes.

O segundo processo de adaptação dos resultados foi feito como a seguir:

- As simulações do estudo de Persson (2008) previam oito paradas intermediárias, o que remeteria a nove subtrechos de aproximadamente 50,8 km de extensão, algo próximo da extensão total do Estudo de Caso 1. Assumiu-se que o padrão das simulações de marcha para o corredor sueco, tomando-se um de seus subtrechos, é suficientemente parecido com o padrão correspondente do primeiro estudo de caso. Esse ponto pode ter agregado mais alguma incerteza aos resultados finais.

- Seguindo essa linha, os tempos de viagem foram então multiplicados pela razão entre a extensão de 47,4 km e a extensão total de 457,0 km da linha sueca, o que equivale a multiplicar pelo fator de 0,104.

- Para igualar os comboios sendo considerados, a potência instalada foi multiplicada de maneira semelhante por um fator: a massa do comboio considerado no Estudo de Caso 1 (202,9 t) sobre a massa do comboio no estudo sueco (360 t). Esse fator é igual a 0,564, e assim foram encontradas as potências correspondentes usadas a seguir. Pode-se entender isso como a aplicação do conceito da relação massa/potência, presente nos meios rodoviário e ferroviário.

- Transformados os valores e expressando a superelevação teórica D_t em metros, foi elaborado o Gráfico 10.7. Remeteu-se uma linha de tendência (polinômio do segundo grau) correspondente a cada nível de potência.

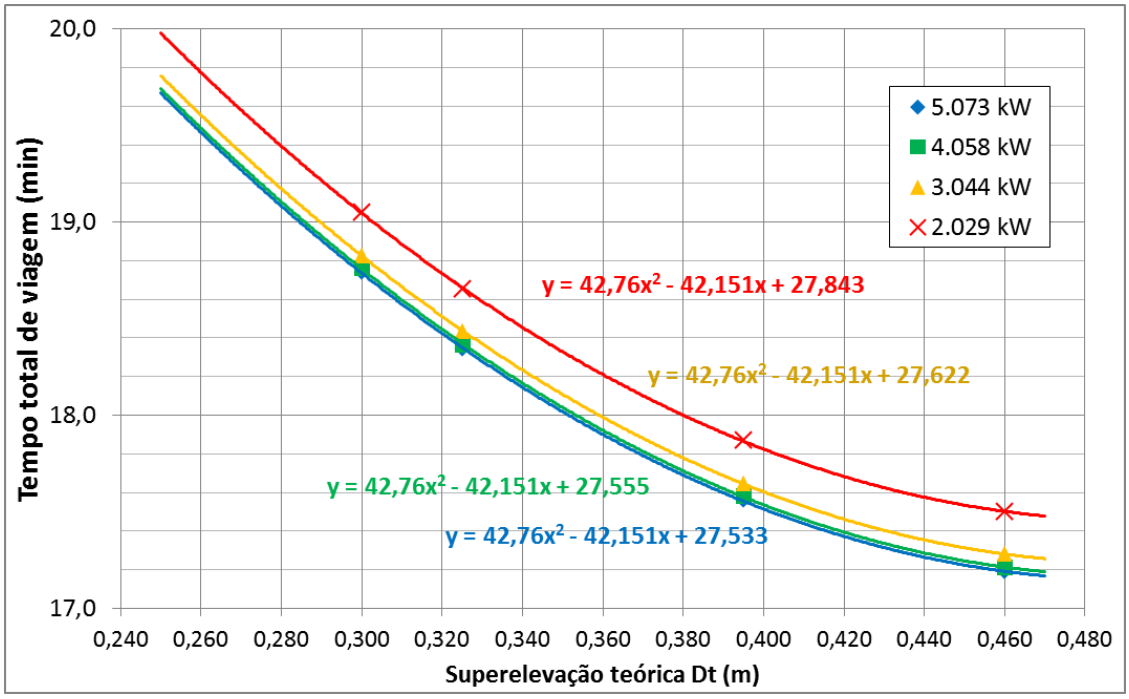


Gráfico 10.7 – Tempo de viagem adaptado para um subtrecho de 47,4 km e para um comboio de 4 carros

O terceiro processo de adaptação dos valores buscou encontrar os tempos de viagem em função da potência instalada. Ou seja, produzindo-se um gráfico semelhante ao Gráfico 10.5, só que referente aos novos valores. Assim:

- Com as equações provenientes das linhas de tendência, encontraram-se os tempos de viagem para os três valores mais relevantes de superelevação teórica D_t, já analisados no Estudo de Caso 1 e correspondentes aos três tipos de material rodante avaliados: 250, 350 e 450 mm.

- Esses novos tempos de viagem foram organizados num novo gráfico, que os mostra em função da potência instalada. Cada curva representa uma superelevação teórica D_t diferente (e naturalmente um material rodante diferente).

- Foram estimados os tempos resultantes de um quinto valor da potência instalada, correspondente ao valor de 2,7 MW usado no estudo original e que aparece no Gráfico 10.5. Esse valor de potência já transformado para um comboio de 4 carros (conforme o segundo processo, supracitado) é igual a 1,522 MW.

- Foi preciso estimar os tempos de viagem associados com esse quinto valor de potência. Para isso, foi suposto que a variação do tempo de viagem diminuindo a potência de 2,0 MW para 1,5 MW corresponde a, aproximadamente, 1,25 vezes a variação do tempo quando diminuída a potência de 3,0 para 2,0 MW. Essa aproximação foi baseada no que foi aferido do Gráfico 10.5. Mais uma vez, neste ponto pode ter sido agregada nova incerteza que se reflete nos resultados finais.

- Com os valores, o Gráfico 10.8 foi constituído. Linhas de tendência (polinômios do quarto grau) novamente foram remetidas.

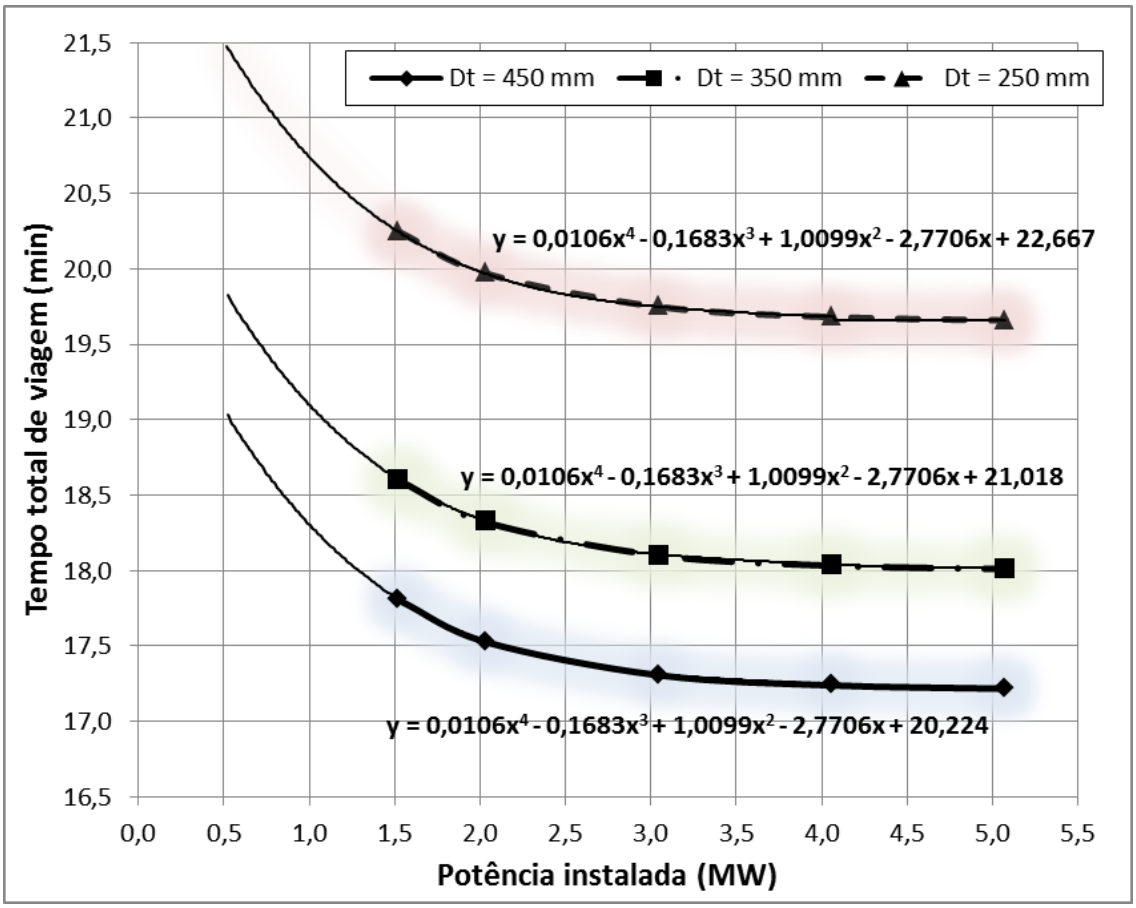


Gráfico 10.8 – Tempo de viagem em função da potência instalada adaptada

As curvas encontradas acabam apresentando aspecto semelhante às do estudo original de Persson (2008). Ressalta-se também a semelhança existente com as curvas do Gráfico 9.8, do Estudo de Caso 1.

Por fim, com os valores adaptados, o quarto processo buscou encontrar os tempos para uma potência instalada ótima:

- Foi efetuada uma análise de sensibilidade semelhante à realizada no item 9.4.6.4, do final do Estudo de Caso 1. Assim sendo, buscou-se determinar a potência instalada ótima no caso do trem pendular ativo (superelevação teórica D_t = 450 mm), avaliando-se as curvas do Gráfico 10.8. Usou-se o mesmo critério do primeiro estudo de caso, verificando-se para quais valores da potência instalada o aumento marginal de 100 kW provoca uma redução do tempo total de viagem menor que 5 segundos.

- Sendo assim, encontrou-se o valor de 1.400 kW de potência instalada ótima, este relativamente baixo. Isso é razoável pelo fato do terreno ser plano e provavelmente não apresentar rampas acentuadas que dificultem o movimento.

- Finalmente, com a potência instalada ótima de 1.400 kW aplicada nas outras equações, encontrou-se os três tempos totais de viagem. Estes são dados em função de cada tipo de material rodante e para condições parecidas com as do Estudo de Caso 1:

    - Para o trem convencional (D_t = 250 mm), tem-se 20,35 minutos de viagem;

    - Para o trem pendular de sistema passivo (D_t = 350 mm), tem-se 18,70 minutos de viagem;

    - Para o trem pendular de sistema ativo (D_t = 450 mm), tem-se 17,90 minutos de viagem.

Mais uma vez ressalta-se que as adaptações e extrapolações matemáticas feitas possuem as incertezas agregadas que foram indicadas. Considerou-se o benefício da semelhança entre os estudos do presente trabalho e o de Persson, ao decidir-se fazer essas adaptações, para usar os resultados na comparação geral posterior. Dadas as incertezas agregadas, ressalva-se então que os resultados finais de tempos aqui encontrados são somente uma referência, a ser usada com cautela.

11. ESTUDO DE CASO 3 – ANÁLISE DE UM TRAÇADO TEÓRICO MUITO SINUOSO

11.1 JUSTIFICATIVA

No Estudo de Caso 1, o objeto foi o corredor São Paulo – Sorocaba, onde o relevo é de característica presumida medianamente ondulada, com um traçado também medianamente sinuoso. O projeto analisado por sua vez é do tipo funcional e a ligação referida, para trens regionais, será implantada futuramente. Quanto ao Estudo de Caso 2, foi abordada uma ligação mais longa, do tipo intercidades. O corredor é um dos mais importantes da Suécia, e a tese analisada mostra um traçado pouco sinuoso, característico de terreno plano, com poucas curvas ao longo do trecho e permitindo grandes velocidades.

O Estudo de Caso 3 terá o objetivo de complementar os outros dois, fazendo-se como no primeiro uma análise de um traçado e do desempenho dos trens neste (em função da motorização e da tecnologia do material rodante). Este traçado analisado será bastante sinuoso, com uma porcentagem em extensão de curvas mais elevada que os outros dois objetos de estudo anteriores. Esse tipo de traçado é característico de corredores implantados em terrenos de relevo fortemente ondulado ou mesmo montanhoso.

11.2 OBJETO E PROCEDIMENTO

O objeto do Estudo de Caso 3 será um traçado teórico, com seus componentes (alinhamento horizontal e vertical) gerados de certa forma aleatoriamente. Esse traçado conservará muitas semelhanças com o corredor analisado no primeiro estudo de caso, contudo se diferenciará por ser mais sinuoso em planta e apresentar rampas em geral mais acentuadas em seu greide.

11.2.1 Alinhamento horizontal gerado

O alinhamento horizontal gerado conservará as seguintes características, análogas às utilizadas no traçado do Estudo de Caso 1, e em função dos mesmos motivos e justificativas:

- Extensão total de 47,4 km;
- Todas as curvas com raio R igual a 1.000 m;
- Curvas de transição utilizadas sendo as do tipo clotoide, cada uma com extensão L_c igual a 162,5 m.

O alinhamento horizontal analisado no primeiro estudo de caso, antes da inserção das clotoides, apresentava cerca de 48,4% de sua extensão em curvas circulares, ou 22,9 km do total de 47,4 km do intermédio. Para gerar o novo alinhamento, a premissa inicial é que os trechos em curva representem em torno de 75% da extensão total, também antes da inserção das clotoides.

Seguindo essa premissa, estipular-se-á para a geração aleatória que as curvas tenham em média 1.200 m de desenvolvimento, e as tangentes tenham em média 400 m de desenvolvimento. Para que a inserção das clotoides seja simplificada, as tangentes e curvas estarão limitadas a uma extensão mínima de 227,5 m. Dessa maneira, quando insertadas as clotoides, sobrarão 65 m em todos os casos como exigido pela norma EN 13803 (CEN, 2010). Esse comprimento de 65 m foi definido como um mínimo desejável em função da velocidade máxima de 195 km/h, conforme abordado no item 9.3.6.1.

A extensão máxima das curvas será de 2.172,5 m; sendo o raio R sempre igual a 1.000 m, isso representa um ângulo central máximo AC_{max} de 124,5°. O lado para o qual cada curva vira será gerado também aleatoriamente. Apenas será adotada uma restrição quanto ao azimute para que o alinhamento siga em geral um sentido. Este, a saber, será de leste para oeste, o mesmo do alinhamento do corredor São Paulo - Sorocaba.

De acordo com essas orientações, alguns alinhamentos horizontais foram gerados por meio de uma planilha do Excel, com auxílio da função ALEATÓRIO() para produzir todos os parâmetros randômicos. Um dos alinhamentos foi escolhido para prosseguimento dos trabalhos. O alinhamento horizontal, com as clotoides já inseridas, é então apresentado pela Tabela 11.1 a seguir. O desenho em planta é apresentado na Figura 11.1, em conjunto com o greide, que foi gerado por um processo também em parte aleatório. O processo de geração do greide em si será detalhado posteriormente, no item 11.2.2.

Tabela 11.1 – Alinhamento horizontal teórico gerado

Elemento	Nº da curva	Est. Início	Est. Final	Desen-volvi-mento L (m)	Raio (início do elemen-to) R' (m)	Direção da curva	Ângulo central (curva hor.) AC (°)
Tangente		00+000,000	00+224,541	224,5	Inf.		
Espiral		00+224,541	00+387,041	162,5	Inf.		
Curva	1	00+387,041	00+691,036	304,0	1.000	Direita	26,7
Espiral		00+691,036	00+853,536	162,5	1.000		
Tangente		00+853,536	01+119,932	266,4	Inf.		
Espiral		01+119,932	01+282,432	162,5	Inf.		
Curva	2	01+282,432	02+389,356	1.106,9	1.000	Direita	72,7
Espiral		02+389,356	02+551,856	162,5	1.000		
Tangente		02+551,856	02+841,120	289,3	Inf.		
Espiral		02+841,120	03+003,620	162,5	Inf.		
Curva	3	03+003,620	04+511,922	1.508,3	-1.000	Esquerda	95,7
Espiral		04+511,922	04+674,422	162,5	-1.000		
Tangente		04+674,422	04+853,332	178,9	Inf.		
Espiral		04+853,332	05+015,832	162,5	Inf.		
Curva	4	05+015,832	06+134,456	1.118,6	1.000	Direita	73,4
Espiral		06+134,456	06+296,956	162,5	1.000		
Tangente		06+296,956	06+624,134	327,2	Inf.		
Espiral		06+624,134	06+786,634	162,5	Inf.		
Curva	5	06+786,634	07+852,636	1.066,0	-1.000	Esquerda	70,4
Espiral		07+852,636	08+015,136	162,5	-1.000		
Tangente		08+015,136	08+351,596	336,5	Inf.		
Espiral		08+351,596	08+514,096	162,5	Inf.		
Curva	6	08+514,096	09+641,870	1.127,8	-1.000	Esquerda	73,9
Espiral		09+641,870	09+804,370	162,5	-1.000		
Tangente		09+804,370	10+003,940	199,6	Inf.		
Espiral		10+003,940	10+166,440	162,5	Inf.		
Curva	7	10+166,440	11+090,959	924,5	1.000	Direita	62,3
Espiral		11+090,959	11+253,459	162,5	1.000		
Tangente		11+253,459	11+367,217	113,8	Inf.		
Espiral		11+367,217	11+529,717	162,5	Inf.		
Curva	8	11+529,717	11+936,356	406,6	-1.000	Esquerda	32,6
Espiral		11+936,356	12+098,856	162,5	-1.000		
Tangente		12+098,856	12+447,646	348,8	Inf.		
Espiral		12+447,646	12+610,146	162,5	Inf.		
Curva	9	12+610,146	13+947,148	1.337,0	-1.000	Esquerda	85,9
Espiral		13+947,148	14+109,648	162,5	-1.000		
Tangente		14+109,648	14+487,966	378,3	Inf.		
Espiral		14+487,966	14+650,466	162,5	Inf.		
Curva	10	14+650,466	16+307,091	1.656,6	1.000	Direita	104,2
Espiral		16+307,091	16+469,591	162,5	1.000		
Tangente		16+469,591	16+829,992	360,4	Inf.		

Elemento	Nº da curva	Est. Início	Est. Final	Desen-volvi-mento L (m)	Raio (início do elemen-to) R' (m)	Direção da curva	Ângulo central (curva hor.) AC (°)
Espiral		16+829,992	16+992,492	162,5	Inf.		
Curva	11	16+992,492	18+550,384	1.557,9	1.000	Direita	98,6
Espiral		18+550,384	18+712,884	162,5	1.000		
Tangente		18+712,884	18+825,080	112,2	Inf.		
Espiral		18+825,080	18+987,580	162,5	Inf.		
Curva	12	18+987,580	19+929,681	942,1	-1.000	Esquerda	63,3
Espiral		19+929,681	20+092,181	162,5	-1.000		
Tangente		20+092,181	20+451,021	358,8	Inf.		
Espiral		20+451,021	20+613,521	162,5	Inf.		
Curva	13	20+613,521	21+106,136	492,6	1.000	Direita	37,5
Espiral		21+106,136	21+268,636	162,5	1.000		
Tangente		21+268,636	21+570,361	301,7	Inf.		
Espiral		21+570,361	21+732,861	162,5	Inf.		
Curva	14	21+732,861	23+319,869	1.587,0	-1.000	Esquerda	100,2
Espiral		23+319,869	23+482,369	162,5	-1.000		
Tangente		23+482,369	23+684,806	202,4	Inf.		
Espiral		23+684,806	23+847,306	162,5	Inf.		
Curva	15	23+847,306	24+128,514	281,2	-1.000	Esquerda	25,4
Espiral		24+128,514	24+291,014	162,5	-1.000		
Tangente		24+291,014	24+480,815	189,8	Inf.		
Espiral		24+480,815	24+643,315	162,5	Inf.		
Curva	16	24+643,315	25+499,154	855,8	1.000	Direita	58,3
Espiral		25+499,154	25+661,654	162,5	1.000		
Tangente		25+661,654	25+816,421	154,8	Inf.		
Espiral		25+816,421	25+978,921	162,5	Inf.		
Curva	17	25+978,921	26+704,257	725,3	-1.000	Esquerda	50,9
Espiral		26+704,257	26+866,757	162,5	-1.000		
Tangente		26+866,757	26+980,097	113,3	Inf.		
Espiral		26+980,097	27+142,597	162,5	Inf.		
Curva	18	27+142,597	27+686,092	543,5	-1.000	Esquerda	40,5
Espiral		27+686,092	27+848,592	162,5	-1.000		
Tangente		27+848,592	28+016,962	168,4	Inf.		
Espiral		28+016,962	28+179,462	162,5	Inf.		
Curva	19	28+179,462	29+481,193	1.301,7	1.000	Direita	83,9
Espiral		29+481,193	29+643,693	162,5	1.000		
Tangente		29+643,693	29+991,698	348,0	Inf.		
Espiral		29+991,698	30+154,198	162,5	Inf.		
Curva	20	30+154,198	31+637,464	1.483,3	1.000	Direita	94,3
Espiral		31+637,464	31+799,964	162,5	1.000		
Tangente		31+799,964	31+981,066	181,1	Inf.		
Espiral		31+981,066	32+143,566	162,5	Inf.		

Elemento	Nº da curva	Est. Início	Est. Final	Desen-volvi-mento L (m)	Raio (início do elemen-to) R' (m)	Direção da curva	Ângulo central (curva hor.) AC (°)
Curva	21	32+143,566	33+674,686	1.531,1	-1.000	Esquerda	97,0
Espiral		33+674,686	33+837,186	162,5	-1.000		
Tangente		33+837,186	34+066,800	229,6	Inf.		
Espiral		34+066,800	34+229,300	162,5	Inf.		
Curva	22	34+229,300	34+463,446	234,1	-1.000	Esquerda	22,7
Espiral		34+463,446	34+625,946	162,5	-1.000		
Tangente		34+625,946	34+800,067	174,1	Inf.		
Espiral		34+800,067	34+962,567	162,5	Inf.		
Curva	23	34+962,567	35+544,926	582,4	-1.000	Esquerda	42,7
Espiral		35+544,926	35+707,426	162,5	-1.000		
Tangente		35+707,426	35+800,039	92,6	Inf.		
Espiral		35+800,039	35+962,539	162,5	Inf.		
Curva	24	35+962,539	37+009,663	1.047,1	-1.000	Esquerda	69,3
Espiral		37+009,663	37+172,163	162,5	-1.000		
Tangente		37+172,163	37+576,747	404,6	Inf.		
Espiral		37+576,747	37+739,247	162,5	Inf.		
Curva	25	37+739,247	38+153,459	414,2	1.000	Direita	33,0
Espiral		38+153,459	38+315,959	162,5	1.000		
Tangente		38+315,959	38+428,979	113,0	Inf.		
Espiral		38+428,979	38+591,479	162,5	Inf.		
Curva	26	38+591,479	39+920,678	1.329,2	1.000	Direita	85,5
Espiral		39+920,678	40+083,178	162,5	1.000		
Tangente		40+083,178	40+370,385	287,2	Inf.		
Espiral		40+370,385	40+532,885	162,5	Inf.		
Curva	27	40+532,885	41+262,479	729,6	-1.000	Esquerda	51,1
Espiral		41+262,479	41+424,979	162,5	-1.000		
Tangente		41+424,979	41+797,258	372,3	Inf.		
Espiral		41+797,258	41+959,758	162,5	Inf.		
Curva	28	41+959,758	43+289,352	1.329,6	1.000	Direita	85,5
Espiral		43+289,352	43+451,852	162,5	1.000		
Tangente		43+451,852	43+700,401	248,5	Inf.		
Espiral		43+700,401	43+862,901	162,5	Inf.		
Curva	29	43+862,901	45+580,777	1.717,9	-1.000	Esquerda	107,7
Espiral		45+580,777	45+743,277	162,5	-1.000		
Tangente		45+743,277	46+121,034	377,8	Inf.		
Espiral		46+121,034	46+283,534	162,5	Inf.		
Curva	30	46+283,534	46+728,463	444,9	1.000	Direita	34,8
Espiral		46+728,463	46+890,963	162,5	1.000		
Tangente		46+890,963	47+400,000	509,0	Inf.		

