HENRIQUE FOSTER DE OLIVEIRA

Contribuição para análise da ocorrência de aquaplanagem em rodovias

São Paulo

2018

HENRIQUE FOSTER DE OLIVEIRA

Contribuição para análise da ocorrência de aquaplanagem em rodovias

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

Área de concentração:

Engenharia de Transportes

Orientador:

Prof. Dr. Felipe Issa Kabbach Jr.

São Paulo

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Oliveira, Henrique Foster
Contribuição para análise da ocorrência de aquaplanagem em rodovias / H. F. Oliveira -- versão corr. -- São Paulo, 2018.
193 p.

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

1.Rodovias 2.Segurança nos transportes I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Agradecimentos

Aos professores Felipe Issa Kabbach Jr. E Carlos Yukio Suzuki, pelo apoio, orientação e incentivos tanto no âmbito profissional como acadêmico.

À minha esposa Flavia pelo apoio e compreensão durante a elaboração deste trabalho e aos meus pais por sua dedicação e suporte ao longo de minha vida.

Aos colegas da Planservi Engenharia pelo apoio no desenvolvimento profissional e sugestões durante a elaboração deste trabalho.

Resumo

A aquaplanagem é um fenômeno que pode ocasionar riscos de acidentes em pistas rodoviárias e que consiste na perda de aderência entre os pneus de um veículo e a superfície do pavimento, em decorrência da presença de uma película de água com certa espessura que impede o contato entre ambos, situação essa que pode ser gerada em condições de precipitações pluviométricas de intensidades relativamente elevadas. De uma forma geral tal fenômeno é desconsiderado em normas, manuais e especificações para projetos rodoviários, tanto no Brasil como no Exterior. O presente trabalho tem como objetivo básico a proposição de um procedimento metodológico que permita a identificação de trechos de traçados rodoviários nos quais tal fenômeno possa ocorrer, seja na fase de elaboração de projetos, seja no processo de avaliação das condições de segurança de pistas existentes. O procedimento proposto foi estruturado com base na análise dos principais modelos de previsão de risco de aquaplanagem levantados durante a revisão bibliográfica, bem como em uma extensiva análise das principais variáveis que influenciam esse fenômeno. Com o propósito de avaliar a adequabilidade do procedimento proposto foi elaborado um estudo de caso considerando as características geométricas e dados pluviométricos relativos a determinada extensão do Trecho Leste do Rodoanel de São Paulo. Em tal estudo de caso foram apresentadas proposições de soluções alternativas de mitigação de risco para os trechos identificados como locais com possibilidade de ocorrência de aquaplanagem.

Palavras-chave: Aquaplanagem; Segurança viária; Projeto de rodovias

Abstract

Hydroplaning is a phenomenon that can result in hazard risk on highways, its occurrence is defined by an absence of adherence between the tire and the pavement caused by the presence of a water film of a certain depth that hinder the contact between those surfaces, it's occurrence is related to high rainfall intensity situations. Usually highway design manuals, standards and criteria don't consider the occurrence of this phenomenon, in Brazil or abroad. The present work has the object of proposing a methodological procedure that allows for the identification of highway segments that are subject to hydroplaning, during its design or during the evaluation of its security conditions. The proposed procedure was based on the analysis of the hydroplaning prediction models studied during the bibliography review, as well as in an extensive analysis of the main variables influencing its occurrence. For the evaluation of the proposed procedure, a case study was conducted with the east portion of the "Rodoanel Mario Covas" geometric characteristics and pluviometry data. In this study some risk mitigation proposals were evaluated for the extensions on which were identified the possibility of hydroplaning occurrence.

Keywords: Hydroplaning; Roadway Security; Highway design

SUMÁRIO

1. Introdução 13
1.1. Objetivo 13
1.2. Justificativa 14
1.3. Estrutura do trabalho 15
2. Revisão bibliográfica 16
2.1. Descrição da ocorrência de aquaplanagem 16
2.1.1. Aquaplanagem viscosa 17
2.1.2. Aquaplanagem por desvulcanização 17
2.1.3. Aquaplanagem dinâmica 19
2.2. Linhas de pesquisa 20
2.2.1. National Aeronautics and Space Administration (NASA) 21
2.2.2. Gallaway 22
2.2.3. Gengenbach 22
2.2.4. Outros trabalhos 23
2.3. Mitigação do risco 23
2.3.1. Pavimento drenante 23
2.3.2. Melhoria da macrotextura 24
2.3.3. Drenos transversais e longitudinais 26
2.3.4. Transição Oblíqua da superelevação 27
2.3.5. Mudanças na superelevação em tangente 29
2.3.6. Sinalização dinâmica 30
3. Análise das variáveis de influência na aquaplanagem 31
3.1. Intensidade de chuva 31

3.2. Pneus 37
3.3. Pavimento 40
3.3.1. Rugosidade 41
3.3.2. Defeitos da superfície 45
3.4. Fluxo de água 46
3.4.1. Comprimento 46
3.4.2. Declividade 48
4. Análise dos métodos de cálculo 50
4.1. Cálculo da espessura da lâmina de água 51
4.1.1. Gallaway 52
4.1.2. Road Research Laboratory 52
4.1.3. NHCRP Web report 16 (PAVDRN) 53
4.1.4. Herrmann 54
4.1.5. Análise comparativa dos modelos de determinação da espessura da lâmina de água 56
4.2. Cálculo da velocidade de ocorrência da aquaplanagem 56
4.2.1. NASA (HORNE e DREHER, 1963) 57
4.2.2. Gengenbach (1967) 57
4.2.3. Gallaway 58
4.2.4. University of South Florida (USF) 59
4.2.5. Análise comparativa dos modelos de velocidade de ocorrência de aquaplanagem 60
5. Procedimento proposto para avaliação da aquaplanagem 61
5.1. Descrição do procedimento 61
5.2. Algoritmo 62

5.2.1. 1ª etapa: cálculo dos dados das linhas de fluxo de água 63

5.2.2. 2ª etapa: Aplicação dos modelos de verificação.....68

5.2.3. Escolha do ponto de análise.....69

5.3. Considerações 72

5.4. Resultados 72

6. Estudo de caso 75

6.1. Descrição do trecho objeto do estudo 75

6.2. Premissas adotadas para o procedimento de análise.....77

6.3. Resultados da aplicação do procedimento de análise proposto 78

6.3.1. Considerações relacionadas aos resultados obtidos.....82

6.4. Avaliação de possíveis medidas de mitigação do risco de aquaplanagem para o traçado objeto do estudo.....84

6.4.1. Transição oblíqua da superelevação 85

6.4.2. Microfresagem 87

6.4.3. Mudança na superelevação básica em tangente.....88

7. Conclusões e recomendações.....90

7.1. Conclusões 90

7.2. Recomendações 91

Referências 93

ANEXO A – Resposta da ARTESP à solicitação do projeto utilizado no estudo de caso 100

APÊNDICE A – Ábacos para verificação expedita de projetos 102

APÊNDICE B – Gráficos para análise da ocorrência de aquaplanagem do estudo de caso – Cenário 1 132

APÊNDICE C – Arquivos de dados utilizados no trabalho 193

Índice de Ilustrações e Figuras

Figura 2-1 – Processo de diminuição do contato pneu-pavimento pela presença de água 16

Figura 2-2 – Zona de contato de um pneu após um evento de aquaplanagem por desvulcanização 18

Figura 2-3 – Arrasto hidrodinâmico 19

Figura 2-4 – Área de contato na ocorrência de aquaplanagem dinâmica em superfície lisa 20

Figura 2-5 – Fluxograma da ocorrência de aquaplanagem 21

Figura 2-6 – processo de “Grooving“ durante sua execução na pista do aeroporto de Congonhas/SP 25

Figura 2-7 – Alternativas de implantação de drenos longitudinais 26

Figura 2-8 – Exemplo de implantação de drenos transversais em uma zona de transição de superelevação 27

Figura 2-9 – Esquema de transição oblíqua da superelevação 28

Figura 2-10 – Variações de seção típica para melhoria da drenagem 29

Figura 2-11 – Sinalização Dinâmica de velocidade 30

Figura 3-1 – Precipitação anual média 32

Figura 3-2 – Curvas de Intensidade-Duração-Frequência 33

Figura 3-3 – Distribuição das durações acumuladas de precipitações em São Paulo e São Carlos até 150 mm/h 36

Figura 3-4 – Distribuição acumulada da pressão dos pneus em veículos de passeio 38

Figura 3-5 – Distribuição acumulada da profundidade dos sulcos da banda de rodagem em veículos de passeio 39

Figura 3-6 – Distribuição dos valores de pressão de enchimento para diferentes níveis de conservação dos pneus.....40

Figura 3-7 – Caracterização de microtextura e macrotextura.....41

Figura 3-8 – Ensaio da mancha de areia 42

Figura 3-9 – Valores de macrotextura obtidos por ensaio de mancha de areia 43

Figura 3-10 – Equipamento utilizado para o ensaio do pêndulo britânico 44

Figura 3-11 – Valores de microtextura obtidos por ensaio de pêndulo britânico.....45

Figura 3-12 – Vetores para determinação do comprimento da lâmina de água em trechos de superelevação constante.....46

Figura 3-13 – Análise do comprimento da linha de água na transição de superelevação 47

Figura 3-14 – Métodos para adaptação de declividades variáveis.....49

Figura 4-1 – Influência da espessura da lâmina de água na ocorrência da aquaplanagem.....51

Figura 4-2 – Coeficiente de rugosidade em função do Número de Reynolds 54

Figura 5-1 – Etapa de cálculo do fluxo da água 63

Figura 5-2 Fluxograma para cálculo do comprimento e declividade das linhas de fluxo. 65

Figura 5-3 – Linhas de fluxo simuladas para a geometria apresentada na Tabela 5-1. 66

Figura 5-4 – Variação do comprimento da linha de fluxo de água para análise do espaçamento ideal entre pontos iniciais da linha de fluxo de água (ponto analisado a 10 m do bordo interno) 67

Figura 5-5 – Variação do comprimento da linha de fluxo de água para análise do espaçamento ideal entre pontos consecutivos da linha de fluxo de água (ponto analisado a 10 m do bordo interno).....67

Figura 5-6 - Características geométricas do trecho utilizado 70

Figura 6-1 – Localização do Trecho Leste do Rodoanel Mario Covas 75

Figura 6-2 – Seção típica do trecho leste do Rodoanel Mário Covas.....76

Figura 6-3 – Análise da velocidade de ocorrência de aquaplanagem para na Pista Externa – km 86,3 a 97,0 80

Figura 6-4 – Análise da velocidade de ocorrência de aquaplanagem para na Pista Externa – km 97,0 a 108,0 80

Figura 6-5 – Distribuição das extensões dos trechos sujeitos à ocorrência de aquaplanagem para velocidade operacional de 95 km/h 83

Figura 6-6 – Características geométricas da pista externa do Rodoanel Leste no km 90 85

Figura 6-7 - esquema de trecho com transição oblíqua 86

Figura 6-8 – Comparação da espessura de lâmina de água nos casos de transição de superelevação comum e oblíqua utilizando o modelo de Herrmann 86

Figura 6-9 – Comparação da velocidade de ocorrência de aquaplanagem nos casos de transição de superelevação comum e oblíqua para a Combinação 8 87

Figura 6-10 – Variação da velocidade de ocorrência de aquaplanagem no meio da faixa 3 para diferentes declividades transversais 89

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ARTESP – Agência de Transporte do Estado de São Paulo

ASTM – American Society for Testing and Materials

CPA – Camada Porosa de Atrito

DAEE/SP – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo

DER/SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FDOT – Florida Departament of Transportation

HCM – Highway Capacity Manual

IAG/USP – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo

IAU/USP – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

I-D-F – Relação de Intensidade, Duração e Frequência de precipitações

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NASS – National Automotive Sampling System,

NHTSA – National Highway Traffic Safety Administration

NHCRB – National Cooperative Highway Research Board

NHCRP – National Cooperative Highway Research Program

RRL – Road Research Laboratory

TRB – Transportation Research Board

LISTA DE SÍMBOLOS

h_f – Espessura da lâmina de água acima da rugosidade do pavimento

${h_f}^*$ – Espessura efetiva da lâmina de água acima da rugosidade do pavimento

TMP – Altura média da textura do pavimento, conforme ensaio de mancha de areia

L_f – Comprimento da linha de fluxo da água

I – Intensidade pluviométrica

S_f – Declividade da linha de fluxo da água

n – Coeficiente de rugosidade de Manning

V_h – Velocidade de ocorrência da aquaplanagem

FAR –Relação entre a largura e extensão da área de contato pneu-pavimento

P_p – Pressão de enchimento do pneu

SD – Redução de velocidade de giro da roda no início da aquaplanagem

S_p – Profundidade dos sulcos da banda de rodagem dos pneus

P_C – Carga por roda

$P_{C,perm}$ – Capacidade de carga do pneu

P_l – Largura da área de contato do pneu

L = largura do plano analisado

S_l = declividade longitudinal do plano analisado

S_t = declividade transversal do plano analisado

K_s= rugosidade equivalente de areia de Nikuradse

T_{moore} = tempo de drenagem de Moore

φ – Proporção da área de contato entre pneu e pavimento que é composta pelos sulcos da banda de rodagem

1. Introdução

A aquaplanagem é um fenômeno decorrente da separação entre o pneu e o pavimento pela presença de uma película de água entre eles, resultando em uma ausência de aderência e possivelmente na perda de controle do veículo.

Sua principal ocorrência em rodovias é conhecida como aquaplanagem dinâmica e surge a partir da dificuldade em que a água seja expelida da área de contato com o pavimento devido a elevadas velocidades radiais do pneu (BROWNE, 1975).

Ainda que seja um fenômeno razoavelmente reconhecido e que tem sido estudado há pelo menos 50 anos, é raro encontrar alguma referência à aquaplanagem em manuais e recomendações de projeto de rodovias. Tal fato pode ser atribuído à diversidade de modelos para determinação de sua ocorrência e a uma falta de consenso em como relacionar sua possibilidade de ocorrência ao risco efetivo à segurança da rodovia.

Este fenômeno é considerado por alguns autores como um dos principais problemas de segurança rodoviária em alguns países, como a Alemanha, onde chega a estar relacionado a 17% de todas as colisões e a 23% das colisões em condições de pavimento úmido (HERRMANN, 2008).

Em anos recentes tal tema tem sido foco de maior interesse acadêmico, possivelmente pelo aumento na velocidade regulamentar em rodovias de boas características técnicas, pelos alargamentos do leito carroçável de rodovias e de uma expectativa do impacto advindo das mudanças climáticas.

1.1. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo básico a proposição de um procedimento metodológico que permita a identificação de trechos de traçados rodoviários nos quais tal fenômeno possa ocorrer.

O procedimento proposto foi estruturado com base na análise dos principais modelos de previsão de risco de aquaplanagem levantados durante a revisão bibliográfica, bem

como em uma extensiva análise das principais variáveis que influenciam esse fenômeno.

1.2. Justificativa

A demanda pelo aumento de capacidade das rodovias em determinadas regiões brasileiras implica na constante ampliação do número de faixas de tráfego, podendo ser verificados casos, como por exemplo os das Rodovias dos Imigrantes e Bandeirantes, em que cada pista conta atualmente com 5 a 6 faixas de tráfego por sentido na Região Metropolitana de São Paulo.

Este acréscimo na largura do leito carroçável resulta no aumento do tempo necessário para a drenagem da plataforma rodoviária em decorrência da majoração da área de contribuição desta plataforma. Tais acréscimos implicam no aumento das espessuras de lâmina de água formadas sobre o pavimento.

Os principais fatores que influenciam o risco de ocorrência da aquaplanagem podem ser associados às condições físicas e operacionais típicas de rodovias de alto padrão técnico, como alta velocidade operacional e elevado número de faixas de tráfego, principalmente quando associados a declividades longitudinais e transversais mais suaves.

Ao se considerar a expectativa de aumento das condições que contribuem para a ocorrência desse fenômeno, evidencia-se a ausência de referências a procedimentos de verificação do risco de aquaplanagem em manuais técnicos e recomendações de projeto existentes no Brasil e de referências a medidas consolidadas para mitigação deste tipo de risco.

Assim, o presente trabalho tem como foco principal a proposição de um procedimento para verificação da possibilidade da ocorrência da aquaplanagem em rodovias com características técnicas de elevado padrão, em função da análise dos fatores e condições que possam contribuir para esse fenômeno.

1.3. Estrutura do trabalho

Adicionalmente ao capítulo inicial de introdução do tema e ao capítulo final de conclusão e recomendações, o presente trabalho é composto de outros 5 capítulos.

No segundo capítulo é apresentado um breve resumo das condições necessárias à ocorrência da aquaplanagem, dos métodos de verificação e de medidas mitigatórias, para tal tipo de risco, tópicos esses baseados na ampla revisão bibliográfica realizada sobre o tema em questão.

No terceiro capítulo é apresentada uma análise das variáveis utilizadas nos modelos concebidos para previsão do risco de ocorrência de aquaplanagem com foco nas condições específicas de pluviometria verificadas no Estado de São Paulo, uma vez que há uma grande variação regional da intensidade de chuva no território nacional.

No quarto capítulo são apresentados e comparados os modelos para previsão da velocidade a partir da qual pode ocorrer o fenômeno da aquaplanagem, modelos estes obtidos no processo de revisão bibliográfica.

No quinto capítulo é apresentado o procedimento proposto para verificação de trechos sujeitos à ocorrência de aquaplanagem e as premissas adotadas na elaboração de um algoritmo de cálculo das velocidades a partir das quais pode ocorrer a aquaplanagem, assim como algumas considerações sobre o procedimento apresentado e sobre a aplicabilidade dos modelos de verificação da ocorrência de aquaplanagem no estudo de trechos rodoviários.

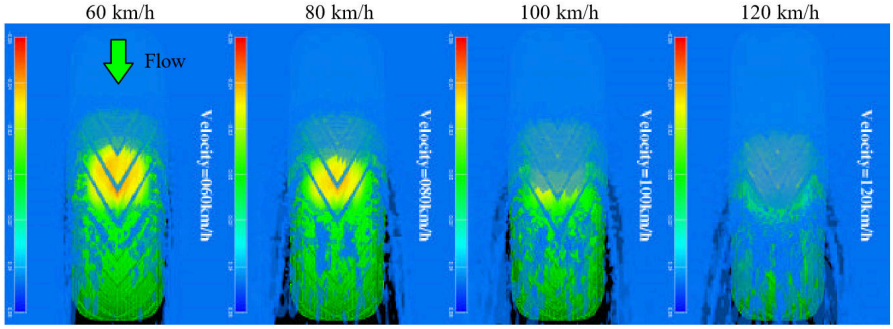
No sexto capítulo é apresentado um estudo de caso de avaliação do risco de ocorrência de aquaplanagem para determinada extensão do trecho Leste do Rodoanel Mario Covas, implantado na região metropolitana da cidade de São Paulo.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Descrição da ocorrência de aquaplanagem

O fator de risco deste fenômeno surge em razão da perda de aderência entre o pneu e o pavimento decorrente da presença de um fluido entre as duas superfícies, como ilustrado na Figura 2-1, resultando em uma possível perda de controle do veículo por parte do condutor e por consequência na possibilidade de diversos tipos de acidentes.

Figura 2-1 – Processo de diminuição do contato pneu-pavimento pela presença de água



Fonte: (OKANO e KOISHI, 2009)

A divulgação do fenômeno da aquaplanagem entre os motoristas e a sua duração geralmente curta nos permite estimar que nem toda ocorrência de aquaplanagem resulte em um acidente e consequentemente não seja registrada. Tal consideração implica na existência de uma certa dificuldade na realização de estudos de correlação entre a ocorrência deste fenômeno e registros de acidentes (GUNARATNE, LU, *et al.*, 2012). Ainda assim há estudos que indicam alguma influência da aquaplanagem em 17% das colisões (HERRMANN, 2008).

Não foi possível encontrar referências à relação entre o número de acidentes decorrentes de aquaplanagem e a extensão do trecho sujeito à sua ocorrência. Se tal fenômeno ocorrer em uma pequena extensão, quando o veículo estiver se deslocando em velocidade elevada a duração de tal ocorrência será demasiada curta para que seja percebida pelo condutor ou para que ele possa avaliar que houve uma redução das condições de segurança no local.

As publicações científicas mais antigas encontradas sobre o tema datam do início da década de 60, sendo mais evidente a preocupação de sua ocorrência na operação aeroportuária. Posteriormente, o foco se deslocou para estudos relacionados à ocorrência de tal fenômeno com automóveis, embora uma significativa redução na produção científica dos Estados Unidos da América tenha ocorrido no período de 1974 a 1995, quando uma lei federal limitou a velocidade máxima a 88,5 km/h (55 mph). Posteriormente, o tema voltou a ser discutido quando foram implementados programas de aumento dos limites regulamentados de velocidade em alguns estados daquele país.

De acordo com os estudos publicados pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) (HORNE e DREHER, 1963) e (HORNE, YAGER e TAYLOR, 1968), o fenômeno da aquaplanagem pode ser dividido em 3 diferentes classes, as quais são caracterizadas a seguir.

2.1.1. Aquaplanagem viscosa

A aquaplanagem viscosa ocorre devido à viscosidade da água quando as espessuras da lâmina formada são muito finas, até mesmo a velocidades muito baixas. Contudo, esta classe de ocorrência depende da condição das superfícies estarem polidas, tanto para o pneu como para o pavimento, podendo assim tal ocorrência ser evitada pela existência de microtextura no pavimento (BROWNE, 1975).

Portanto, ao se garantir a microtextura do pavimento, esta ocorrência não implica em riscos à operação rodoviária. Por esta razão, tal tipo de aquaplanagem não será avaliado neste estudo, da mesma maneira que não tem sido analisada usualmente nos demais trabalhos sobre este assunto.

2.1.2. Aquaplanagem por desvulcanização

Este tipo de aquaplanagem ocorre quando a superfície do pneu sofre um aumento de temperatura em consequência de um travamento, enquanto a roda desliza sobre uma

superfície molhada. Nestas condições a borracha da banda de rodagem perde as propriedades adquiridas pelo processo de vulcanização e sofre um processo de fusão, resultando na formação de um colchão de borracha derretida, água e vapor que separa o pneu do pavimento. A Figura 2-2 apresenta um pneu após passar por este processo.

Figura 2-2 – Zona de contato de um pneu após um evento de aquaplanagem por desvulcanização

Fonte: (GOODYEAR AVIATION, 2016)

Segundo Browne (1975), as condições necessárias para a ocorrência deste fenômeno são:

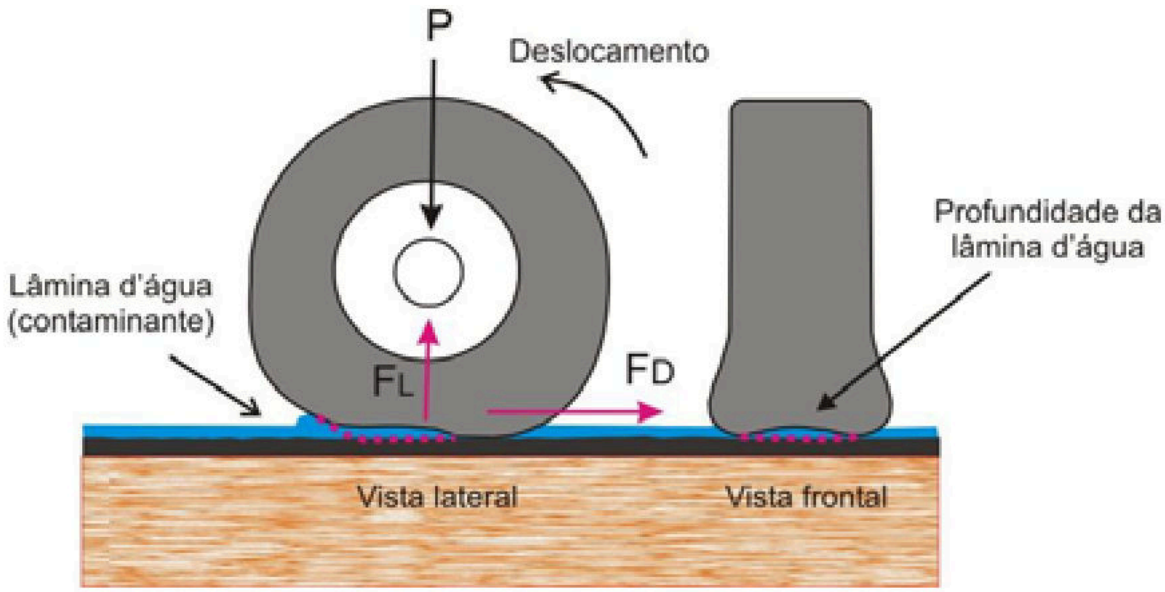
- o pavimento deve possuir elevada macrotextura e baixa microtextura;
- a roda do veículo deve ser travada enquanto o veículo se desloca a uma alta velocidade;
- veículo pesado (caminhões e aeronaves).

Devido à combinação destes fatores não ocorrer comumente em rodovias, este tipo de aquaplanagem não oferece riscos à operação rodoviária típica e por essa razão também não será objeto deste estudo.

2.1.3. Aquaplanagem dinâmica

A aquaplanagem dinâmica ocorre quando a lâmina de fluido presente entre o pavimento e o pneu não consegue ser expelida da interface pneu-pavimento com velocidade suficiente, reduzindo consequentemente a área de contato e eliminando a aderência que garante a estabilidade e controle do veículo, situação ilustrada na Figura 2-3.

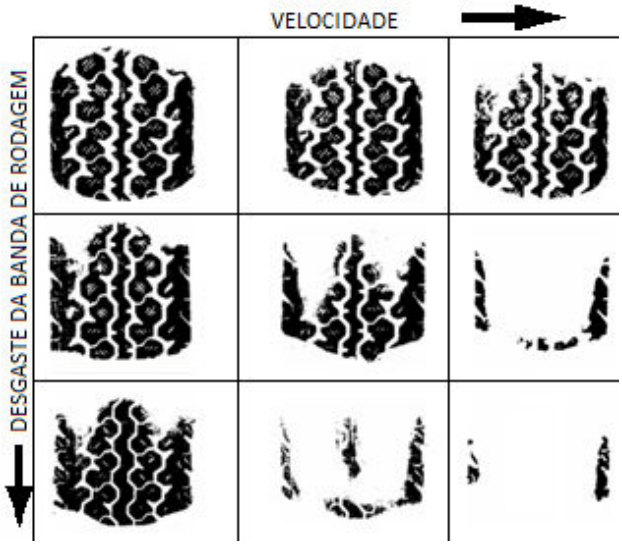
Figura 2-3 – Arrasto hidrodinâmico



Fonte: (SILVA, 2008)

Tal situação gera um esforço de sustentação pela lâmina de água, o que reduz a área de contato entre o pneu e o pavimento, como ilustrado na Figura 2-4, e causa a perda de aderência necessária para a estabilidade e controle de condução do veículo.

Figura 2-4 – Área de contato na ocorrência de aquaplanagem dinâmica em superfície lisa



Fonte: adaptado de (GOTHIÉ, 2005)

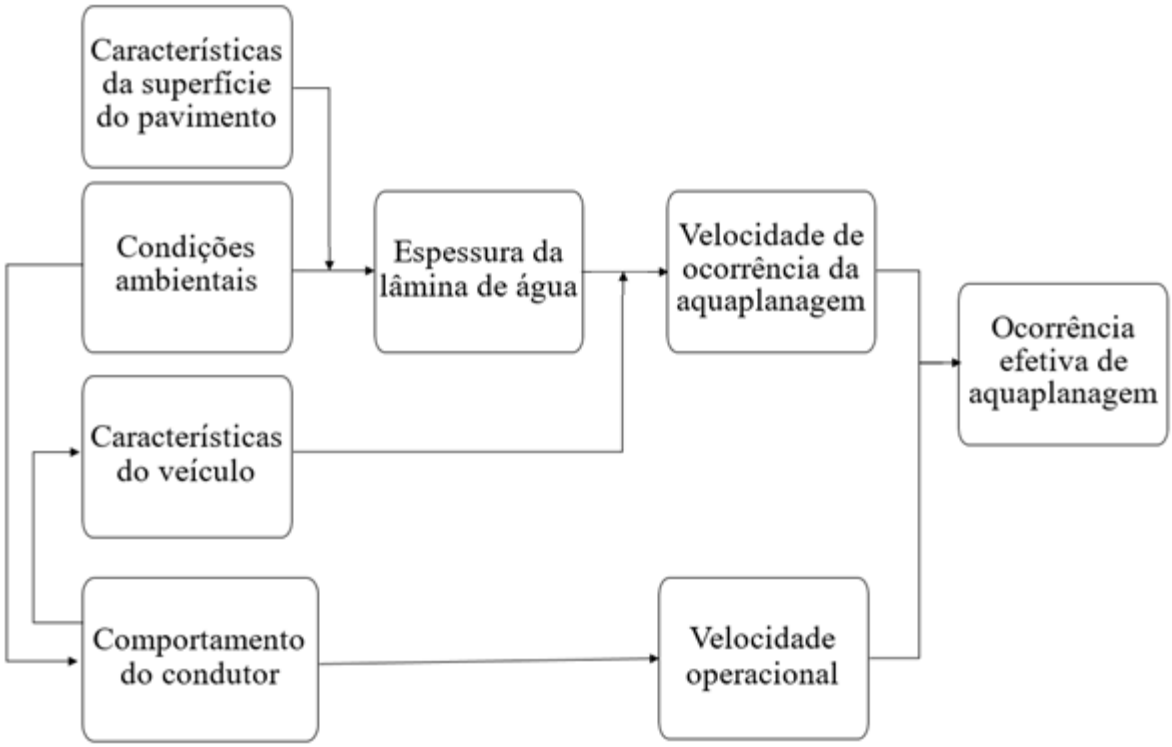
Esta classe de ocorrência é a mais comum na operação rodoviária e é objeto de uma maior quantidade de estudos acadêmicos. Dentre os trabalhos analisados com a elaboração de modelos de previsão da ocorrência deste fenômeno, todos estão baseados nesta classe de ocorrência.

2.2. Linhas de pesquisa

Mais adiante são apresentadas, de maneira resumida, as diferentes linhas de pesquisa que foram concebidas para verificação da ocorrência de aquaplanagem, assim como as aplicações já realizadas em cada uma delas. Os modelos matemáticos desenvolvidos nestas linhas de pesquisa serão apresentados com maiores detalhes no Capítulo 4.

A ocorrência da aquaplanagem é resultado da combinação de diversos fatores, como ilustrado na Figura 2-5. Em tal fluxograma fica evidenciada a necessidade de que os mencionados modelos incluam o cálculo da espessura da lâmina de água e da velocidade do veículo a partir da qual é possível a ocorrência da aquaplanagem.

Figura 2-5 – Fluxograma da ocorrência de aquaplanagem



2.2.1. National Aeronautics and Space Administration (NASA)

Os trabalhos conduzidos por esta organização estão entre os mais antigos (HORNE e DREHER, 1963) e possuem enfoque na operação aeroportuária, condizente com a área de atuação da instituição. Posteriormente o escopo de tais estudos foi ampliado, incluindo também a ocorrência de aquaplanagem para veículos rodoviários de carga (HORNE, YAGER e IVEY, 1986).

Estes trabalhos também foram utilizados na validação de modelos computacionais para simulação do comportamento da água na área de contato entre pneu e pavimento (GUNARATNE, LU, *et al.*, 2012).

2.2.2. Gallaway

O método desenvolvido no Texas Transportation Institute (GALLAWAY, IVEY, *et al.*, 1979) é um dos mais reconhecidos dentre os trabalhos analisados sobre o tema. Tendo sido elaborado a partir de uma extensa coleta de dados experimentais utilizando veículos de passeio, este método foi dividido em um modelo para estimativa da velocidade a partir da qual poderia ocorrer a aquaplanagem em determinados locais do pavimento e outro para a estimativa da espessura da lâmina de água formada na pista.

Este método foi utilizado ou adaptado em diversos estudos posteriores, conforme descrito a seguir.

- na Austrália o método tem sido indicado para a verificação do risco de ocorrência da aquaplanagem pelo manual de drenagem rodoviária australiano (AUSTROADS, 2013);
- em Portugal o método foi adaptado por França (1988) e utilizado em diversos trabalhos na verificação do risco de ocorrência do fenômeno em rodovias portuguesas existentes;
- na Pensilvânia as equações foram adaptadas para elaboração do software PAVDRN (NHCRP, 1998).

2.2.3. Gengenbach

O trabalho iniciado na Alemanha por Gengenbach (1967) também considera a ocorrência da aquaplanagem para veículos de passeio e foi posteriormente expandido por Höcker (1971) para considerar algumas características não previstas originalmente. Tal modelo é referenciado por diversos autores alemães. Este modelo também serviu de base para o desenvolvimento das equações utilizadas no software PLANUS, desenvolvido na Universidade de Sttutgart (HERRMANN, 2008).

2.2.4. Outros trabalhos

Alguns trabalhos realizados em outros centros de pesquisa não tiveram uma aplicação ampla em estudos posteriores, embora sejam citados ocasionalmente em publicações que tratam da verificação da ocorrência da aquaplanagem.

Dentre tais trabalhos pode-se citar:

- as equações para determinação da espessura da lâmina de água na pista desenvolvidas pelo Road Research Laboratory (ROSS e RUSSAM, 1968);
- os modelos de simulação desenvolvidos em Singapura (ONG e FWA, 2006), os quais foram utilizados no método desenvolvido na Universidade do Sul da Flórida (GUNARATNE, LU, *et al.*, 2012), método este que, por sua vez, foi aplicado no desenvolvimento do software HP, utilizado pelo Departament of Transportation do Estado da Flórida.

2.3. Mitigação do risco

Em diversos trabalhos foram analisadas medidas para mitigação do risco de ocorrência de aquaplanagem a partir dos modelos descritos no item anterior. São apresentadas a seguir algumas das propostas de mitigação apresentadas em tais trabalhos com observações sobre sua aplicabilidade.

2.3.1. Pavimento drenante

Pavimentos drenantes podem ser divididos em 2 categorias:

- pavimentos permeáveis, que possuem como característica principal a condução e armazenamento subsuperficial da água;

- revestimentos de alta porosidade, que possuem um maior percentual de vazios somente na camada mais superficial do pavimento e que consequentemente melhoram o escoamento da água superficial.

Os pavimentos permeáveis são usualmente utilizados em trechos de tráfego leve, por possuírem uma menor capacidade de suporte, não sendo indicados para utilização em rodovias de elevado padrão técnico (SUZUKI, 2015); portanto, tal tipo de pavimento não será considerado neste trabalho como possível solução ao problema da aquaplanagem.

Revestimentos porosos, como a camada porosa de atrito (CPA), tem sido adotados em diversos países com objetivo de redução de ruído (BIN YU, 2014), contudo, o aumento do índice de vazios deste tipo de revestimento resulta também em maiores valores de macrotextura e maior capacidade de escoamento superficial. Por outro lado, há que se considerar que uma baixa frequência de manutenção neste tipo de revestimento resultará em perda da capacidade hidráulica ao longo do tempo (SOARES, 2011).

2.3.2. Melhoria da macrotextura

Para obter resultados semelhantes à utilização de pavimentos de alta porosidade, em pavimentos existentes podem ser adotados tratamentos como a microfresagem ou o “grooving”. Tais tratamentos podem ser aplicados a pavimentos existentes com o objetivo de aumentar a macrotextura da superfície.

A microfresagem é um processo de regularização da camada superficial do pavimento através da realização de cortes com espaçamento de 2 a 3 mm. Este processo resulta em um aumento da macrotextura do pavimento devido ao espaçamento entre os cortes. A Tabela 2-1 apresenta os dados comparativos da macrotextura do pavimento antes e depois da execução deste processo.

Tabela 2-1 – Efeito da execução de microfresagem no resultado dos ensaios de mancha de areia

Local do ensaio	Macrotextura [mm]		
	Antes	Depois	Diferença
Rodovia dos Tamoios Pista Sul (11/01/2018)			
km 78+000	0,40	0,67	0,27
km 78+100	0,40	0,64	0,23
km 78+250	0,43	0,76	0,33
km 78+400	0,56	0,83	0,26
km 78+550	0,59	0,74	0,15
Rodovia dos Tamoios Pista Norte - Faixa 2 (17/01/2018)			
km 69+020	0,52	0,64	0,12
km 69+150	0,49	0,66	0,17
km 69+300	0,32	0,48	0,16
km 69+400	0,30	0,44	0,14
Média	0,45	0,65	0,20

Fonte: cedido por Planservi Engenharia

O “grooving” utiliza-se de cortes maiores para criar pequenos canais que aumentam a capacidade de escoamento superficial de uma seção de pavimento. Conforme pode ser visualizado na Figura 2-6 apresentada a seguir.

Figura 2-6 – processo de “Grooving“ durante sua execução na pista do aeroporto de Congonhas/SP

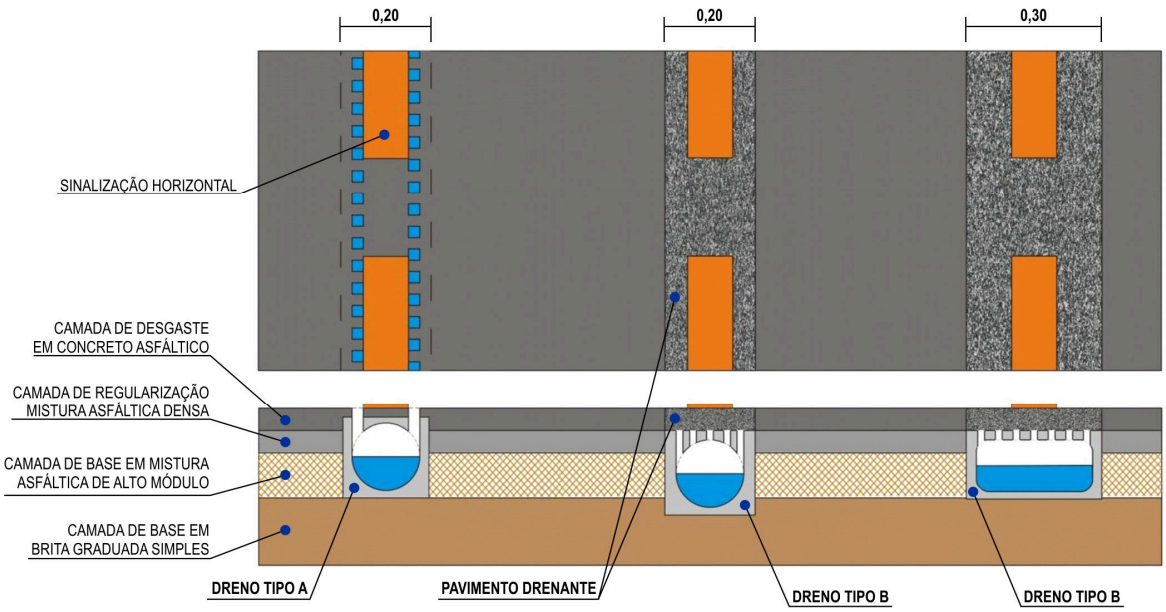
Fonte: Agência Brasil

Por se tratar de uma solução localizada, não considerada em nenhum dos métodos de previsão de espessura de lâmina de água abordados neste trabalho, não é possível aferir efetivamente seu real impacto na velocidade de ocorrência de aquaplanagem. Contudo, o efeito dos cortes no pavimento se reflete também em um aumento da macrotextura.

2.3.3. Drenos transversais e longitudinais

Drenos superficiais de pavimento são uma ampliação do conceito do “grooving”, uma vez que, com a utilização de seções de dimensões maiores é possível interromper o desenvolvimento da linha de fluxo de água. Sua implantação pode ocorrer de maneira longitudinal ou transversal ao eixo da rodovia, conforme ilustrado nas Figuras 2-7 e 2-8.

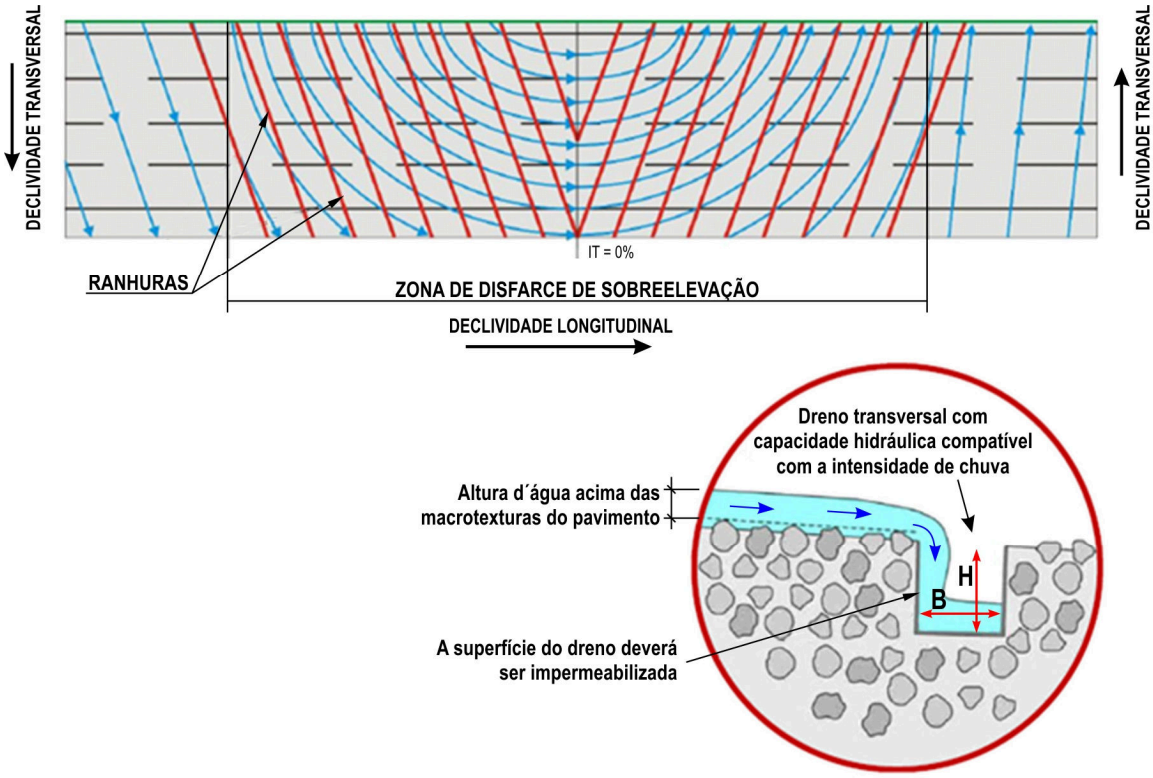
Figura 2-7 – Alternativas de implantação de drenos longitudinais



Fonte (SOARES, 2011)

Drenos longitudinais podem sem implantados sob a sinalização horizontal e não impactam nas condições de regularidade da superfície da pista, exigindo, no entanto, adequação na estrutura do pavimento.

Figura 2-8 – Exemplo de implantação de drenos transversais em uma zona de transição de superelevação



Fonte (SOARES, 2011)

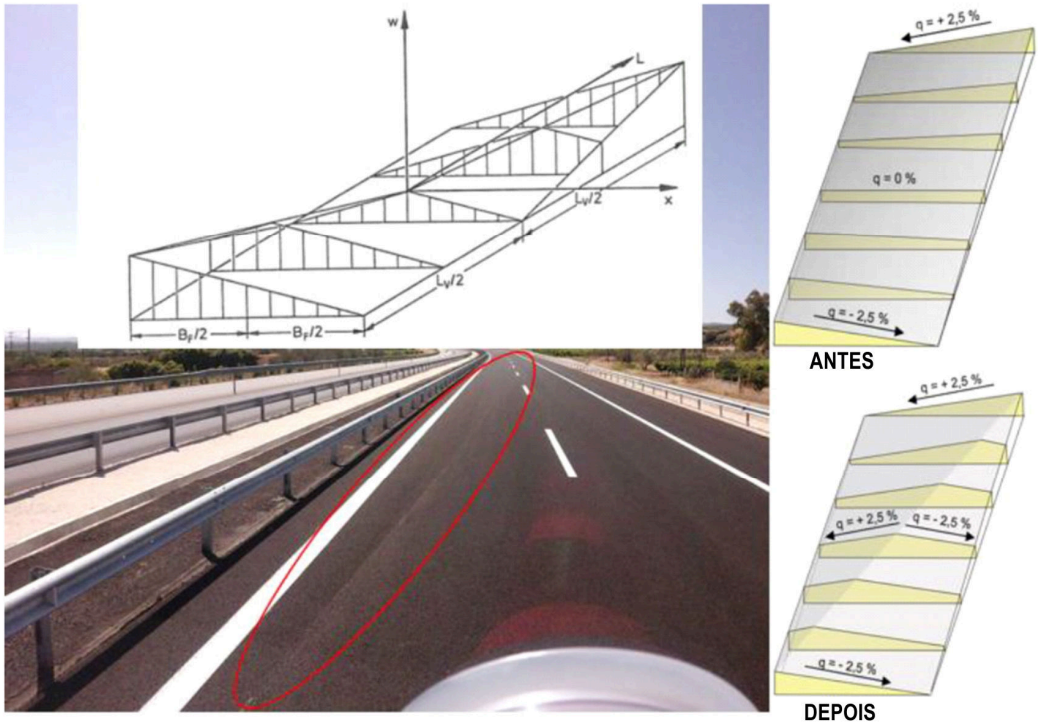
A implantação dos drenos transversais ocorre na superfície do pavimento; assim, os mesmos devem ser implantados com seções estreitas para minimizar o impacto ao conforto dos usuários da via.

De maneira geral, ambos os tipos de drenos exigem um dimensionamento hidráulico a fim de que sejam capazes de comportar o volume de água a ser retirado da superfície do pavimento, sendo que os procedimentos de manutenção são imprescindíveis para evitar entupimentos no sistema e sua consequente inutilização.

2.3.4. Transição Oblíqua da superelevação

Este critério de transição da superelevação, aplicável a trechos onde há inversão de sentido da superelevação, consiste no deslocamento da linha de coroamento da seção de um bordo da pista para o outro, conforme ilustrado na Figura 2-9.

Figura 2-9 – Esquema de transição oblíqua da superelevação



Fonte (AOUN, APOSTOLERIS, *et al.*, 2017)

Tal critério elimina áreas da superfície do pavimento em que o valor da declividade transversal é menor do que o valor estabelecido para trechos em tangente. No entanto, tal medida de mitigação pode gerar desconforto ao usuário devido à súbita mudança da declividade transversal e por manter uma das faixas de tráfego com declividade desfavorável por uma extensão significativa (AOUN, APOSTOLERIS, *et al.*, 2017).

O comprimento necessário para realizar a transição da superelevação de -2,5 % a 2,5% pode ser obtido a partir da equação 2.1 (AOUN, APOSTOLERIS, *et al.*, 2017). Tal comprimento deve ser posicionado no alinhamento, tomando-se o cuidado de atender aos limites de aceleração transversal em todas as faixas de tráfego.

$$L_V = 0{,}1 * B * V_P \qquad (2.1\ )$$

Em que:

L_V = comprimento da transição [m];

B = Largura da pista[m];

$\boldsymbol{V_P}$ = velocidade de projeto [km/h].

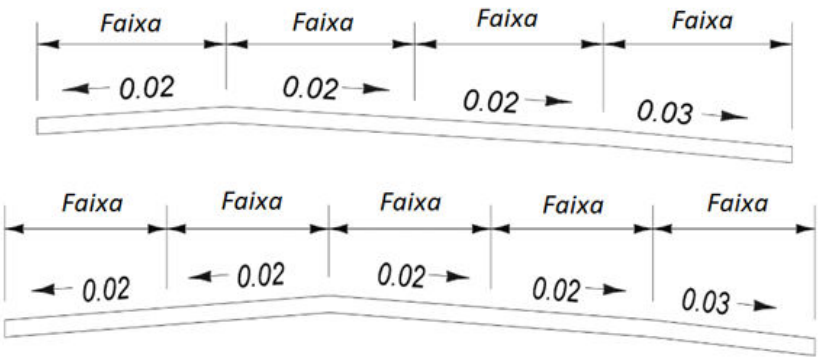
Atualmente tal critério não é previsto nos manuais e normas nacionais, estando, contudo, descrito em manuais alemães como uma alternativa à utilização da transição convencional para rodovias de alta velocidade (DIETRICH, ROTACH e BOPPART, 1989).