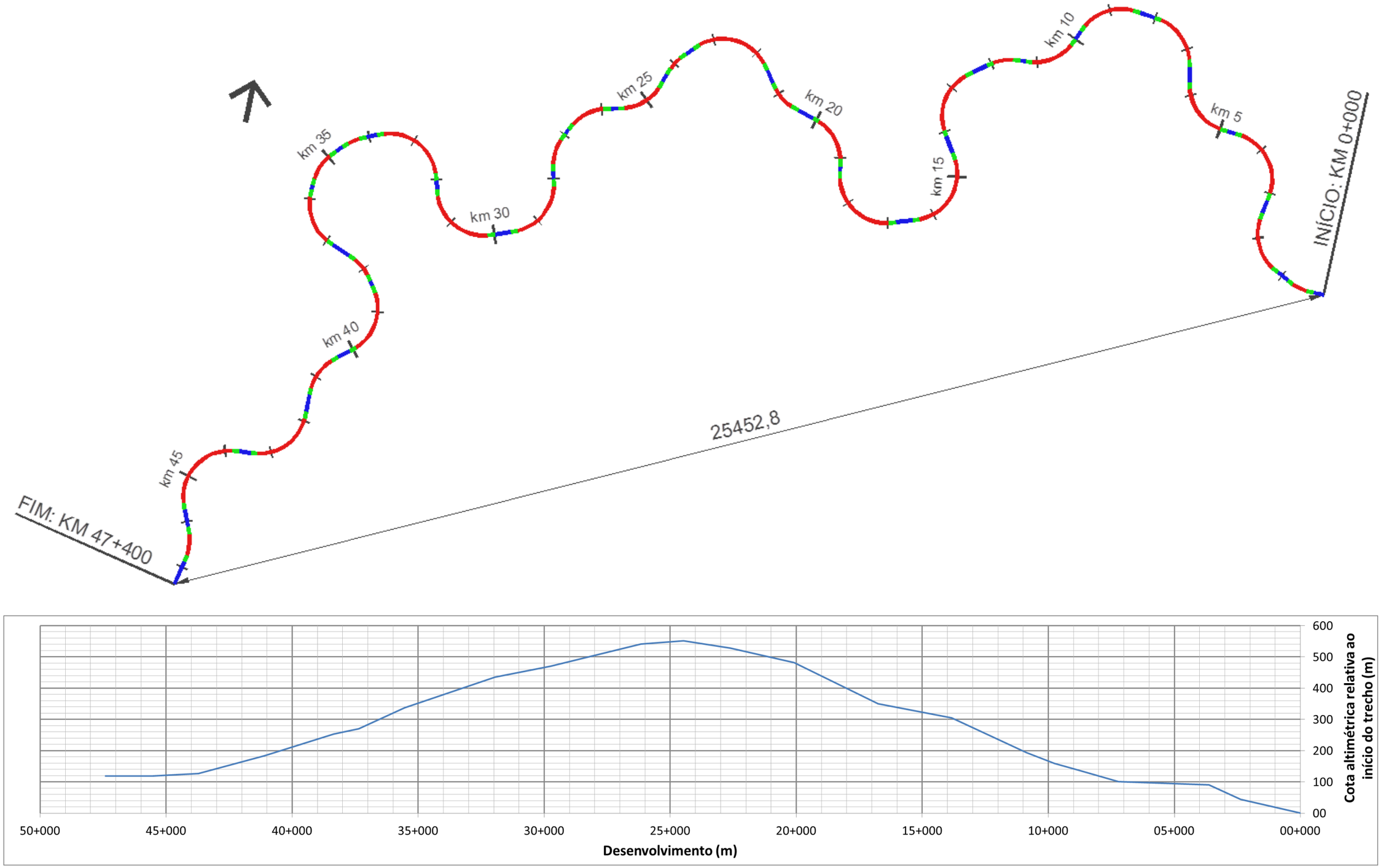


Figura 11.1 – Traçado teórico gerado em planta e perfil

Para fazer referência às opções operacionais a serem simuladas neste traçado será adotada a letra T (de teórico). A nomenclatura seguirá o mesmo raciocínio adotado anteriormente, no Estudo de Caso 1. Desse modo, ter-se-ão as opções T-0 para o trem convencional, T-1 para o trem pendular passivo e T-2 para o trem pendular ativo.

A análise do alinhamento horizontal gerado permite algumas conclusões preliminares. Como mostra a figura, um alinhamento mais sinuoso, em terreno de relevo fortemente ondulado necessita de um maior desenvolvimento para cobrir uma dada distância. Por mais que a extensão total seja de 47,4 km, a distância absoluta entre o início e o fim do trecho é de em torno de 25,5 km.

Este alinhamento mais sinuoso, seguindo o relevo, teria como alternativa um traçado retificado, talvez quase totalmente em túnel. Esse traçado retificado seria necessário eventualmente para a operação de trens de alta velocidade. Em termos dos trens regionais, uma alternativa retificada em túnel teria um custo construtivo por km mais elevado (da ordem de 5 vezes ou mais). A extensão total, todavia, seria pouco mais da metade da correspondente ao traçado sinuoso.

No traçado gerado, em alguns trechos, uma volta em torno de uma montanha ou monte se tornaria muito extensa (como por exemplo do km 13 ao km 20 ou do km 30 ao km 39), o que incorre que poderia compensar a execução de um trecho em túnel. Há que se ver, todavia, a questão do alinhamento vertical: em relevo fortemente ondulado ou montanhoso, as rampas acentuadas são necessárias mesmo ao se adotar um alinhamento horizontal sinuoso. Aliás, é a combinação de rampas acentuadas e um traçado horizontal mais sinuoso que possibilita a implantação de uma linha num corredor com esse tipo de topografia acidentada.

Um exemplo de terreno montanhoso de difícil transposição se dá nos Alpes, na Europa. Em algumas linhas a diferença de cota altimétrica a se vencer é tão grande que se torna necessário um traçado em helicoidal, formando uma “volta” que gera o desenvolvimento necessário para acomodar a rampa. Em muitos casos essas “voltas” ou “*loops* em espiral”[13] têm trechos significativos em túnel. A Figura 11.2 e a Figura

[13] Tradução livre para o termo em inglês “*spiral loops*” da literatura (PITA, 2008).

11.3 a seguir mostram um exemplo: uma ferrovia passando pelas cidades de Gurtnellen e Wassen, na Suíça, com túneis helicoidais.

Outras questões mais específicas referentes ao alinhamento vertical são tratadas no item a seguir, que detalha o processo em partes aleatório usado para gerá-lo.

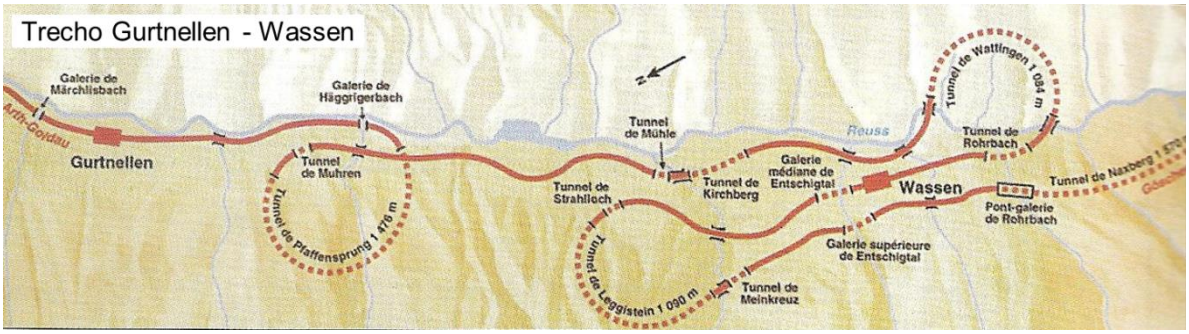


Figura 11.2 – Trecho de ferrovia nos Alpes Suíços com túneis helicoidais - Planta (PITA, 2008)

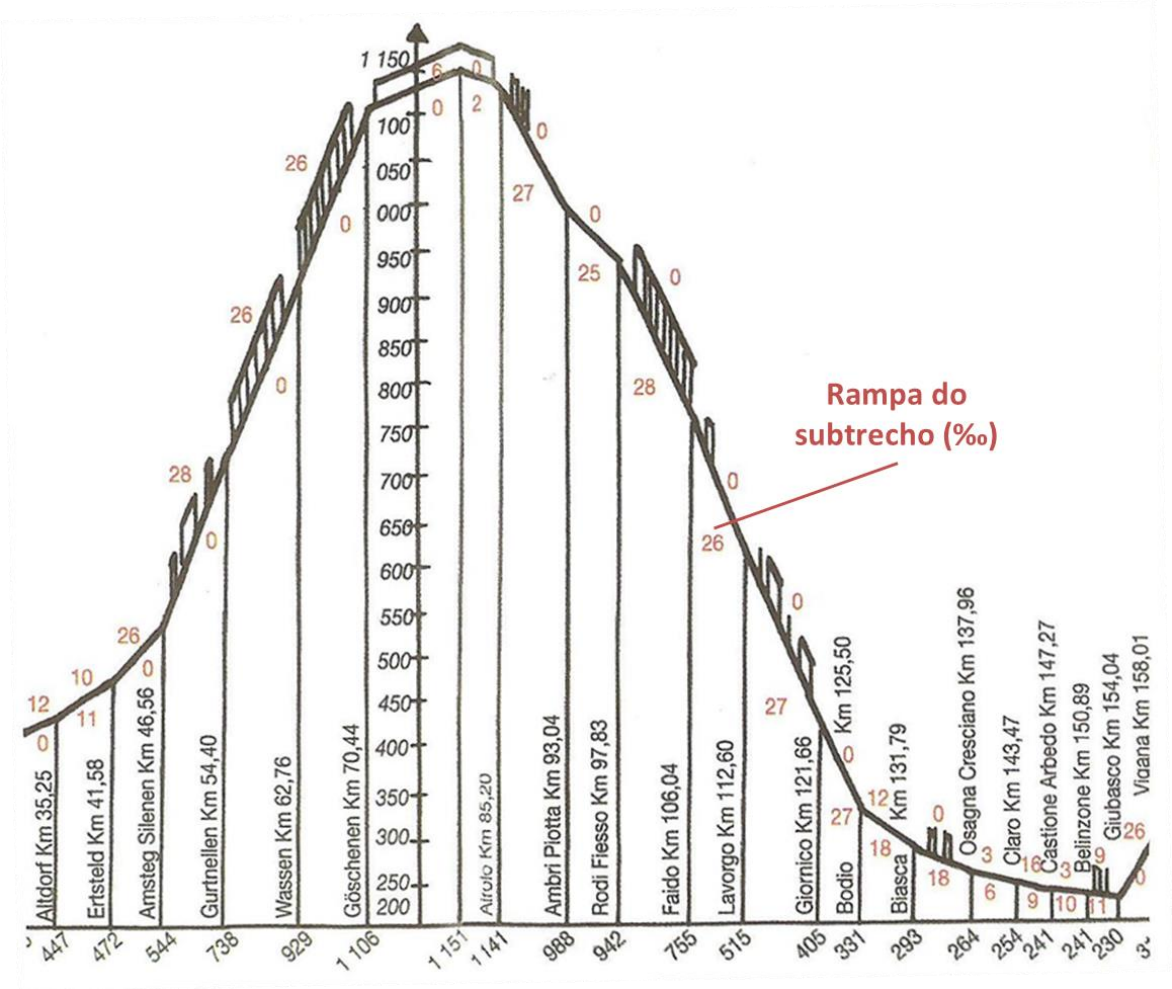


Figura 11.3 – Trecho de ferrovia nos Alpes Suíços com túneis helicoidais - Perfil (PITA, 2008)

O alinhamento horizontal gerado para o Estudo de Caso 3, antes da inserção das clotoides, tinha 72,9% de trechos em curva circular (cerca de 34,6 km em extensão e um total de 30 curvas). Após a inserção das clotoides, a divisão ficou como se segue:

- Em torno de 8,0 km (16,8% do total) de via em tangente;
- Em torno de 9,8 km (20,6% do total) de via em espiral (clotoides);
- Em torno de 29,7 km (62,6% do total) de via em curva circular.

11.2.2 Alinhamento vertical gerado

Primeiramente, o alinhamento vertical para o terceiro estudo de caso, assim como ocorrido com o alinhamento horizontal, conservou algumas das características do greide utilizado no Estudo de Caso 1, do corredor São Paulo – Sorocaba. Cabe enaltecer algumas características do greide analisado no primeiro estudo de caso:

- Considerando o sentido do estaqueamento, que é de São Paulo a Sorocaba, o alinhamento vertical tinha em torno de 19,9 km de extensão em aclive (42,1% do total), com uma rampa média de cerca de +1,24%;
- Também no sentido do estaqueamento, o greide possuía em torno de 27,5 km de extensão em declive (57,9% do total), com uma rampa média de cerca de -1,47%;
- O greide do intermédio iniciava-se na cota 774,5 m, atingindo a cota máxima do trecho de 935,9 m após uma extensão aproximada de 10,1 km (diferença de 161,4 m); a cota no final do intermédio era de 617,9 m (diferença em relação à cota máxima de -318,0 m).

O novo greide a ser gerado terá rampas mais acentuadas, simulando a necessidade de transpor um terreno de relevo fortemente ondulado ou montanhoso.

Para gerar aleatoriamente esse alinhamento vertical, estipular-se-á como premissas que ele tenha rampas ascendentes (seguindo-se o estaqueamento) variando de 0 a +4% na primeira metade do trecho. Isso resulta numa média relativamente mais alta, de +2% das rampas em aclive, que o que resultou no corredor São Paulo – Sorocaba. Já para as rampas descendentes, semelhantemente,

a variação será de 0 a -4% na metade restante do trecho, resultando também numa média mais acentuada que o greide do primeiro estudo de caso, igual a -2%.

Quanto ao número de tangentes verticais, este manter-se-á em torno de 21 tangentes, como no primeiro estudo de caso. As curvas verticais não serão inseridas, por simplificação, considerando-se que isso tem um baixo impacto nas simulações de marcha a serem feitas na sequência.

Mais uma vez então, seguindo as premissas destacas, foi utilizada uma planilha do Excel com a aplicação da função ALEATÓRIO() para gerar os parâmetros aleatórios, criando a Tabela 11.2 e o greide mostrado na Figura 11.1.

Tabela 11.2 – Alinhamento vertical teórico gerado

Nº da tangente vertical	Est. Início	Est. Final	Desenvol-vimento L (m)	i%
T1	00+000	02+372	2.372,2	+1,88
T2	02+372	03+625	1.253,2	+3,71
T3	03+625	07+210	3.584,7	+0,26
T4	07+210	08+778	1.567,9	+2,35
T5	08+778	09+758	980,4	+2,17
T6	09+758	10+873	1.114,8	+3,13
T7	10+873	13+835	2.962,0	+3,78
T8	13+835	16+749	2.914,1	+1,54
T9	16+749	20+087	3.337,7	+3,94
T10	20+087	22+624	2.536,8	+1,86
T11	22+624	24+477	1.853,1	+1,26
T12	24+477	26+161	1.684,3	-0,64
T13	26+161	29+747	3.585,9	-1,99
T14	29+747	31+958	2.211,1	-1,59
T15	31+958	35+542	3.583,6	-2,73
T16	35+542	37+361	1.819,2	-3,70
T17	37+361	38+351	989,6	-1,65
T18	38+351	41+113	2.762,0	-2,53
T19	41+113	43+724	2.611,6	-2,16
T20	43+724	45+545	1.820,6	-0,46
T21	45+545	47+400	1.855,3	0,00

Esse greide gerado em parte aleatoriamente possui as seguintes características, em comparação com as resumidas anteriormente para o alinhamento vertical do Estudo de Caso 1. Percebe-se que todos os aspectos deste greide são relativamente mais acentuados.

- Considerando o sentido do estaqueamento (da direita pra esquerda), o greide tem em torno de 24,5 km de extensão em aclive (51,6% do total), com uma rampa média de +2,26%;
- Também conforme o sentido do estaqueamento, o alinhamento vertical possui em torno de 22,9 km de extensão em declive (48,4% do total), com uma rampa média de -1,89%;
- Partindo-se de uma cota altimétrica inicial referenciada como 0,0 m, o greide sobe até a cota máxima de 552,2 m (que representa também o maior desnível do trecho), para em seguida descer até a cota final de 119,0 m (diferença de -433,2 m em relação à cota máxima).

As rampas mais acentuadas, as cotas e os desníveis maiores entre elas demonstram com clareza a transposição de um terreno fortemente ondulado, que poderia ser uma cadeia de montanhas, por exemplo.

11.2.3 Simulações de marcha para o traçado teórico

Com os alinhamentos horizontal e vertical gerados formando o traçado teórico, passou-se às simulações de marcha nesse novo trecho.

Primeiramente, definiram-se as restrições de velocidade de maneira análoga à do Estudo de Caso 1. Dado que no presente estudo de caso o alinhamento horizontal é mais sinuoso, naturalmente as restrições serão mais acentuadas.

As simulações de marcha em si seguiram as mesmas premissas adotadas no primeiro estudo de caso. As opções de material rodante adotadas são as mesmas, com as especificações técnicas inalteradas. Apenas diferencia-se nomeando estas como T-0, T-1 e T-2 para os trens convencional, pendular passivo e pendular ativo, respectivamente. Para cada opção, as alternativas de nível de motorização testadas também foram as usadas anteriormente, variando de 1.300 kW a 5.200 kW (alternativas a, b, c e d).

Previamente já se pode adiantar que o relevo mais acentuado exige maior potência do material rodante, dada a influência significativa das rampas nas resistências que os trens sofrem. Os resultados são mostrados a seguir.

11.3 RESULTADOS

Na sequência, são apresentados:

- O Gráfico 11.1, com a restrição de velocidades para cada opção de material rodante;
- Os gráficos das simulações de marcha (Gráfico 11.2, Gráfico 11.3 e Gráfico 11.4) para as três opções (respectivamente, T-0, T-1 e T-2), cada qual com 4 alternativas de motorização (a, b, c e d);
- As tabelas compilando os tempos de viagem para cada opção de material rodante (Tabela 11.3, Tabela 11.4 e Tabela 11.5).

Posteriormente, os resultados são comparados e discutidos, da mesma forma que feito para o Estudo de Caso 1.

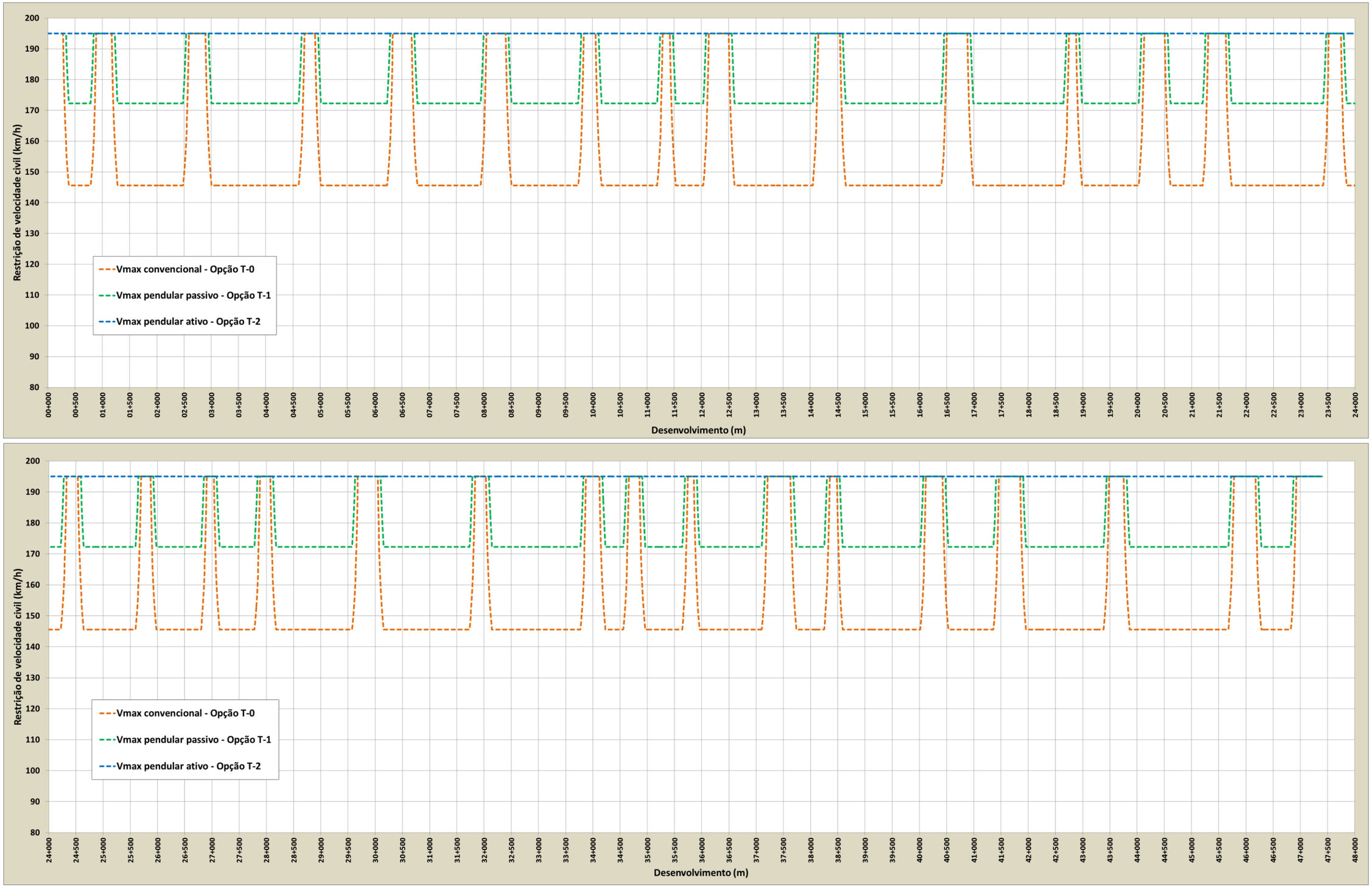
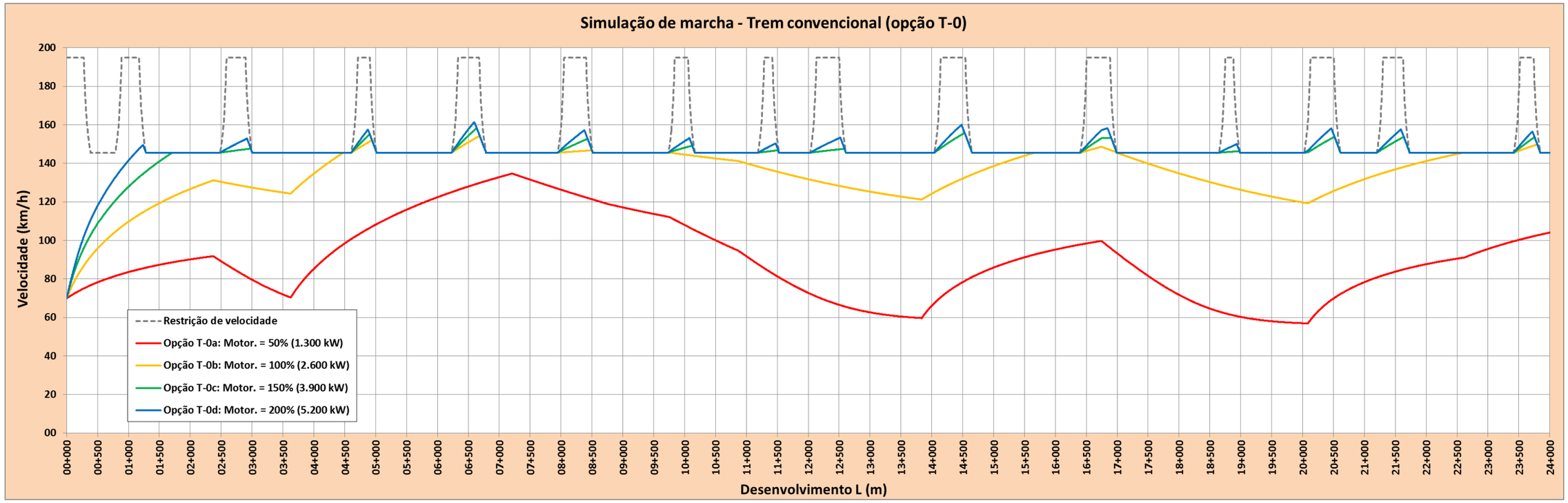


Gráfico 11.1 – Restrições de velocidade para o traçado teórico gerado (opções de operação T-0, T-1 e T-2)



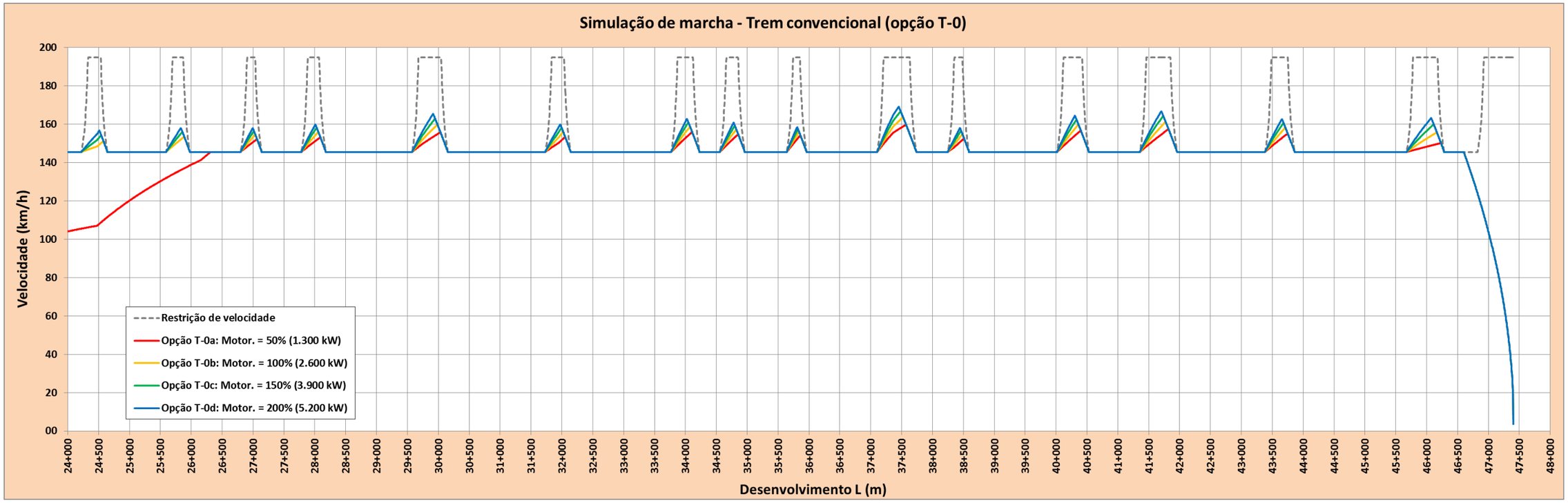


Gráfico 11.2 - Simulações de marcha para a opção operacional T-0 (trem convencional), no traçado teórico

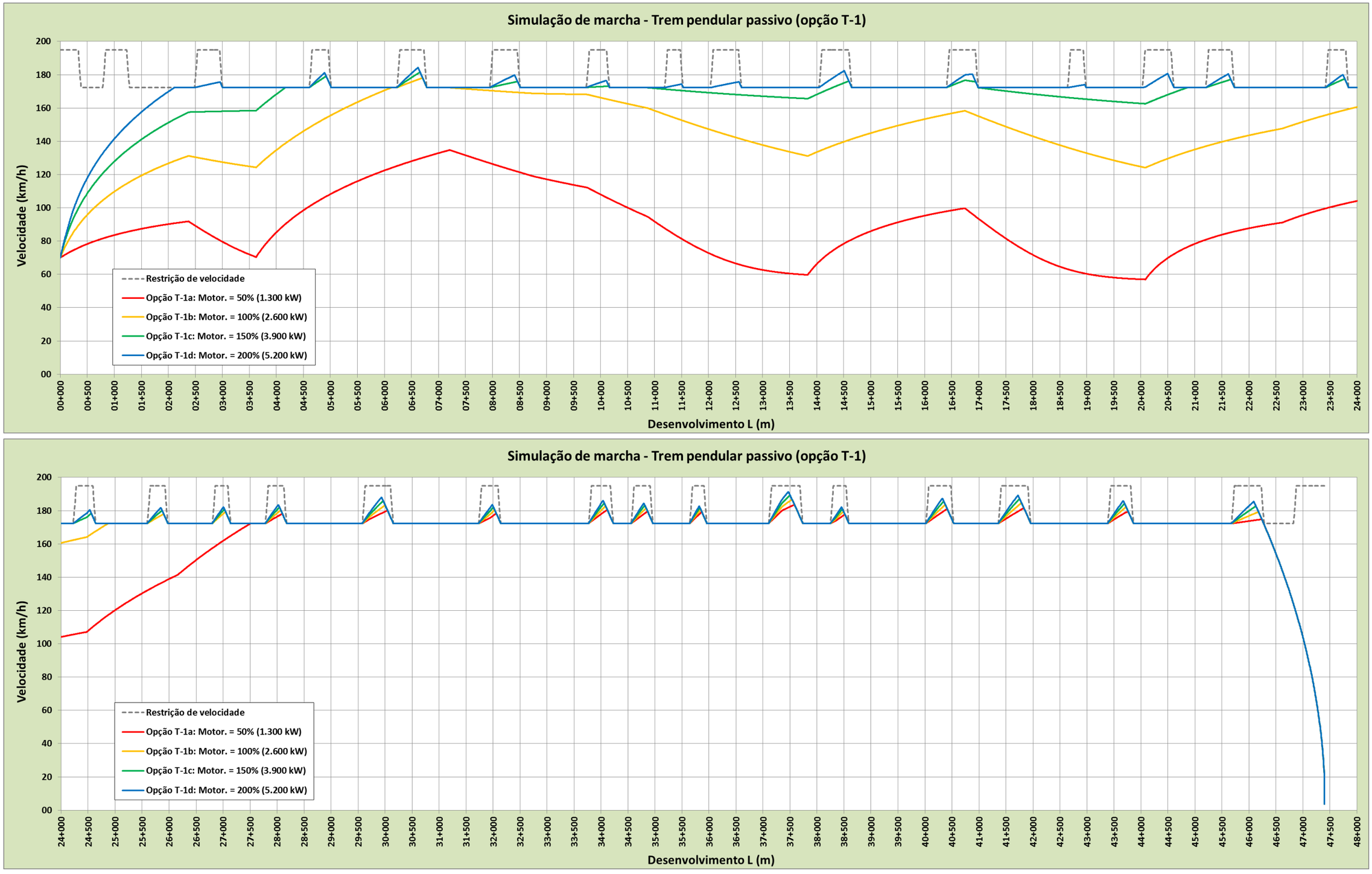
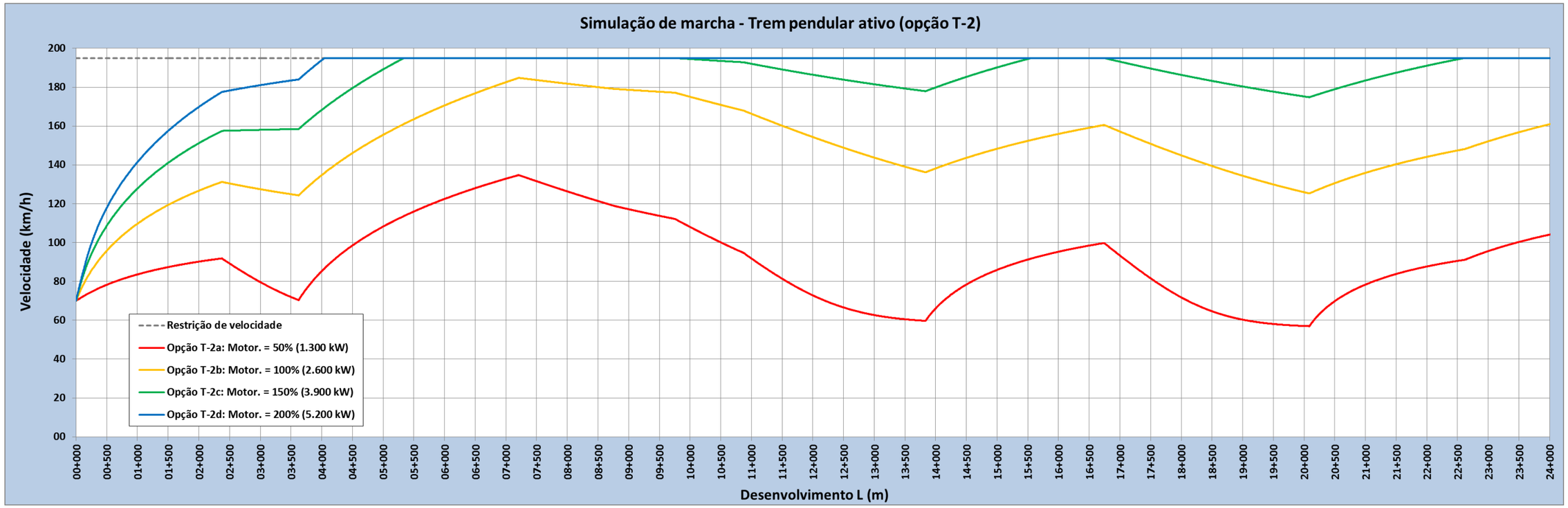


Gráfico 11.3 - Simulações de marcha para a opção operacional T-1 (trem pendular de sistema passivo), no traçado teórico



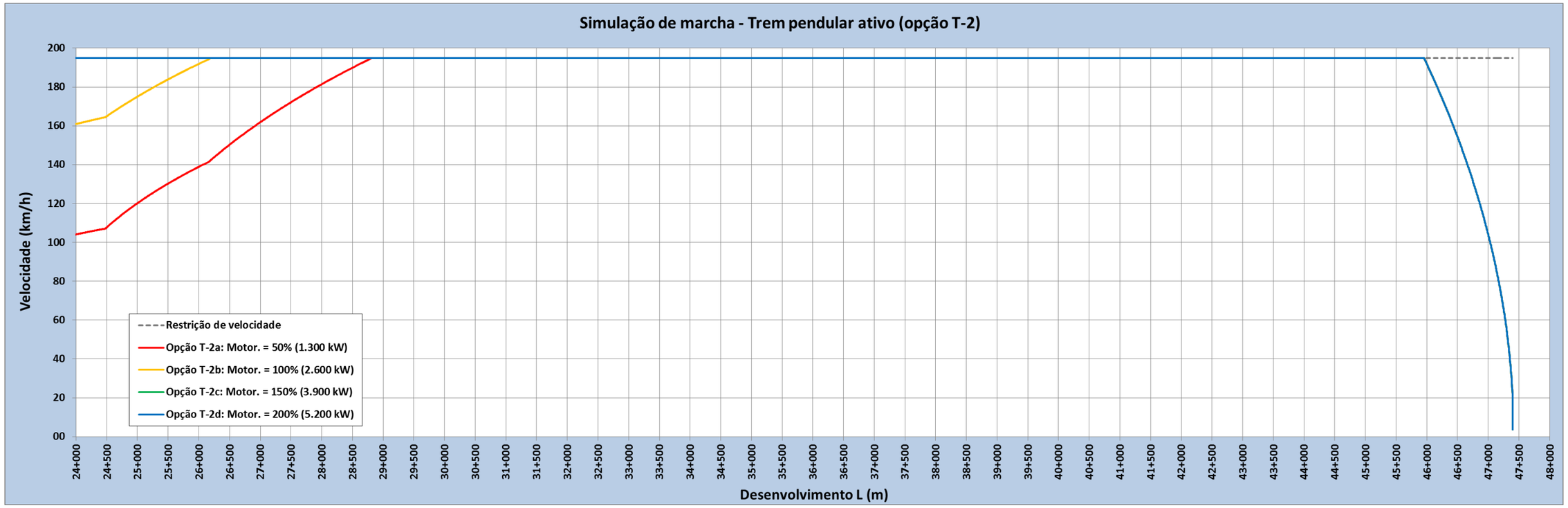


Gráfico 11.4 - Simulações de marcha para a opção operacional T-2 (trem pendular de sistema ativo), no traçado teórico

Tabela 11.3 - Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção T-0), para o traçado teórico

Opção de operação	Motorização		Tempo total de viagem	Velocidade média
	(%)	(kW)		(km/h)
T-0a	50%	1.300	1.610,3 s 26,8 min	106,0
T-0b	100%	2.600	1.233,5 s 20,6 min	138,3
T-0c	150%	3.900	1.186,4 s 19,8 min	143,8
T-0d	200%	5.200	1.179,7 s 19,7 min	144,6

Tabela 11.4 - Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção T-1), para o traçado teórico

Opção de operação	Motorização		Tempo total de viagem	Velocidade média
	(%)	(kW)		(km/h)
T-1a	50%	1.300	1.537,5 s 25,6 min	111,0
T-1b	100%	2.600	1.111,5 s 18,5 min	153,5
T-1c	150%	3.900	1.029,9 s 17,2 min	165,7
T-1d	200%	5.200	1.014,9 s 16,9 min	168,1

Tabela 11.5 - Tempos totais de viagem e velocidades médias (opção T-2), para o traçado teórico

Opção de operação	Motorização		Tempo total de viagem	Velocidade média
	(%)	(kW)		(km/h)
T-2a	50%	1.300	1.496,1 s 24,9 min	114,1
T-2b	100%	2.600	1.053,4 s 17,6 min	162,0
T-2c	150%	3.900	941,2 s 15,7 min	181,3
T-2d	200%	5.200	918,3 s 15,3 min	185,8

11.4 COMPARAÇÃO, CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Seguindo o mesmo raciocínio feito para o Estudo de Caso 1, são compilados os tempos totais de viagem e velocidades médias para todas as opções em função do material rodante, do nível de motorização e da insuficiência de superelevação,

montando-se as seguintes tabelas (Tabela 11.6 e Tabela 11.7) e gráficos (Gráfico 11.5, Gráfico 11.6 e Gráfico 11.7).

Tabela 11.6 – Comparação dos tempos totais de viagem (traçado teórico)

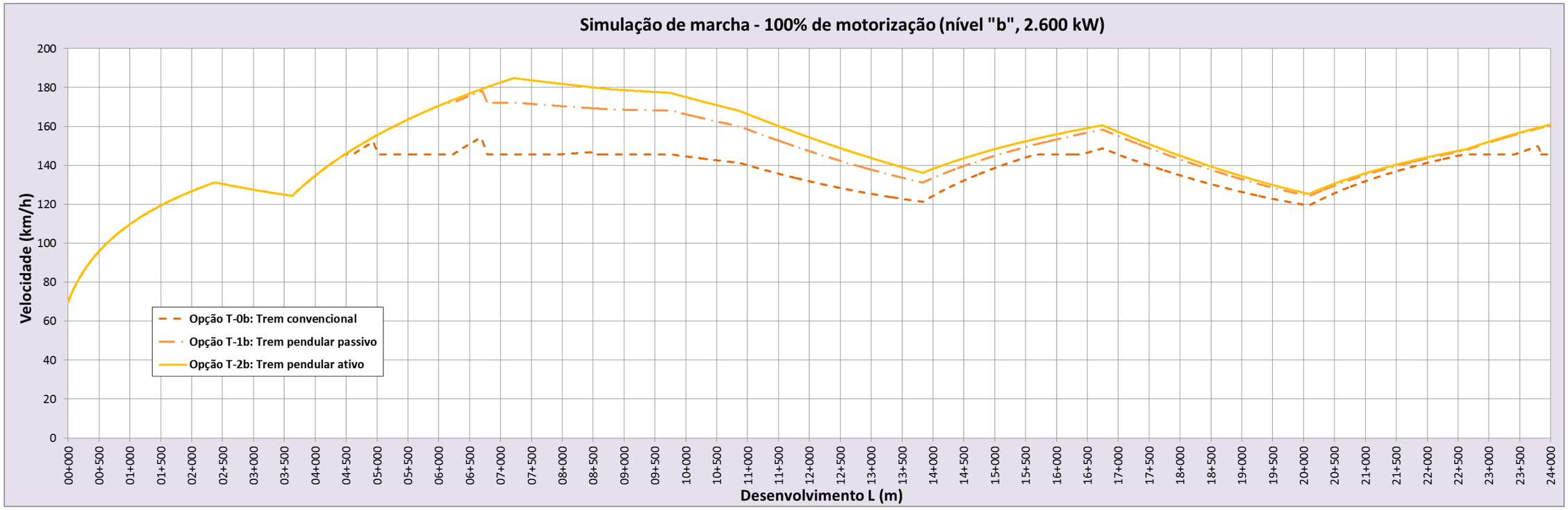
		Nível de motorização			
		a	b	c	d
Opção de operação	Tempo de viagem (minutos)	1.300 kW	2.600 kW	3.900 kW	5.200 kW
		50%	100%	150%	200%
T-0	Trem convencional	26,8	20,6	19,8	19,7
T-1	Trem pendular passivo	25,6	18,5	17,2	16,9
T-2	Trem pendular ativo	24,9	17,6	15,7	15,3

		Nível de motorização			
		a	b	c	d
Opção de operação	Tempo de viagem relativo à referência (%)	1.300 kW	2.600 kW	3.900 kW	5.200 kW
		50%	100%	150%	200%
T-0	Trem convencional	100,0%	76,6%	73,7%	73,3%
T-1	Trem pendular passivo	95,5%	69,0%	64,0%	63,0%
T-2	Trem pendular ativo	92,9%	65,4%	58,4%	57,0%

Tabela 11.7 - Comparação das velocidades médias (traçado teórico)

		Nível de motorização			
		a	b	c	d
Opção de operação	Velocidade média (km/h)	1.300 kW	2.600 kW	3.900 kW	5.200 kW
		50%	100%	150%	200%
T-0	Trem convencional	106,0	138,3	143,8	144,6
T-1	Trem pendular passivo	111,0	153,5	165,7	168,1
T-2	Trem pendular ativo	114,1	162,0	181,3	185,8

		Nível de motorização			
		a	b	c	d
Opção de operação	Velocidade média relativa à referência (%)	1.300 kW	2.600 kW	3.900 kW	5.200 kW
		50%	100%	150%	200%
T-0	Trem convencional	100,0%	130,6%	135,7%	136,5%
T-1	Trem pendular passivo	104,7%	144,9%	156,4%	158,7%
T-2	Trem pendular ativo	107,6%	152,9%	171,1%	175,4%



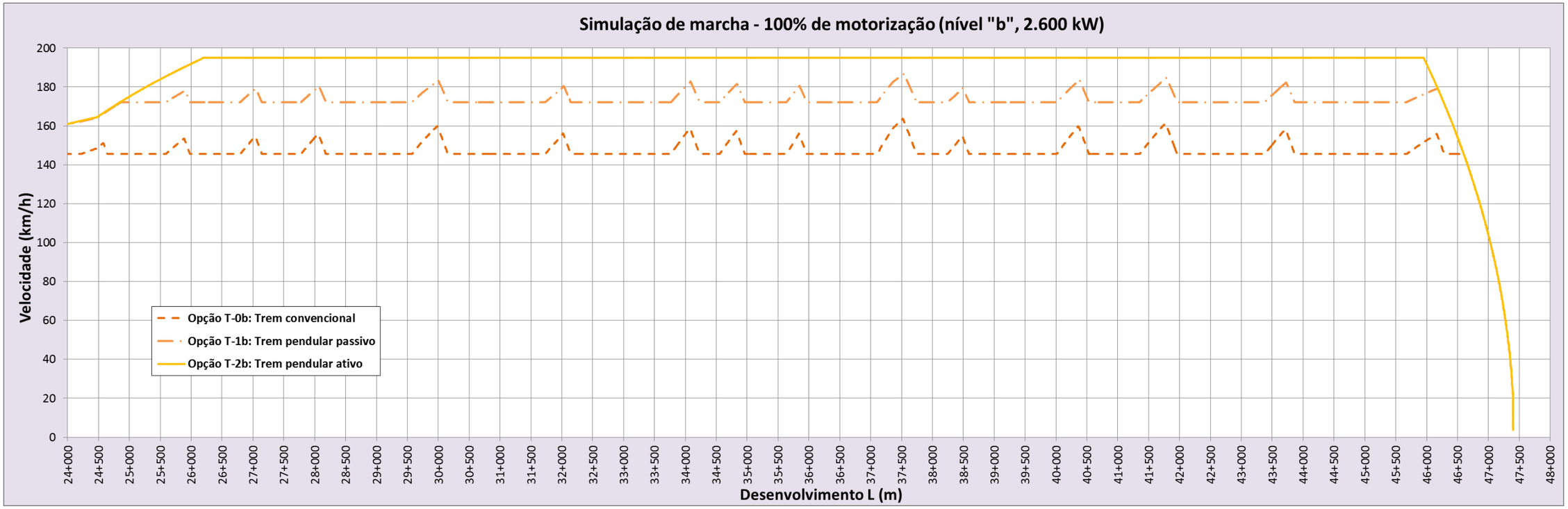
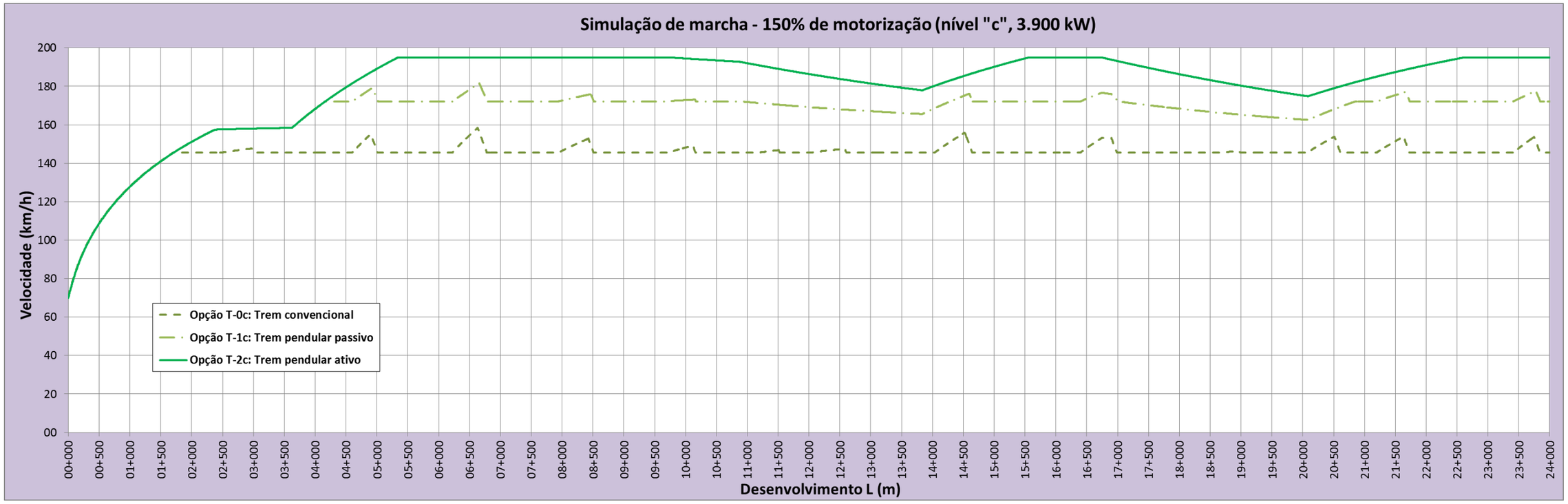