2.3.5. Mudanças na superelevação em tangente

O aumento da declividade transversal básica em tangente, do valor de 2% adotado atualmente, para 2,5% ou 3% permitiria um escoamento mais rápido da água sobre o pavimento. Tais valores são adotados como mínimos aceitáveis em alguns países e sua adoção é sugerida, para rodovias com mais de 2 faixas de tráfego por sentido, em algumas recomendações de projeto brasileiras (DER/SP, 2006).

Há que se considerar, no entanto que essa solução não possui impacto muito significativo na velocidade de ocorrência da aquaplanagem, dependendo inclusive do modelo utilizado para verificação de tal risco. Por essa razão, é sugerida sua adoção em conjunto com a solução de taxas de superelevação diferentes para uma pista unidirecional com 3 ou mais faixas de tráfego, com sentido único de tráfego, como caracterizado na Figura 2-10.

Figura 2-10 – Variações de seção típica para melhoria da drenagem



A variação da velocidade de ocorrência da aquaplanagem em função do número de faixas de trafego e da declividade transversal pode ser observada nos ábacos apresentados no Apêndice A.

2.3.6. Sinalização dinâmica

A aplicação de uma sinalização dinâmica e automatizada para alterar o limite de velocidade em condição de chuva é uma opção que independe de alteração no pavimento ou traçado da rodovia. Tal sinalização pode ser calibrada para limitar a velocidade de acordo com a intensidade de chuva obtida por pluviógrafo instalado no local ou conforme outras condições adversas, como apresentado na Figura 2-11.

Figura 2-11 – Sinalização Dinâmica de velocidade

Fonte: (THOMAS, 2016)

Segundo Rämä (2001), a utilização de sinalização dinâmica, em um trecho de testes na Finlândia, reduziu a velocidade média do tráfego de maneira mais efetiva do que a sinalização estática. Para verificação da eficácia desta proposta em nosso país seria necessário confirmar se o mesmo comportamento também seria adotado pela maioria dos motoristas brasileiros, e se tal redução de velocidade seria suficiente para impedir a ocorrência de aquaplanagem.

3. Análise das variáveis de influência na aquaplanagem

Neste capítulo são analisados os fatores que influenciam as condições que possibilitam a ocorrência da aquaplanagem, com o objetivo de identificar os valores típicos das variáveis que serão utilizadas no procedimento de verificação de tal tipo de risco.

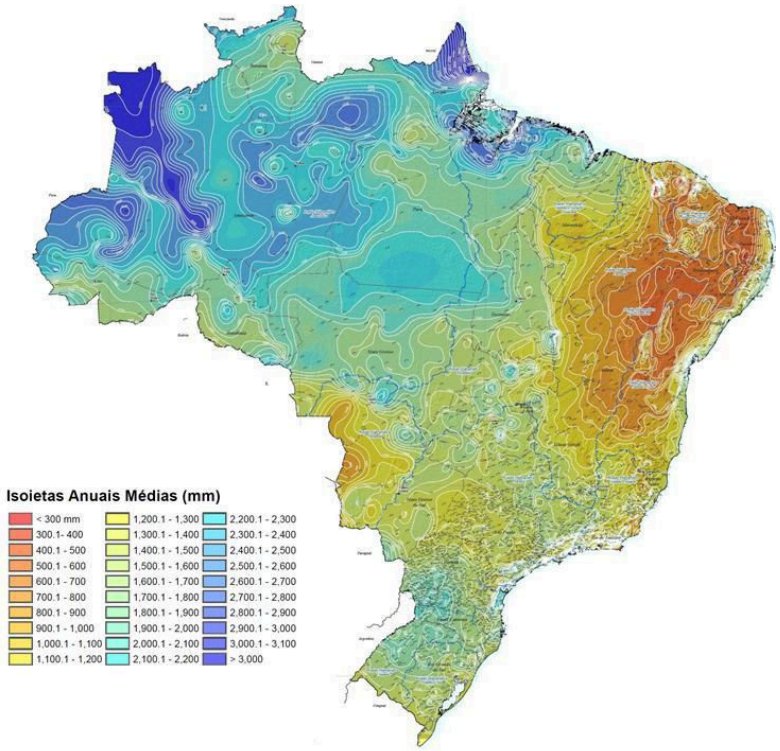
Os diferentes modelos utilizados no procedimento de verificação do risco consideram a ocorrência simultânea dos fatores correspondentes a tais variáveis. Deve-se salientar que a adoção dos valores extremos para cada uma das variáveis, pode levar a resultados demasiadamente conservadores. Assim, em tal procedimento de análise é necessário assumir um fator de risco que possa ser considerado aceitável para a operação de rodovias, como usualmente adotado nos demais campos da engenharia.

3.1. Intensidade de chuva

A intensidade de chuva é um dos principais fatores na análise do risco de aquaplanagem, pois a espessura da lâmina de água está diretamente relacionada a esta variável e é um fator determinante para ocorrência da aquaplanagem.

Como é possível verificar pela Figura 3-1, a precipitação é um evento com grande variação regional, com as regiões no noroeste do país possuindo volumes acumulados anualmente duas vezes maiores do que os do Estado de São Paulo.

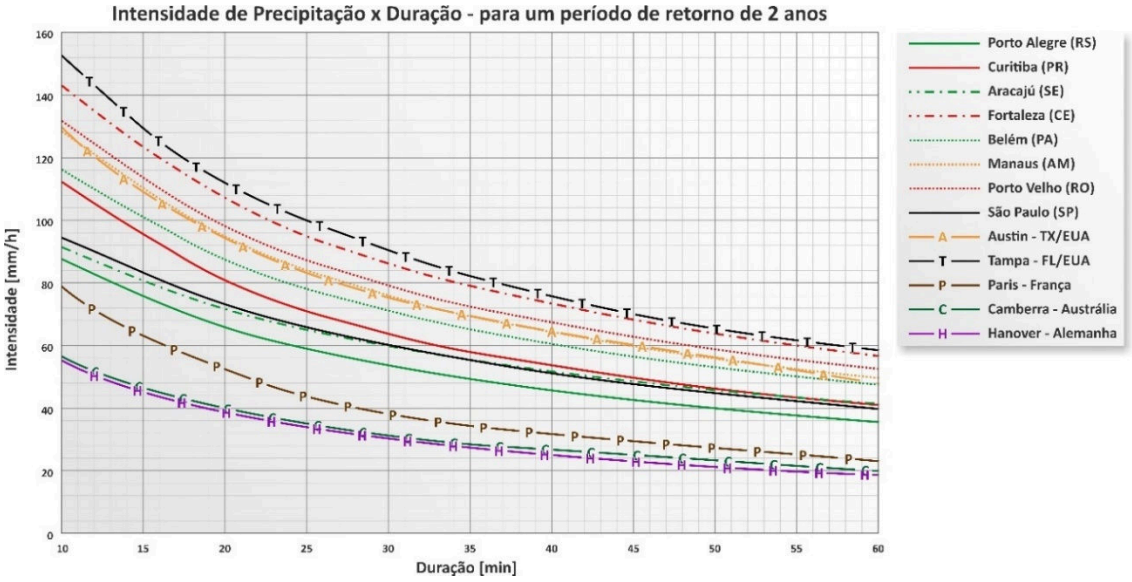
Figura 3-1 – Precipitação anual média



Fonte: Adaptado de (CPRM, 2006)

Na Figura 3-2 são apresentadas diversas relações de intensidade-duração-frequência de precipitações usualmente utilizadas em projetos de drenagem superficial. Essa relação é construída a partir de séries históricas e o valor de intensidade é essencial para os métodos de previsão do risco de aquaplanagem.

Figura 3-2 – Curvas de Intensidade-Duração-Frequência



Fonte: adaptado de: (DAEE/SP, 2015), (GONÇALVEZ, 2011), (CLEVELAND, HERRMANN, *et al.*, 2015), (FDOT, 2015), (ROUX, 1996), (VERDON-KIDD e KIEM, 2015) e (DEUTSCHER WETTERDIENST, 2005)

As curvas apresentadas evidenciam ainda mais a característica regional dessa variável. A título de exemplo, comparando-se dados das cidades de Fortaleza e São Paulo é possível afirmar que as intensidades de chuva de Fortaleza são 1,5 x maiores do que as que ocorrem em São Paulo, quando considerados a mesma frequência e duração; entretanto, os volumes acumulados anualmente são de 1358 mm e 1457 mm respectivamente.

Pelas informações apresentadas, conclui-se que há de se adotar grande cautela ao se estabelecer valores-padrão advindos de regiões alheias à área que será analisada, pois, os valores de intensidade de chuva sofrem grande variação regional.

Os valores obtidos pelas curvas I-D-F podem resultar em intensidades elevadas de precipitação. Como exemplo, quando considerada a relação entre a intensidade de chuva e a distância de visibilidade disponível (IVEY, LEHTIPUU e BUTTON, 1975), adotando as distâncias de visibilidade de parada recomendadas pela AASHTO (2011) obtemos os seguintes valores para a cidade de São Paulo:

- Para redução da distância de visibilidade a 172 m, correspondente a velocidade de 80 km/h, é necessária uma intensidade de chuva de 118 mm/h. Intensidade esta que, quando considerada uma duração de 15 min, resulta em um período de retorno de aproximadamente 7 anos,

- Para a redução da distância de visibilidade a 188 m, correspondente a velocidade de 100 km/h, seria necessária uma intensidade de chuva de 75 mm/h. Intensidade esta que, quando considerada uma duração de 15 min, resultaria em um período de retorno de 1,6 anos.

Assim, devido à baixa frequência destas ocorrências, parece razoável levar em consideração a reação dos condutores a estes eventos.

Conforme dados das publicações apresentados na Tabela 3-1, existe um consenso de que os motoristas reduzem a velocidade na ocorrência de precipitações e esta redução aumenta conforme a intensidade de chuva.

Tabela 3-1 – Redução da velocidade durante precipitações, para velocidade inicial de 100 km/h

Intensidade [mm/h]		0,25	1	5	10	20	30
Visibilidade [m] (IVEY, LEHTIPUU e BUTTON, 1975)		9 085	3 540	1 185	740	462	350
Velocidade [km/h]	HCM (2016)	95	95	95	93	-	-
	(IBRAHIM e HALL, 1994)	98	98	98	91	-	-
	(KYTE, KHATIB, *et al.*, 2001)	90,7	90,7	90,7	90,7	90,7	90,7
	(CHIN, FRANZESE, *et al.*, 2004)	90	90	90	90	90	75
	(HABLAS, 2007)	97,6	96,6	95,4	95	94,5	94,2
	(MAHMASSANI, DONG, *et al.*, 2009)	95,7	91,4	83,7	75,5	59,4	43,5
	(AGARWAL, MAZE e SOULEYRETTE, 2005)	98,4	96,1	96,1	93,9	-	-
	(HRANAC, STERZIN, *et al.*, 2006)	97,9	97,7	96,6	95,3	92,5	89,8
	(HARTZ, 2010)	90	90	80	75	-	-

Avaliando as relações de redução de velocidade apresentadas, conclui-se que:

- a ordem de grandeza das reduções de velocidade varia significativamente dependendo do estudo, sendo que alguns estudos foram realizados apenas para intensidades inferiores a 10 mm/h;
- foi identificada em alguns trabalhos uma tendência de formação de pelotões; contudo, para fins comparativos, as relações apresentadas consideraram medições realizadas apenas para condições de fluxo livre;

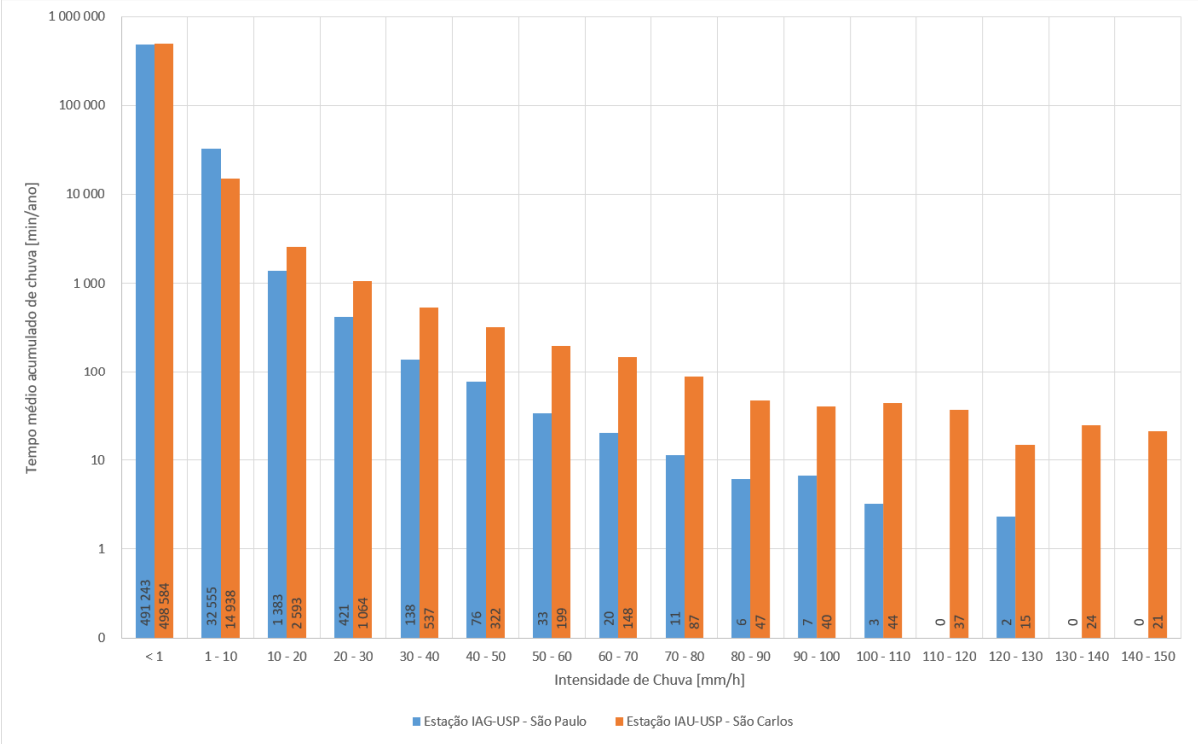
- é possível que as diferenças entre os resultados sejam devidas à existência de fatores locais, como características geométricas ou regionais no comportamento dos motoristas.

Assim, optou-se por realizar uma análise do intervalo de tempo em que a pista estará sujeita a uma determinada intensidade de chuva para determinação do valor de intensidade de chuva a ser utilizado.

Devido à esta variabilidade regional nas intensidades de precipitação, as análises apresentadas a seguir referem-se a intensidades de chuva medidas no Estado de São Paulo.

Para análise desta condição foram consideradas as intensidades obtidas em dois locais. Conforme descrito a seguir. No primeiro caso foram utilizados dados do pluviógrafo da Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP), situado em São Paulo; tais dados foram obtidos em intervalos de 15 min no período de 01/01/2000 a 31/12/2015. No segundo foram utilizados os dados da estação meteorológica do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU/USP), localizado em São Carlos, com intervalos de 30 min entre 01/01/2010 e 31/12/2015, sendo que foram identificadas algumas falhas na coleta de dados em algumas parcelas deste período. Tais casos são resumidos na Figura 3-3.

Figura 3-3 – Distribuição das durações acumuladas de precipitações em São Paulo e São Carlos até 150 mm/h



Fonte: Dados da Estação Meteorológica IAG-USP e da estação do IAU-USP.

A partir destes dados pode-se destacar os seguintes pontos:

- para o intervalo de tempo em que foram coletados os dados de precipitação, apenas em uma parcela inferior a 10% deste período foi identificada a ocorrência de precipitações;
- as precipitações com intensidade menores do que 10 mm/h correspondem a mais de 90% do tempo em que é medida alguma precipitação para São Paulo e mais de 70% do tempo em que há precipitações em São Carlos;
- o período de retorno de 2 anos e duração de 1 hora, valores baixos para projetos de drenagem superficial, resultam em uma intensidade de chuva aproximadamente 40 mm/h para cidade de São Paulo, uma chuva intensa que é superada em média por apenas 2,7 horas por ano.

Analisando as intensidades de chuva de acordo com a classificação do Highway Capacity Manual (TRB, 2016), observa-se que as precipitações medidas podem ser divididas de acordo com a duração acumulada em: 20,5% do tempo com precipitações leves, 69,2% precipitações de intensidade média e 10,3% intensas.

Portanto, sugere-se que, para estudo de ocorrência da aquaplanagem, um valor de intensidade de chuva que seja coerente com o tempo de exposição dos motoristas ao risco de ocorrência deste fenômeno. Tal prática deve ser adotada até que seja realizado estudo que possibilite relacionar a redução da velocidade com a intensidade de chuva de maneira mais precisa.

Algumas sugestões de estudos posteriores que não estão incluídos no escopo deste estudo são:

- avaliação da relação entre a velocidade praticada e a intensidade de precipitação para rodovias brasileiras.
- análise da relação entre a intensidade de chuva e tempo de ocorrência para outras estações pluviométricas em diferentes regiões e utilização de séries históricas mais longas;

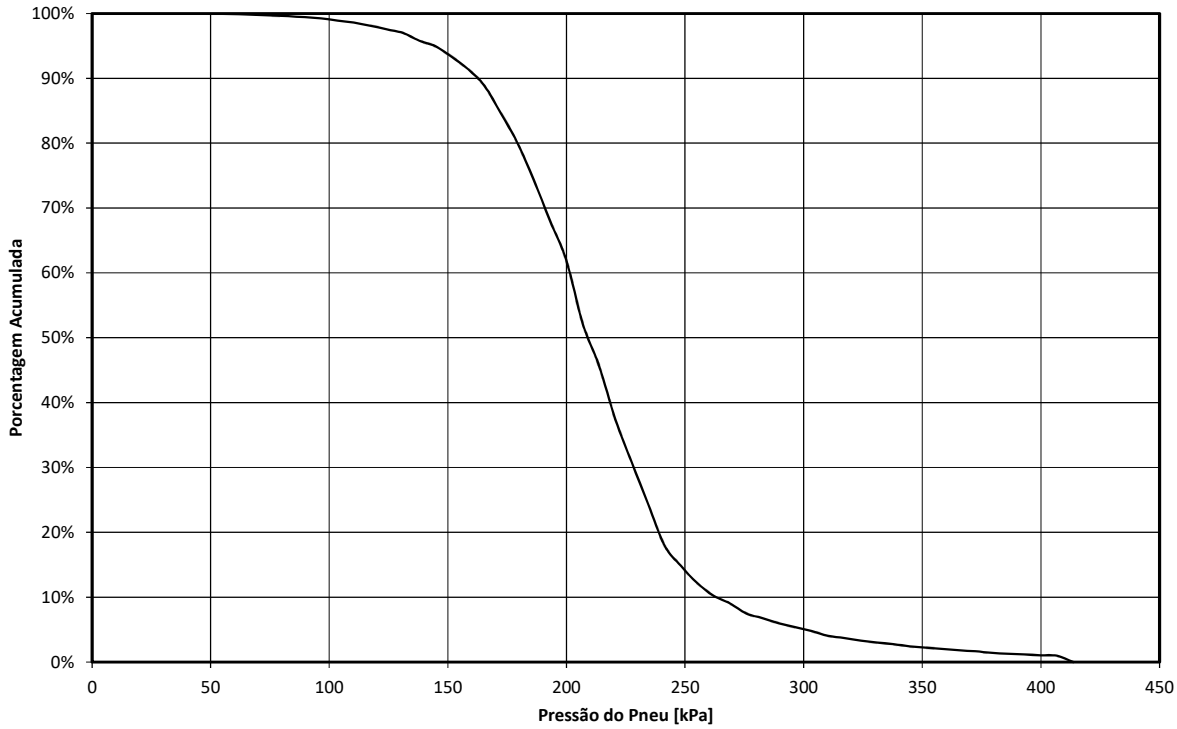
3.2. Pneus

As condições dos pneus variam de acordo com as decisões dos proprietários dos veículos quanto a frequência de manutenção dos mesmos, dificultando assim a determinação dos valores que caracterizem tais condições.

Devido à dificuldade em encontrar um levantamento de dados referentes ao estado de conservação de pneus em veículos de passeio no Brasil, foram adotados os resultados provenientes de um levantamento do National Automotive Sampling System, promovido pela National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), em que foram obtidas as características dos pneus, incluindo pressão e profundidade dos sulcos da banda de rodagem, para 11 530 veículos.

As Figuras 3-4 e 3-5 apresentam as porcentagens acumuladas de pressão e profundidade dos sulcos da banda de rodagem respectivamente.

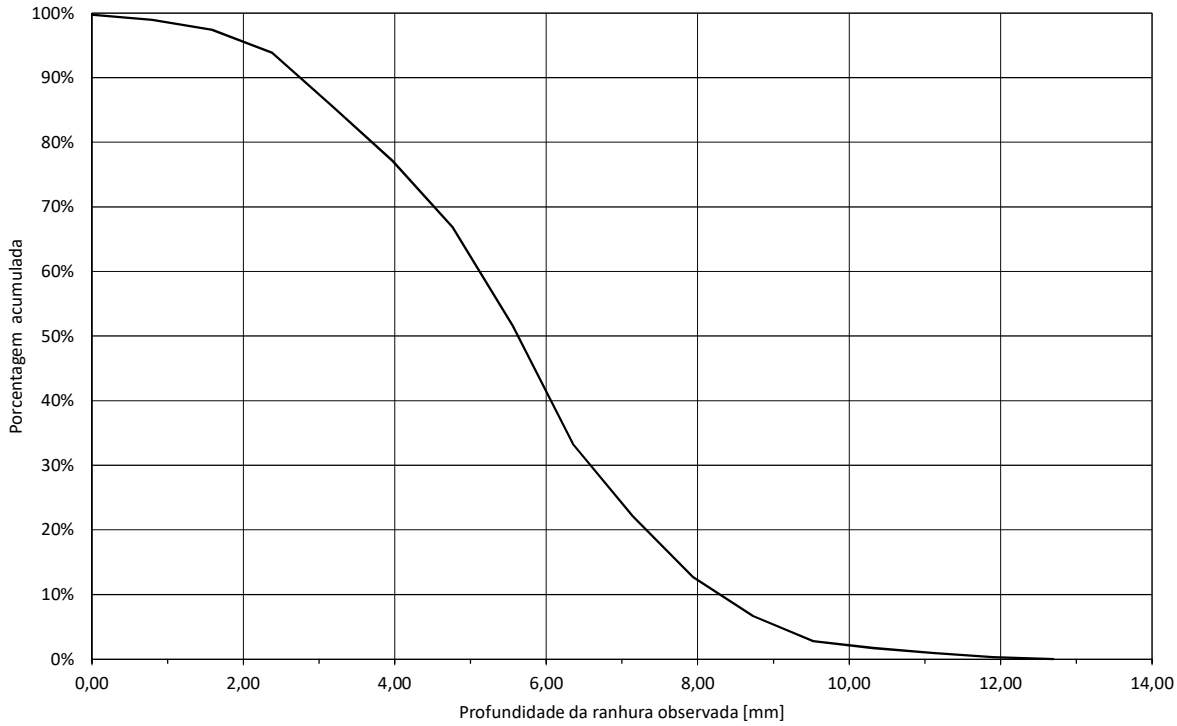
Figura 3-4 – Distribuição acumulada da pressão dos pneus em veículos de passeio



Fonte: (NHTSA, 2001)

Considerando os dados de pressão de enchimento dos pneus, parece razoável considerar o uso de valores na faixa de 165 a 180 kPa, referentes ao 90º e 80º percentil, respectivamente, valores estes que estão de acordo com as considerações adotadas nos modelos que são utilizados neste trabalho.