Gráfico 11.5 - Simulações de marcha para o nível de motorização de 100% (2.600 kW), no traçado teórico



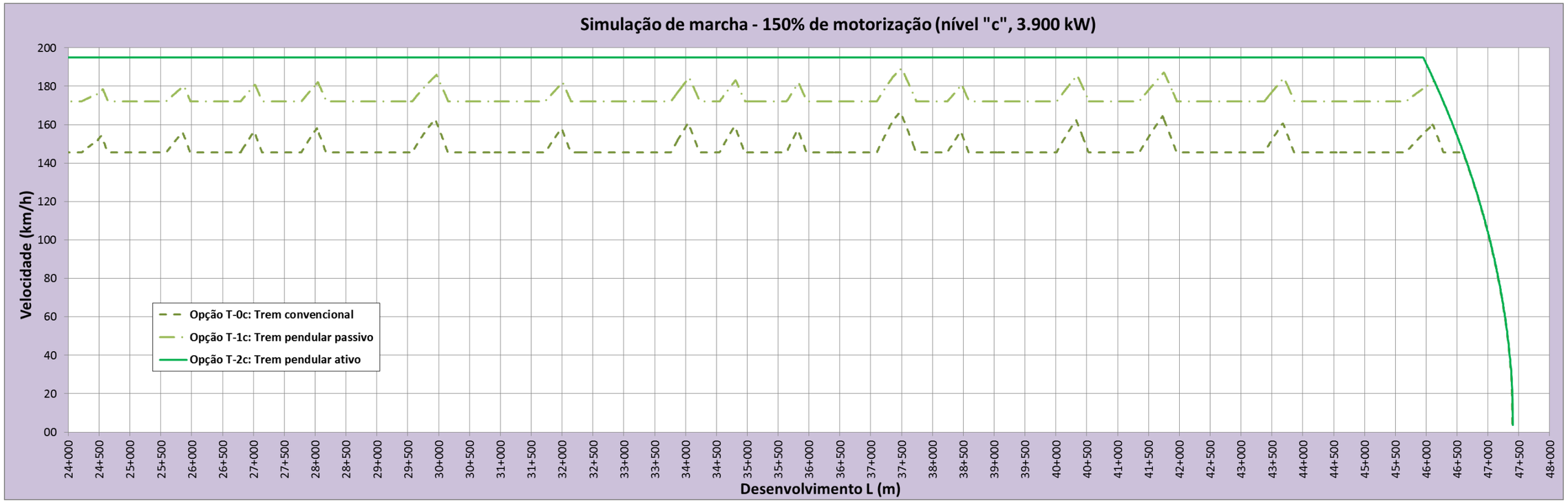


Gráfico 11.6 - Simulações de marcha para o nível de motorização de 150% (3.900 kW), no traçado teórico

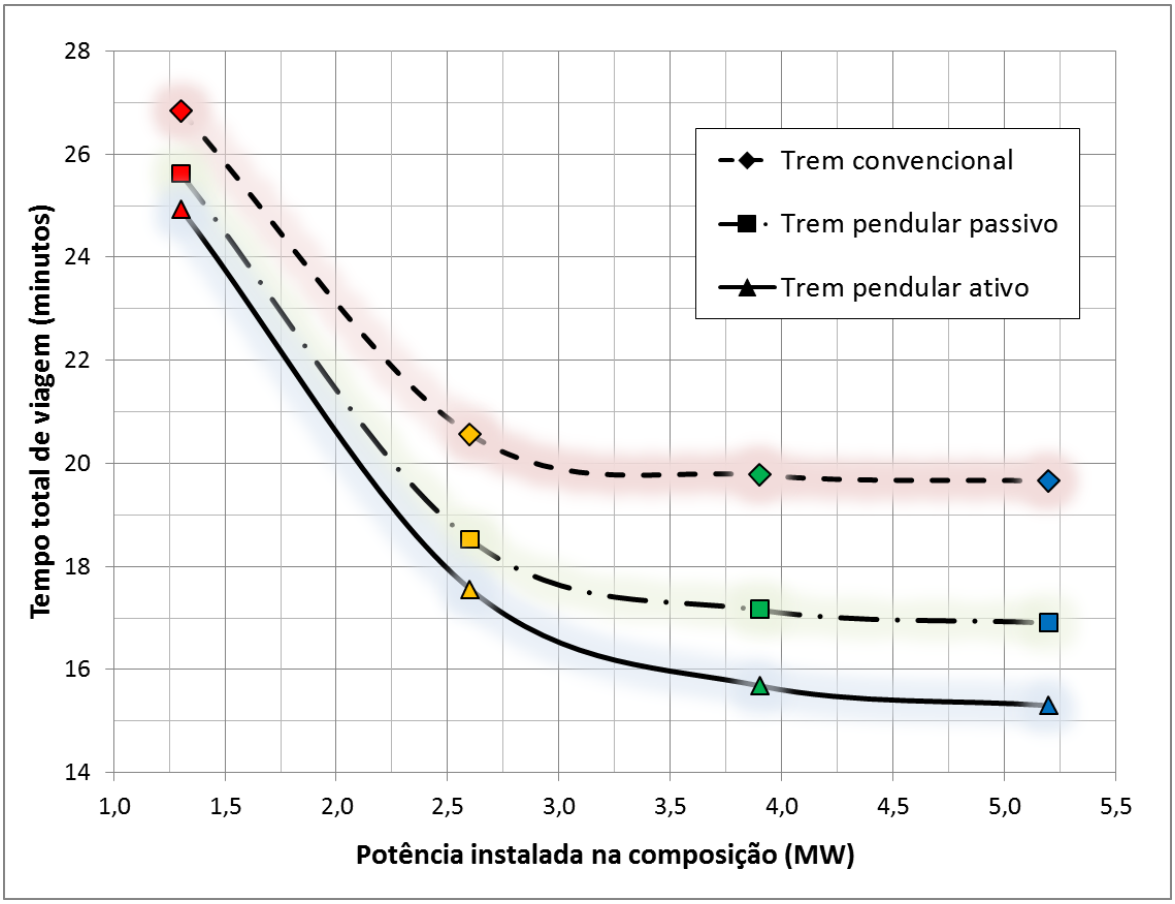


Gráfico 11.7 - Tempo total de viagem em função da potência instalada (traçado teórico)

A partir da análise dos gráficos e tabelas comparativas, primeiramente percebe-se que o nível de motorização de 50% (alternativa “a”), correspondente a uma potência de 1.300 kW, não atenderia de maneira satisfatória a esse corredor. Os tempos totais de viagem resultantes desse nível de motorização são elevados, significativamente maiores que os referentes aos outros níveis, para as três opções de material rodante. Conforme previsto, as rampas acentuadas do traçado teórico exigem uma potência instalada maior. Como mostram os gráficos de simulações de marcha, as opções de nível “a” de motorização não conseguem ultrapassar os 140 km/h na primeira metade do trecho, que possui os aclives acentuados.

O Gráfico 11.5 e o Gráfico 11.6 mostram as opções operacionais comparadas nos níveis de motorização de 100% e 150%, respectivamente, entre os quais deve se situar o ponto ótimo para a potência instalada dos trens. O Gráfico 11.8 e o Gráfico 11.9 mostram os dados de tempo de viagem reorganizados de outros modos; percebe-se a semelhança em forma com os gráficos finais apresentados no Estudo de Caso 1.

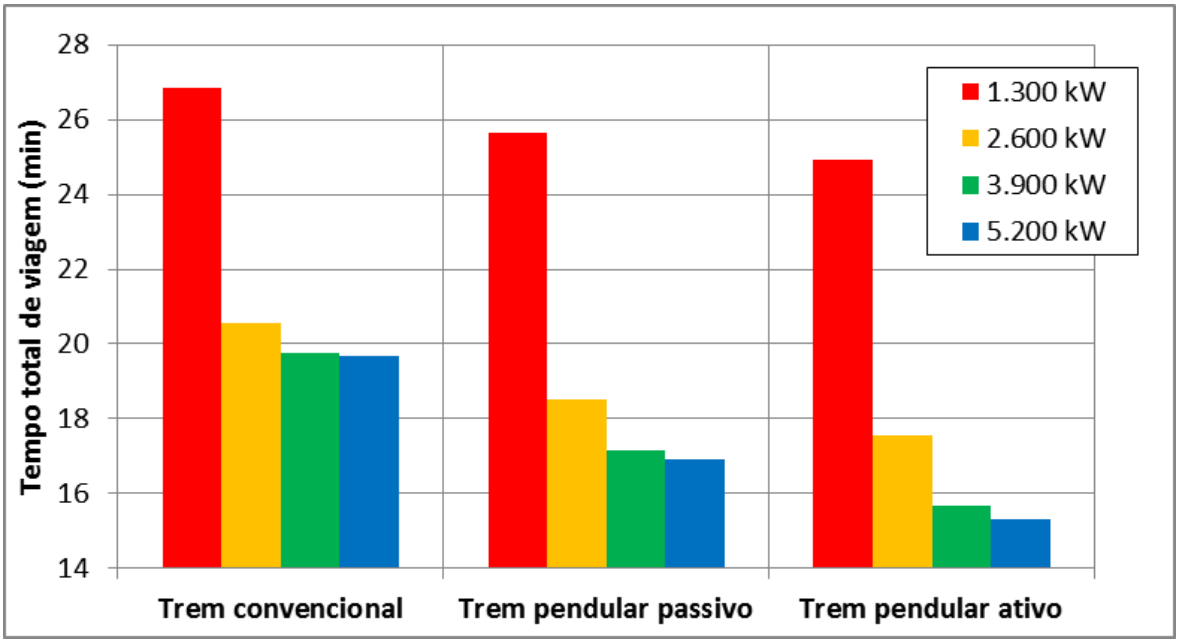


Gráfico 11.8 - Tempo total de viagem em função do material rodante (traçado teórico)

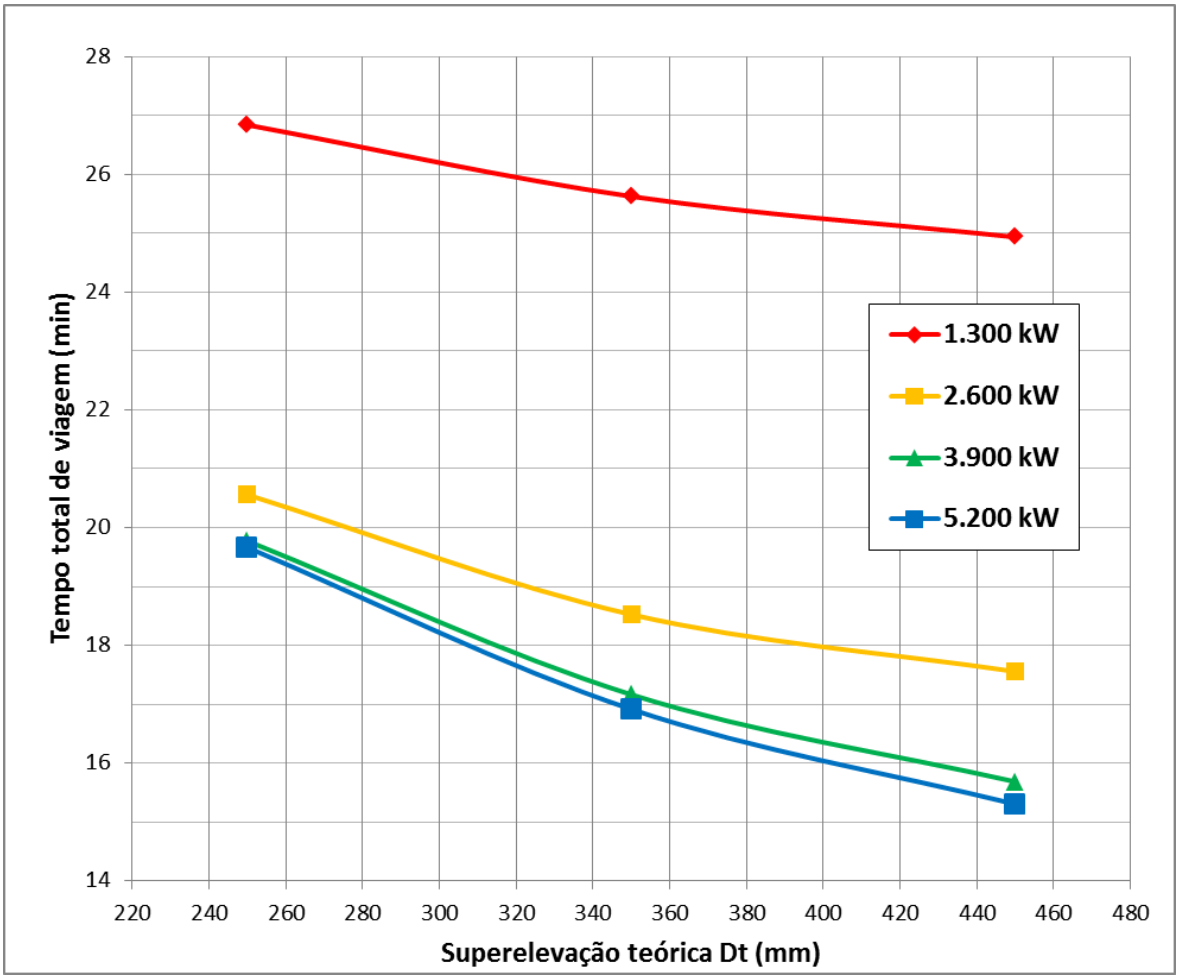


Gráfico 11.9 - Tempo total de viagem em função da superelevação teórica D_t (traçado teórico)

As considerações feitas quanto aos resultados do Estudo de Caso 1 são também válidas para os resultados do Estudo de Caso 3. Os tempos totais de viagem diminuíram significativamente com a aplicação de uma superelevação teórica maior, ou seja, com o uso do material rodante diferenciado (do tipo pendular). Apenas o ponto ótimo quanto à motorização se diferencia, o que era naturalmente esperado.

O ponto ótimo mais uma vez foi definido por uma análise de sensibilidade, como no primeiro e segundo estudos de caso. Foi usado o mesmo critério da verificação de onde o aumento marginal de 100 kW reduz o tempo total de viagem em menos que 5 segundos. Assim sendo, analisando-se o Gráfico 11.7 e usando as planilhas de simulação elaboradas, definiu-se que para o trem pendular ativo (superelevação teórica D_t = 450 mm) a potência instalada ótima é igual a 3.600 kW. Esse valor superior era esperado, devido às exigências principalmente das rampas acentuadas do traçado gerado.

Assim, considerando a potência instalada ótima de 3.600 kW:

- Para o trem convencional (D_t = 250 mm), tem-se 19,8 minutos de viagem;
- Para o trem pendular de sistema passivo (D_t = 350 mm), tem-se 17,3 minutos de viagem;
- Para o trem pendular de sistema ativo (D_t = 450 mm), tem-se 15,9 minutos de viagem.

No capítulo seguinte, os resultados encontrados no Estudo de Caso 3 e nos dois estudos de caso anteriores são comparados entre si. Desse modo será possível estabelecer uma perspectiva geral a respeito do emprego dos trens pendulares, em função das características de cada traçado, que são o que mais diferencia os objetos de cada estudo uns dos outros.

PARTE 3 – ANÁLISE CRÍTICA

12. COMPARAÇÃO ENTRE OS TRÊS ESTUDOS DE CASO

12.1 JUSTIFICATIVA

A comparação entre os três estudos de caso permitirá um entendimento mais completo das possibilidades e implicações relacionadas com o uso do material rodante do tipo pendular. Os estudos de caso diferem entre si principalmente quanto à natureza dos corredores analisados, embora os métodos de análise deles também tenham sido bastante específicos. A comparação geral buscará em essência juntar os resultados de cada estudo de caso numa conclusão mais geral e genérica, que valha não só para os três casos, mas eventualmente para outros corredores ferroviários.

Recapitulando-se os três estudos de caso:

- O Estudo de Caso 1 teve como objeto um trecho rural do corredor de trens regionais São Paulo – Sorocaba, cujo projeto funcional já havia sido elaborado (tendo sido apropriadamente complementado). O chamado intermédio analisado foi considerado como de traçado moderadamente sinuoso, característico de um terreno de relevo ondulado, com uma extensão de 47,4 km. Pelas simulações de marcha foram obtidos a velocidade média e o tempo total de viagem em função da potência instalada e do tipo de material rodante (convencional, pendular passivo ou pendular ativo). A velocidade máxima considerada foi de 195 km/h, superior à do projeto funcional (140 km/h), mas ainda na faixa remetida aos trens de média velocidade.

- O Estudo de Caso 2 teve como objeto o corredor sueco entre Estocolmo e Gotemburgo, analisado na tese de Persson (2008). Desse corredor tinha-se somente a porcentagem de trechos em curva em função do raio, não o alinhamento horizontal em si. O traçado avaliado é pouco sinuoso, característico de um terreno de relevo plano ou levemente ondulado, com uma extensão total de 457 km. Nesse estudo de caso não foram feitas simulações de marcha, apenas foram interpretados os resultados de Persson sob a ótica do presente trabalho. Cabe ressaltar que os resultados analisados são para um corredor de alta velocidade, diferentemente dos outros dois estudos de caso, com uma composição maior (6 carros e 360 toneladas) e de potência instalada

também maior. As velocidades analisadas por Persson variavam de 200 a 280 km/h. Todas essas diferenças exigiram uma prévia adaptação e reinterpretação (com uma incerteza agregada) dos valores para permitir uma comparação efetiva.

- O Estudo de Caso 3 teve como objeto um traçado gerado em partes aleatoriamente, com o objetivo de produzir um alinhamento horizontal bastante sinuoso e um alinhamento vertical de rampas acentuadas. O terceiro e último traçado foi classificado como bastante sinuoso, característico de terreno fortemente ondulado ou montanhoso, com 47,4 km de extensão total como o traçado do primeiro estudo de caso. As simulações de marcha e os resultados gerados seguiram um processo semelhante ao utilizado no primeiro estudo de caso.

12.2 COMPARAÇÃO GERAL

Para permitir a comparação geral entre os resultados, ao final de cada estudo de caso foi encontrada a potência instalada ótima para o trem pendular ativo (superelevação teórica D_t igual a 450 mm). O critério estipulado foi o do aumento marginal de 100 kW que não provocasse uma redução do tempo de viagem maior que 5 segundos. Os valores encontrados foram:

- Para o Estudo de Caso 1 (corredor São Paulo – Sorocaba), a potência instalada ótima é igual a 2.600 kW;
- Para o Estudo de Caso 2 (alinhamento pouco sinuoso analisado na tese de Persson), a potência instalada ótima é igual a 1.400 kW;
- Para o Estudo de Caso 3 (alinhamento teórico bastante sinuoso gerado), a potência instalada ótima é igual a 3.600 kW.

Mais uma vez, as potências instaladas encontradas são bastante razoáveis. Percebe-se que quanto mais ondulado o terreno e acentuadas as rampas, maior será a potência necessária dos comboios e maior será a potência ótima correspondente.

Finalmente, os tempos de viagem referentes às potências ótimas foram levantados nas simulações de marcha. Os resultados de tempo e velocidade média

para cada um dos três tipos de material rodante, para cada um dos três estudos de caso foram organizados numa tabela geral.

Nesta tabela é designado o tempo relativo de viagem, sempre tomando como referência o tempo total de viagem conseguido com o trem convencional em cada um dos três tipos de traçado. Para cada estudo de caso também é associada a porcentagem de curvas em extensão, em relação ao total do trecho, e a potência instalada ótima.

A Tabela 12.1 geral e comparativa é apresentada a seguir, juntamente com o Gráfico 12.1, que ilustra os tempos de maneira relativa.