Figura 3-5 – Distribuição acumulada da profundidade dos sulcos da banda de rodagem em veículos de passeio



Fonte: (NHTSA, 2001)

Para a banda de rodagem dos pneus foi desconsiderada a influência do desenho dos sulcos na maioria trabalhos analisados, pois este é dependente do fabricante do pneu.

Quando considerada a profundidade dos sulcos da banda de rodagem, os valores referentes ao 90º e 80º percentis seriam 2,5 e 3,8 mm. Contudo, neste caso, deve-se considerar que o valor mínimo desta variável é definido pelo Artigo 4º, da resolução Nº 558/80 do Conselho Nacional de Trânsito (1997). Tal valor mínimo possui pouca variação na legislação consultada, como apresentado na Tabela 3-2.

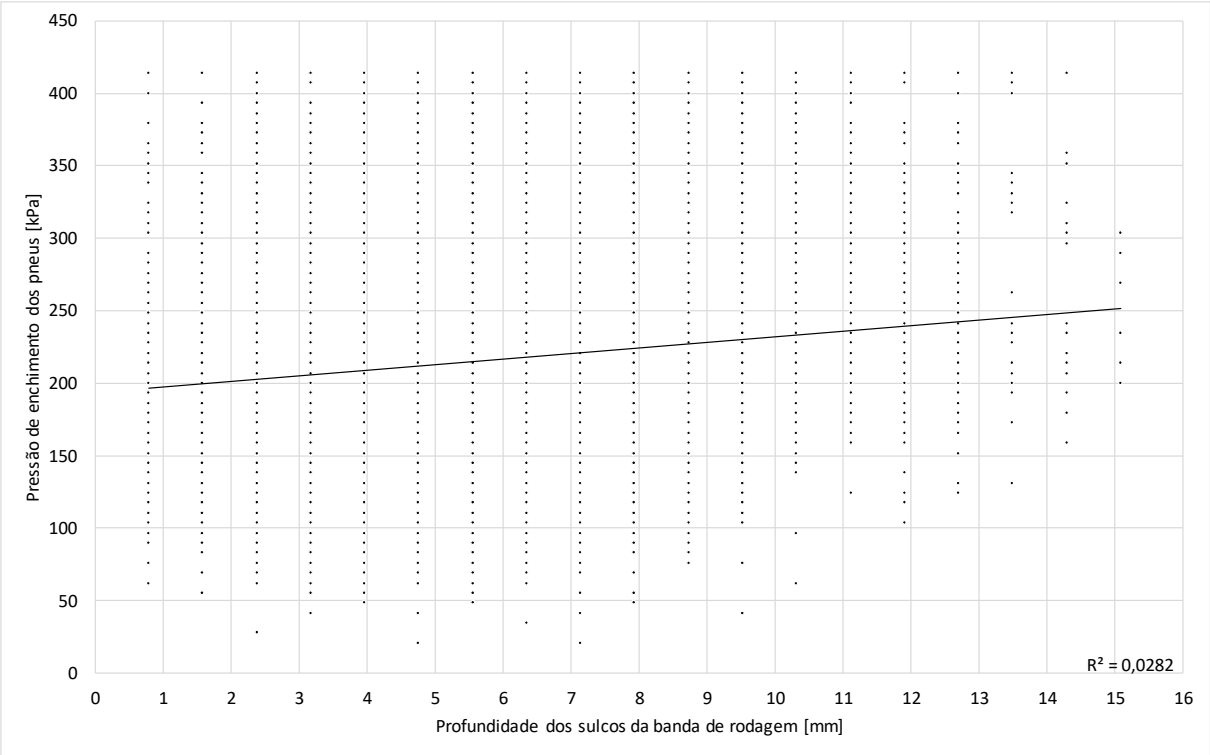
Tabela 3-2 – Limites legais para desgaste de pneus

Local	**Mínima profundidade dos sulcos da banda de rodagem [mm]**
União Europeia	1,60
Austrália	1,50
Brasil	1,60
Estados Unidos	0-1,59

FONTE: Adaptado de (CONGRESSO NACIONAL, 1997), (COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 1989), (GOVERNMENT OF SOUTH AUSTRALIA, 2016) e (BLYTHE e SEGUIN, 2007)

Há que se considerar ainda que os valores de pressão e desgaste dos pneus não apresentam uma correlação significativa, conforme demonstrado na Figura 3-6. Portanto, a consideração de ocorrência simultânea destes valores mínimos não é usual.

Figura 3-6 – Distribuição dos valores de pressão de enchimento para diferentes níveis de conservação dos pneus



Fonte: (NHTSA, 2001)

3.3. Pavimento

As características do pavimento que influem na ocorrência de aquaplanagem são relacionadas ao fluxo de água na pista e a aderência pneu-pavimento. Tais características são derivadas de sua configuração geométrica, de seu estado de conservação e dos materiais utilizados.

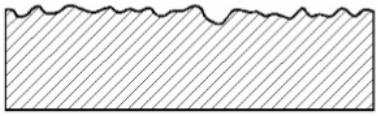
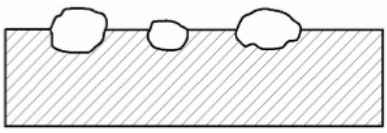
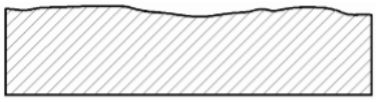
3.3.1. Rugosidade

A rugosidade é a principal característica do pavimento na ocorrência da aquaplanagem e depende do tipo de revestimento utilizado.

Esta variável é geralmente dividida em microtextura e macrotextura, cujas diferenças são ilustradas na Figura 3-7 e que, de acordo com Lamm et al. (1999) podem ser definidas como:

- Microtextura: são as protuberâncias da superfície com altura menor do que 0,5 mm; permite a penetração de lâminas de água de baixa espessura para que seja mantido contato entre pneu e pavimento;
- Macrotextura: são as protuberâncias da superfície com altura maior do que 0,5 mm; proporciona uma “rede de drenagem” à superfície do pavimento, assim como a histerese entre o pneu e o pavimento.

Figura 3-7 – Caracterização de microtextura e macrotextura

Microtextura	Macrotextura	Superfície
Rugosa	Aberta	
	Fechada	
Polida ou Lisa	Aberta	
	Fechada	

Fonte: (APS, 2006)

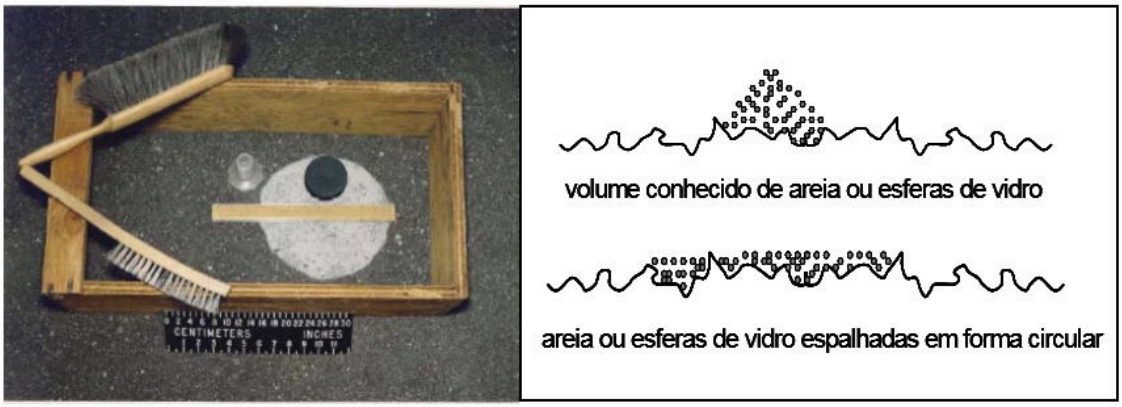
3.3.1.1. Macrotextura

A macrotextura pode ser aferida de diversas maneiras, sendo que um dos métodos mais comuns é o ensaio da mancha de areia, ilustrado na Figura 3-8.

O ensaio consiste no espalhamento de um volume de areia conhecido sobre a superfície do pavimento e a posterior medição da área (ASTM INTERNATIONAL, 2015), ou da variante deste método que substitui a areia por graxa (GALLAWAY, IVEY, *et al.*, 1979). Deve-se ficar atento às correlações entre os diferentes métodos de medição para a aplicação do valor correto nas fórmulas, uma vez que diferentes métodos retornam diferentes resultados.

Os modelos apresentados no Capítulo 4 foram elaborados considerando este ensaio como representativo da macrotextura.

Figura 3-8 – Ensaio da mancha de areia



Fonte: (APS, 2006)

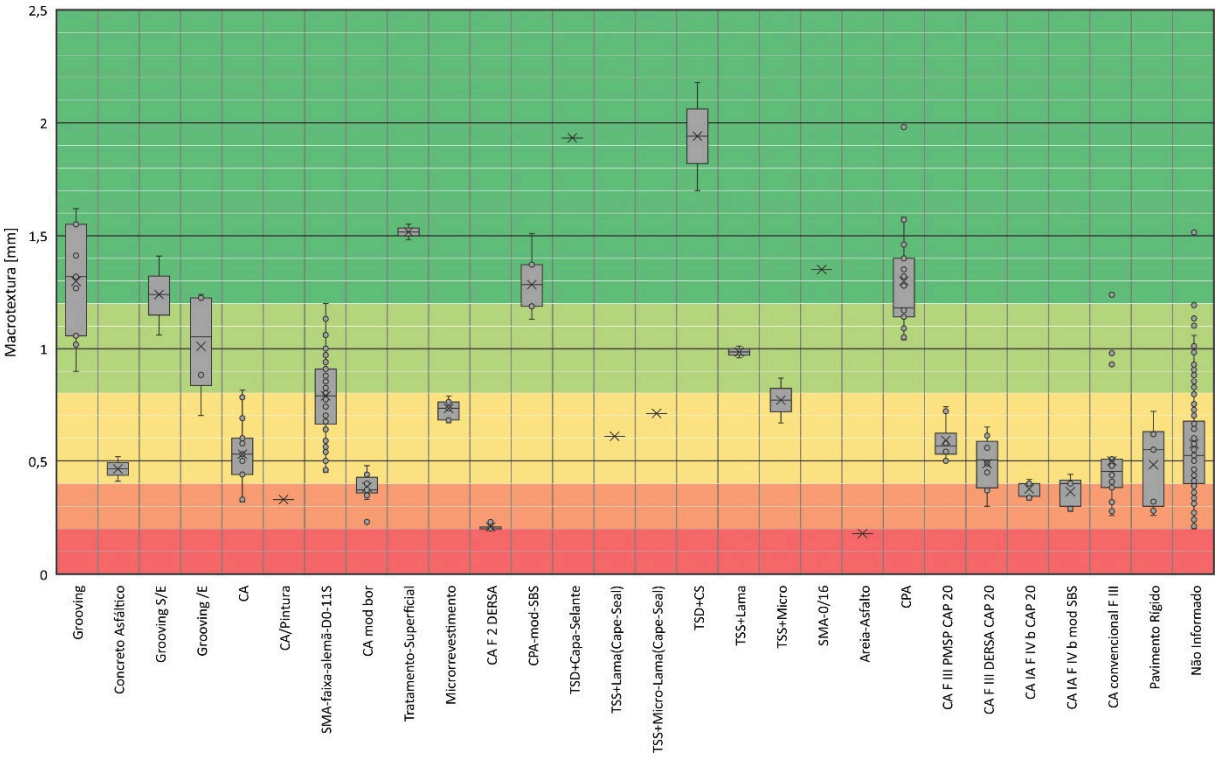
A Tabela 3-3 apresenta a classificação da macrotextura do pavimento de acordo com o resultado do ensaio de mancha de areia.

Tabela 3-3 – Classificação da macrotextura DNIT (2006)

Ensaio de Mancha de Areia	
Classificação	Limites
Muito fina	≤ 0,2
Fina	0,2 - 0,4
Média	0,4 - 0,8
Grossa	0,8 - 1,2
Muito Grossa	> 1,2

A Figura 3-9 apresenta um resumo dos valores de macrotextura obtidos junto à Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP) e em outros trabalhos consultados, organizados de acordo com o tipo de revestimento.

Figura 3-9 – Valores de macrotextura obtidos por ensaio de mancha de areia



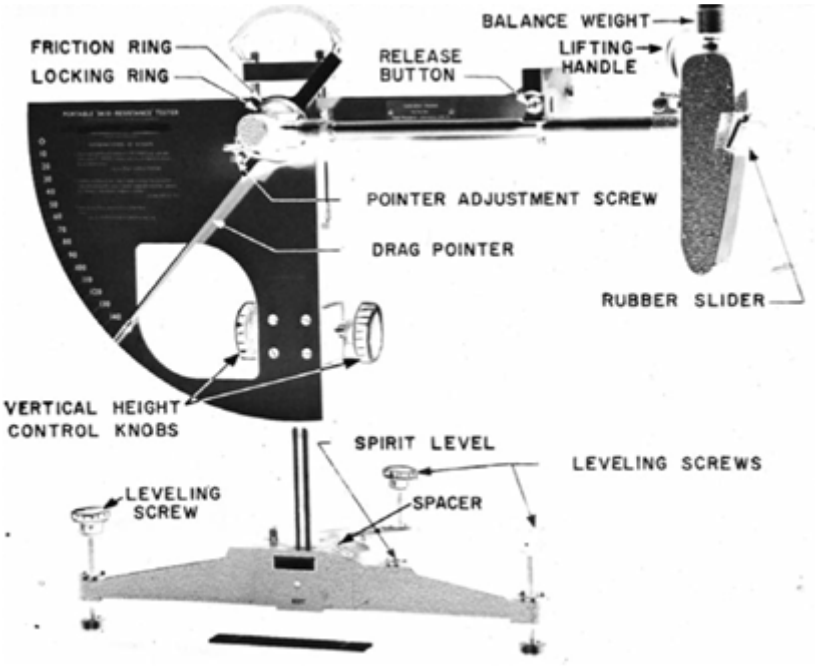
Fonte: Dados de (APS, 2006) e ARTESP

Estes dados podem servir de referência na análise de um trecho quando se tenha conhecimento do tipo de revestimento que será utilizado.

3.3.1.2. Microtextura

Os valores da microtextura podem ser aferidos por uma grande variedade de métodos, sendo que um dos mais utilizados no Estado de São Paulo é o pêndulo britânico, com o equipamento necessário apresentado na Figura 3-10.

Figura 3-10 – Equipamento utilizado para o ensaio do pêndulo britânico



Fonte: (ASTM INTERNATIONAL, 2013)

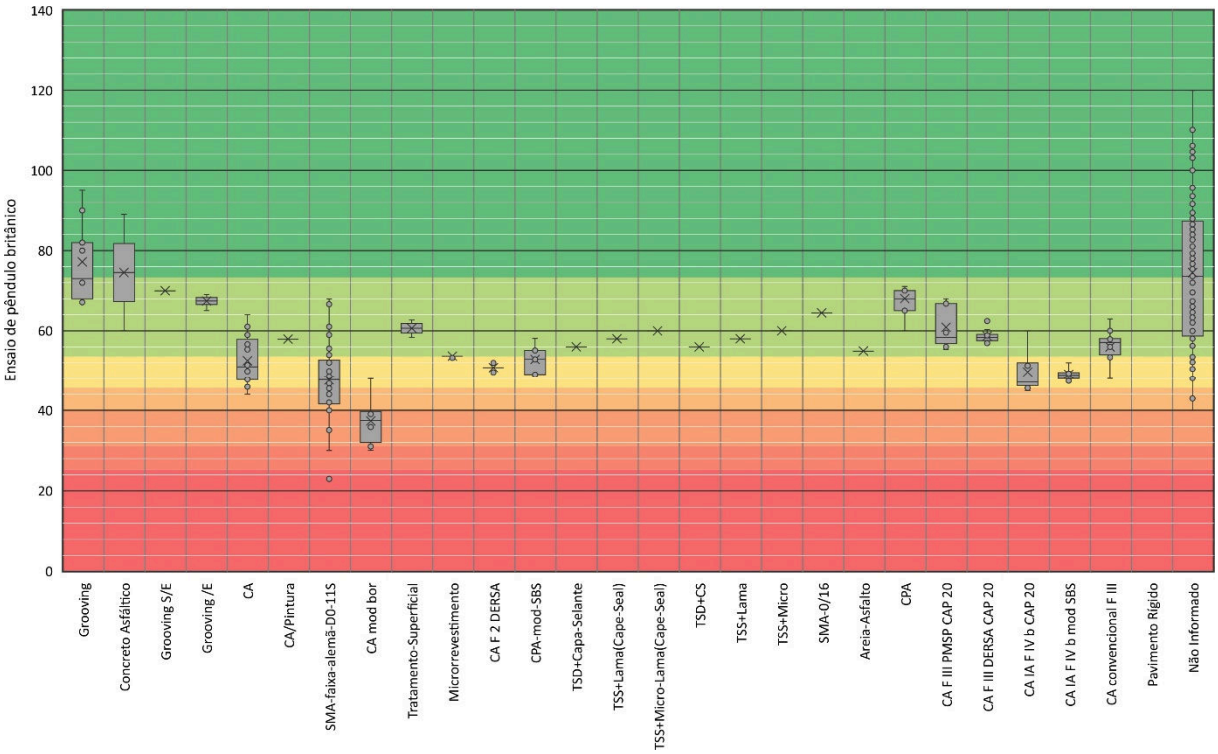
Este método avalia a microtextura de maneira indireta, através do atrito entre a alavanca de borracha e o pavimento e é classificado segundo a Tabela 3-4.

Tabela 3-4 – Classificação da microtextura DNIT (2006)

Ensaio do Pêndulo Britânico	
Classificação	Limites
Perigosa	< 25
Muito lisa	25 – 31
Lisa	32 – 39
Insuficientemente rugosa	40 – 46
Medianamente rugosa	47 – 54
Rugosa	55 – 75
Muito rugosa	> 75

Este dado foi coletado em diversas condições pela ARTESP e em outros trabalhos consultados. A Figura 3-11 apresenta um resumo destes valores organizados pelo tipo de revestimento.

Figura 3-11 – Valores de microtextura obtidos por ensaio de pêndulo britânico



Fonte: Dados de (APS, 2006) e ARTESP

Como mencionado no item 2.1.1, a presença da microtextura elimina o risco de ocorrência da aquaplanagem viscosa, e a afirmação de que este tipo de aquaplanagem pode ser desconsiderado em rodovias, por não se tratarem de superfícies lisas, está coerente com os dados levantados, uma vez que, à exceção do concreto asfáltico modificado com borracha, os revestimentos estudados podem ser classificados como medianamente rugosos a muito rugosos.

3.3.2. Defeitos da superfície

A superfície do pavimento sofre alterações com o tempo e uso, que dependem do tráfego, qualidade da execução, tipo e frequência de manutenção, entre outros.

Tais condições podem aumentar o risco de ocorrência de aquaplanagem, contudo pelo procedimento proposto utilizar as informações de projeto, estas características não estão incluídas no escopo deste trabalho.

3.4. Fluxo de água

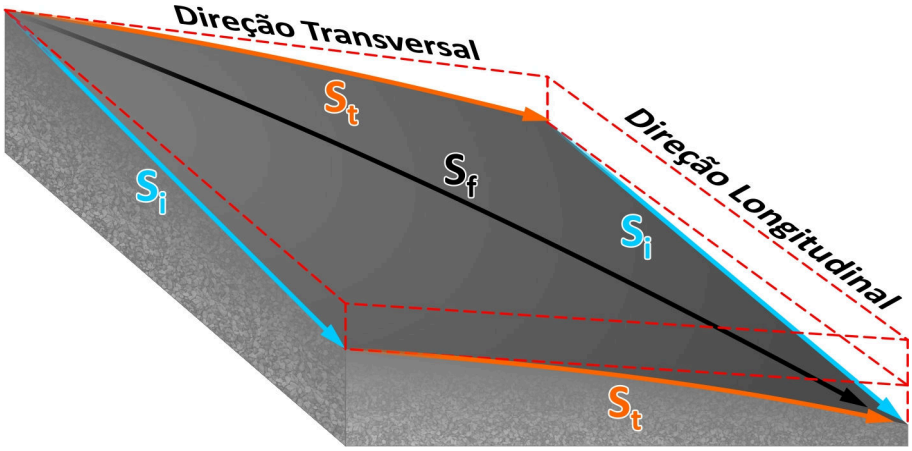
As informações sobre as linhas de fluxo de água que se formam no pavimento dependem das características geométricas da via. Tais como, alinhamento horizontal, alinhamento vertical e seção transversal.

Para fim de determinação das características da linha de fluxo de água pode-se considerar as declividades longitudinais e transversais como independentes, embora tal afirmação não seja válida na análise de outras caraterísticas de uma rodovia.

3.4.1. Comprimento

O comprimento da linha de água pode ser obtido de maneira simples para as situações em que as declividades da pista são constantes, mesmo para situações em que o alinhamento horizontal está em curva, pois, devido ao comprimento das linhas de fluxo, estas situações podem ser aproximadas para uma tangente. O sentido do fluxo nestes casos apresentado na Figura 3-12.

Figura 3-12 – Vetores para determinação do comprimento da lâmina de água em trechos de superelevação constante



Fonte: Adaptado de (SALPICO, 2009)

Para estas situações o comprimento da linha de água é dado pela Equação (3.1):

$$L_f = L.\frac{\sqrt{{S_l}^2 + {S_t}^2}}{S_t} \qquad (3.1)$$

Em que,

L_f = comprimento da linha de água;

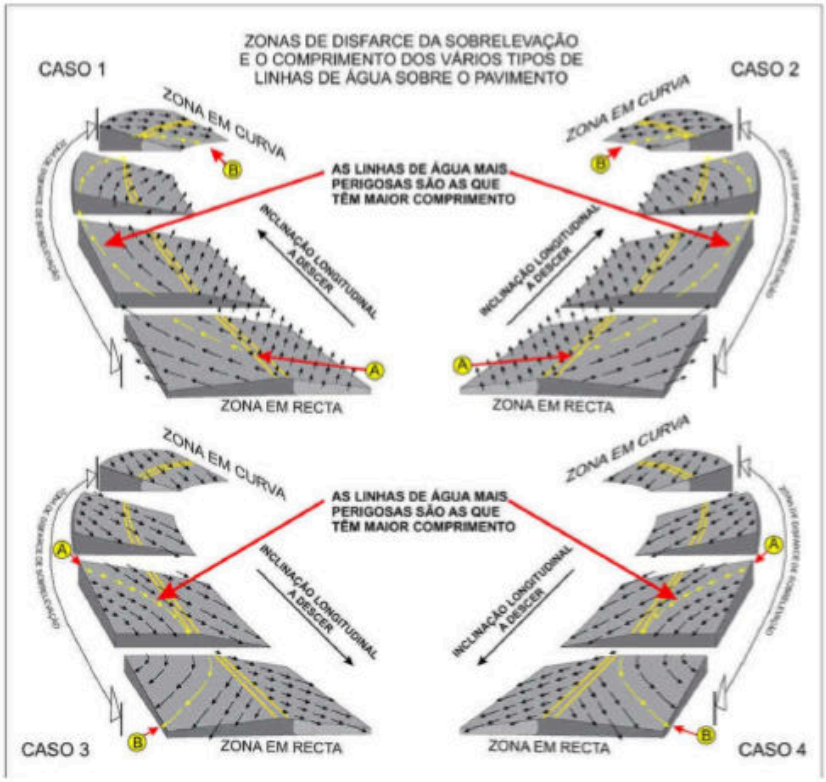
L = largura do plano analisado;

S_l = declividade longitudinal;

S_t = declividade transversal.

Para situações onde ocorre a variação da declividade transversal ou longitudinal, o cálculo deixa de ser simples e passa a depender da taxa de variação desta declividade; nos trechos onde a declividade transversal sofre a inversão de sentido o trajeto da linha de água se assemelha a uma parábola, como apresentado na Figura 3-13.

Figura 3-13 – Análise do comprimento da linha de água na transição de superelevação



Fonte: (SALPICO, 2009)

Em tais casos é sugerida a utilização de um processo iterativo de cálculo, conforme apresentado no Capítulo 5, ou a utilização de softwares de modelagem de superfície para obtenção dos dados de comprimento e declividade das linhas de fluxo.