Tabela 12.1 – Tempos e velocidades médias para cada material rodante, para os três estudos de casos

	Estudo de caso	**CASO 2**	**CASO 1**	**CASO 3**
	Potência instalada (ótima) (kW)	**1.400**	**2.600**	**3.600**
	Sinuosidade do traçado	**Baixa**	**Média**	**Alta**
	Porcentagem em curvas	**9,4%**	**34,7%**	**62,6%**
Trem convencional (D_t = 250 mm)	Tempo de viagem (s)	1.220,8	1.180,4	1.189,1
	Tempo de viagem (min)	20,3	19,67	19,8
	Tempo relativo (%)	**100,0%**	**100,0%**	**100,0%**
	Vel. média (km/h)	139,8	144,6	143,5
Trem pendular passivo (D_t = 350 mm)	Tempo de viagem (s)	1.121,8	1.030,0	1.038,0
	Tempo de viagem (min)	18,7	17,17	17,3
	Tempo relativo (%)	**91,9%**	**87,3%**	**87,3%**
	Redução relativa (%)	***-8,1%***	***-12,7%***	***-12,7%***
	Vel. média (km/h)	152,1	165,7	164,4
Trem pendular ativo (D_t = 450 mm)	Tempo de viagem (s)	1.074,2	960,8	951,9
	Tempo de viagem (min)	17,9	16,01	15,9
	Tempo relativo (%)	**88,0%**	**81,4%**	**80,0%**
	Redução relativa (%)	***-12,0%***	***-18,6%***	***-20,0%***
	Vel. média (km/h)	158,9	177,6	179,3

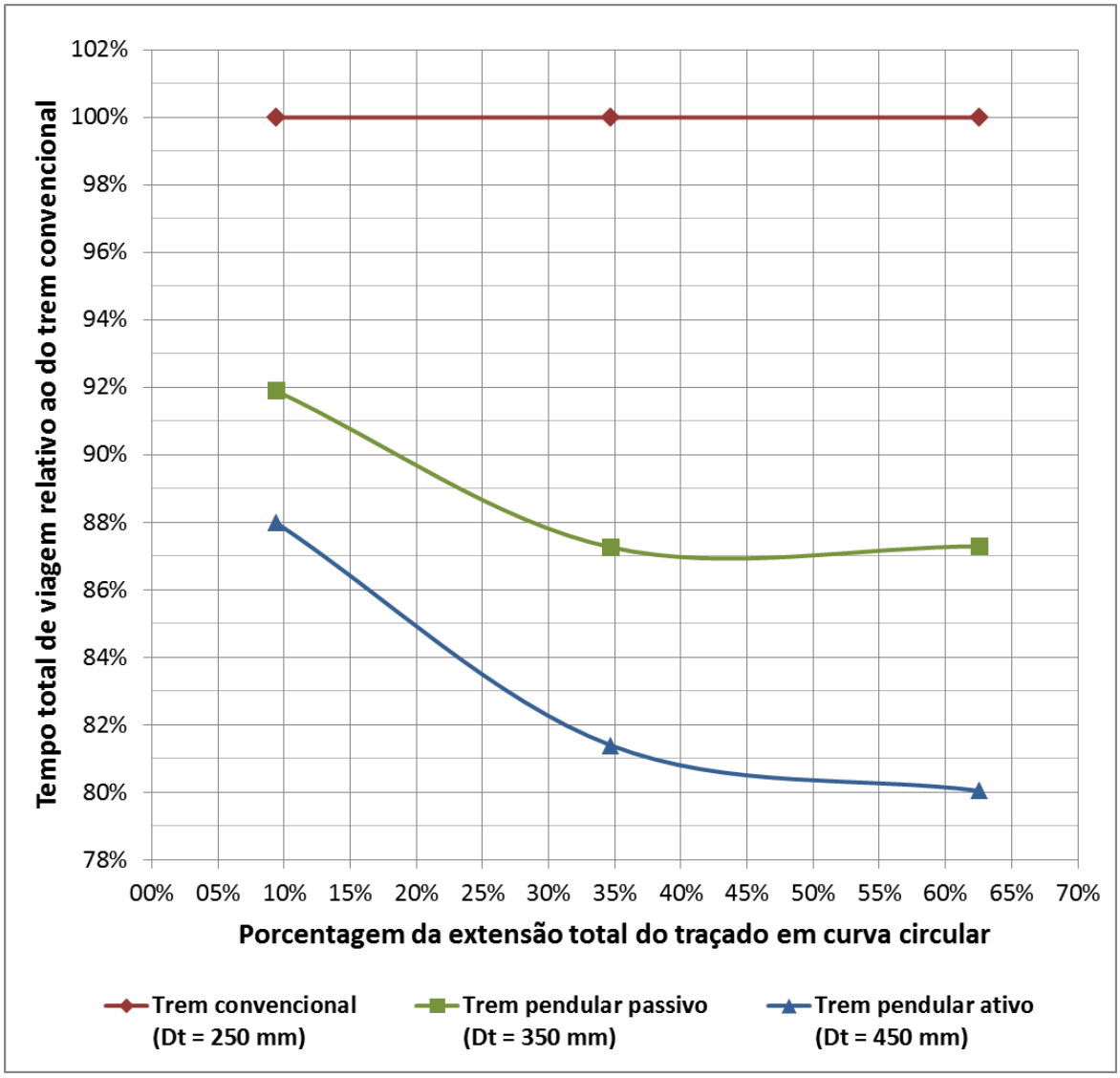


Gráfico 12.1 – Tempos relativos de viagem para cada material rodante, para cada um dos estudos de caso, em função da porcentagem em extensão de curvas dos traçados

12.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados encontrados com a comparação geral permitem uma série de discussões e conclusões englobantes sobre o material rodante pendular.

Encontrou-se uma redução de tempo significativa nos três estudos de caso. Mesmo no estudo de caso 2, em terreno de relevo plano, a redução do tempo total de viagem proporcionada é de 8,1% com emprego do trem pendular de sistema passivo e de 12,0% com o emprego do trem pendular de sistema ativo. Disso pode-se incorrer que as curvas de raio mínimo menor, mesmo que sejam poucas e de pequena extensão num dado traçado, podem restringir a velocidade média de um trem convencional significativamente. Isso decorre de que o trem tem que diminuir a

velocidade para transitar por uma curva; ao sair dela, o comboio não tem uma extensão suficiente para alcançar e manter a velocidade máxima por muito tempo, antes de chegar numa próxima curva em que deva reduzir a velocidade novamente. Isto ficou claro através dos gráficos das simulações de marcha.

Os tempos de viagem comparados, principalmente os relativos no Gráfico 12.1, mostram que a redução do tempo total de viagem é mais significativa para traçados mais sinuosos. Isso era esperado, e sabe-se da experiência que os trens pendulares são mais empregados em terrenos de relevo mais acentuado. Foi notado que, entretanto, essa redução relativa do tempo é parecida tanto para o Estudo de Caso 1, de relevo medianamente ondulado, quanto para o Estudo de Caso 3, de relevo fortemente ondulado. O trem pendular passivo reduz o tempo de viagem para 87,3% do correspondente referente ao trem convencional nos dois estudos de caso. Já o trem pendular ativo reduz o tempo para entre 80,0% e 81,4% do tempo que o trem convencional faria nestes mesmos casos.

Estes últimos resultados foram diferentes do intuitivamente esperado, que uma maior sinuosidade do traçado (e rampas mais acentuadas) levaria a uma redução relativa também maior. Como aconteceu com o Estudo de Caso 2, entretanto, essa semelhança pode ser explicada por como a sequência de curvas de raios mínimos impede que as velocidades máximas sejam alcançadas. Esse efeito acontece de maneira muito parecida no Estudo de Caso 1 e no Estudo de Caso 3, se forem analisados os gráficos das simulações de marcha.

Por fim, o Gráfico 12.1, com a comparação geral em função da porcentagem em extensão de curvas circulares de cada estudo de caso, constitui ferramenta interessante para a análise da efetividade dos trens pendulares. Estudos futuros, com alinhamentos existentes, em projeto ou mesmo teóricos, são aqui incentivados de maneira a complementar esse gráfico, ou construir outros parecidos com base nos mesmos raciocínios.

Por meio do gráfico, a efetividade do uso dos trens pendulares pode ser consultada para um traçado mais ou menos sinuoso. A potencial redução de tempo em função de um dado traçado de uma tal sinuosidade, associada com o benefício dessa redução, pode então ser comparada com o custo adicional do material rodante pendular para atestar a viabilidade de seu emprego.

13. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao longo do trabalho, foram apresentados e discutidos diversos aspectos referentes ao transporte ferroviário de passageiros. O âmbito analisado foi o dos serviços regionais e interurbanos (ou intercidades). O foco principal foi dado no material rodante de caixa móvel, também chamado de trem pendular, com suas particularidades e implicações analisadas, como no projeto geométrico, operação, implantação de novas linhas, conforto do usuário, dentre outros.

Neste capítulo são levantadas as principais conclusões e recomendações que decorreram ao longo do trabalho, seja pela revisão bibliográfica, pelos estudos de caso realizados ou da comparação geral feita entre os dados encontrados. Esses levantamentos serão feitos para cada parte, conforme a sequência adotada no presente trabalho.

13.1 PARTE 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica permitiu as seguintes conclusões e recomendações:

- O transporte ferroviário teve importância no desenvolvimento mundial, mas passou a sofrer concorrência com outros modais, como o rodoviário e o ferroviário, desde meados da década de 1950, como visto no Capítulo 3. Os trens de alta velocidade ou TAVs surgiram de maneira a aumentar a competitividade ferroviária. Os trens pendulares também, mas como uma alternativa mais barata, de modo a usar as infraestruturas existentes, embora apresentassem um incremento menor de velocidade. A tecnologia se desenvolveu desde 1970, estando estabelecida desde 1990, mas não amplamente difundida no mundo na atualidade.

- O entendimento da dinâmica do veículo na curva horizontal, apresentado no Capítulo 4, é essencial para o projeto de ferrovias e está ligado com a tecnologia pendular. Basicamente, o conceito de pendulação é o mesmo da superelevação para trens de passageiros. Os sistemas de pendulação da caixa fornecem uma inclinação adicional que diminui a aceleração lateral sentida pelo passageiro, que por sua vez é o principal fator prejudicial ao conforto de

viagem. No caso do veículo ferroviário, decorrem ainda da dinâmica na curva horizontal:

- O efeito da flexibilidade da suspensão, que é prejudicial para o conforto do passageiro. Esse efeito é pequeno, porém significativo; as menções a ele são menos comuns na literatura.
- Os critérios de segurança que devem ser verificados, por mais que eles normalmente sejam atendidos conforme opera-se em níveis aceitáveis de conforto do usuário. Os trens pendulares apresentam algumas particularidades quanto à segurança, por estarem sujeitos a uma maior aceleração centrífuga. Deve ser dada uma atenção maior para o risco de tombamento do veículo e o efeito agravador do vento na transversal na operação dos trens pendulares.
- O gabarito dinâmico ferroviário é de avaliação mais complexa no caso específico dos trens pendulares. Os veículos pendulares, todavia, normalmente são projetados de modo a atender o gabarito sem que sejam necessárias mudanças na infraestrutura viária existente.

- Pelo Capítulo 5 foram verificados os tipos de material rodante pendular, o funcionamento e as particularidades de cada um. A variante de sistema passivo é simples e apresenta praticidade, embora a inclinação fornecida seja menor (em torno de 4º). Já a variante de sistema ativo é mais complexa, exigindo um sistema de controle e com uma inclinação maior (até em torno de 8º), sendo a mais difundida pelo mundo.
- O Capítulo 6 levantou a questão do conforto do passageiro, essencial no projeto geométrico e para os trens pendulares, pois o sistema age de modo a diminuir o desconforto sentido pelos usuários. Mostrou-se que:
    - O passageiro está sujeito a um desconforto médio de viagem, que depende das características do veículo e das irregularidades da via.
    - Além disso, o usuário sente desconforto em eventos discretos, como curvas de transição. Nelas, o projeto geométrico é de influência relevante. Curvas mais longas estão associadas com um maior conforto

do usuário, o que pode ser avaliado pelo índice P_{CT}. Os trens pendulares diminuem a aceleração lateral sentida pelo passageiro, que é uma das maiores causas de desconforto. Em compensação a velocidade de giro do plano do usuário na curva de transição é aumentada, o que diminui também o conforto. Com curvas de transição longas, o efeito é minimizado. Da experiência prática, os trens pendulares acabam apresentando um maior conforto que os convencionais se analisado o índice P_{CT}.

- O enjoo de movimento ou cinetose é um efeito de desconforto nos trens ainda em estudo, causado supõe-se pelo conflito sensorial. O fenômeno é algumas vezes mais associado aos trens pendulares. Autores como Persson (2011) recomendam várias medidas para diminuir o efeito no material rodante de caixa móvel, como evitar a combinação de acelerações verticais e mesmo reduzir a inclinação fornecida pelos sistemas de controle.

- Por fim, no Capítulo 7 discutiram-se referências para os custos adicionais associados aos trens pendulares, ressaltando-se que esse tipo de dado pode apresentar variações e deve ser considerado com cautela. Os pontos levantados foram:

  - Os custos adicionais encontrados de aquisição e operação do material rodante pendular são, numa estimativa expedita com base na literatura, de 10 a 15% quando comparados com os custos relativos aos trens convencionais. Não foram encontrados custos adicionais na implantação da via, mas ressaltou-se que na fase de projeto estes seriam pouco significativos. Recomenda-se assim a adaptação do projeto geométrico em novas ferrovias para possibilitar a operação de trens pendulares (incrementando-se a velocidade), por mais que a operação deles não esteja prevista no curto prazo. Encontrou-se uma estimativa de custo adicional de manutenção da via de até 5%.

  - Como as referências de custos adicionais encontradas foram em geral pequenas, recomenda-se em futuros trabalhos compará-los com as economias geradas pela implantação de uma infraestrutura com raios

menores (e assim menos obras civis necessárias, como túneis e viadutos). Essa possibilidade é mencionada na literatura, porém pouco atestada.

- Foram mostrados três exemplos onde o emprego de trens pendulares apresentou-se viável economicamente.

13.2 PARTE 2 – ESTUDOS DE CASO

A parte prática ou experimental do trabalho reuniu quatro estudos de caso (preliminar, 1, 2 e 3). As conclusões encontradas através deles são descritas nos itens a seguir.

13.2.1 Capítulo 8 - Estudo de Caso Preliminar

No Estudo de Caso Preliminar, foi analisado o projeto funcional do corredor São Paulo – Sorocaba, uma ferrovia de traçado medianamente sinuoso cujo projeto funcional avaliou a alternativa com a operação de trens pendulares. Ao repassar-se o projeto verificou-se que:

- Quando no traçado é usado o raio mínimo de 1.000 m ao invés do raio mínimo de 1.500 m, a redução de custos é significativa, ficando em torno de 11,0% no intermédio (parte rural do trecho).
- No projeto funcional, viu-se que os trens pendulares não mostravam economias significativas de tempo para o traçado com raio de 1.000 m. Isso se deve à velocidade máxima de 140 km/h, que podia ser atingida pelos trens convencionais nas curvas sem prejuízo para o conforto.

13.2.2 Capítulo 9 - Estudo de Caso 1

O Estudo de Caso 1, visto na sequência, buscou mostrar as possibilidades com o incremento da velocidade máxima para cerca de 195 km/h e opções operacionais prevendo o uso de trens convencionais e pendulares.

- Primeiramente estabeleceu-se a opção de referência F-R, prevendo trens convencionais com a velocidade máxima de 140 km/h no intermédio,

complementando-se o projeto funcional conforme os critérios das normas, em especial a EN 13803:2010 (CEN, 2010).

- De maneira semelhante, foram elaboradas as opções operacionais F-0, F-1 e F-2, prevendo trens convencionais, pendulares passivos e pendulares ativos, respectivamente. Complementou-se o projeto para a velocidade máxima incrementada de 195 km/h, de modo que foi verificado que:
    - São necessários comprimentos de curva de transição maiores e algumas alterações no projeto geométrico quando inseridas as clotoides (curvas de transição adotadas). Foi visto que essas alterações são pequenas e de custo adicional inexpressivo na fase de projeto, sendo recomendadas para prever a operação de trens pendulares futuramente e assim possibilitar o incremento de velocidades.
    - Há a influência do alinhamento vertical no desconforto do usuário, devida a qual é recomendado evitar coincidir curvas verticais côncavas e curvas horizontais no projeto geométrico quando for possível.
    - A avaliação do conforto (Apêndice B) do usuário mostrou que mesmo para os trens pendulares ativos, que apresentam os movimentos mais acentuados, o índice P_{CTs} (para passageiros sentados) não ultrapassa 6,8%. Ou seja, menos que 6,8% dos passageiros sentados sentiriam desconforto nas curvas de transição, o que é considerado um valor pequeno.
- As simulações de marcha para avaliação do tempo total de viagem mostraram reduções significativas com o emprego de trens pendulares. O tempo de referência adotado foi o do trem convencional, com 1.300 kW de potência instalada (a comparação geral, posterior, possibilitou uma avaliação mais apropriada, vale ressaltar). Para o ponto ótimo encontrado de 2.600 kW, o trem pendular passivo reduz o tempo de viagem para 80,3% do tempo referencial; já o trem pendular ativo reduz para 74,9% desse mesmo tempo.

13.2.3 Capítulo 10 – Estudo de Caso 2

No Estudo de Caso 2, avaliaram-se os resultados encontrados por Persson (2008) num corredor sueco pouco sinuoso, onde operam trens pendulares acima de 200 km/h. Os resultados encontrados proveram as seguintes conclusões:

- Mesmo para um traçado considerado pouco sinuoso, as reduções de tempos de viagem com o uso de trens pendulares mostraram-se significativas, embora naturalmente menores que as que seriam encontradas em traçados mais sinuosos. As reduções apontadas foram maiores que as correspondentes às alternativas analisadas (aumento da potência e aumento da velocidade máxima admissível de 200 para 280 km/h).
- Os resultados foram extrapolados e adaptados, com a ressalva de que os processos matemáticos podem ter agregado uma incerteza aos valores finais. Com parâmetros parecidos com o Estudo de Caso 1, o trem pendular passivo apresentou 91,9% do tempo de viagem; o trem pendular ativo mostrou 88,0% desse tempo. Para ambos considerou-se a potência ótima nesse traçado de 1.400 kW e em relação ao tempo total de viagem que corresponde ao trem convencional com essa mesma potência.

13.2.4 Capítulo 11 – Estudo de Caso 3

Com relação ao Estudo de Caso 3, foi proposto um novo traçado, teórico, gerado em partes aleatoriamente, bastante sinuoso e de rampas acentuadas (representando-se um terreno fortemente ondulado). Assim como no Estudo de Caso 1, foram elaboradas opções operacionais para os três tipos de material rodante: T-0, T-1 e T-2, com os mesmos parâmetros, como a velocidade incrementada de 195 km/h.

As simulações mostraram mais uma vez reduções significativas mediante o emprego de trens pendulares. Considerou-se o tempo de referência correspondente ao trem convencional e à potência instalada de 1.300 kW. No nível considerado como ótimo (de potência instalada igual a 3.600 kW), o tempo de viagem com o trem pendular passivo é reduzido para 64,5% do referencial. Já no caso do trem pendular ativo, a redução é para 59,1% desse mesmo tempo. Mais uma vez ressalta-se que a comparação geral, posterior, permitiu uma avaliação mais apropriada, já que as

reduções elevadas se devem em grande parte ao aumento da potência instalada em relação ao tempo referencial.

13.3 PARTE 3 – ANÁLISE CRÍTICA

A análise crítica, da qual o presente capítulo faz parte, constituiu-se também da comparação geral entre os estudos de caso. Como anteriormente descrito, a comparação geral foi feita de modo a encontrar conclusões englobantes para a operação de trens pendulares. Os resultados encontrados para cada estudo de caso são, em boa parte, específicos para cada traçado. A possibilidade de extrapolação das conclusões para outros corredores é melhorada com a comparação geral.

Na comparação geral foram analisados somente os níveis ótimos de potência instalada para cada traçado. Também foram organizados os dados a fim de mostrar os resultados de um modo genérico. Considerou-se então que:

- Para o Estudo de Caso 1, tinha-se o traçado medianamente sinuoso do projeto funcional do corredor São Paulo – Sorocaba. A potência instalada considerada ótima encontrada assumia o valor de 2.600 kW.
- No Estudo de Caso 2, tomou-se o traçado pouco sinuoso da tese de Persson (2008). A potência instalada ótima encontrada era igual a 1.400 kW.
- Já para o Estudo de Caso 3, o traçado avaliado era teórico, gerado aleatoriamente e classificado como bastante sinuoso. A potência instalada assumia o valor de 3.600 kW.

Para cada um desses estudos, organizaram-se as velocidades médias e os tempos de viagem referentes às três opções de material rodante: convencional (D_t = 250 mm), pendular passivo (D_t = 350 mm) e ativo (D_t = 450 mm). Assim sendo, obteve-se a redução de tempo de viagem fornecida pelos trens pendulares (passivo e ativo). Isso foi dado em função de quão sinuoso é o traçado, o que por sua vez foi avaliado conforme a porcentagem em extensão de trechos em curva circular. A Tabela 12.1 e o Gráfico 12.1 ilustram que:

- Os trens pendulares passivos ofereceram uma redução de 8,1% a 12,7% do tempo de viagem correspondente aos trens convencionais nos traçados estudados.

- Os trens pendulares ativos forneceram uma redução de 12,0% a 20,0% do tempo de viagem correspondente aos trens convencionais nos traçados estudados.

Cabe ressaltar que foram encontradas reduções significativas para todos os traçados e tanto para os trens de sistema passivo quanto ativo. Além disso, ao contrário do suposto inicialmente, o traçado teórico (Estudo de Caso 3), muito sinuoso, não necessariamente implicou numa redução muito maior do tempo de viagem que o traçado medianamente sinuoso (Estudo de Caso 1).

13.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como visto ao longo do trabalho, o transporte ferroviário de passageiros apresenta importância no contexto atual. Os trens pendulares mostram-se como solução tecnológica viável e com potencial para incremento de velocidades. Várias são as particularidades avaliadas, principalmente através da revisão bibliográfica, como a consideração do conforto do usuário e a operação diferenciada do sistema dos trens, que é mais complexo.

De maneira geral, os estudos de caso atestaram as possibilidades de incremento de velocidade e redução dos tempos totais de viagem. Procurou-se analisar casos diferenciados, inclusive por métodos também diferenciados. O aumento da velocidade e as reduções de tempo de viagem encontradas são condizentes com os referidos na literatura, como por Pita (2006) e Stipetic e Krec (2005). Já a comparação geral permite o uso como referência em projetos posteriores, embora contanto sejam semelhantes, com velocidades máximas estipuladas próximas do limite com que se trabalhou, em torno de 195 km/h.

Ressalta-se mais uma vez a importância de um projeto geométrico, ao implantar-se um novo corredor, que leve em conta a operação futura de trens pendulares por mais que eles não estejam previstos inicialmente. As alterações, com a inserção de curvas de transição maiores por exemplo, são simples e provocam mudanças pouco significantes nessa fase de projeto. Permite-se assim incrementar as velocidades futuramente, aumentando a competitividade do modo ferroviário.

Cabe lembrar também a possibilidade de redução de custos construtivos numa nova ferrovia. A implantação de uma ferrovia com raios pequenos e que preveja trens

pendulares desde o início pode gerar economias de obras civis, ao mesmo tempo atingindo as velocidades necessárias para o serviço. Essa hipótese é levantada na literatura, como no FACT (KUFVER, 2005). No presente trabalho ela também foi abordada, mas sugere-se um estudo mais aprofundado, incluindo comparação de custos construtivos e de operação, a fim de atestá-la.

Finalmente, vale reafirmar o compromisso da engenharia de transportes no âmbito do transporte ferroviário de passageiros. Os serviços de transporte devem ser progressivamente mais confortáveis para o usuário, com tempos de viagem cada vez menores, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis. O modo ferroviário se destaca pela sua sustentabilidade e pode ser também o mais confortável, com menor tempo e maior confiabilidade num considerável “raio” de ação, comparado com os outros modos (como o aeroviário e o rodoviário). A vindoura retomada das ferrovias de passageiros no Brasil é indicador claro desses pontos.

Nesse contexto, como visto ao longo do trabalho, os trens pendulares se destacam como solução tecnológica a ser contemplada, de modo a atingir esses objetivos, propiciando assim serviços cada vez mais aprimorados - em todos os sentidos analisados.

14. REFERÊNCIAS

AASHTO. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. AASHTO. Washington. 2004.

ABATE, V. **Aula inaugural - Crescimento do setor ferroviário**. Associação Brasileira da Indústria Ferroviária. São Paulo. 2013.

ALSTOM. **Technologies & Systems - Tiltronix: Leaning towards high speed**. Alstom. [S.l.]. 2010.

ALSTOM. **Technology & Systems - Tiltronix: Leaning towards high speed**. [S.l.]. 2012.

ALSTOM. Technologies. **Site de tecnologias da Alstom**, 15 Setembro 2013. Disponivel em: <http://www.alstom.com/transport/news-and-events/events/archives/reveal-agv/technologies/>. Acesso em: 15 Setembro 2013.

ANTT. Trem de Alta Velocidade - TAV - Portal ANTT. **Portal da ANTT - TAV Brasil**, 2014. Disponivel em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/5448.html>. Acesso em: 31 Agosto 2014.

AUTODESK. **AutoCAD Civil 3D Land Desktop 2009 - Ajuda**. Autodesk. [S.l.]. 2009.

BOMBARDIER. **FLEXX Tronic Technologies**. Bombardier. Netphen. 2011.

CEN. **Railway applications - Track - Track alignment design parameters - Track gauges 1435 mm and wider - Part 1:** Plain line. Bruxelas: European Committee of Standardization, 2010.

CENTRO-OESTE BRASIL: FERREOMODELISMO, TRENS E FERROVIAS DO BRASIL. Gabaritos de via férrea | Engenharia ferroviária. **Gabaritos de via:** EFCB - Estrada de Ferro Central do Brasil e VFRGS - Viação Férrea do Rio Grande do Sul, 20 out. 2013. Disponivel em: <http://vfco.brazilia.jor.br/ferrovias/bitolas/gabaritos-de-via-EFCB-VFRGS.shtml>. Acesso em: 20 Outubro 2013.

CPTM. **Projeto geométrico do traçado da via permanente**. São Paulo: CPTM, 2007.

CPTM. **Ligações ferroviárias regionais: Considerações preliminares e diretrizes**. Companhia Paulista de Trens Metropolitanos. São Paulo. 2010.

CPTM. **Estudos de Traçado, de Viabilidade Técnica, Operacional e Ambiental, de Inserção Urbana e de Projeto Funcional para Implantação de um Serviço Ferroviário de Passageiros ligando as cidades de São Paulo e Sorocaba**. Companhia Paulista de Trens Metropolitanos. São Paulo. 2011.

DER/SP. **Notas técnicas de projeto geométrico**. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. São Paulo. 2006.

ENSCO. Keeping Your Trains on the Track - Strategies for Preventing Derailments | ENSCO Press Releases. **Site da ENSCO**, 19 out. 2013. Disponivel em:

<http://www.ensco.com/News-Media/pressreleases.htm&artcat=2&article=128>. Acesso em: 19 Outubro 2013.

ESVELD, C. **Modern Railway Track**. Delft: Dior Zwarthoed-van Nieuwenhuizen, 2001.

FÖRSTBERG, J. **Ride comfort and motion sickness in tilting trains:** Human responses to motion environments in train experiment and simulator experiments. Estocolmo: Royal Institute of Technology, 2000.

GOODALL, R. M.; MEI, T. X. Active Suspensions. In: IWNICKI, S. **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. Boca Raton: CRC Press, 2006. p. 327-357.

GOOGLE MAPS. Google Maps. **Site do Google Maps mostrando a rota entre Estocolmo e Gotemburgo na Suécia**, 28 Setembro 2014. Disponivel em: <https://www.google.com.br/maps/dir/Estocolmo,+Sweden/Gothenburg,+Sweden/@58.5824208,15.0090793,8z/data=!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x465f763119640bcb:0xa80d27d3679d7766!2m2!1d18.0685808!2d59.3293235!1m5!1m1!1s0x464f8e67966c073f:0x4019078290e7c40!2m2!1d11.97456!2>. Acesso em: 28 Setembro 2014.

HITACHI. Tilting Train : Hitachi-Rail.com. **Site da Hitachi sobre trens pendulares**, 26 Outubro 2013. Disponivel em: <http://www.hitachi-rail.com/products/rolling_stock/tilting/index.html>. Acesso em: 26 Outubro 2013.

JOHNSON, D. M. Gauging Issues. In: IWNICKI, S. **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. Boca Raton: CRC Press, 2006. p. 181-207.

KABBACH JUNIOR, F. I. **PTR 2378 - Projeto de infra-estrutura de vias de transportes terrestre: Aula 7 - Alinhamento horizontal II**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2013.

KUFVER, B. **Fast And Comfortable Trains - FACT - Deliverable D8:** Tracks for tilting trains. Linköping: European Commission, 2005.

LAZAREVIC, L. et al. **Curve with nonlinear change of curvature - 3D Modeling**. Belgrado. 2011.

LEFERROVIE.IT. Elettrotreno politensione ETR 600 - leferrovie.it. **Site sobre o trem ETR 600**, 27 Setembro 2014. Disponivel em: <http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=schede_tecniche:elettrico:etr:etr_600>. Acesso em: 27 Setembro 2014.

LICHTBERGER, B. **Track Compendium:** Track System, Substructure, Maintenance & Economics. Hamburgo: DW Media Group GmbH, Eurail Press, 2011.

MANCINI, G. et al. **New developments with the Italian solution for tilting trains:** optimization of tilting system on new generation of Pendolino trains. Florença: Trenitalia SpA, 2008.

NORSONIC. Human vibration - Norsonic. **Respostas do corpo humano às vibrações - Norsonic**, 2 Novembro 2013. Disponivel em:

<http://www.norsonic.com/en/applications/vibration/human_vibration/>. Acesso em: 2 Novembro 2013.

ORLOVA, A.; BORONENKO, Y. The Anatomy of Railway Vehicle Running Gear. In: IWNICKI, S. **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. Boca Raton: CRC Press, 2006. p. 39-83.

PERSSON, R. **Tilting trains:** Description and analysis of the present situation. Estocolmo: Royal Institute of Technology (KTH), 2007.

PERSSON, R. **Tilting trains:** Technology, benefits and motion sickness. Estocolmo: Royal Institute of Technology (KTH), 2008.

PERSSON, R. **Tilting trains:** Enhanced benefits and strategies for less motion sickness. Estocolmo: Royal Institute of Technology (KTH), 2011.

PITA, A. L. **Pendulación, Basculación y Construcción de Infraestructuras Ferroviarias:** Opciones alternativas y complementarias. Madri: Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones., 1998.

PITA, A. L. **Infraestructuras ferroviarias**. Barcelona: Edicions UPC, 2006.

PITA, A. L. **Explotación de líneas de ferrocarril**. Barcelona: Edicions UPC, 2008.

PLANSERVI. **Projeto geométrico funcional**. Planservi Engenharia. São Paulo. 2012.

PORTO, T. G.; KABBACH JUNIOR, F. I. **PTR - 2302 Projeto de Infra-estrutura de Vias de Transportes Terrestres: Aula Ferrovia I**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2002.

REVISTA ELETRÔNICA TAV. Revista Eletrônica Trem de Alta Velocidade - TAV no Brasil e no Mundo: Agosto 2014. **Site com notícias sobre TAVs e trens regionais**, 01 Agosto 2014. Disponivel em: <http://www.tavtrilhos.com/2014_08_01_archive.html>. Acesso em: 27 Setembro 2014.

SANTOS, S. D. **Transporte ferroviário:** história e técnicas. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

SCHRAMM, G. **A Geometria da Via Permanente**. Porto Alegre: Meridional "Emma", 1974.

SIEMENS. **Siemens - Desiro ML: Soluções Siemens para os Trens Regionais no Brasil**. Siemens. São Paulo. 2011.

STECH, P. H. **Parâmetros do projeto geométrico para trens de passageiros de alta velocidade e longo percurso**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012.

STIPETIC, A.; KREC, M. Preparation of Railway Infrastructure for the Operation of Tilting Trains. **Promet- Traffic & Transportation**, Zagreb, 20 Dezembro 2005.

TALGO. **Apresentação Talgo**. [S.l.]. 2011.

TRAINS-WORLDEXPRESSES.COM. trains-worldexpresses.com. **trains-worldexpresses.com**, 2014. Disponivel em: <http://trains-worldexpresses.com/800/814.htm>. Acesso em: 17 Agosto 2014.

UIC. **UIC-703R: Layout characteristics for lines used by fast passenger trains**. International Union of Railways. [S.l.]. 1989.

UIC. **UIC-703RI: Infrastructure for tilting trains**. International Union of Railways. [S.l.]. 2003.

WICKENS, A. H. A History of Railway Vehicle Dynamics. In: IWNICKI, S. **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. Boca Raton: CRC Press, 2006. p. 5-38.

WIKIPEDIA. 0 Series Shinkansen - Wikipedia, the free encyclopedia. **Página sobre o 0 Series Shinkansen na Wikipedia**, 2014a. Disponivel em: <http://en.wikipedia.org/wiki/0_Series_Shinkansen>. Acesso em: 18 Agosto 2014.

WIKIPEDIA. Comboio pendular – Wikipédia, a enciclopédia livre. **Site sobre trens pendulares na Wikipedia**, 2014b. Disponivel em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Comboio_pendular>. Acesso em: 4 Outubro 2014.

WIKIPEDIA. N700 Series Shinkansen - Wikipedia, the free encyclopedia. **Site do Shinkansen Série N700 na Wikipédia**, 2014c. Disponivel em: <http://en.wikipedia.org/wiki/N700_Series_Shinkansen>. Acesso em: 17 Agosto 2017.

WIKIPEDIA. New Pendolino - Wikipedia, the free encyclopedia. **Site sobre o novo pendolino - ETR600**, 27 Setembro 2014d. Disponivel em: <http://en.wikipedia.org/wiki/New_Pendolino>. Acesso em: 27 Setembro 2014.

WIKIPEDIA. Santiago de Compostela derailment - Wikipedia, the free encyclopedia. **Site sobre o acidente de Santiago de Compostela**, 15 set. 2014e. Disponivel em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Santiago_de_Compostela_derailment>. Acesso em: 15 Setembro 2014.

WIKIPEDIA. SJ 2000 - Wikipedia, the free encyclopedia. **Site sobre o trem pendular ativo SJ 2000**, 28 Setembro 2014f. Disponivel em: <http://en.wikipedia.org/wiki/SJ_2000>. Acesso em: 28 Setembro 2014.

WIKIPEDIA. SJ X2 - Wikipedia, the free encyclopedia. **Site do SJ X2 na wikipedia**, 2014g. Disponivel em: <http://en.wikipedia.org/wiki/SJ_X2>. Acesso em: 17 Agosto 2014.

WIKIPEDIA. TGV - Wikipedia, the free encyclopedia. **Site sobre o TGV francês**, 27 Setembro 2014h. Disponivel em: <http://en.wikipedia.org/wiki/TGV>. Acesso em: 27 Setembro 2014.

WIKIPEDIA. Tilting train - Wikipedia, the free encyclopedia. **Site sobre trens pendulares na Wikipédia**, 2014i. Disponivel em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Tilting_train>. Acesso em: 17 Agosto 2014.

APÊNDICE A – CURVAS DE TRANSIÇÃO

No presente apêndice é introduzido e discutido o conceito de curva de transição e os tipos mais comuns utilizados no meio ferroviário. Em seguida, é apresentada uma justificativa para a adoção da clotoide no Estudo de Caso 1, como feito para a opção operacional de referência F-R (item 9.2.4) e para as opções com velocidade incrementada (item 9.3.4).

A.1 CONCEITO DA CURVA DE TRANSIÇÃO

A curva de transição deve normalmente ser dimensionada e inserida nos seguintes casos:

- Entre um trecho em tangente e um trecho em curva horizontal, e vice-versa;
- Entre curvas reversas;
- Entre curvas compostas de raios significativamente diferentes.

A rampa de superelevação normalmente é locada coincidindo com a curva de transição. A curvatura K de uma curva circular é definida como o inverso do raio R da mesma; normalmente, a curvatura pode ser expressa multiplicada por 1.000, algo comum no meio ferroviário. Ou seja, uma curva de raio 800 m teria uma curvatura (multiplicando-se o valor por 1.000) correspondente de K = 1,25.

Basicamente, ao longo de uma curva de transição haverá uma variação do raio R e consequentemente da curvatura K; normalmente também a superelevação D varia conjuntamente (quando a rampa coincide com a curva de transição). Por exemplo, ao longo de uma curva de transição entre uma tangente e uma curva horizontal (caso mais simples):

- O raio varia de infinito (tangente) a R;
- A curvatura varia de K = 0 a K = 1/R;
- A superelevação varia de 0 a D.

O modo como a variação da curvatura se dá (variação constante, por exemplo) ao longo do desenvolvimento da curva de transição é que definirá a tipologia desta, o

que concerne formato, afastamento, etc. A seguir, são apresentados os principais tipos de curvas de transição empregados no meio ferroviário, antes que seja justificada a adoção de um dos tipos (clotoide) para utilização ao longo do Estudo de Caso 1. Como referência tomar-se-á a transição entre uma tangente e a curva com R = 1.000 m e D = 150 mm, que é a mais comum nos estudos de caso, para um comprimento teórico de 150 m.

A.2 TIPOS DE CURVAS DE TRANSIÇÃO

A.2.1 Espiral do tipo clotoide

A clotoide é uma curva de transição em espiral na qual a variação da curvatura ao longo do desenvolvimento da mesma é linear, assim como a variação da superelevação. É interessante notar que os gráficos tanto da curvatura (Gráfico 0.1) quanto da superelevação (Gráfico 0.2) tomam o mesmo formato, o que também acontece com outros tipos de curva de transição.

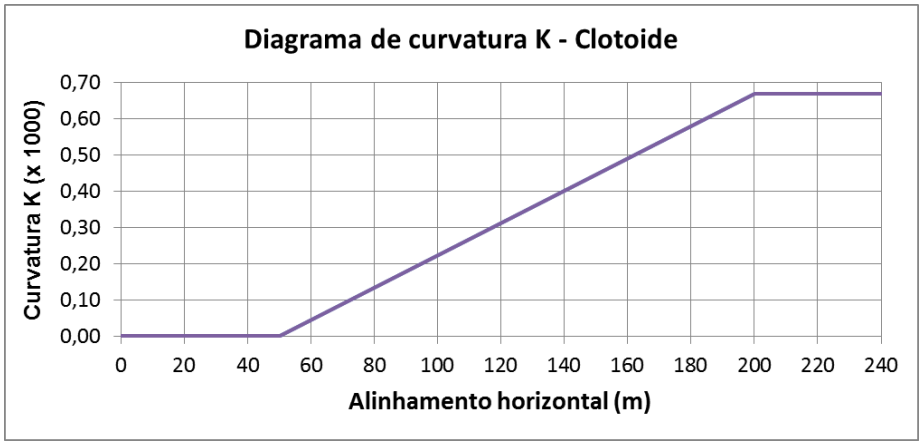


Gráfico 0.1 - Diagrama de curvatura K para a clotoide (variação linear)

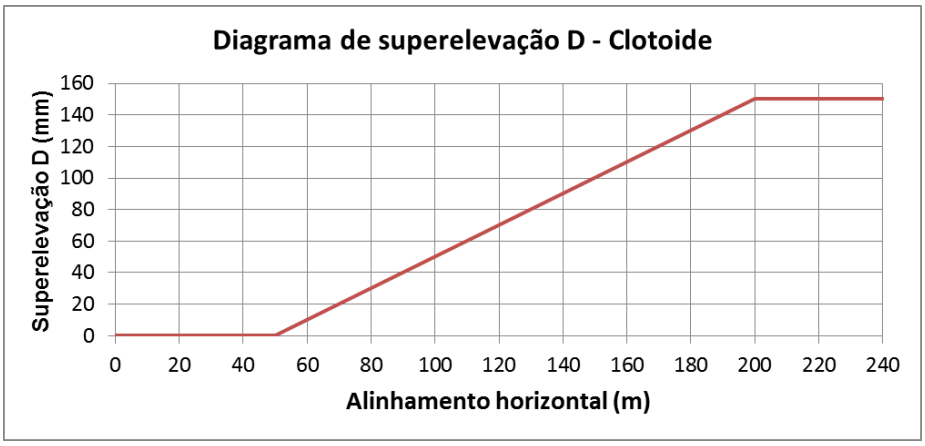


Gráfico 0.2 – Diagrama de superelevação D para a clotoide (variação linear)

A clotoide ainda é caracteriza por um parâmetro A que definirá seu comprimento conforme a expressão na Equação 0.1:

$$A^2 = R \cdot L$$

Equação 0.1 – Expressão que caracteriza a clotoide

Nota-se a partir da expressão que valores maiores de A conduzem a taxas mais suaves de mudança de curvatura, enquanto valores menores conduzem a taxas mais acentuadas. Também se extrai que, para qualquer ponto da clotoide, o produto do raio R pelo desenvolvimento L (tomando-se o início como o ponto onde o raio é infinito) será sempre o mesmo e igual a A². O Gráfico 0.3 e Gráfico 0.4 ilustram os conceitos referidos.

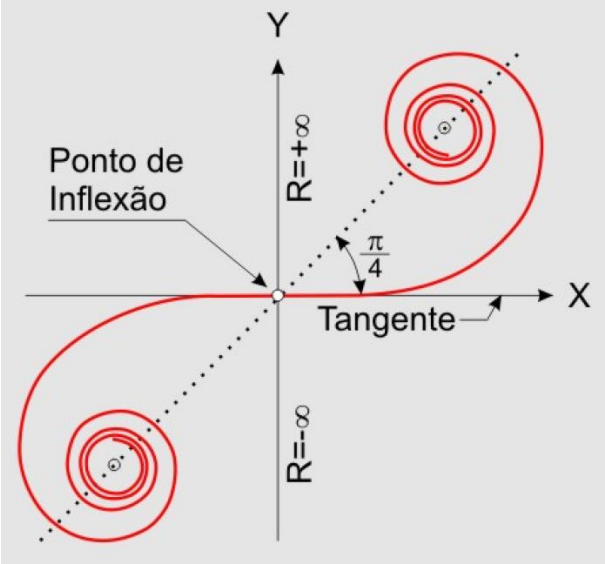


Gráfico 0.3 – Aspecto da curva de transição - Espiral do tipo clotoide (KABBACH JUNIOR, 2013)

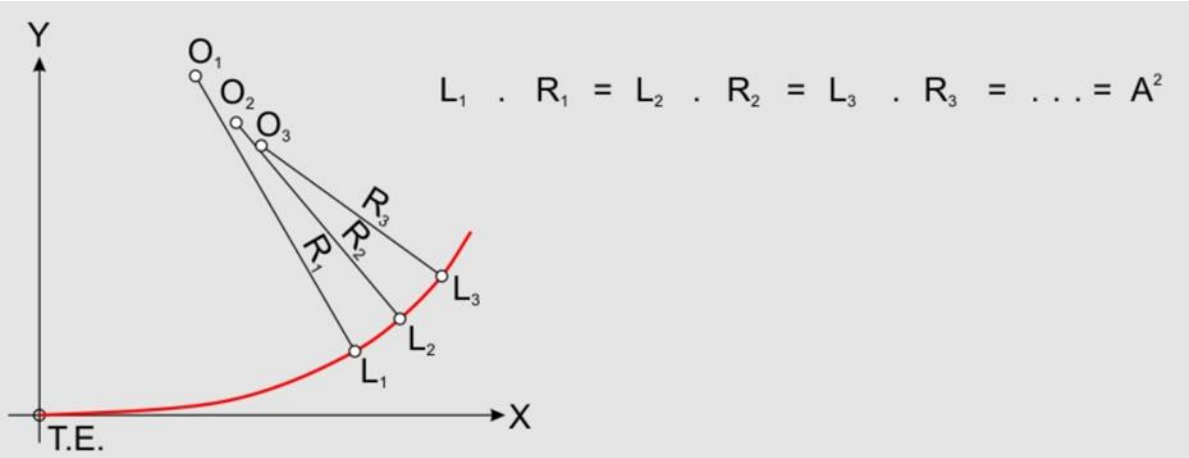


Gráfico 0.4 – Relação entre o raio e comprimento na clotoide (KABBACH JUNIOR, 2013)

A clotoide é a curva de transição mais comum e aplicada no mundo no traçado geométrico ferroviário e mesmo no rodoviário. Entre suas vantagens em relação a outros tipos de curva, estão: sua simplicidade, a variação em uma taxa praticamente constante ao longo de toda a curva da aceleração lateral e do giro do veículo em torno do eixo longitudinal, entre outros.

Alguns efeitos de segunda ordem surgem na clotoide, como picos localizados de variação do *jerk* lateral no início e fim dessa curva de transição – embora a relevância desses efeitos possa não ser grande, na prática. Como será visto a seguir, podem ser usados outros tipos de curvas de transição "superiores" ou "de padrão mais elevado" que evitam alguns efeitos indesejados, porém ao mesmo tempo com algumas desvantagens associadas.

A.2.2 Parábola cúbica

A parábola cúbica representa uma boa aproximação da clotoide e é mais simples que ela para ser locada em campo, por isso foi largamente aplicada desde o início das ferrovias, principalmente quando os raios e comprimentos envolvidos são grandes. Esse é normalmente o caso do meio ferroviário; no meio rodoviário, devido que as curvas são relativamente menores e haveria maiores excentricidades associadas, opta-se pelo uso exclusivo da clotoide.

A CPTM ainda adota em muitos de seus traçados a parábola cúbica. Porém no geral, para ferrovias de passageiros destinadas a trens de média e alta velocidade, esse tipo de curva de transição encontra-se em desuso.

A.2.3 Curvas de transição "superiores" ou "de padrão mais elevado"

A norma EN13803-1 (CEN, 2010) retrata outros quatro tipos de curvas de transição de gradiente variável, caracterizadas a seguir de acordo com a natureza da função de curvatura e superelevação em cada caso:

- Curva de Bloss (descrita por parábolas cúbicas);
- Curva cossenoide (descrita naturalmente pela função cosseno);
- Curva de Helmert/Schramm (descrita por parábolas quadráticas);
- Curva senoidal (descrita naturalmente pela função seno).

Superpondo as funções que descrevem essas quatro curvas e a clotoide, e que são ambivalentes (pois descrevem tanto a curvatura K quanto a superelevação D ao longo do desenvolvimento da curva de transição), tem-se o Gráfico 0.5:

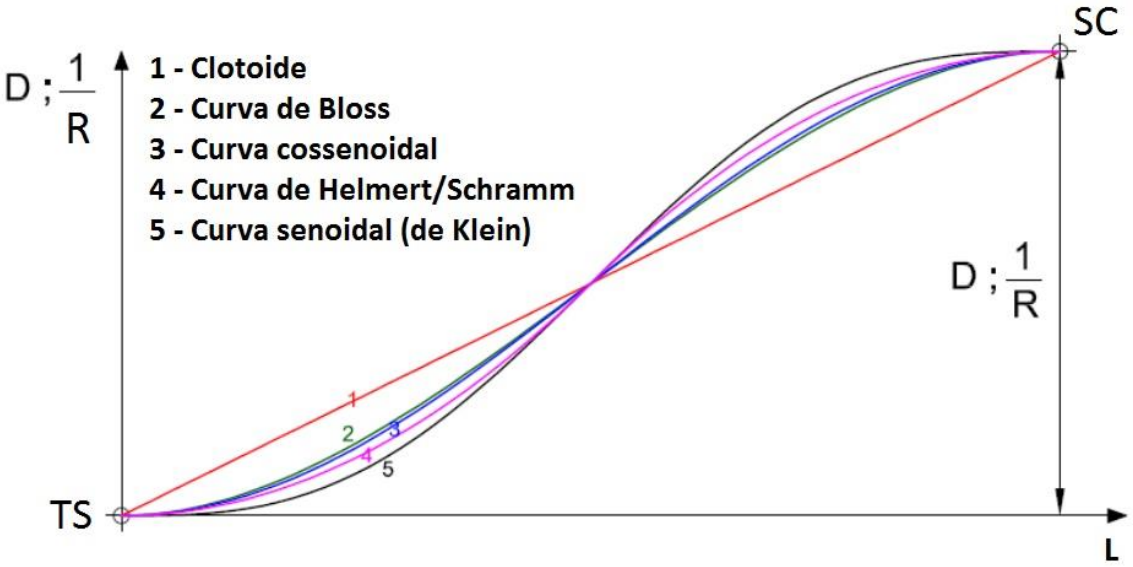


Gráfico 0.5 – Tipos de curvas de transição (LAZAREVIC, POPOVIC, *et al.*, 2011)

Essas quatro curvas “superiores” ou “de padrão mais elevado” são projetadas quando se deseja reduzir as influências dinâmicas no veículo e a aceleração vertical que afeta os passageiros (LAZAREVIC, POPOVIC, *et al.*, 2011). Em velocidades altas, em sistemas de alta velocidade da Europa e do Japão, por exemplo, é ressaltado que os efeitos de segunda ordem normalmente verificados em curvas de transição tornam-se mais relevantes para a dinâmica do veículo e o conforto do passageiro.

Por esse motivo, em ferrovias de alta velocidade as curvas de transição com função de curvatura quadrática (de Helmert/Schramm) e senoidal (de Klein) são mais usadas na Europa, enquanto a espiral com função de curvatura cossenoidal é mais usada no Japão, conforme informações de ajuda do software de projeto geométrico, AutoCAD Civil 3D Land Desktop 2009 (AUTODESK, 2009).