3.4.2. Declividade

Para o cálculo da declividade, assim como para o cálculo do comprimento, a solução para os trechos de declividades transversais e longitudinais constantes é simples, podendo ser obtido pela equação (3.2):

$$S_f = \sqrt{{S_l}^2 + {S_t}^2} \qquad (3.2)$$

Em que,

S_f = declividade da linha de água;

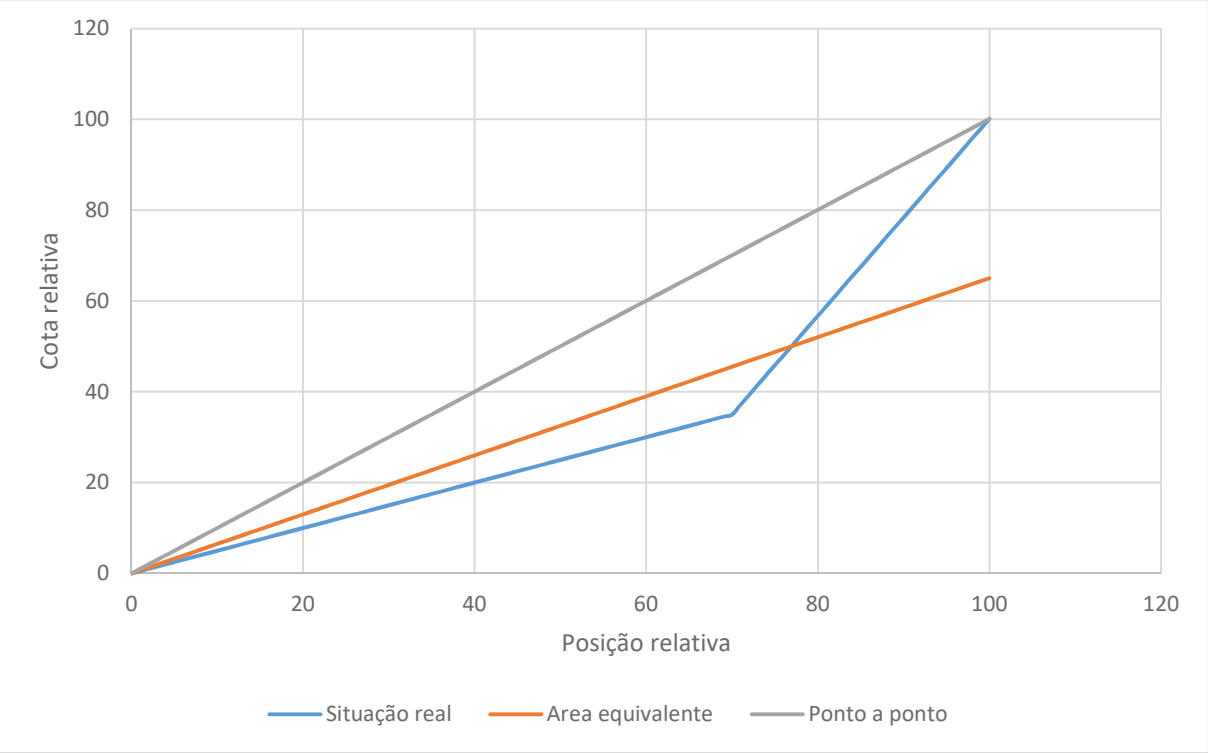
S_l = declividade longitudinal;

S_t = declividade transversal.

Nos trechos onde há variação da declividade longitudinal ou transversal, a declividade deixa de ser constante ao longo do escoamento; assim, deve ser adotado um método para determinação do valor a ser utilizado nos estudos. Algumas simplificações para adoção de uma declividade média são: média simples, divisão por trechos uniformes ou a média através da área equivalente (como ilustrado na Figura 3-14).

A dificuldade na escolha por algum destes critérios surge da ausência de estudos comparando resultados experimentais de espessuras de lâmina de água com os valores obtidos a partir de sua aplicação nos modelos.

Figura 3-14 – Métodos para adaptação de declividades variáveis.



Fonte: Adaptado de (AUSTROADS, 2013)

Nestes casos sugere-se a adoção do método da área equivalente como adotado no Manual australiano de drenagem de rodovias (AUSTROADS, 2013). Este método consiste na determinação da declividade que resulte em um triângulo com a mesma área da situação real, quando analisado o perfil da linha de fluxo da água. E é definido pela equação (3.3).

$$S_f = \frac{\int_0^{L_f} Z(x)dx}{2\,L_f} \qquad (3.3)$$

Em que,

L_f = comprimento da linha de fluxo analisada;

$Z(x)$ = é a função que define a cota relativa de um ponto qualquer da linha de fluxo em relação ao seu ponto inicial;

x = é a posição relativa ao ponto inicial da linha de fluxo.

4. Análise dos métodos de cálculo

A ocorrência da aquaplanagem está condicionada a dois principais fatores: a velocidade do veículo e a presença de água na pista. Assim, neste capítulo, são apresentados alguns dos principais métodos existentes para determinação de tais fatores, bem como as análises de limitações de aplicações de cada um destes métodos.

Com objetivo de facilitar a comparação das equações, os nomes e unidades das variáveis foram padronizados de acordo com a lista a seguir:

h_f – Espessura da lâmina de água acima da rugosidade do pavimento[mm];

TMP – Altura média da rugosidade do pavimento, conforme ensaio de mancha de areia [mm];

L_f – Comprimento da linha de fluxo da água [m];

I – Intensidade pluviométrica [mm/h];

S_f – Declividade da linha de fluxo da água [m/m];

n – Coeficiente de rugosidade de Manning;

V_h – Velocidade de ocorrência da aquaplanagem [km/h];

FAR – (“Footprint Aspect Ratio”) Relação entre a largura e extensão da área de contato pneu-pavimento;

P_p – Pressão do pneu [kPa];

SD – Redução de velocidade de giro da roda no início da aquaplanagem [%];

S_p – Profundidade dos sulcos da banda de rodagem dos pneus [mm];

P_C – Carga por roda [kN];

$P_{C,perm}$ – Capacidade de carga do pneu [kN];

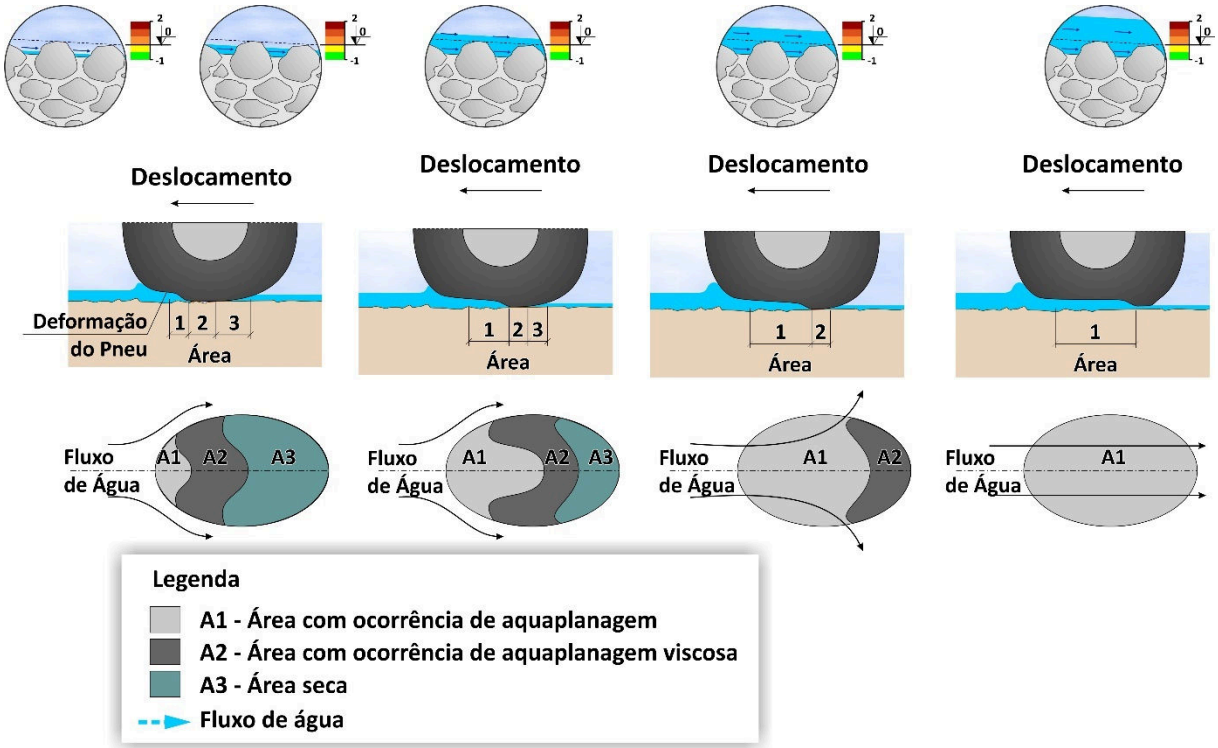
P_l – Largura da área de contato do pneu [mm].

4.1. Cálculo da espessura da lâmina de água

O primeiro passo para avaliação do risco da aquaplanagem dinâmica é o cálculo da espessura da lâmina de água sobre as asperezas do pavimento, pois, conforme já mencionado, este fator é condicionante para a ocorrência desse fenômeno.

A Figura 4-1 ilustra a relação entre a espessura da lâmina de água, a altura das asperezas do pavimento e a interação do pneu com estes.

Figura 4-1 – Influência da espessura da lâmina de água na ocorrência da aquaplanagem



Fonte: Adaptado de (SALPICO, 2009)

Para este cálculo são necessários os dados da geometria da via, características do pavimento e de intensidade de chuva, conforme apresentado no Capítulo 3.

Diversos autores aplicaram métodos empíricos e analíticos para determinar a espessura da lâmina de água sobre o pavimento.

A seguir são detalhados os métodos utilizados por alguns destes, assim como uma descrição de suas limitações de aplicação.

4.1.1. Gallaway

Nos estudos do Texas Transportation Institute (GALLAWAY, IVEY, *et al.*, 1979) foram realizados testes para diversas combinações de superfícies, intensidades de chuva e comprimento e declividade das linhas críticas de fluxo de água. Este modelo foi validado com dados experimentais de linhas de fluxo de água (L_f) com comprimento menores que 14,6 m, embora, segundo o autor, o modelo continue sendo válido também para extensões maiores. Caracterizado pela equação (4.1) apresentada a seguir.

$$h_f = 0{,}01485\left[TMP^{0{,}11}{L_f}^{0{,}43}I^{0{,}59}\left(\frac{1}{S_f}\right)^{0{,}42}\right] - TMP \qquad (4.1)$$

4.1.2. Road Research Laboratory

Os estudos do Road Research Laboratory (ROSS e RUSSAM, 1968) resultaram em duas equações de base empírica: uma para a espessura de lâmina de água total, outra para a espessura acima das asperezas do pavimento. Para a análise do presente estudo, apenas a segunda situação será considerada, caracterizada pela expressão (4.2) apresentada a seguir.

$$h_f = 0{,}046\left[\frac{\left(L_f I\right)^{0{,}5}}{{S_f}^{0{,}2}}\right] \qquad (4.2)$$

Para elaboração deste modelo foi feito um levantamento de dados de espessura da lâmina de água conforme variação do comprimento da linha de fluxo, de declividade da plataforma e de intensidade de chuva. Contudo, devido às limitações técnicas, apenas foram consideradas espessuras maiores do que 1,5 mm.

4.1.3. NHCRP Web report 16 (PAVDRN)

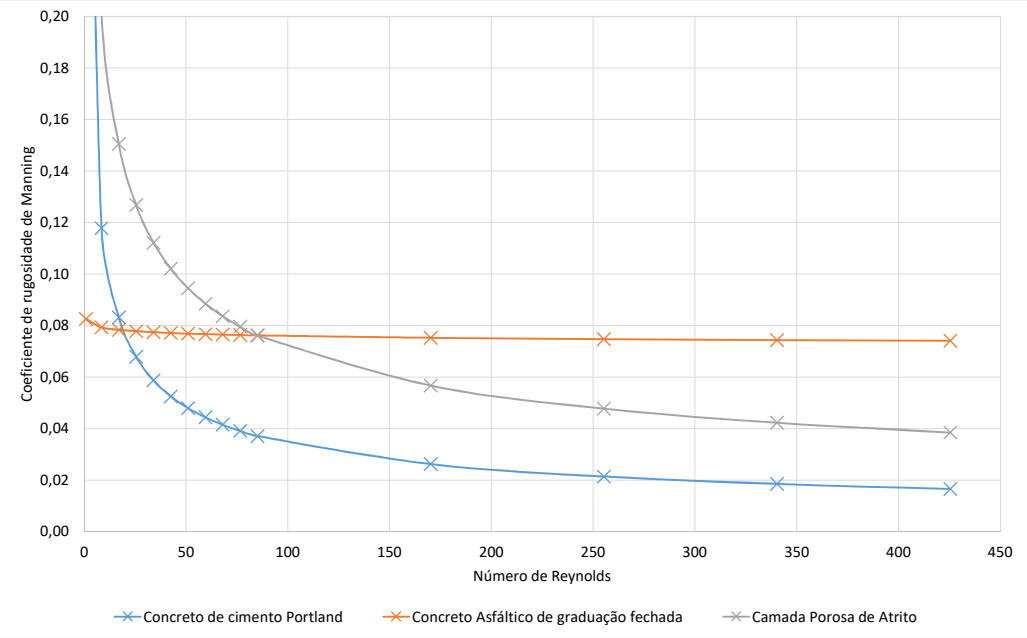
O National Cooperative Highway Research Board (1998) elaborou um software baseado em MS-DOS para análise da velocidade de ocorrência de aquaplanagem em situações de tangente horizontal e vertical, transição de superelevação e pontos altos e baixos. Os autores deste estudo consideraram a equação (4.1), proposta por Gallaway, inadequada por não considerar a resistência ao escoamento provocada pela superfície. Portanto, esta equação foi descartada, tendo sido elaborada uma equação baseada nas soluções de onda cinemática unidirecional para estado constante, da qual resulta o valor da espessura da lâmina de água sobre as asperezas do pavimento. Tal equação (4.3) é apresentada a seguir.

$$h_f = \left(\frac{nL_f I}{36{,}1.{S_f}^{0{,}5}}\right)^{0{,}6} - TMP \qquad (4.3)$$

O valor do coeficiente de rugosidade de Manning (n) foi modelado para 3 diferentes tipos de pavimento, a saber: pavimento rígido de concreto de cimento Portland; camada porosa de atrito (CPA) e pavimento asfáltico de graduação fechada, como apresentado na Figura 4-2, na qual o número de Reynolds (N_R) é obtido pela equação (4.4), e ϑ representa o valor da viscosidade cinemática da água.

$$N_R = \frac{L_f I}{\vartheta} \qquad (4.4)$$

Figura 4-2 – Coeficiente de rugosidade em função do Número de Reynolds



4.1.4. Herrmann

A aplicação da solução de onda cinemática unidimensional com saída variável, proposta por Hermann (2008), trata o fluxo de água como um canal de largura muito maior do que a profundidade, de modo que o atrito com as paredes laterais tem importância quase nula no comportamento do escoamento e é representada pela equação (4.5).

$$h = c.\left(L_f.\frac{I}{60}\right)^{\alpha}.{S_f}^{\beta}.R^{\gamma} \qquad (4.5)$$

A equação (4.5) resulta na espessura total da lâmina de água e foi calibrada a partir de dados experimentais, com os valores dos coeficientes apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 Valores obtidos empiricamente para método de onda cinemática

Revestimento	c	α	β	γ
Concreto de Cimento Portland – Textura lisa	0,07489	0,5412	-0,3963	-
Concreto de Cimento Portland – Textura Rugosa	0,32044	0,4064	-0,2637	-
Mastique	0,39369	0,3941	-0,3079	-
SMA – Stone Mastic Asphalt (0/11S)	0,24114	0,4422	-0,3491	-
SMA – Stone Mastic Asphalt (0/8S)	0,25866	0,3783	-0,3652	-
Qualquer revestimento (em que $R = K_s$)	0,19422	0,4158	-0,3289	0,1752
Qualquer revestimento (em que $R = T_{moore}$)	0,29371	0,4157	-0,3317	-0,1608
Qualquer revestimento (em que $R = TMP$)	0,26334	0,4158	-0,3314	0,4177

Fonte: (HERRMANN, 2008)

A variável R é utilizada na equação (4.5) para representar o resultado de diferentes tipos de ensaio de textura do pavimento, tendo sido calibrada para os seguintes ensaios:

K_s= rugosidade equivalente de areia de Nikuradse [mm] (NIKURADSE, 1933);

T_{moore} = tempo de drenagem de Moore [s] (MOORE, 1965);

TMP = Macrotextura do pavimento, de acordo com o ensaio da mancha de areia [mm] (ASTM INTERNATIONAL, 2015).

Para as análises realizadas no presente trabalho foi utilizada a forma da equação que considera o ensaio da mancha de areia como representativo da rugosidade (TMP) e subtraindo o valor da macrotextura para obter a espessura de lâmina de água acima das asperezas do pavimento, obtém-se a equação (4.6).

$$h_f = \left[0{,}26334.\left(L_f.\frac{I}{60}\right)^{0{,}4158}.S_f{}^{-0{,}3314}.TMP^{0{,}4177}\right] - TMP \qquad (4.6)$$

4.1.5. Análise comparativa dos modelos de determinação da espessura da lâmina de água

A partir dos modelos apresentados é possível observar que:

- pavimentos com valores maiores de macrotextura (TMP) implicam em menores espessuras de lâmina de água, com exceções ocorrendo para o método do RRL (pois este não considera esta variável) e para o modelo de Herrmann em que o efeito é reduzido com o aumento das intensidades de chuva;
- o coeficiente de Manning (n), utilizado no método do PAVDRN, não é influenciado pela macrotextura, sendo dependente apenas da intensidade de chuva, do comprimento da linha de fluxo e da temperatura d'água;
- a sensibilidade das equações em relação ao comprimento da linha de fluxo (L_f) de água e intensidade de precipitação (I) é semelhante entre os 4 métodos avaliados, tal fato pode ser observado pela proximidade dos valores dos expoentes aplicados a estas variáveis;
- o impacto causado pela variação da declividade média da linha de fluxo de água (S_f) diminui consideravelmente para valores maiores do que 2%, indicando que a existência de linhas de fluxo de água com declividades menores que esta são críticas à operação rodoviária;
- as espessuras previstas pelo modelo do RRL têm valores geralmente superiores a 1,5 mm em condições consideradas típicas, possivelmente em decorrência da restrição durante a coleta de dados do experimento original.

4.2. Cálculo da velocidade de ocorrência da aquaplanagem

Para aferição do risco de ocorrência de aquaplanagem são utilizados modelos que resultam na velocidade a partir da qual se iniciaria a ocorrência de tal fenômeno.

No presente estudo são comparados 4 modelos de determinação da "velocidade de aquaplanagem", sendo que os resultados destes modelos devem ser comparados com a velocidade operacional da rodovia para determinação da possibilidade de ocorrência de aquaplanagem.

4.2.1. NASA (HORNE e DREHER, 1963)

A equação (4.7) do modelo da NASA foi desenvolvida visando compreender a ocorrência do fenômeno em pistas de pouso e decolagem de aeronaves e é válida para pneus lisos e com “closed pattern tread tires”, ou seja, com pneus com sulcos da banda de rodagem paralelas ao sentido de rotação, quando a espessura da lâmina de água é maior do que a profundidade dos sulcos.

O modelo teve sua validade comprovada para cargas por roda de 43 a 9979 kg e pressão de enchimento do pneu de 165 a 1034 kPa, considerando a espessura de lâmina de água constante e igual a 7 mm e desconsiderando as características do pavimento.

$$V_h = 6{,}36\sqrt{P_p} \qquad (4.7)$$

A equação (4.7) foi adequada posteriormente por Horne, Yager e Ivey (1986) para consideração de diferentes tipos de pneu, consideração essa que, segundo os autores, seria melhor representada pelo FAR, que é a relação entre a largura e o comprimento da área de contato do pneu com o pavimento, conforme caracterizado na equação (4.8).

$$V_h = 83{,}363812 - 27{,}600181(FAR) + 0{,}168058758P_p \qquad (4.8)$$

4.2.2. Gengenbach (1967)

A equação (4.9) foi desenvolvida na Alemanha a partir de dados experimentais e é válida apenas para pneus lisos e considera a carga na roda, a largura da área de contato e a espessura da lâmina de água.

$$V_h = 5080\sqrt{\frac{P_c}{P_l.\,{h_f}^*.\left(46\left(\frac{P_c}{P_{c,perm}}\right)^{-1,342}\right)}} \qquad (4.9)$$

Posteriormente, uma adaptação desta equação foi desenvolvida para possibilitar a análise de pneus com sulcos na banda de rodagem (HÖCKER, 1971). Tal adequação é feita considerando que a espessura efetiva da lâmina de água (${h_f}^*$) pode ser reduzida em relação ao valor real por uma relação de equivalência de área dos sulcos da banda de rodagem, conforme a equação (4.10), em que φ representa a porcentagem da área de contato que é composta pelos sulcos.

$${h_f}^* = h_f - \varphi.(S_p - 0{,}8\,mm) \qquad (4.10)$$

4.2.3. Gallaway

A equação desenvolvida por Gallaway et al. (1979) é a mais difundida na literatura consultada, tendo sido utilizada em estudos realizados em diversos países. Foi elaborada a partir de mais de 1300 resultados experimentais utilizando diversas combinações de pavimento, pneus e métodos de aferição de aquaplanagem. Dentre o material consultado, o conjunto de experimentos realizados é o mais abrangente sobre o assunto.

Este modelo é dividido em 2 partes: a equação (4.11) é válida para espessuras de lâmina de água menores do que 2,4 mm e foi elaborada a partir dos estudos de Agrawal, Meyer e J.J. (1977), enquanto a equação (4.12) foi elaborada a partir dos dados levantados durante o estudo.

$$V_h = 96{,}9.\,{h_f}^{-0{,}259} \qquad (4.11)$$

$$V_h = 0{,}9143.\,SD^{0{,}04}.\,{P_p}^{0{,}3}.\left(S_p + 0{,}794\right)^{0{,}06}.\,máximo\begin{cases} \dfrac{12{,}639}{{h_f}^{0{,}06}} + 3{,}507 \\ \left(\dfrac{22{,}351}{{h_f}^{0{,}06}} - 4{,}97\right).\,TMP^{0{,}14} \end{cases} \qquad (4.12)$$

Um grupo de estudo da NHCRP (1998) utilizou estas equações no software PAVDRN; porém, nos casos em que as espessuras de lâmina de água resultaram superiores a 2,4 mm, foram adotados como constantes os valores de: Pressão dos pneus (P_p = 215 kPa), Redução de velocidade de giro da roda no início da aquaplanagem (SD = 10 %) e profundidade dos sulcos da banda de rodagem (S_p = 1,5875 mm). A adoção de tais valores para a equação (4.12) resultou na equação (4.13).

$$V_h = 5{,}29.\,máximo\begin{cases} \dfrac{12{,}639}{{h_f}^{0{,}06}} + 3{,}507 \\ \left(\dfrac{22{,}351}{{h_f}^{0{,}06}} - 4{,}97\right).\,TMP^{0{,}14} \end{cases} \qquad (4.13)$$

4.2.4. University of South Florida (USF)

A equação (4.14) proposta no trabalho de Gunaratne et al (2012) é baseada no modelo numérico apresentado no trabalho de Ong e Fwa (2007) e considera o uso do pneu no padrão ASTM E-524, que não possui sulcos na banda de rodagem e foi validado com a equação de acordo com as equações da NASA (HORNE, YAGER e IVEY, 1986).

$$V_h = (P_c * 1000)^{0{,}2}.\,{P_p}^{0{,}5}\left[\frac{0{,}82}{{h_f}^{0{,}06}} + 0{,}49\right] \qquad (4.14)$$

4.2.5. Análise comparativa dos modelos de velocidade de ocorrência de aquaplanagem

No presente trabalho os modelos de velocidade de ocorrência de aquaplanagem seguirão a seguinte designação:

- NASA, equação (4.8);
- Gengenbach, equações (4.9) e (4.10);
- Gallaway, equações (4.11) e (4.12);
- Gunaratne, equação (4.14).

Para fins comparativos, as análises utilizarão todos os modelos. A análise de tais modelos, utilizando valores típicos para suas variáveis, permite fazer as seguintes observações:

- o modelo desenvolvido por Gunaratne possui a menor variabilidade dentre os 4 apresentados, com velocidades previstas para ocorrência de aquaplanagem entre 75 e 100 km/h;
- os resultados do modelo da NASA dependem apenas das características do pneu; assim, este modelo não é recomendável na identificação de trechos críticos de rodovias;
- as equações de Gallaway sugerem que seriam necessárias condições extremas para ocorrência de aquaplanagem em velocidades inferiores a 70 km/h, em desacordo com o modelo de Gengenbach;
- a equação de Gengenbach é a mais sensível aos valores da profundidade dos sulcos da banda de rodagem (S_p), possivelmente por considerar esta variável como um redutor da espessura da lâmina de água (h_f).

5. Procedimento proposto para avaliação da aquaplanagem

Neste capítulo será descrito o procedimento de verificação proposto, com detalhamento de suas etapas.

5.1. Descrição do procedimento

O processo de verificação é iniciado pelo levantamento das características geométricas da rodovia, tais como declividade transversal e longitudinal.

O alinhamento vertical de uma rodovia é composto de dois elementos básicos: tangentes verticais, em que a declividade longitudinal é constante e curvas verticais, em que são feitas as concordâncias entre tangentes de diferentes declividades. Devido a utilização usual de parábolas de 2º grau nestas curvas de concordância, é possível obter o valor da declividade em qualquer ponto de uma curva através de uma interpolação simples com os dados de posição e declividade de seu início e fim.

Assim como no caso do alinhamento vertical, a declividade transversal também é definida por trechos de valor constante e trechos de variação, também podendo ser obtido seu valor em qualquer posição da rodovia através de uma simples interpolação entre os pontos de mudança dos valores.

Na largura da via deve ser considerada a largura que efetivamente contribui no fluxo de água das faixas de tráfego. Os refúgios ou acostamentos devem ser considerados sempre que possuam a mesma declividade transversal das faixas de tráfego. Característica essa que é usualmente adotada em trechos de pontes e viadutos.

Para elaboração do algoritmo que será detalhado adiante, optou-se pela organização dos dados conforme o formato apresentado na Tabela 5-1, na qual são indicados os dados de um exemplo de traçado com as seguintes características:

- 500 m de extensão;
- curva horizontal à esquerda entre os km 0+228 e 0+334 em que a transição da superelevação é feita em 112 m, com a transição entre 3,6% e 6% sendo feita no trecho em curva e a transição entre -2% e 3,6% no trecho em tangente;

- curva vertical convexa entre os km 0+020 e 0+132;
- largura constante de 10,5 m, referentes a 3 faixas de tráfego de largura iguais a 3,5 m cada.

Tabela 5-1 – Dados geométricos do trecho

Declividade longitudinal		Declividade transversal		Largura		
km	Declividade	km	Declividade	km	Largura	Obs.
0+000,00	2,00%	0+000,00	-2,00%	0+000,00	10,5	3 faixas
0+020,00	2,00%	0+150,00	-2,00%	0+500,00	10,5	3 faixas
0+132,00	-2,00%	0+262,00	6,00%			
0+500,00	-2,00%	0+300,00	6,00%			
		0+412,00	-2,00%			
		0+500,00	-2,00%			

Como é possível notar, na Tabela 5-1, não estão presentes os dados da curva horizontal. No cálculo proposto para o algoritmo, foi considerado que os raios de curvatura não influem no fluxo de água na pista devido à sua magnitude, quando considerada a utilização de valores mínimos para rodovias de alto padrão. O sentido do fluxo da água depende apenas das declividades longitudinal e transversal.

Na sequência deve-se definir o valor de macrotextura que será adotado. Para os exemplos apresentados neste capítulo foi adotado o valor constante de 0,5 mm, valor este que está próximo do limite inferior dentre os valores levantados no item 3.3.1.

Os demais valores necessários à verificação da ocorrência de aquaplanagem, como intensidade de precipitação e condições do pneu devem ser definidos de acordo com os critérios apresentados nos Capítulos 3 e 4. Tais valores são considerados constantes para todo o trecho analisado.

5.2. Algoritmo

Devido à configuração geométrica das linhas de fluxo de água nos trechos onde há variação da declividade, como apresentado no item 3.4, optou-se pela elaboração de um algoritmo para determinação das linhas de fluxo de água, permitindo o cálculo das espessuras de lâmina de água, velocidade de ocorrência da aquaplanagem ao longo do trecho.

Para tal algoritmo foi utilizada a linguagem de programação “Visual Basic for Applications” sobre uma planilha Microsoft Excel, com seu código fonte disponibilizado nos arquivos presentes no Apêndice C. Tal linguagem foi escolhida por sua ampla utilização no ambiente de projetos de engenharia.

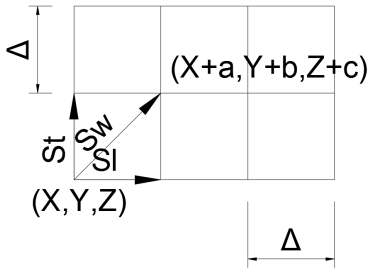
A seguir serão detalhadas as premissas e organização das etapas de processamento.

5.2.1. 1ª etapa: cálculo dos dados das linhas de fluxo de água

Inicialmente são calculados o comprimento e a declividade das linhas de fluxo de água, características estas que são função da geometria da rodovia e independem dos modelos apresentados no Capítulo 4.

A Figura 5-1 mostra a consideração básica utilizada no estudo do fluxo da água: A partir das coordenadas de um ponto inicial (X, Y, Z) e das declividades transversal e longitudinal (S_t e S_l) conhecidas pode-se determinar a direção da linha de fluxo.

Figura 5-1 – Etapa de cálculo do fluxo da água



Ao limitar a distância máxima entre dois pontos (Δ) adotou-se a premissa de que a variação das declividades neste intervalo pode ser desprezada.

Assim, é possível obter as coordenadas do ponto de destino (X+a, Y+b, Z+c) a partir das equações (5.1), (5.2) e (5.3), apresentadas a seguir.

$$a = \frac{S_l}{Máximo[S_l, S_t]} * \Delta \qquad (5.1)$$

$$b = \frac{S_t}{Máximo[S_l, S_t]} * \Delta \qquad (5.2)$$

$$c = S_l * a + S_t * b \qquad (5.3)$$

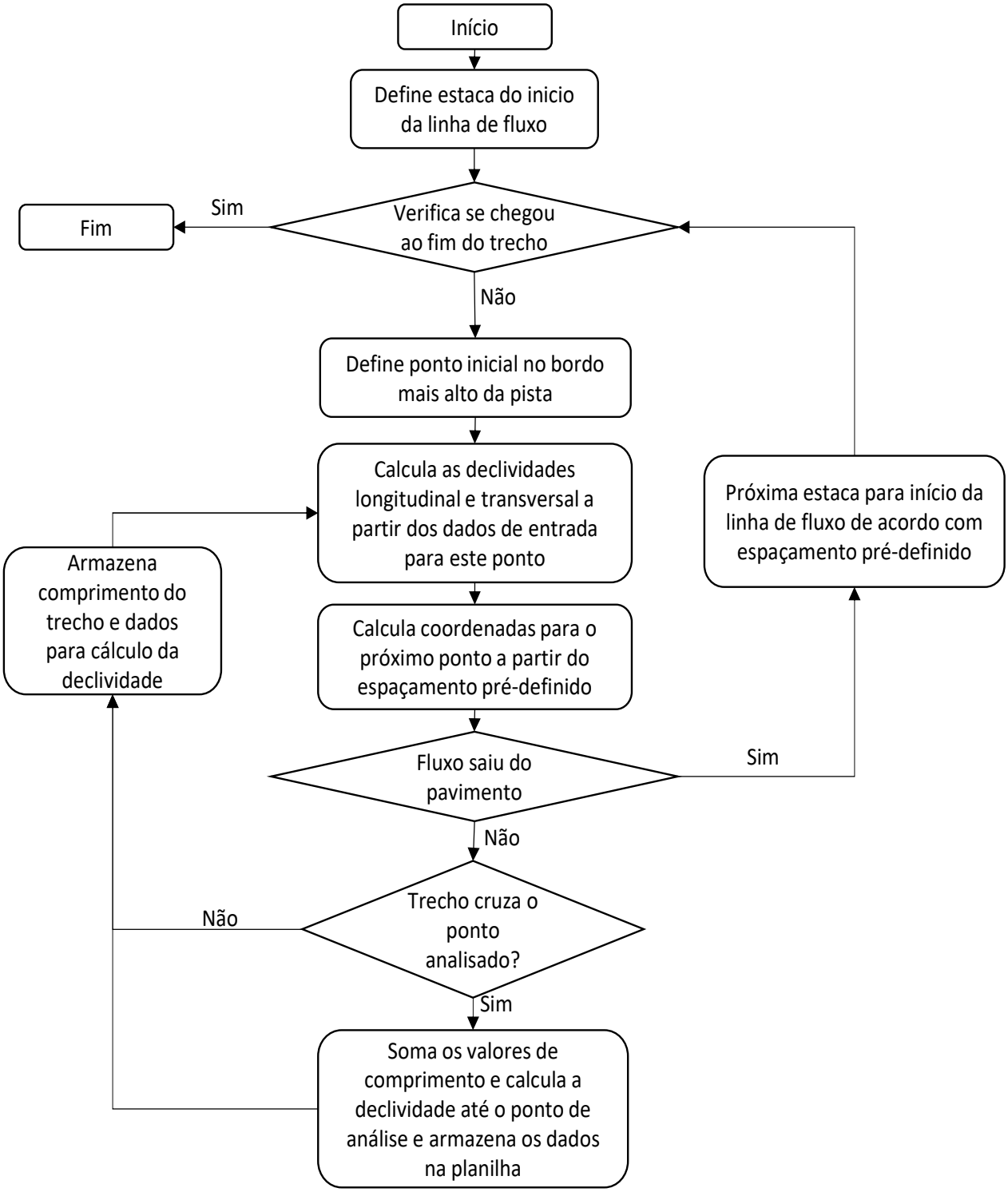
Repetindo esta operação diversas vezes, até que exista uma interseção da linha de fluxo com o ponto que se deseja analisar, é possível determinar, através das equações (5.4) e (5.5) os valores do comprimento total da linha de fluxo até tal ponto (L_w), assim como da declividade da linha de fluxo (S_f).

$$L_{wi} = \sqrt{a^2 + b^2} \qquad (5.4)$$

$$S_f = \frac{2 * \sum_i^n \left(\frac{c_i * L_{wi}}{2}\right)}{(\sum_i^n L_{wi})^2} \qquad (5.5)$$

A sequência dos cálculos realizados nesta 1ª etapa é resumida no fluxograma apresentado na Figura 5-2.

Figura 5-2 Fluxograma para cálculo do comprimento e declividade das linhas de fluxo.



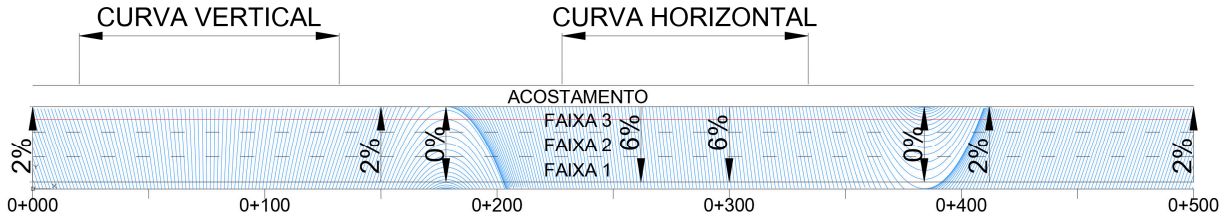
5.2.1.1. Avaliação da eficiência no cálculo da 1ª etapa

Para verificação dos resultados obtidos pela aplicação do algoritmo em relação à variação do espaçamento entre pontos iniciais de duas linhas de fluxo subsequentes e o espaçamento máximo entre dois pontos subsequentes para a mesma linha de fluxo, foram realizados alguns testes, conforme se explica para um trecho específico a seguir.

Utilizando a geometria apresentada na Tabela 5-1 foram adotados diferentes valores de intervalo entre pontos iniciais das linhas de fluxo de água (de 0,01 m a 20 m) e os valores do espaçamento máximo entre dois pontos subsequentes para a mesma linha de fluxo (de 0,01 m a 2 m).

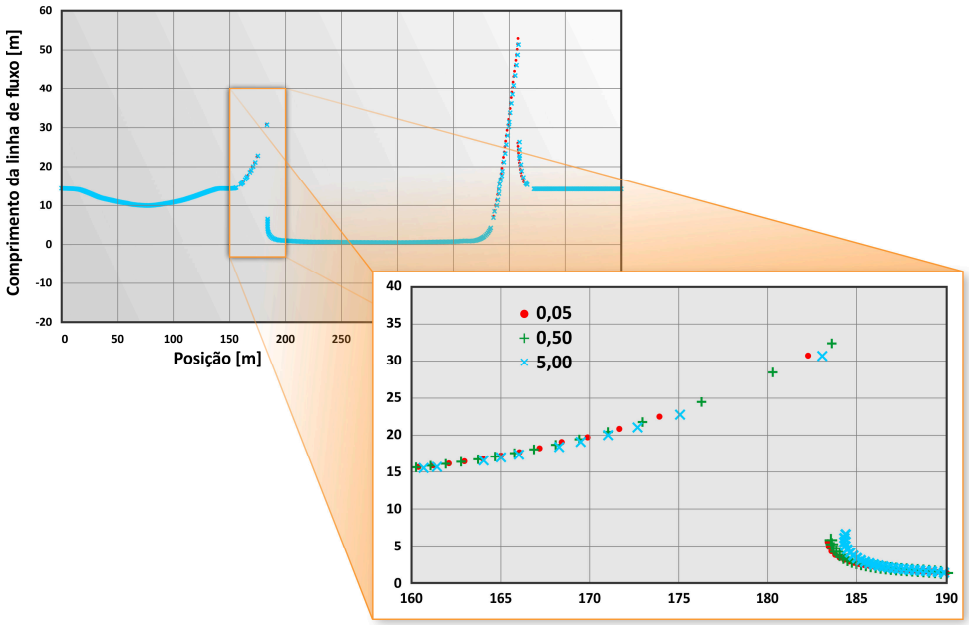
A Figura 5-3 ilustra os fluxos de água previstos para a geometria indicada, com a linha vermelha indicando o ponto escolhido para análise das diferenças resultantes da variação dos valores de espaçamento.

Figura 5-3 – Linhas de fluxo simuladas para a geometria apresentada na Tabela 5-1.



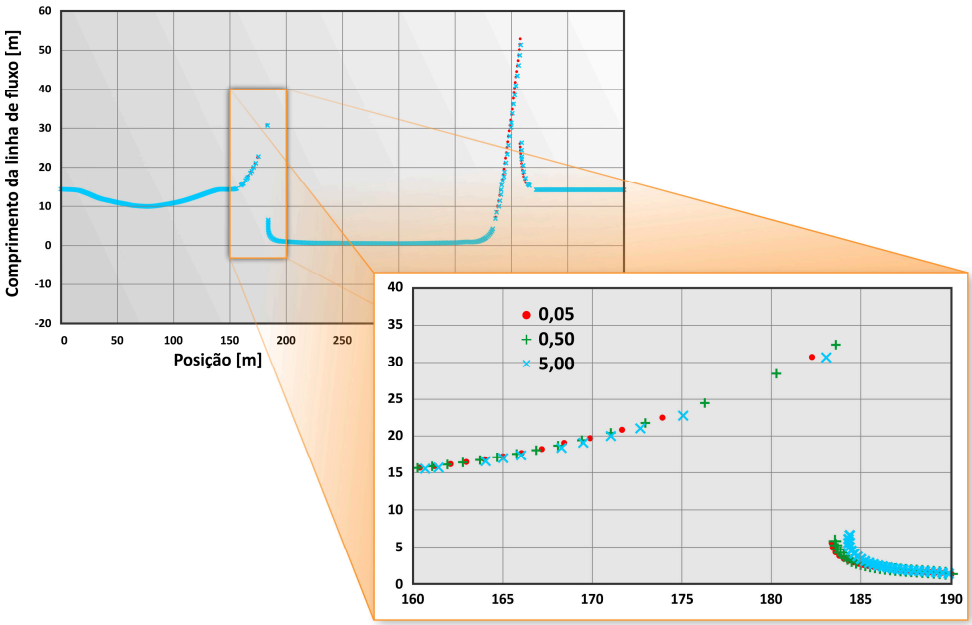
A Figura 5-4 apresenta os comprimentos de fluxo de água obtidos no ponto intermediário da faixa 3, considerando o afastamento entre pontos iniciais de linha de fluxo iguais a: 0,05 m, 0,50 m e 5,00 m, para facilitar a visualização do impacto dessa variação nos resultados do algoritmo.

Figura 5-4 – Variação do comprimento da linha de fluxo de água para análise do espaçamento ideal entre pontos iniciais da linha de fluxo de água (ponto analisado a 10 m do bordo interno)



A Figura 5-5 apresenta os comprimentos de fluxo de água obtidos no ponto intermediário da faixa, considerando o afastamento entre dois pontos consecutivos (Δ) iguais a: 0,05 m, 0,50 m e 5,00 m, para facilitar a visualização do impacto dessa variação nos resultados do algoritmo. Sendo possível perceber apenas um deslocamento da posição dos comprimentos críticos, é possível concluir que esse parâmetro possui menor influência nos resultados obtidos.

Figura 5-5 – Variação do comprimento da linha de fluxo de água para análise do espaçamento ideal entre pontos consecutivos da linha de fluxo de água (ponto analisado a 10 m do bordo interno)



Outros impactos na variação destes parâmetros são o tempo de processamento necessário e o volume de dados gerados para análise, sendo que o volume de dados aumenta linearmente com a redução nos espaçamentos enquanto o tempo de processamento aumenta exponencialmente.

Foi possível notar que alguns dos valores críticos de comprimento da lâmina de água resultaram reduzidos quando utilizados espaçamento entre pontos iniciais de linhas de fluxo maiores que 2 m. Assim, visando garantir uma margem de segurança na precisão dos resultados, optou-se pela adoção de 0,5 m como padrão para ambos os espaçamentos.

5.2.2. 2ª etapa: Aplicação dos modelos de verificação

Após definidos os valores de comprimento e declividade da linha de fluxo de água, podem ser aplicados os modelos apresentados no Capítulo 4.

Tal etapa consiste em aplicar os modelos aos vários pontos ao longo da rodovia para os quais foram determinadas as linhas de fluxo de água. Para tanto, os modelos foram combinados de diversas maneiras, sendo que as combinações definidas no presente trabalho foram numeradas conforme a Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Combinações de equações utilizadas

Nº da combinação	Modelo de previsão da velocidade de ocorrência da aquaplanagem	Modelo de previsão da espessura de lâmina de água
1	Gengenbach	Gallaway
2	Gengenbach	RRL
3	Gengenbach	PAVDRN
4	Gengenbach	Herrmann
5	Gallaway	Gallaway
6	Gallaway	RRL
7	Gallaway	PAVDRN
8	Gallaway	Herrmann
9	Gunaratne	Gallaway
10	Gunaratne	RRL
11	Gunaratne	PAVDRN
12	Gunaratne	Herrmann
13	NASA	-

Uma melhor visualização dos resultados pode ser obtida com a utilização de gráficos de velocidade de ocorrência da aquaplanagem em relação à posição na rodovia.

5.2.3. Escolha do ponto de análise

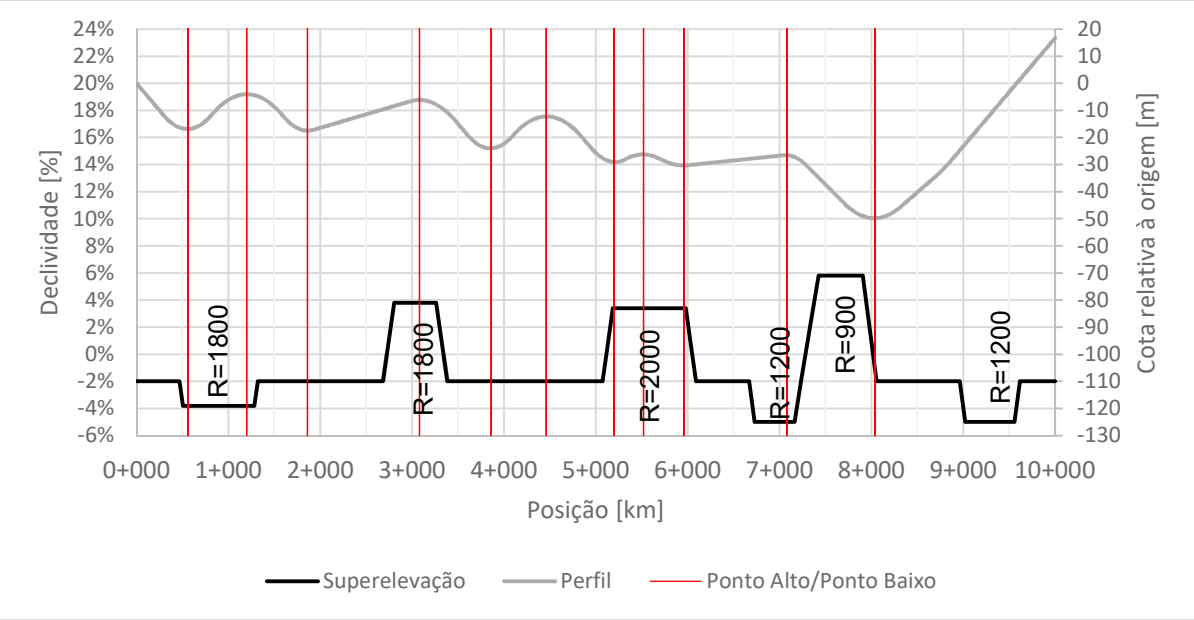
Neste procedimento deve-se escolher um ponto para verificação da velocidade de ocorrência de aquaplanagem, pois o comprimento da linha de fluxo de água varia em função da sua posição na pista como decorrência do efeito conjugado das características geométricas dos alinhamentos horizontal e vertical e da seção transversal.

Para avaliar o impacto da escolha de diferentes pontos de análise foi realizada uma comparação entre as velocidades resultantes para o ponto intermediário de cada faixa de tráfego e para posições afastadas 0,85 m deste ponto. Devido à necessidade de se considerar este impacto para diferentes combinações de características geométricas, optou-se por realizar tal avaliação em um trecho cujo traçado possui as seguintes características:

- extensão de 10 km;
- 6 curvas de raios variando entre 900 m e 2000 m, com 3 curvas à direita e 3 curvas à esquerda, nas quais, dada a magnitude dos raios adotados, não foram utilizadas curvas de transição;
- declividades longitudinais variando de 0,35 % a 4% e valores de K (taxa de variação da declividade longitudinal nas curvas verticais) variando de 66 a 170;
- Seção típica composta de acostamento interno de 1 m de largura,3 faixas de tráfego com 3,6 m de largura e acostamento externo com 3 m de largura.

Características essas que são ilustradas na Figura 5-6.

Figura 5-6 - Características geométricas do trecho utilizado



Para as variáveis utilizadas nos modelos, foram adotados valores favoráveis à ocorrência de aquaplanagem, enquanto o valor do afastamento entre o centro da faixa de tráfego e a posição das rodas foi adotado em 0,85 m por ter sido considerado um valor representativo de veículos de passeio típicos. Por fim, para a construção da Tabela 5-3 foram descartados os casos em que a velocidade de ocorrência de aquaplanagem em uma das linhas de roda fosse superior a 130 km/h, por considerar que nestes casos não há aquaplanagem.

Tabela 5-3 - Variação da velocidade de ocorrência de aquaplanagem na trajetória dos pneus em relação ao ponto central da faixa de tráfego.