As diferentes curvas de transição podem ser comparadas em uma série de quesitos, como: a aceleração lateral, a vertical e suas variações (*jerk* lateral e *jerk* vertical); a máxima variação da superelevação; o afastamento provocado pela inserção das curvas de transição; entre outros. Fazer essa comparação de todos os quesitos, para todas as curvas está aquém do escopo do presente trabalho. As

seguintes tabelas, entretanto, compiladas a partir da norma EN 13803-1 (CEN, 2010), permitem uma análise simplificada.

Para um mesmo desenvolvimento L da curva de transição, tem-se conforme a Tabela 0.1:

Tabela 0.1 - Comparação dos tipos de curvas de transição dado um mesmo desenvolvimento L (CEN, 2010)

			Fator de comparação com a clotoide (multiplicar pelo valor de referência)				
		Valor de referência	Clotoide	Bloss	Cosse-noide	Helmert/ Schramm	Senoidal
Máxima variação da superelevação em função do desenvolvimento	$1: n_{max}$	D/L	1,00	1,50	1,57	2,00	2,00
Afastamento aproximado da curva horizontal, quando inseridas as curvas de transição	f	$\frac{L^2}{24 \cdot R}$	1,00	0,60	0,57	0,50	0,39

Considere-se agora, para as quatro curvas que não a clotoide, um desenvolvimento L tal que o afastamento f seja o mesmo que o da clotoide. Isso resultará nos seguintes valores, reunidos na Tabela 0.2:

Tabela 0.2 – Comparação dos tipos de curvas de transição dado um mesmo afastamento f (CEN, 2010)

			Fator de comparação com a clotoide (multiplicar pelo valor de referência)				
		Valor de referência	Clotoide	Bloss	Cosse-noide	Helmert/ Schramm	Senoidal
Comprimento aproximado da curva de transição	L	L_c	1,000	1,291	1,326	1,414	1,597
Máximo jerk lateral	$\dddot{y}_{max}$	1	1,000	1,162	1,184	1,414	1,252
Taxa de variação da aceleração vertical	$\frac{da_v}{dt}$	1	1,00	0,37	0,29	0,21	0,25

Como pode ser verificado, as quatro curvas “superiores” têm um menor afastamento f que o correspondente da clotoide, no caso de mantido o mesmo

desenvolvimento L. A variação da superelevação D/L, entretanto, torna-se superior nesse caso (com até o dobro do valor), como mostra a Tabela 0.1.

Se as quatro curvas “superiores” tiverem um desenvolvimento L incrementado de maneira que o afastamento f seja igual ao da clotoide, como se verifica pela Tabela 0.2, o máximo *jerk* lateral $\dddot{y}_{max}$ naturalmente diminui, porém mesmo assim é maior do que o experimentado na clotoide. A taxa de variação da aceleração vertical $\frac{da_v}{dt}$, todavia, diminui consideravelmente para essas quatro curvas diferenciadas nesse mesmo caso (sendo de até 21% do valor correspondente na clotoide), pois há uma transição suave ao entrar e sair da curva de transição.

Por fim destaca-se que as quatro curvas “superiores” apresentadas não exibem diferenças práticas entre si na operação: considerando a geometria da via, essas diferenças são da ordem de milímetros (SCHRAMM, 1974).

A.3 JUSTIFICATIVA PARA ADOÇÃO DA CLOTOIDE

Para o Estudo de Caso 1, a parábola cúbica foi desconsiderada em primeiro lugar, por ser uma aproximação da clotoide que não se faz necessária, estando à disposição os modernos equipamentos de locação em campo. A clotoide apresenta-se superior a ela por representar precisamente a variação constante da curvatura ao longo do desenvolvimento na curva de transição.

Já as quatro curvas “superiores” foram descartadas pois as vantagens que supostamente apresentam não justificam seu uso (e há desvantagens associadas a elas também) nos traçados do presente trabalho, destinados a trens de passageiros de média velocidade. De fato, a clotoide é a curva de transição mais convencional, comumente utilizada e com seus efeitos bem conhecidos nos traçados ferroviários em todo o mundo. Por exemplo, como relata a norma EN 13803-1 (2010), a experiência com curvas de transição de gradiente variável é limitada.

O emprego da clotoide, ao contrário das curvas “superiores”, gera no perfil do trilho externo à curva - que é o que “gira” na rampa de superelevação - dois pontos de inflexão vertical (que podem ser entendidos como “pontos secos”). Isso está ilustrado pelo Gráfico 0.5. Naturalmente, essa geometria em si é composta por duas “quebras”, às quais se poderia atribuir um desconforto devido a uma mudança brusca da

velocidade de giro (gerando uma aceleração de giro teoricamente infinita). Essa mudança brusca não se apresentaria nas curvas “superiores”, pelo perfil do trilho associado ser contínuo, o que se supõe que agregaria conforto para o usuário.

Tal suposição, entretanto, é questionável. Como visto anteriormente, a equação mais utilizada para avaliação do conforto (índice P_{CT}) na curva de transição leva em conta somente a aceleração lateral sentida pelo passageiro ÿ, o *jerk* lateral $\dddot{y}$ e a velocidade de giro $\dot{\varphi}$, desconsiderando efeitos de segunda ordem. Aliás, enquanto na clotoide o *jerk* lateral e a velocidade de giro serão teoricamente constantes, nas curvas “superiores” de desenvolvimento equivalente haverá picos indesejáveis no meio do elemento e com valores correspondentes consideravelmente maiores que os presentes na clotoide, como visto.

A restrição quanto ao valor máximo de variação da superelevação ao longo do tempo impõe mais uma desvantagem às curvas superiores. Segundo a norma EN 13803-1 (CEN, 2010), os limites normais são parecidos para as transições constante e variável: 50 mm/s e 55 mm/s, respectivamente. Dados esses limites, numa mesma curva de raio R = 1.000 m, trafegada a 140 km/h e com superelevação D = 150 mm, aplicando-se uma clotoide e uma curva senoidal (de Klein) resultaria como na Tabela 0.3:

Tabela 0.3 – Comparação de curvas de transição de diferentes tipos – Clotoide e senoidal (de Klein)

		Clotoide	**Senoidal (de Klein)**
Taxa máxima de variação da superelevação ao longo do tempo (mm/s)	$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim}$	50 mm/s	55 mm/s
Comprimento necessário (m)	L	116,7	212,1
Afastamento aproximado (m)	f	0,57	0,74

Percebe-se que o desenvolvimento de uma curva “superior” resulta excessivamente maior. Para determinados traçados nem mesmo seria possível incluir curvas de transição tão longas e as próprias necessidades inerentes à operação dos trens pendulares já requerem um aumento do desenvolvimento dessas curvas.

Além disso, o benefício supracitado quanto ao menor afastamento f pode não ser verdadeiro. As curvas “superiores” geram menor afastamento que o de uma

clotoide, mas para um mesmo desenvolvimento. Como justamente foi necessário aumentar o comprimento da curva de transição “superior”, aumentou também o afastamento, que ultrapassou o correspondente da clotoide. Vale ressaltar que para novos traçados – como o do Estudo de Caso 1 - a discussão quanto ao afastamento pode ser pouco relevante.

Mesmo os dois “pontos secos” presentes na clotoide podem não representar um problema na rampa de superelevação associada por outro motivo: essa interface é normalmente suavizada na prática por curvas verticais curtas, naturalmente “de suavização”.

Por todos esses levantamentos, justifica-se o emprego da clotoide na opção operacional de referência F-R, assim como para as opções com velocidade incrementada F-0, F-1 e F-2, todas integrantes do Estudo de Caso 1. As opções do Estudo de Caso 3 seguem essa mesma premissa, tendo sido adotada igualmente a clotoide como curva de transição no alinhamento horizontal.

APÊNDICE B – AVALIAÇÃO DO CONFORTO NA CURVA DE TRANSIÇÃO

São neste apêndice apresentadas as avaliações do conforto do usuário na curva de transição para as opções de operação do Estudo de Caso 1, propostas ao longo do trabalho, mediante o uso do índice de conforto P_{CT} definido em 6.2.2.1.

A avaliação do conforto é feita normalmente mediante testes em campo. As simulações das respostas dinâmicas do veículo, como feito nos experimentos do FACT (KUFVER, 2005), representam uma alternativa mais barata, simples e de maior controle das variáveis envolvidas.

Os dados para avaliação do conforto por meio do índice P_{CT} são normalmente obtidos do modelo simulado segundo a metodologia apresentada no item 6.2.2.1. A construção de um modelo simulado é complexa e fora do escopo do presente trabalho. Assim, os três dados de entrada da equação do conforto na curva de transição (máxima aceleração lateral, máximo *jerk* lateral e máxima velocidade de giro sentidos pelos passageiros) serão inferidos de maneira simplificada, a partir apenas dos dados de alinhamento horizontal.

Nas aproximações perdem-se os efeitos dinâmicos, de inércia dos componentes por exemplo. Porém, como as curvas de transição estudadas são longas, é possível considerar esses efeitos desprezíveis. Isso valerá tanto para a opção de referência F-R, com a velocidade prevista do projeto funcional São Paulo – Sorocaba, quanto para as opções de velocidade incrementada F-0, F-1 e F-2. Justifica-se que os valores encontrados terão apenas caráter indicativo.

B.1 OPÇÃO DE OPERAÇÃO DE REFERÊNCIA F-R

A curva típica do traçado de referência F-R é a de raio 1.000 m, associada com clotoides de desenvolvimento L_c igual a 108,9 m e superelevação D de 140 mm. A velocidade de projeto é de 140 km/h, e a insuficiência de superelevação I praticada é de I = 100 mm. Com isso podem ser calculados os três dados de entrada da equação do P_{CT}. O tempo que o veículo percorre a clotoide é de 2,8 segundos.

Antes deve ser considerado, entretanto, o efeito inerente à flexibilidade da suspensão. Como discutido em 4.2.1, esse efeito aumenta de 1,15 a 1,50 vezes (coeficiente f_R) a aceleração lateral sentida pelo passageiro – pois o ângulo total θ entre o plano do veículo e o plano horizontal diminui.

- A máxima aceleração lateral não compensada seria de a_{nc} = 0,597 m/s², por meio da Equação 9.1 e da Equação 4.4. Corrigindo esse valor dado o efeito da flexibilidade (multiplicando-se pelo coeficiente f_R), tem-se $a_{nc,f}$ = ÿ = 0,687 a 0,895 m/s².

- O máximo *jerk* lateral, também no plano da via, da caixa do veículo e do passageiro seria de $\dddot{y}$ = 0,213 m/s³ (bastando dividir a aceleração pelo tempo do trem percorrendo a curva de transição). Mais uma vez aplicando o coeficiente f_R, tem-se $\dddot{y}$ de 0,245 a 0,320 m/s³.

Para saber a velocidade de giro da caixa do veículo, é preciso antes calcular o ângulo real entre o plano do veículo e o plano horizontal, θ'. Calculando-se o ângulo original pelo arco seno (de acordo com a superelevação D e a distância entre os eixos dos trilhos, b_0), o ângulo sem considerar o efeito da flexibilidade resulta igual a θ = 5,36°.

O ângulo real θ' pode ser calculado conforme a dedução a seguir, feita resgatando-se o raciocínio da Equação 4.4. O termo à esquerda (aceleração lateral não compensada) aparece multiplicado pelo fator de rolamento f_R (que varia de 1,15 a 1,5); já do primeiro termo à direita é subtraída a componente da gravidade como na equação original, mas agora segundo o ângulo real θ'.

Deduzindo então o ângulo, tem-se:

$$a_{nc,f} = a_{nc} \cdot f_R = \frac{V^2}{12{,}96 \cdot R} - g \cdot \operatorname{sen} \theta' \qquad \text{(I)}$$

$$0{,}597 \cdot f_R = \frac{140^2}{12{,}96 \cdot 1.000} - 9{,}81 \cdot \operatorname{sen} \theta' \qquad \text{(II)}$$

$$\operatorname{sen} \theta' = \frac{1{,}508 - 0{,}597 \cdot f_R}{9{,}81} \qquad \text{(III)}$$

$$\theta' = \operatorname{arcsen}\left(\frac{1{,}508 - 0{,}597 \cdot f_R}{9{,}81}\right) \qquad \text{(IV)}$$

$$\theta' = 3{,}58° \; a \; 4{,}80° \qquad \text{(V)}$$

Considerando-se o ângulo provido originalmente pela superelevação de θ = 5,36°, a caixa do veículo inclina-se de 0,56° a 1,78° em relação ao plano da via. Curiosamente isso é favorável para o conforto ao produzir uma menor taxa de giro da caixa do veículo. Portanto:

- Tomando o tempo de 2,8 s que o veículo percorre a curva, a máxima velocidade de giro da caixa do veículo seria originalmente de $\dot{\varphi}$ = 1,91°/s; contabilizado o efeito da flexibilidade da suspensão tem-se $\dot{\varphi}$ de 1,28°/s a 1,71°/s.

Aplicando-se os valores na fórmula P_{CT} apresentada (Equação 6.4) e considerando-se os coeficientes relativos a um passageiro sentado (segundo a Tabela 6.1), resultaria que apenas em torno de 1,9% desses passageiros sentiria desconforto numa clotoide de entrada na curva horizontal. Novamente contabilizando o efeito da flexibilidade da suspensão, tem-se que de 2,9% a 5,4% dos passageiros sentiria desconforto, ainda assim valores consideravelmente baixos.

Da mesma maneira aplicando-se agora os valores na equação do conforto, mas considerando-se os coeficientes da Tabela 6.1 relativos ao caso de um passageiro em pé, resultaria que em torno de 11,2% desses passageiros sentiria desconforto na mesma clotoide de entrada. Também contabilizando o efeito da flexibilidade da suspensão, o desconforto afeta de 14,2% a 21,4% dos passageiros. Os valores encontrados são expressivos, porém aceitáveis. Vale lembrar que esse último caso é de menor importância para o presente trabalho – nos trens regionais, em geral, os passageiros estão sentados, levantando-se só eventualmente.

B.2 OPÇÕES DE VELOCIDADE INCREMENTADA F-0, F-1 E F-2

B.2.1 Avaliação preliminar do conforto para a clotoide redefinida

A clotoide para a curva mais comum do traçado objeto das opções F-0, F-1 e F-2 a partir do projeto funcional, de maneira a permitir o emprego de trens pendulares e em função das recomendações presentes nas normas, foi definida como tendo um comprimento L_c = 162,5 m.

Dado esse comprimento, a opção de operação com trens pendulares ativos (F-2) é a mais representativa para a avaliação do desconforto que o usuário irá sentir. Isso pode ser verificado pela natureza da equação do conforto na curva de transição (P_{CT}), pois mantidas todas as outras variáveis iguais (tomando-se que somente um projeto do traçado é feito), tem-se que:

- A flexibilidade da suspensão (principalmente a secundária) tem um efeito mais proeminente nos trens pendulares ativos que nos convencionais, pois eles estão sujeitos a uma maior aceleração lateral no plano da via – isso leva a um incremento na aceleração lateral $\ddot{y}$ que o passageiro efetivamente irá sentir (MANCINI, PELACCHI, *et al.*, 2008).

- O trem pendular ativo percorrerá a mesma curva de transição numa velocidade maior que as correspondentes das outras opções de operação, com trem convencional e pendular passivo – isso conduz a um incremento do *jerk* lateral ($\dddot{y}$) e da velocidade de giro ($\dot{\varphi}$).

- O ângulo total que a caixa do veículo gira, que no caso do trem pendular ativo dá-se principalmente pela superelevação e pela inclinação devido ao sistema pendular, será obviamente maior que o ângulo correspondente ao trem convencional e ao trem pendular passivo, também incrementando a velocidade de giro ($\dot{\varphi}$).

Para o caso típico do traçado do Estudo de Caso 1 e a opção F-2, tem-se:

- Raio R = 1.000 m;

- Superelevação D = 150 mm;

- Velocidade V = 195 km/h;

- Ângulo de giro da caixa do veículo α = 8,0°;

- Aceleração lateral no plano da via, sem consideração da compensação pelo sistema pendular e do efeito da flexibilidade, a_{nc} = 1,96 m/s² (correspondente à insuficiência de superelevação I de 300 mm).

Mancini et al (2008) caracteriza a aceleração lateral não compensada que o passageiro efetivamente sente $a_{nc,f,p} = \ddot{y}$ conforme a Equação 0.2 a seguir. Essa

aceleração leva em conta tanto a compensação pelo sistema pendular quanto o efeito da flexibilidade da suspensão.

$$a_{nc,f,p} = \ddot{y} = a_{nc} \cdot f_R - g \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

Equação 0.2 - Aceleração lateral sentida pelo passageiro – Trem pendular ativo

A equação apresenta um raciocínio parecido com o da dedução para o conforto na clotoide para a opção de referência F-R, apresentado no item B.1 do presente apêndice. Apenas é subtraído o termo referente ao sistema de inclinação da caixa do veículo ($g \cdot \operatorname{sen} \alpha$).

A aceleração gravitacional é tomada como g = 9,81 m/s². O fator de rolamento f_R da caixa do veículo será tomado como 1,18, como utilizado por Mancini et al (2008). Esse valor corresponde ao trem Pendolino ETR 600, o veículo moderno considerado na opção F-2. É interessante comparar esse valor com os da faixa apresentada anteriormente para os trens convencionais, na qual os valores do fator f_R se situam entre 1,20 e 1,50.

Ainda é posto por Mancini et al (2008) um coeficiente de compensação C_c, definido como a razão entre a aceleração lateral compensada pelo sistema pendular (segundo termo à direita na Equação 0.2) e a aceleração lateral à qual um veículo na mesma velocidade e na mesma curva estaria sujeito (primeiro termo à direita na Equação 0.2). Isso resulta na Equação 0.3:

$$C_c = \frac{g \cdot \operatorname{sen} \alpha}{a_{nc} \cdot f_R}$$

Equação 0.3 - Coeficiente de compensação da aceleração lateral – Trens pendulares de sistema ativo (MANCINI, PELACCHI, *et al.*, 2008)

A arquitetura de alguns sistemas de trens pendulares do tipo ativo prevê o uso do coeficiente C_c constante, compensando sempre uma porcentagem fixa da aceleração lateral. Essa é, inclusive, a regra adotada nos trens Pendolino como o ETR 600.

Aplicados os valores citados no Estudo de Caso 1 para o caso típico da curva de raio R igual a 1.000 m e a opção F-2, resulta que a aceleração lateral à qual o passageiro estará submetido assume valor ÿ = 0,950 m/s². Este valor, correspondente

à curva típica, será o mesmo independentemente do comprimento da clotoide adotado. O coeficiente de compensação C_c correspondente segundo a Equação 0.3 será igual a 59,0%. Já o jerk lateral ($\dddot{y}$) e a velocidade de giro ($\dot{\varphi}$) serão função do comprimento da clotoide.

De forma a fazer uma avaliação mais abrangente, os três parâmetros serão designados justamente em função do comprimento da clotoide L_c. Além disso, por mais que o comprimento da clotoide esteja definido como L_c = 162,5, por enquanto o valor dessa variável será deixado em aberto, de modo a verificar o conforto em função de possíveis diferentes comprimentos da curva de transição.

O *jerk* lateral $\dddot{y}$ (m/s³) será então definido simplificadamente pela Equação 0.4, tomando-se a velocidade V como 195 km/h e a aceleração lateral como ($\ddot{y}$) como 0,950 m/s²:

$$\dddot{y} = \ddot{y} \cdot \frac{V/3{,}6}{L_c} = \frac{51{,}46}{L_c}$$

Equação 0.4 - *Jerk* lateral em função do comprimento da clotoide, para o caso típico (opção F-2)

Sendo que a superelevação D = 150 mm corresponde a um ângulo de 5,74° e o sistema pendular garante 8° de inclinação adicionais, o ângulo total seria θ = 13,74°. Porém, contabilizando o efeito da flexibilidade da suspensão para encontrar o ângulo de giro θ' ao qual o passageiro está realmente submetido em relação ao plano horizontal, mais uma vez será adotado um raciocínio parecido ao realizado no item B.1 do presente apêndice, conforme a dedução a seguir.

$$\ddot{y} = \frac{V^2}{12{,}96 \cdot R} - g \cdot \operatorname{sen}\theta' \qquad \text{(VI)}$$

$$0{,}950 = \frac{195^2}{12{,}96 \cdot 1.000} - 9{,}81 \cdot \operatorname{sen}\theta' \qquad \text{(VII)}$$

$$\operatorname{sen}\theta' = \frac{2{,}934 - 0{,}950}{9{,}81} \qquad \text{(VIII)}$$

$$\theta' = \operatorname{arcsen}(0{,}2022) \qquad \text{(IX)}$$

$$\theta' = 11{,}67° \qquad \text{(X)}$$

Já a velocidade de giro ($\dot{\varphi}$), em °/s e em função do comprimento da clotoide será então (assumindo-se também V = 195 km/h) como na Equação 0.5:

$$\dot{\varphi} = \theta' \cdot \frac{V/3{,}6}{L_c} = \frac{632{,}1}{L_c}$$

Equação 0.5 - Velocidade de giro em função do comprimento da clotoide para o caso típico (opção F-2)

Aplica-se assim as fórmulas encontradas no cálculo do índice P_{CT} apresentado em 6.2.2.1, e têm-se as duas equações (Equação 0.6 e Equação 0.7) que retornam a porcentagem de passageiros que sente desconforto.

$$P_{CTp} = máx(28{,}54 \cdot \ddot{y} + 20{,}69 \cdot \dddot{y} - 11{,}1; 0) + 0{,}185 \cdot \dot{\varphi}^{2{,}283}$$

$$P_{CTp} = máx\left(28{,}54 \cdot 0{,}950 + 20{,}69 \cdot \frac{51{,}46}{L_c} - 11{,}1; 0\right) + 0{,}185 \cdot \left(\frac{632{,}1}{L_c}\right)^{2{,}283}$$

$$P_{CTp} = máx\left(16{,}013 + \frac{1.064{,}7}{L_c}; 0\right) + \frac{458.527{,}8}{{L_c}^{2{,}283}}$$

$$P_{CTp} = 16{,}013 + \frac{1.064{,}7}{L_c} + \frac{458.527{,}8}{{L_c}^{2{,}283}}$$

Equação 0.6 – P_{CTp}, para um passageiro em pé no caso típico (opção F-2) em função do comprimento da clotoide

$$P_{CTs} = máx(8{,}97 \cdot \ddot{y} + 9{,}68 \cdot \dddot{y} - 5{,}9; 0) + 0{,}120 \cdot \dot{\varphi}^{1{,}626}$$

$$P_{CTs} = máx\left(8{,}97 \cdot 0{,}950 + 9{,}68 \cdot \frac{51{,}46}{L_c} - 5{,}9; 0\right) + 0{,}120 \cdot \left(\frac{632{,}1}{L_c}\right)^{1{,}626}$$

$$P_{CTs} = máx\left(2{,}6215 + \frac{498{,}1}{L_c}; 0\right) + \frac{4.297{,}9}{{L_c}^{1{,}626}}$$

$$P_{CTs} = 2{,}6215 + \frac{498{,}1}{L_c} + \frac{4.297{,}9}{{L_c}^{1{,}626}}$$

Equação 0.7 - P_{CTs}, para um passageiro sentado no caso típico (opção F-2) em função do comprimento da clotoide

A Equação 0.6 corresponde aos passageiros em pé (índice P_{CTp}), enquanto a Equação 0.7 corresponde aos passageiros sentados (índice P_{CTs}). Ambas são válidas para a curva de transição de entrada da curva típica analisada no Estudo de Caso 1 e

para a opção de operação F-2. Com as duas equações encontradas pode-se construir o Gráfico 0.6, que mostrará a porcentagem dos passageiros que sentirá desconforto (na situação sentado e em pé) em função do comprimento da clotoide.