Combinação	Diferença de velocidade [km/h]					
	Trajetória Direita + Trajetória Esquerda		Trajetória Direita		Trajetória Esquerda	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
1	0,33	6,84	-4,65	10,03	5,31	11,31
2	0,35	6,73	-3,10	5,05	4,02	7,28
3	-1,62	8,01	-4,52	9,56	1,86	5,85
4	0,19	5,96	-3,66	10,14	4,05	11,05
5	0,18	3,17	-1,56	3,38	1,91	3,65
6	0,38	3,11	-0,48	1,71	1,25	2,27
7	0,33	5,12	-2,23	3,68	3,00	5,37
8	-0,68	3,77	-2,31	4,72	1,20	3,41
9	0,10	1,21	-0,39	1,08	0,60	1,27
10	0,04	0,37	-0,07	0,22	0,16	0,28
11	0,21	1,68	0,12	0,44	0,29	0,69
12	-0,09	1,82	-0,37	0,81	0,19	1,53
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Pela Tabela 5-3 pode se observar que os valores para a trajetória direita são inferiores às da trajetória esquerda, tal fato deve-se ao conjunto de casos considerados possuir um maior número de situações com a declividade transversal à direita.

Pelos valores de diferença média, quando considerados os casos da trajetória esquerda somada a trajetória direita, estarem muito próximos de 0, com valores baixos de desvio padrão, exceto para as combinações de 1 a 4, considera-se que a análise realizada no meio de cada da faixa de tráfego é suficiente para os estudos de identificação dos trechos de uma rodovia que são favoráveis à ocorrência de aquaplanagem. Contudo, para o caso de interesse de maior detalhamento e precisão dos valores calculados, o procedimento proposto permite a verificação nas linhas referentes as trilhas de roda, ainda que o volume de dados gerado seja dobrado.

5.3. Considerações

Os resultados obtidos pelo método apresentado são de fácil verificação e entendimento, sendo que o algoritmo pode ser ajustado para aplicações em diferentes condições, podendo ser adaptado na eventualidade do surgimento de novos métodos.

Tais resultados permitem a identificação dos pontos da rodovia em que a velocidade de ocorrência de aquaplanagem está abaixo da velocidade de referência da rodovia (velocidade de projeto, regulamentada ou praticada), assim como a extensão destes trechos, auxiliando na decisão sobre a necessidade de alterações ou ajustes em um projeto. Além disso, através da utilização de um algoritmo computacional, a verificação pode ser repetida para diferentes cenários, de maneira que seus resultados possam ser comparados.

O espaçamento entre pontos iniciais pode ser ajustado de acordo com a extensão do trecho a ser analisado, com os espaçamentos de 0,5 m gerando um volume de dados que, apesar de elevado, ainda é manipulável. O valor do espaçamento entre pontos consecutivos (Δ) também pode ser reduzido para trechos curtos, não tendo sido observadas, no entanto, mudanças significativas nos resultados com tal redução.

Com base nos resultados obtidos com a aplicação dos modelos de verificação pode-se concluir que alguns destes não são recomendados para avaliação de projetos: o modelo da NASA, por resultar em valor único para toda a rodovia, e o modelo de Gunaratne, por ter uma amplitude de resultados restrita entre 75 e 100 km/h. No caso dos modelos de espessura da lâmina de água, os modelos propostos pelo RRL e no PAVDRN também não são recomendados por resultar em espessuras de lâmina de água muito elevadas quando comparadas com os resultados das outras equações.

5.4. Resultados

A partir de diversas simulações utilizando o procedimento proposto foi possível elaborar uma série de ábacos visando permitir uma avaliação expedita de situações típicas de projetos de rodovias de alto padrão.

As situações simuladas foram:

- transições de superelevação para diferentes declividades longitudinais;
- trechos com declividades transversais constantes, diferentes larguras e declividades longitudinais.

Para elaboração de tais simulações foi necessário assumir alguns valores para as variáveis utilizadas nos modelos, tendo-se optado pela utilização de 2 cenários que são apresentados na Tabela 5-4.

Tabela 5-4 - Cenários adotados

	Cenário A	Cenário B	Unidade
I	30	10	mm/h
SD	10	10	%
P_P	165	210	kPa
S_P	1,6	5,5	mm
P_C	2,5	2,5	kN
P_L	175	175	mm
Fi	0,3	0,3	Adimensional
FAR	0,63	0,49	Adimensional
T	21	21	º C

Os valores variáveis, indicados na Tabela 5-4 foram adotados com base nas seguintes considerações:

- Para a profundidade dos sulcos da banda de rodagem (Sp) foram utilizados o valor mínimo permitido no Código de Trânsito Brasileiro (1997) e o valor correspondente ao 50º percentil de acordo com os dados da NHTSA (SUBRAMANIAN e THIRIEZ, 2001);
- Na pressão de enchimento dos pneus (Pp) foram adotados os valores do 90º e 50º percentis, conforme dados do levantamento da NHTSA (SUBRAMANIAN e THIRIEZ, 2001);
- para a intensidade de chuva foram adotados como valores máximo 30mm/h e mínimo 10 mm/h, valores esses que, na Região Metropolitana de São Paulo, têm sido superados, respectivamente, durante 5 h/ano e 35 h/ano em média (IAG-USP, 2016);
- o valor da largura da área de contato do pneu foi adotado igual a 175 mm, o qual corresponde à média dos valores de modelos disponíveis para veículos de passeio;

- para a carga por roda foi adotado o valor de 2,5 kN, com base na média dos valores de peso bruto de carros de passeio;
- o valor da redução relativa na rotação da roda foi adotado como 10%, segundo proposto por Gallaway (1979);
- o valor da relação entre a área dos sulcos e a área de contato do pneu com o pavimento foi adotado como igual a de 30 %, conforme Herrmann (2008);
- o valor da relação entre largura e comprimento da área de contato entre o pneu e o pavimento foi calculado a partir dos dados de pressão e largura das rodas, considerando um formato elíptico para a área de contato, tendo resultado em 0,63, quando utilizados os valores críticos, e 0,49, quando utilizados os valores médios;
- o valor da temperatura da água foi adotado em 21 ºC, de acordo com os métodos de previsão de temperatura na superfície do pavimento (ARIAWAN, SUBAGIO e SETIADJI, 2015), utilizando os valores médios de temperatura do ar para a cidade de São Paulo;
- intervalo dos incrementos de distância horizontal, foi adotado em 0,5 m.

Os ábacos que permitem a visualização expedita da extensão sujeita à ocorrência da aquaplanagem em uma rodovia são apresentados no Apêndice A.

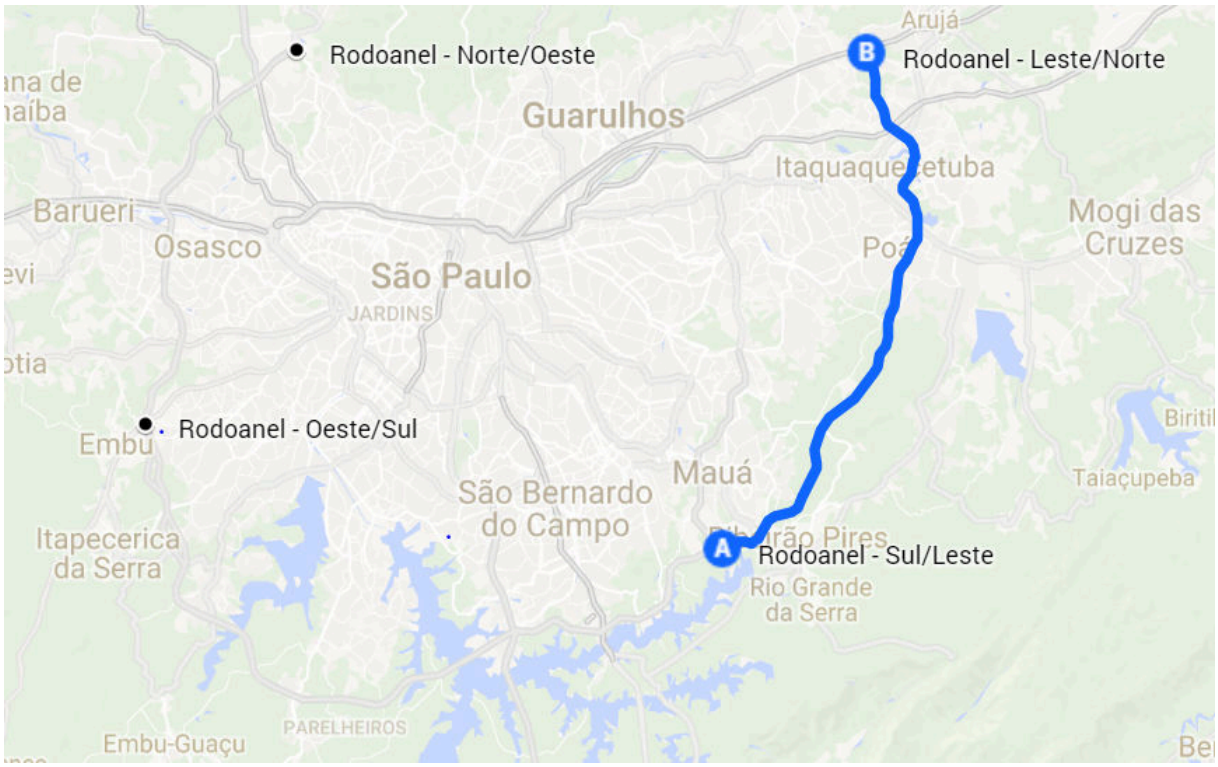
6. Estudo de caso

6.1. Descrição do trecho objeto do estudo

Para o estudo foi escolhido o trecho Leste do Rodoanel Mário Covas, implantado em 2014 na região metropolitana de São Paulo, por tratar-se de uma rodovia de padrão elevado, controle total de acesso e constituído de múltiplas faixas de tráfego.

O trecho em questão é administrado pela concessionaria SPMar e supervisionado pela Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP). Sua localização é apresentada de forma esquemática na Figura 6-1.

Figura 6-1 – Localização do Trecho Leste do Rodoanel Mario Covas



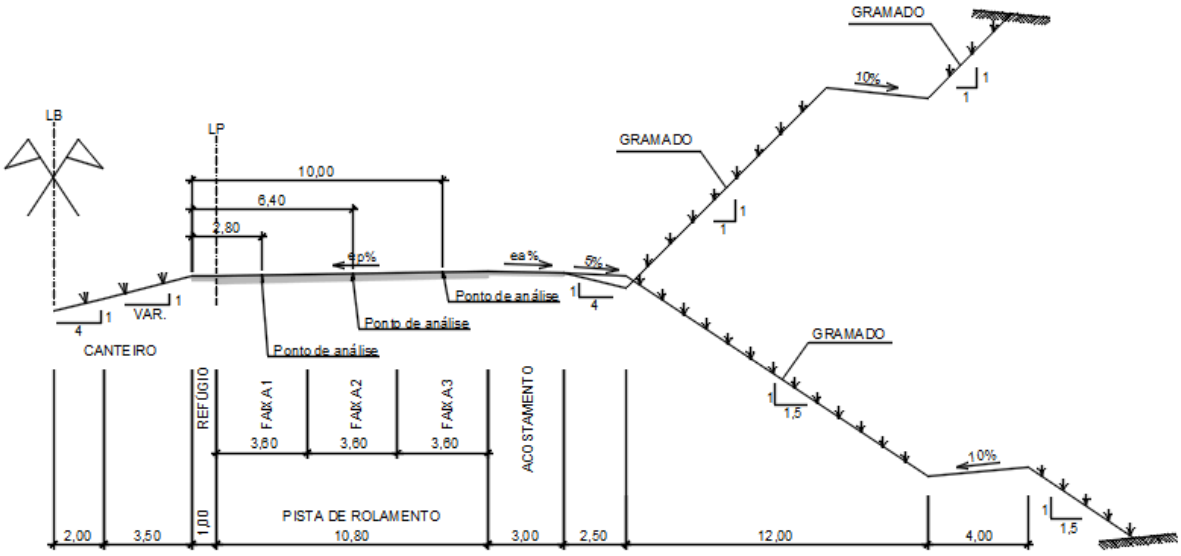
Fonte: Google Maps

Suas principais características são:

- extensão de 43,8 km com uma configuração de pista dupla;
- velocidade regulamentada de 100 km/h ao longo do trecho, com reduções nas aproximações das praças de pedágio;

- seção típica é composta por acostamento interno de 1 m largura, 3 faixas com 3,6 m de largura e acostamento externo com 3m de largura. Conforme ilustrado na Figura 6-2.

Figura 6-2 – Seção típica do trecho leste do Rodoanel Mário Covas



Alguns trechos possuem condições distintas das representadas na seção típica, tais trechos são caracterizados na Tabela 6-1.

Tabela 6-1 – Trechos com configurações distintas da seção típica.

km inicial	km final	Descrição	km inicial	km final	Descrição
86+620	87+465	Pedágio	104+851	104+876	Obra de Arte Especial
87+300	87+370	Obra de Arte Especial	105+377	105+731	Entrada/Saída
88+885	89+239	Entrada/Saída	105+736	105+811	Obra de Arte Especial
89+220	89+460	Obra de Arte Especial	107+673	107+743	Obra de Arte Especial
90+110	90+260	Obra de Arte Especial	107+840	108+240	Entrada/Saída
90+825	90+850	Obra de Arte Especial	108+615	108+625	Obra de Arte Especial
91+300	91+700	Entrada/Saída	108+977	108+986	Obra de Arte Especial
91+724	91+815	Obra de Arte Especial	109+255	109+336	Obra de Arte Especial
92+515	92+660	Obra de Arte Especial	110+069	118+220	Obra de Arte Especial
93+100	93+180	Obra de Arte Especial	115+775	116+103	Entrada/Saída
94+878	94+953	Obra de Arte Especial	118+200	118+480	Entrada/Saída
95+940	97+010	Túnel	118+405	120+459	Obra de Arte Especial
97+224	97+300	Obra de Arte Especial	120+459	120+806	Entrada/Saída
97+863	98+215	Entrada/Saída	122+151	123+613	Obra de Arte Especial
98+210	98+260	Obra de Arte Especial	123+435	123+648	Entrada/Saída
98+852	99+002	Obra de Arte Especial	124+000	124+250	Entrada/Saída
99+431	99+463	Obra de Arte Especial	124+758	124+815	Túnel
100+195	100+276	Obra de Arte Especial	124+955	125+310	Entrada/Saída
101+662	101+713	Obra de Arte Especial	125+315	125+345	Obra de Arte Especial
103+568	103+618	Obra de Arte Especial	127+610	128+030	Pedágio

As características principais desses trechos, no que se refere a ocorrência de aquaplanagem, podem ser resumidas em:

- nas obras de arte especiais e nos túneis, a declividade do acostamento segue a mesma declividade da pista de rolamento;
- nas entradas e saídas de pista, existe uma faixa de aceleração ou desaceleração com largura variável e que também segue a mesma declividade da pista de rolamento, sendo que nestas faixas espera-se uma velocidade menor do que na pista destinada ao tráfego direto;
- nos pedágios há um grande alargamento na plataforma pavimentada, com baixas declividades longitudinais e transversais e uma redução da velocidade regulamentada;
- nos túneis não é esperada a ocorrência de aquaplanagem, por não haver contribuição de precipitações.

Todas as características listadas foram obtidas no projeto executivo de geometria, o qual foi fornecido pela concessionaria através do sistema de informações ao cidadão da ARTESP, conforme solicitação apresentada no Anexo A.

6.2. Premissas adotadas para o procedimento de análise

A partir dos conceitos, análises e observações apresentados nos capítulos anteriores e dos dados fornecidos pela ARTESP foram adotadas as seguintes premissas para o estudo de caso:

- a análise considera a espessura da lâmina de água no ponto intermediário de cada faixa de tráfego (2,8 m; 6,4 m; 10 m a partir do bordo interno do pavimento);
- optou-se pela realização do estudo de caso apenas para a pista externa, a qual tem seu tráfego no sentido crescente da quilometragem;
- as declividades longitudinais, transversais e largura da pista foram obtidas a partir do projeto geométrico executivo;

- o valor da macrotextura do pavimento foi adotado a partir de resultados de ensaios de mancha de areia realizados em abril de 2015, cedidos pela ARTESP;
- para as demais variáveis foram adotados quatro cenários com os valores apresentados na Tabela 6-2.

Tabela 6-2 – Valores das variáveis para os cenários adotados

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Unidade
I	30	10	30	10	mm/h
SD	10	10	10	10	%
P_P	165	165	210	210	kPa
S_P	1,6	1,6	5,5	5,5	mm
P_C	2,5	2,5	2,5	2,5	kN
P_L	175	175	175	175	mm
Fi	0,3	0,3	0,3	0,3	Adimensional
FAR	0,63	0,63	0,49	0,49	Adimensional
T	21	21	21	21	º C

A escolha dos valores destas variáveis segue os mesmos critérios utilizados no item 5.4.

6.3. Resultados da aplicação do procedimento de análise proposto

Para avalição do risco de ocorrência de aquaplanagem na rodovia, foram aplicadas as combinações de modelos indicadas na Tabela 6-3 aos 4 cenários apresentados anteriormente.

Tabela 6-3 – Combinações de equações utilizadas

Nº da Combinação	Método de previsão da velocidade de ocorrência da aquaplanagem	Método de previsão da espessura de lâmina de água
1	Gengenbach	Gallaway
2	Gengenbach	RRL
3	Gengenbach	PAVDRN
4	Gengenbach	Herrmann
5	Gallaway	Gallaway
6	Gallaway	RRL
7	Gallaway	PAVDRN
8	Gallaway	Herrmann
9	Gunaratne	Gallaway
10	Gunaratne	RRL
11	Gunaratne	PAVDRN
12	Gunaratne	Herrmann
13	NASA	-

Os resultados foram então analisados em forma de gráficos, sendo que os gráficos elaborados para o Cenário 1 são apresentados no apêndice B, com exceção da Combinação 13 por esta resultar em valor único. Os demais resultados podem ser acessados no arquivo disponível no Apêndice C.

As Figuras 6-3 e 6-4 foram elaboradas para ilustrar as situações consideradas, e representam a velocidade de ocorrência de aquaplanagem para a faixa 1, quando utilizada a equação proposta por Herrmann. Na Figura 6-3 é apresentada toda extensão do trecho analisado e a Figura 6-4 detalha apenas um trecho em curva horizontal.

Figura 6-3 – Análise da velocidade de ocorrência de aquaplanagem para na Pista Externa – km 86,3 a 97,0

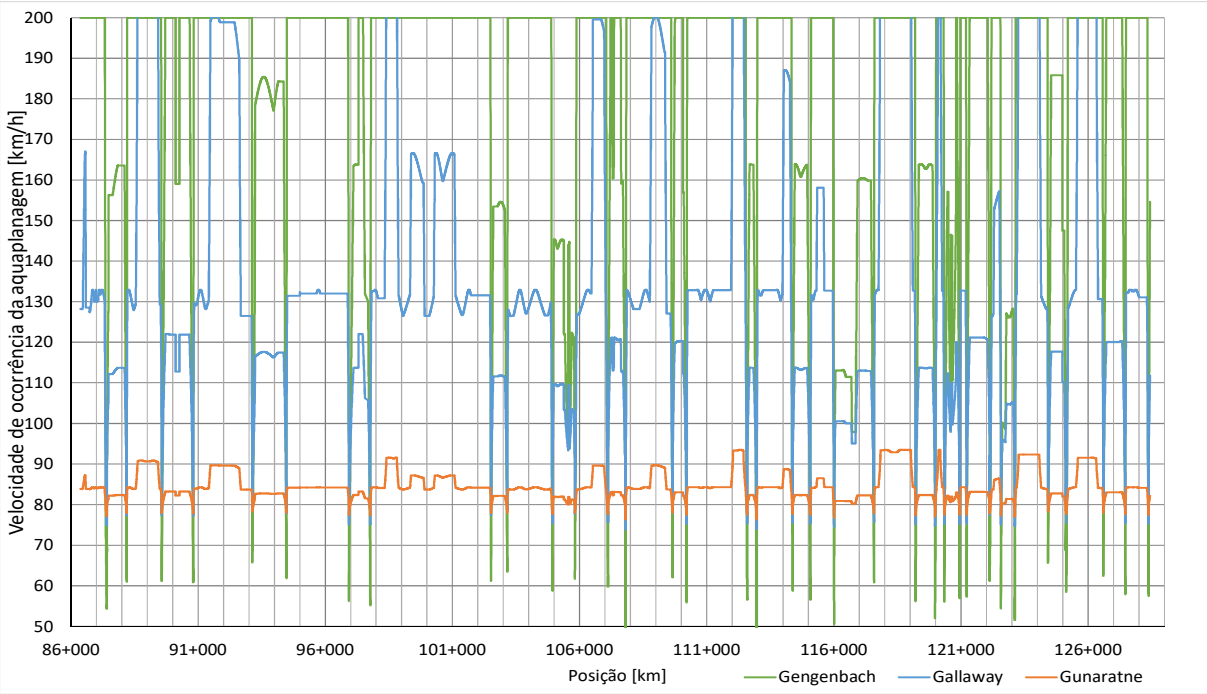
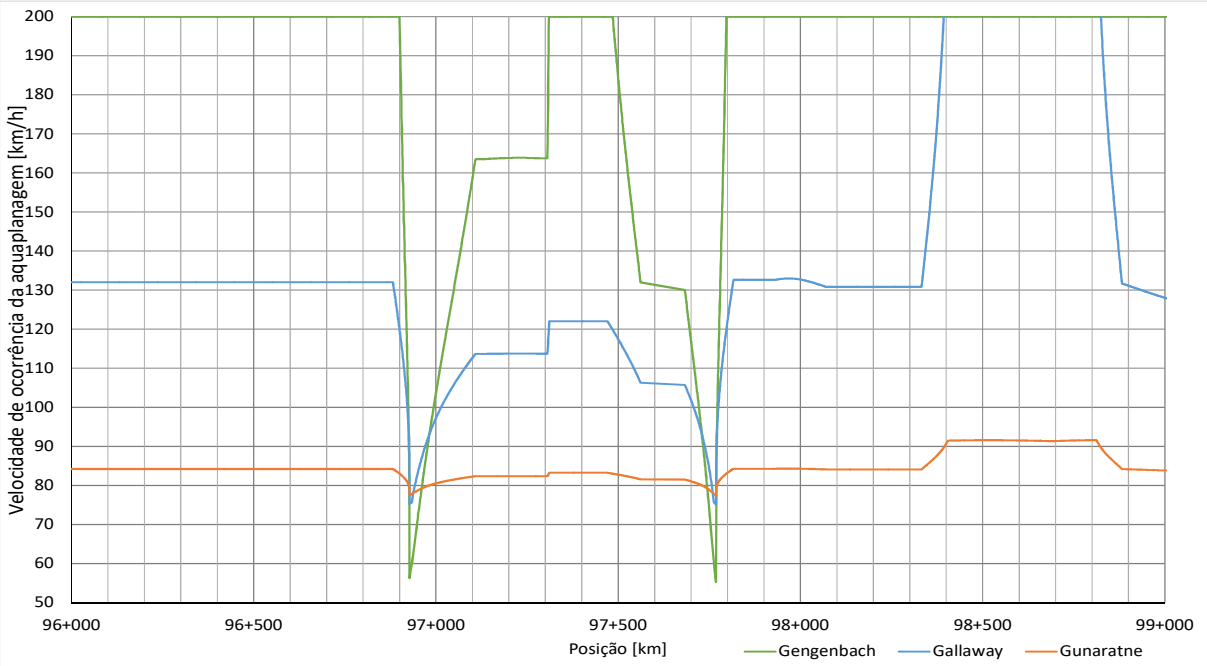


Figura 6-4 – Análise da velocidade de ocorrência de aquaplanagem para na Pista Externa – km 97,0 a 108,0



A partir desta análise foi possível comparar a extensão da rodovia em que o fenômeno da aquaplanagem pode ocorrer em velocidades inferiores ao limite legal regulamentado, estando tais extensões apresentadas na Tabela 6-4. Na apresentação foi excluída a Combinação 13, pela mesma gerar resultado constante de 93,7 km/h nos Cenários 1 e 2 e 105,0 km/h nos Cenários 3 e 4.