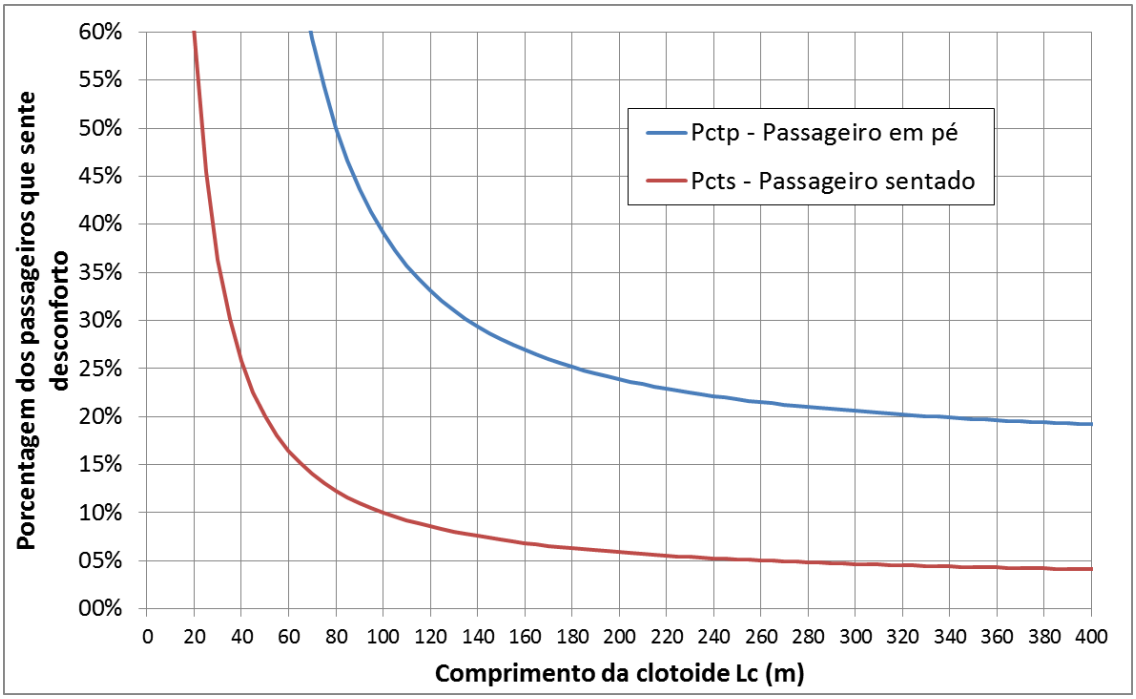


Gráfico 0.6 – Desconforto do passageiro em função do comprimento da clotoide – Opção F-2 para o caso típico

O comprimento mínimo da clotoide $L_{c,\ min}$ de 162,5 m adotado para o traçado no Estudo de Caso 1 conduz a um P_{CTp} de 26,7% e a um P_{CTs} de 6,8%. Estes valores estão um pouco acima dos já encontrados para o pior caso da opção de referência (F-R), conforme descrito no item B.1.

Pelo gráfico, conclui-se que aumentar o comprimento da clotoide adotado não implicaria em melhora significativa do conforto do usuário, por uma questão de “perda de sensibilidade” nas equações. Para referência, mesmo clotoides com 400 m de comprimento levariam a índices de P_{CTp} = 18,5% e P_{CTs} = 4,1%. E aumentar o comprimento das clotoides acarretaria em maiores afastamentos em relação à curva horizontal original (embora isso não seja um grande problema na fase de projeto).

Os dados provenientes da literatura corroboram a ideia de manter o comprimento adotado, que por sua vez está conforme os limites normais da EN 13803 (CEN, 2010), e que leva a valores aceitáveis do P_{CT}. Mancini et al (2008) relata que, para um dado traçado que foi objeto de simulações, o P_{CT} para o passageiro em pé é

de até 35%, implicitamente sendo isso aceitável. Já os dados do FACT (KUFVER, 2005), considerando trens pendulares em vários países da Europa (República Tcheca, Itália, Noruega, Espanha, Suécia e Reino Unido) e valores para o dimensionamento do traçado em casos excepcionais, relata o P_{CTp} entre 11,2% (Suécia) e 36,3% (Noruega), enquanto o P_{CTs} fica entre 1,5% (Suécia) e 9,8% (Noruega).

B.2.2 Avaliação do conforto em cada curva do alinhamento modificado

Para essa análise, será verificado o conforto do passageiro (sentado e em pé) em cada curva do alinhamento horizontal modificado, este que é objeto final do Estudo de Caso 1, tendo sido elaborado a partir do alinhamento horizontal original do projeto funcional. Também serão discutidas as implicações adicionais do alinhamento vertical no conforto.

A avaliação será feita por meio dos índices P_{CT}, como feito anteriormente no presente apêndice, só que para cada curva em particular do traçado neste caso. Os resultados são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**4. O processo desenvolvido pode ser descrito da seguinte maneira:

- As curvas do alinhamento horizontal modificado são separadas em função do raio R, da superelevação D e do comprimento das clotoides L_c de cada uma – notar que 31 das 44 curvas do trecho representam o caso típico de raio 1.000 m, mesmo após as modificações.

- São definidos os parâmetros de operação em função da velocidade máxima local V_{max}, da superelevação D e do raio R de cada curva, conforme a Equação 4.9, calculando-se com eles a insuficiência de superelevação I. Com esta deduz-se a aceleração lateral no plano da via a_{nc}, por meio da Equação 9.1.

Tabela 0.4 – Resumo do processo para estimativa do conforto do passageiro (em pé e sentado) em cada curva

Geometria da via				Parâmetros de operação				Movimentos aos quais são submetidos os passageiros				Avaliação do conforto	
Número da curva	Raio	Supere-levação	Compri-mento das clotoides	Veloci-dade máxima local	Insuficiên-cia de superele-vação	Aceleração lateral no plano da via	Ângulo (sistema pendular) - Cc = 59%	Aceleração lateral sentida pelo passageiro	Jerk lateral sentido pelo passageiro	Ângulo efetivo total	Velocida-de de giro	Desconforto do passageiro em pé	Desconforto do passageiro sentado
	R	D	L_c	V_{max}	I	a_{nc}	α	$\ddot{y}$	$\dddot{y}$	θ'	$\dot{\varphi}$	P_{CTp}	P_{CTs}
	(m)	(mm)	(m)	(km/h)	(mm)	(m/s²)	(°)	(m/s²)	(m/s³)	(°)	(°/s)	(%)	(%)
1; 2	400	150	102,9	123,5	300,0	1,96	8,00	0,95	0,32	11,72	3,91	**26,7%**	**6,8%**
44	600	150	126,1	151,3	300,0	1,96	8,00	0,95	0,32	11,72	3,91	**26,7%**	**6,8%**
6; 7; 9 a 13; 16 a 21; 23 a 37; 40; 41; 43 (31 curvas)	1.000	150	162,5	195,0	298,7	1,95	7,97	0,95	0,32	11,70	3,90	**26,5%**	**6,7%**
15	1.050	150	150,2	195,0	277,3	1,81	7,40	0,88	0,32	11,27	4,06	**25,0%**	**6,2%**
8	1.100	150	139,7	195,0	257,9	1,69	6,88	0,82	0,32	10,88	4,22	**23,7%**	**5,7%**
22	1.100	150	162,5	195,0	257,9	1,69	6,88	0,82	0,27	10,88	3,63	**21,3%**	**5,0%**
3	1.150	150	130,1	195,0	240,2	1,57	6,40	0,76	0,32	10,52	4,38	**22,5%**	**5,3%**
42	1.250	150	135,6	195,0	209,0	1,37	5,57	0,66	0,26	9,90	3,95	**17,5%**	**3,7%**
39	1.300	150	138,3	195,0	195,2	1,28	5,20	0,62	0,24	9,62	3,77	**15,3%**	**3,0%**
4	1.500	150	148,6	195,0	149,1	0,98	3,97	0,47	0,17	8,70	3,17	**8,5%**	**0,8%**
38	2.000	125	135,4	195,0	99,3	0,65	2,64	0,31	0,13	6,75	2,70	**2,3%**	**0,6%**
5; 14	2.100	115	124,6	195,0	98,7	0,65	2,62	0,31	0,14	6,35	2,76	**2,5%**	**0,6%**

- A opção tomada para a avaliação do conforto é a F-2, com emprego do trem pendular de sistema ativo, que apresenta os movimentos mais acentuados. Considera-se o ângulo máximo de giro α fornecido pelo sistema igual a 8°. Em curvas de raios maiores que 1.000 m, entretanto, ângulos de giro α menores podem ser suficientes. Seguir-se-á a regra de arquitetura do sistema de controle dos trens do tipo Pendolino ETR 600, de adotar um coeficiente de compensação C_c fixo para todas as curvas.

- O valor do coeficiente C_c adotado será igual a 59,0%, como na avaliação preliminar feita no item B.2.1 para a curva típica. Através da Equação 0.3, também expressa nesse item anterior, pode-se calcular os ângulos de giro a serem fornecidos pelo sistema α para cada curva. Para isso primeiro deve ser contabilizado o efeito da flexibilidade da suspensão, adotando-se assim o fator de rolamento f_R = 1,18 correspondente ao trem ETR 600.

- Calcula-se então a aceleração lateral efetivamente sentida pelo passageiro no plano do veículo $a_{nc,f,p} = \ddot{y}$, usando-se a Equação 0.2.

- O *jerk* lateral correspondente $\dddot{y}$ é a variação da aceleração $\ddot{y}$ ao longo do tempo que o trem percorre a curva de transição, que por sua vez pode ser encontrado através da velocidade máxima V_{max} e da própria extensão da clotoide L_c.

- O ângulo efetivo total em relação ao plano horizontal θ' ao qual o passageiro está submetido é calculado através do mesmo raciocínio feito no item B.2.1. Com esse ângulo, a velocidade e a extensão da clotoide calcula-se a velocidade de giro $\dot{\varphi}$ do mesmo modo.

- Calculados os três fatores (aceleração lateral $\ddot{y}$, *jerk* lateral $\dddot{y}$ e velocidade de giro $\dot{\varphi}$), pode-se inseri-los nas equações P_{CTp} e P_{CTs}, obtendo-se uma avaliação prática do conforto do passageiro em cada curva.

A Tabela 0.4 apresenta os grupos de curvas em ordem crescente de raio. Os comprimentos das clotoides correspondentes, entretanto, não são necessariamente menores quanto maior for o raio, como seria intuitivo. Isso acontece pois em alguns casos, como o da curva 22, a curva de transição foi aumentada para compatibilizar-se numa transição única de curva reversa. Além disso, critérios diferentes da norma EN

13803-1 (CEN, 2010) prevaleceram para a definição do comprimento da clotoide numa dada faixa de raios de curva. Em alguns casos prevalece o limite da variação da superelevação D ao longo do tempo, enquanto em outros prevalece o limite da variação da insuficiência I; lembrando também que as clotoides estão dimensionadas possibilitando as três opções de operação, com trens convencionais, pendulares passivos e ativos (opções F-0, F-1 e F-2).

Percebe-se que o comprimento da clotoide é muito importante para a definição do conforto conforme os índices P_{CT}. De maneira geral e prática, os resultados encontrados mostram que o desconforto sentido pelos passageiros diminui quando o raio da curva é aumentado, ao qual o comprimento da clotoide está vinculado. O Gráfico 0.7 ilustra esses resultados.

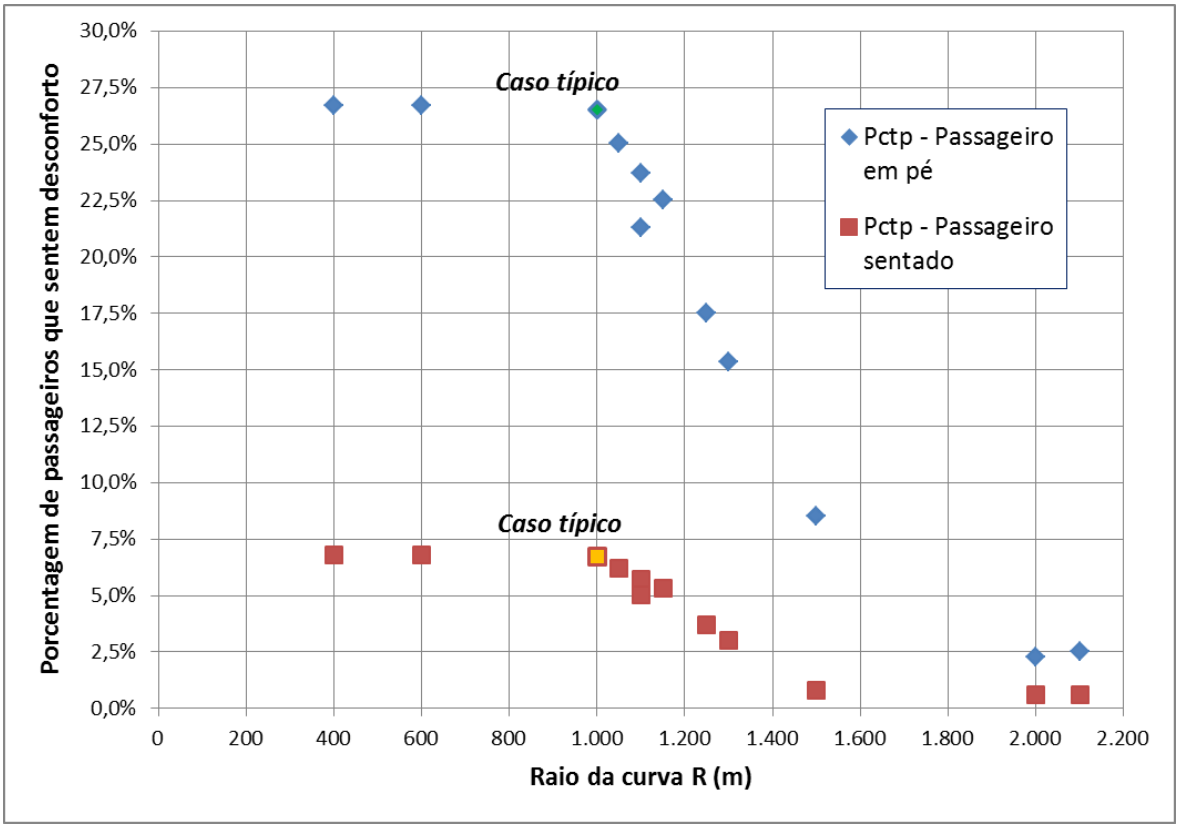


Gráfico 0.7 – Desconforto sentido pelo passageiro (em pé e sentado) em função do raio nas curvas do intermédio

O ângulo efetivo de giro θ', da caixa do veículo em relação ao plano horizontal, também tem grande importância para o conforto do passageiro. Embora um ângulo de giro maior diminuísse a aceleração e o *jerk* laterais sentidos pelo passageiro, a velocidade de giro excessiva provocaria desconforto. A estratégia de controle

comumente adotada para o sistema ativo, de compensar uma porcentagem fixa da aceleração lateral, gera velocidades de giro menores, que não ultrapassam os 5°/s.

O principal ônus dos trens pendulares quanto ao conforto é justamente gerar velocidades de giro maiores que os trens convencionais, como se pode notar comparando-se as velocidades de giro encontradas com as calculadas no item B.1, para a opção de referência F-R. O valor máximo de 5°/s, inclusive, é sugerido como um limite aceitável na literatura (KOYANAGI, 1985, apud FACT, 2005).

B.2.2.1 Implicações da aceleração vertical

A aceleração vertical sentida pelo passageiro é limitada no projeto geométrico somente nas considerações quanto ao alinhamento vertical, como apresentado em 9.3.7. Além disso, as equações P_{CT} não englobam as acelerações verticais.

Há que se ressaltar que, quando a caixa do veículo se inclina em relação ao plano horizontal, seja somente devido à superelevação ou também considerando a inclinação fornecida pelos sistemas pendulares, muda a distribuição das acelerações sentidas pelos passageiros. Embora a aceleração lateral diminua (ou, como analisado ao longo do trabalho, a velocidade possa ser aumentada e a aceleração lateral fique dentro do mesmo limite aceitável), a aceleração vertical será incrementada, ainda mais quando o trem percorrer a curva numa velocidade mais elevada.

A mudança é demonstrada na Figura 0.1 para um trem com sistema pendular ativo. A resultante é a mesma (em verde), porém enquanto a aceleração lateral diminui, a aceleração vertical aumenta; na figura, as acelerações em relação ao plano horizontal são mostradas em azul, enquanto as acelerações em relação ao plano da caixa do veículo (e do passageiro) que inclina são mostradas em vermelho.

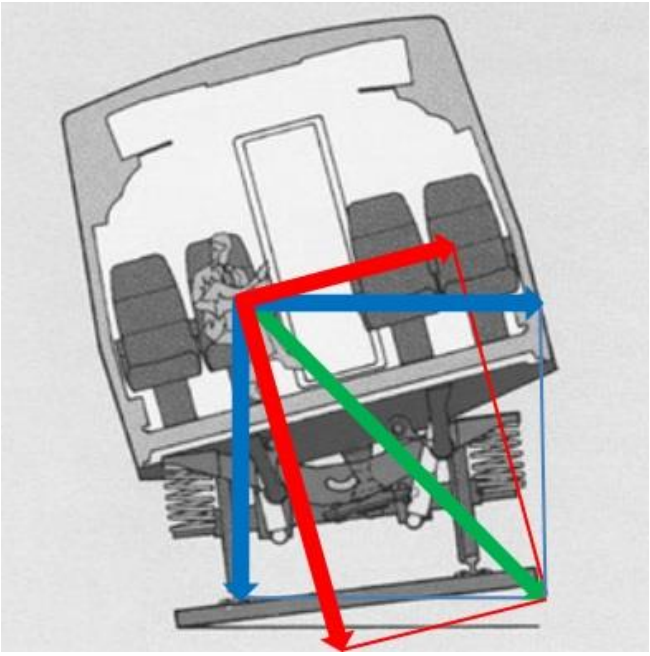


Figura 0.1 - Mudanças nas acelerações lateral e vertical sentidas pelo passageiro (FÖRSTBERG, 2000)

Esse incremento da aceleração vertical “empurrando” o passageiro pra baixo devido exclusivamente à inclinação da caixa do veículo pode ser bastante significativo. Caso ele ocorra na coincidência de uma curva horizontal com uma curva vertical côncava, haverá um pico indesejado nessa aceleração.

Persson (2011) identifica a geometria da via como de grande impacto nos movimentos da caixa do veículo e consequentemente na geração dos efeitos do enjoo de movimento ou cinetose. O autor, em primeiro lugar, identifica que a adoção de curvas de transição longas ajuda a reduzir o efeito, prática também adotada no presente trabalho. Em segundo, ele recomenda que não devem coincidir curvas verticais côncavas e curvas horizontais ou de transição.

Essa segunda consideração envolve uma prática de projeto geométrico mais avançada desde a concepção dos traçados horizontal e vertical, que devem ser elaborados de maneira conjunta. Nos estudos de caso analisados, isso acarretaria em mudanças muito profundas, de carácter inicial, e fora do escopo do trabalho.

A norma EN 13803-1 (CEN, 2010) como visto contempla com clareza os trens pendulares. Porém mesmo nela não há indicação de limites de aceleração vertical que considerem o efeito incrementador dos trens pendulares nas curvas côncavas. Somente pode-se deduzir que valem os mesmos limites apresentados para o

alinhamento vertical, no caso da aceleração diferencial para baixo (“esmagando” o usuário), conforme colocado em 9.3.7:

- Limite normal de 0,22 m/s²;
- Limite excepcional de 0,59 m/s².

Para não incorrer em soluções de intervenção mais complexa, alterando os traçados por exemplo, poder-se-ia incluir uma restrição local de velocidade como última solução, contrariando-se a premissa de máximo aumento das velocidades adotada no Estudo de Caso 1.

Como o efeito descrito pode não ser significativo e não há limites claros nas normas a serem respeitados, entre outras possíveis justificativas, será feita no presente trabalho apenas uma referência ao fenômeno. Também serão relacionados os trechos em que coincidem curvas verticais côncavas e as curvas horizontais ou de transição, com a indicação das acelerações verticais estimadas nesses trechos para a opção de operação F-2, que mais uma vez representa o caso crítico.

A Tabela 0.5 da página a seguir resume o efeito. Através dela, pode-se verificar que os trechos coincidentes são poucos, porém não podem ser desprezados, correspondendo a em torno de 3,5 km ou 7,5% do total do trecho. Em quase todos os trechos há picos locais da aceleração vertical que ultrapassam o limite excepcional de 0,59 m/s², chegando a até 0,80 m/s². Na média geral ponderada pelos comprimentos dos trechos coincidentes, entretanto, a aceleração vertical fica em torno de 0,49 m/s².

Nota-se a grande influência da parcela devido à inclinação da caixa do veículo nas acelerações verticais totais. Os valores máximos destas parcelas, que são geralmente para as curvas de raio igual a 1.000 m, por si só já se equivalem ao limite excepcional de 0,59 m/s².

Conclui-se então a importância de conciliar os alinhamentos vertical e horizontal, principalmente quando se preveja a operação de trens com sistema pendular, na fase de concepção do traçado geométrico.

Tabela 0.5 – Incremento nas acelerações verticais devido à inclinação da caixa do veículo em trechos de coincidência

Trecho de coincidência	Est. Inicial	Est. Final	Comprimento L	Raio horizontal (mínimo)	Raio vertical	Aceleração vertical devido à curva vertical	Aceleração vertical devido à inclinação da caixa do veículo			Aceleração vertical total (curva vertical + inclinação da caixa)		
							Mínima	Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média
			(m)	(m)	(km)	(m/s²)	(m/s²)	(m/s²)	(m/s²)	(m/s²)	(m/s²)	(m/s²)
1	28+293	28+592	299,0	1.000	23,5	0,13	0,07	0,59	0,42	0,20	0,72	**0,54**
2	32+483	32+882	399,0	1.000	20,9	0,14	0,59	0,59	0,59	0,73	0,73	**0,73**
3	39+305	39+654	349,5	1.000	26,9	0,11	0,00	0,59	0,41	0,11	0,70	**0,52**
4	41+527	41+905	378,0	1.000	44,5	0,07	0,00	0,59	0,42	0,07	0,66	**0,49**
5	44+245	44+411	165,7	1.000	34,5	0,09	0,00	0,59	0,21	0,09	0,68	**0,29**
6	48+837	49+336	499,0	1.000	24,7	0,12	0,00	0,59	0,48	0,12	0,71	**0,60**
7	51+037	51+224	187,0	1.000	27,2	0,11	0,00	0,59	0,25	0,11	0,70	**0,36**
8	55+827	56+026	199,0	1.000	14,0	0,21	0,47	0,59	0,59	0,68	0,80	**0,80**
9	57+177	57+536	359,2	1.000	45,7	0,06	0,00	0,59	0,41	0,06	0,66	**0,48**
10	63+647	64+146	499,0	2.000	50,1	0,06	0,11	0,14	0,14	0,17	0,20	**0,20**
11	66+367	66+569	202,0	1.000	31,0	0,09	0,00	0,59	0,28	0,09	0,69	**0,37**
Comprimento total de trechos de coincidência			**3.536,4**	Média ponderada		0,10	Média ponderada		0,39	**Média ponderada**		**0,49**