Tabela 6-4 – proporção de extensão em que a velocidade de ocorrência de aquaplanagem é menor do que 100 km/h

Faixa	Cenário	Comb. 1	Comb. 2	Comb. 3	Comb. 4	Comb. 5	Comb. 6	Comb. 7	Comb. 8	Comb. 9	Comb. 10	Comb. 11	Comb. 12
Faixa 1	1	3,8%	46,1%	38,4%	4,2%	5,4%	74,6%	49,0%	6,1%	85,2%	97,3%	97,3%	92,9%
	2	0,3%	7,2%	5,6%	0,9%	0,6%	18,2%	9,6%	1,3%	15,0%	97,3%	78,2%	42,5%
	3	0,6%	2,8%	9,2%	0,5%	5,4%	74,6%	49,0%	6,1%	73,9%	97,3%	97,3%	85,3%
	4	0,0%	0,3%	1,2%	0,0%	0,6%	18,2%	9,6%	1,3%	10,4%	97,3%	67,2%	28,4%
Faixa 2	1	3,5%	93,4%	74,4%	3,7%	4,5%	97,3%	90,4%	5,0%	92,9%	97,3%	97,3%	97,3%
	2	0,3%	4,6%	4,1%	0,9%	0,6%	20,3%	5,9%	1,4%	34,7%	97,3%	95,7%	72,7%
	3	0,6%	2,5%	5,6%	0,5%	4,5%	97,3%	90,4%	5,0%	88,7%	97,3%	97,3%	97,3%
	4	0,0%	0,4%	1,3%	0,0%	0,6%	20,3%	5,9%	1,4%	16,8%	97,3%	92,5%	53,3%
Faixa 3	1	3,5%	72,7%	71,7%	3,8%	14,9%	79,6%	73,0%	40,3%	81,2%	97,3%	95,7%	85,3%
	2	0,4%	25,9%	16,5%	0,9%	0,6%	47,9%	34,8%	1,4%	45,6%	97,3%	80,0%	72,1%
	3	0,6%	4,5%	36,9%	0,6%	14,9%	79,6%	73,0%	40,3%	77,7%	97,3%	92,5%	80,8%
	4	0,0%	0,4%	1,2%	0,0%	0,6%	47,9%	34,8%	1,4%	36,6%	97,3%	78,5%	59,3%

Observou-se também muitos casos em que a velocidade de ocorrência de aquaplanagem resultou pouco abaixo de 100 km/h; assim optou-se por apresentar na Tabela 6-5 as extensões em que houvesse possibilidade de ocorrência do fenômeno para velocidades inferiores a 95 km/h.

Tabela 6-5 – proporção de extensão em que a velocidade de ocorrência de aquaplanagem é menor do que 95 km/h

Faixa	Cenário	Comb. 1	Comb. 2	Comb. 3	Comb. 4	Comb. 5	Comb. 6	Comb. 7	Comb. 8	Comb. 9	Comb. 10	Comb. 11	Comb. 12
Faixa 1	1	3,1%	39,9%	36,2%	3,3%	3,3%	43,5%	37,6%	3,6%	84,7%	97,3%	97,3%	91,9%
	2	0,2%	4,9%	4,8%	0,7%	0,3%	6,4%	5,2%	0,8%	13,6%	97,3%	77,3%	39,8%
	3	0,5%	2,4%	7,8%	0,4%	3,3%	43,5%	37,6%	3,6%	37,2%	97,3%	94,2%	59,2%
	4	0,0%	0,2%	1,1%	0,0%	0,3%	6,4%	5,2%	0,8%	3,6%	97,3%	33,2%	8,9%
Faixa 2	1	3,1%	81,9%	66,5%	3,2%	3,3%	88,6%	71,8%	3,4%	92,7%	97,3%	97,3%	97,3%
	2	0,2%	3,5%	3,5%	0,7%	0,3%	4,1%	3,8%	0,8%	32,9%	97,3%	94,5%	70,4%
	3	0,5%	2,2%	4,8%	0,4%	3,3%	88,6%	71,8%	3,4%	60,5%	97,3%	97,3%	76,9%
	4	0,0%	0,2%	1,2%	0,0%	0,3%	4,1%	3,8%	0,8%	3,3%	97,3%	71,6%	6,6%
Faixa 3	1	3,1%	70,5%	69,3%	3,2%	3,3%	72,1%	71,0%	3,6%	80,5%	97,3%	94,5%	83,7%
	2	0,2%	13,8%	9,9%	0,7%	0,3%	18,4%	13,9%	0,8%	42,3%	97,3%	79,7%	71,9%
	3	0,5%	2,4%	30,7%	0,5%	3,3%	72,1%	71,0%	3,6%	66,8%	97,3%	83,9%	72,5%
	4	0,0%	0,2%	1,1%	0,0%	0,3%	18,4%	13,9%	0,8%	3,3%	97,3%	71,1%	38,9%

Com base nos resultados resumidos pelos valores apresentados em tais tabelas pode-se concluir que:

- a equação proposta por Gunaratne (2012) possui uma pequena amplitude de resultados, com a velocidade de ocorrência de aquaplanagem variando entre 75 e 100 km/h, resultando em grandes extensões sob risco de ocorrência deste fenômeno;
- nos trechos de transição de superelevação ocorre um aumento na espessura da lâmina de água e por consequência redução da velocidade de ocorrência de aquaplanagem;
- os resultados das equações de Gallaway (1979) são em geral mais conservadores do que os de Gengenbach (1967) para a extensão em que a velocidade de ocorrência de aquaplanagem se encontra abaixo de 100 km/h, contudo esta situação se inverte quando analisada a mínima velocidade necessária para ocorrência de tal fenômeno;
- devido à consideração de que nos trechos em túnel não há ocorrência de precipitações não é esperada ocorrência de aquaplanagem nestes;
- as extensões com velocidades de ocorrência de aquaplanagem inferiores a 95 km/h são consideravelmente menores que aquelas que resultam para velocidades inferiores a 100 km/h. Estas diferenças são mais evidentes para os Cenários 1 e 3 pelo fato de que em alguns trechos de declividade transversal constante a velocidade de ocorrência de aquaplanagem resulta em valor constante próximo a 97 km/h.

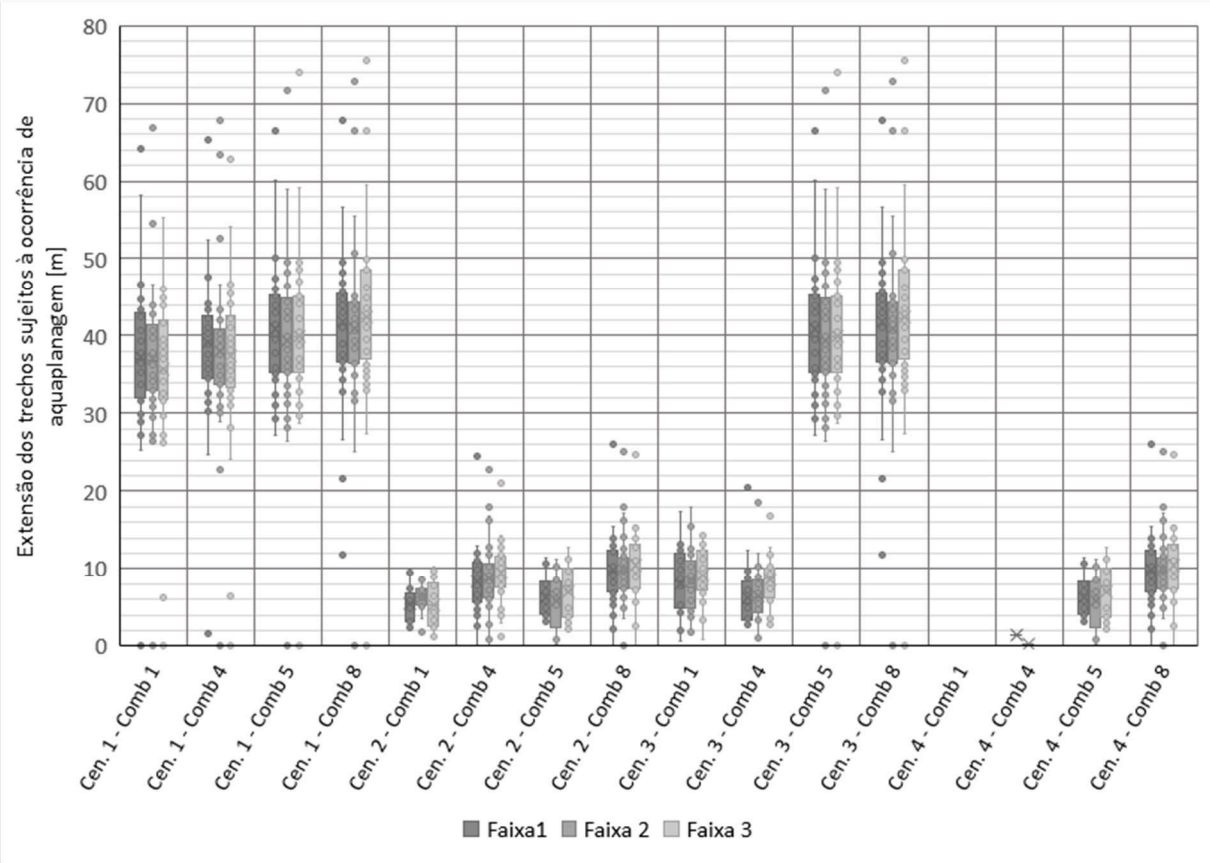
6.3.1. Considerações relacionadas aos resultados obtidos

Como não foi possível definir a relação entre a velocidade praticada e diferentes intensidades de chuva, deve-se observar que, embora os Cenários 1 e 3 resultem em maiores extensões sujeitas à ocorrência de aquaplanagem, pode-se esperar que as velocidades praticadas nestes cenários sejam inferiores às velocidades praticadas nos Cenários 2 e 4.

Em toda a extensão estudada, quando considerados o Cenário 4 e a Combinação 1, foi identificado apenas 1 local com velocidade de ocorrência de aquaplanagem inferior ao limite de velocidade sinalizado da rodovia. Tal local possui extensão de 0,29 m, insuficiente para se considerar que tal situação possa representar um problema de segurança. Contudo, quando considerado o Cenário 3 e mesma combinação, foram identificados 28 locais com possibilidade de ocorrência de aquaplanagem, todos localizados em trechos de transição de superelevação.

De modo geral, é possível afirmar que o fenômeno poderia ocorrer em diversos locais do traçado estudado, cabendo ressalvar, no entanto, que as extensões com velocidades de ocorrência de aquaplanagem inferiores ao limite de velocidade sinalizado são razoavelmente variados. Tal fato pode ser verificado na Figura 6-5, em que é apresentada a distribuição das extensões dos trechos sujeitos à ocorrência de aquaplanagem para velocidades inferiores a 95 km/h.. Esta análise visa desconsiderar uma distorção causada por alguns trechos de declividade transversal constante em que a velocidade de ocorrência de aquaplanagem resultou próxima de 97 km/h.

Figura 6-5 – Distribuição das extensões dos trechos sujeitos à ocorrência de aquaplanagem para velocidade operacional de 95 km/h



Considerando tal variação nas extensões sujeitas à ocorrência de aquaplanagem e a ausência de dados correlacionando estas extensões e a ocorrência de acidentes, não é possível concluir qual a extensão mínima sujeita ao risco de ocorrência de aquaplanagem a partir da qual exista um risco efetivo de segurança na rodovia.

Outra situação com possibilidade de ocorrência de problemas foi identificada na faixa 3, na Combinação 8 e Cenários 1 e 3, em que o risco se mostra presente em toda a extensão de tangentes horizontais da rodovia; contudo, a velocidade necessária para ocorrência de aquaplanagem nestes trechos está em torno de 97 km/h.

Verifica-se também a possibilidade de ocorrência, em menor extensão, nos trechos com faixas de aceleração/desaceleração, onde a maior largura da via influi no aumento da espessura da lâmina de água na faixa de cota mais baixa. Tal ocorrência é mais perigosa quando associada a curvas a esquerda, pois nestes casos a maior espessura de lâmina de água estará localizada na faixa de maior velocidade.

Embora a declividade longitudinal possa não exercer uma influência relevante na espessura da lâmina de água, esta variável apresenta uma relação com a extensão dos trechos sujeitos à aquaplanagem.

6.4. Avaliação de possíveis medidas de mitigação do risco de aquaplanagem para o traçado objeto do estudo

Considerando os pontos levantados anteriormente, nota-se uma forte relação entre a espessura da lâmina de água na pista e a declividade transversal.

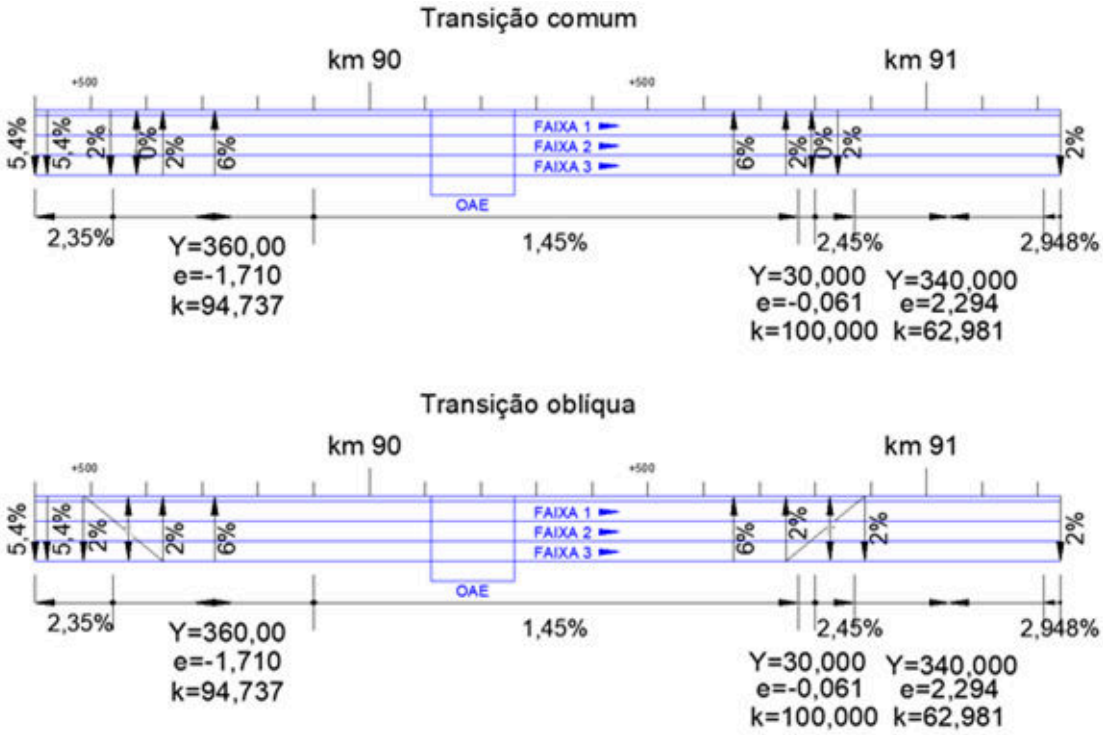
Portanto, dentre as possíveis soluções mencionadas no Capítulo 2, são comparadas apenas as que focam nesta característica geométrica, conforme apresentado a seguir.

6.4.1. Transição oblíqua da superelevação

Para verificação da eficiência desta solução foi realizada a análise comparativa em uma curva a esquerda, localizada nas proximidades do km 90+000 e considerando os seguintes aspectos:

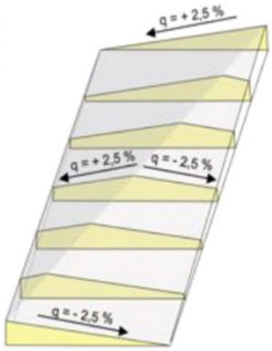
- mesmas premissas adotadas no estudo de caso inicial;
- as características geométricas dos dois casos considerados são apresentadas na Figura 6-6;

Figura 6-6 – Características geométricas da pista externa do Rodoanel Leste no km 90



- comprimento da transição oblíqua de 141,6 m, válido para velocidade de projeto de 120 km/h; tal comprimento foi adotado conforme esquema apresentado na Figura 6-7; a declividade transversal foi adotada em 2%;

Figura 6-7 - esquema de trecho com transição oblíqua

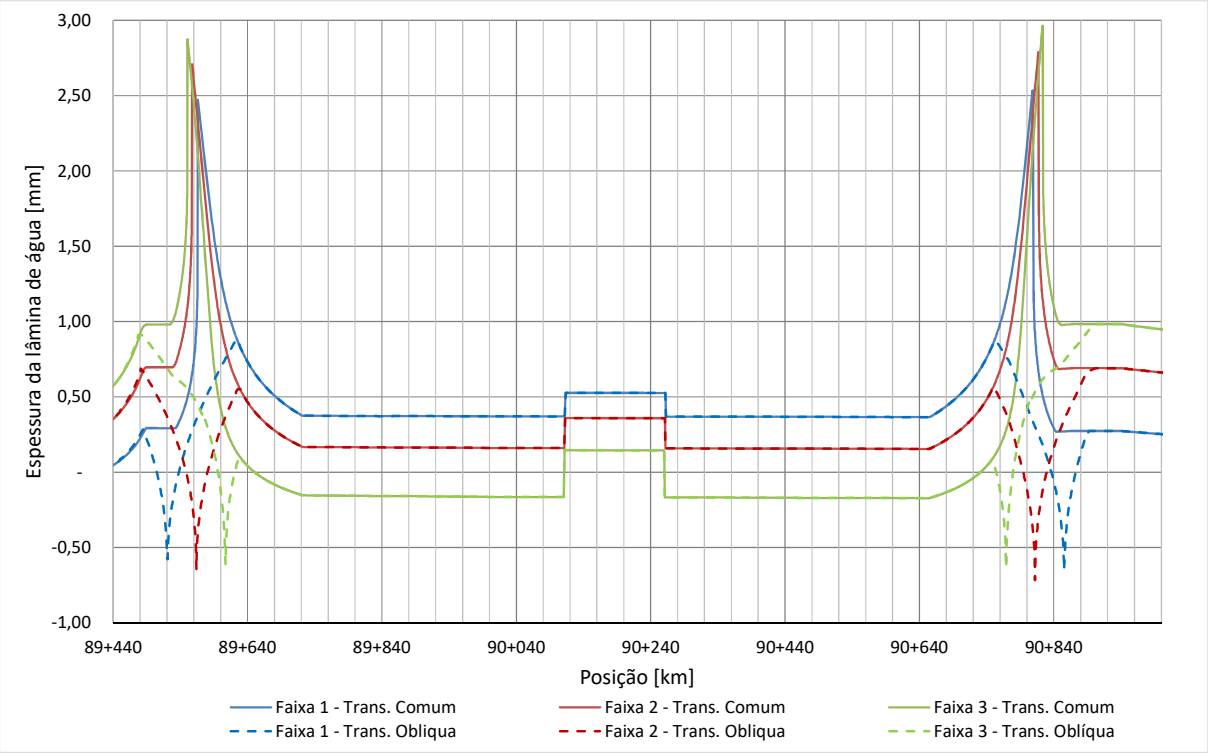


Fonte: (AOUN, APOSTOLERIS, *et al.*, 2017)

- o comprimento adicional de transição foi desenvolvido fora do trecho em curva.

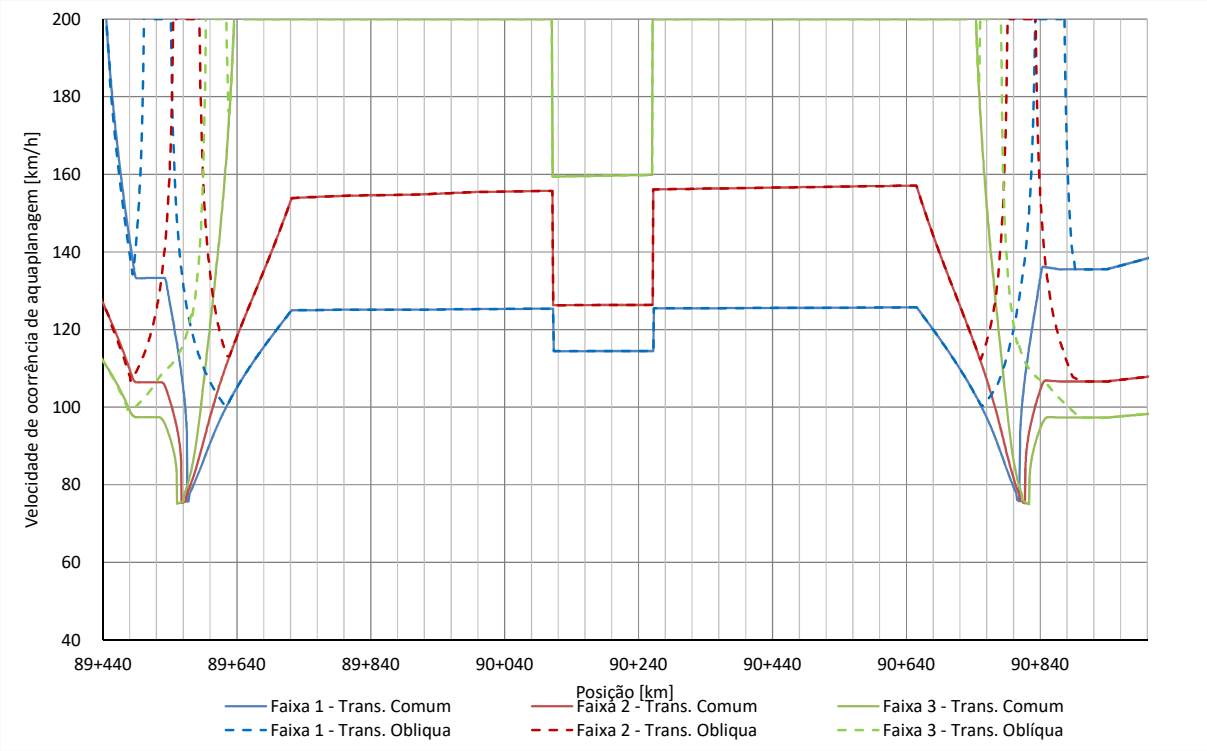
A Figura 6-8 apresenta as espessuras da lâmina de água de acordo com a equação de Herrmann para as 3 faixas de tráfego nos casos de transição da superelevação nos critérios usual e oblíquo.

Figura 6-8 – Comparação da espessura de lâmina de água nos casos de transição de superelevação comum e oblíqua utilizando o modelo de Herrmann



A Figura 6-9 apresenta a comparação entre as velocidades de ocorrência de aquaplanagem nos dois métodos de transição de superelevação, considerando a Combinação 8.

Figura 6-9 – Comparação da velocidade de ocorrência de aquaplanagem nos casos de transição de superelevação comum e oblíqua para a Combinação 8



A partir destes dados é possível perceber que as espessuras de lâmina de água críticas, nos pontos em que a superelevação se aproxima a 0%, são evitadas ao se aplicar este método de transição de superelevação, resultando em velocidades de ocorrência de aquaplanagem muito acima da velocidade limite sinalizada na rodovia.

No entanto, tal solução resulta em comprimentos de transição de superelevação maiores dos que os métodos de transição propostos pela AASHTO (2011), assim, sua adoção pode não ser possível sem alterações no traçado horizontal da rodovia.

6.4.2. Microfresagem

Para o estudo do impacto da utilização de microfresagem na aquaplanagem, foi considerado um incremento de 0,2 mm na macrotextura, nos pontos onde houvesse transição de superelevação para curvas à esquerda. Os resultados desta simulação estão apresentados na Tabela 6-6.

Tabela 6-6 – Resultados após a aplicação de microfresagem nos trechos com curva à esquerda

Cenário		Comb. 1	Comb. 2	Comb. 3	Comb. 4	Comb. 5	Comb. 6	Comb. 7	Comb. 8	Comb. 9	Comb. 10	Comb. 11	Comb. 12
Faixa 1	1	2,9%	46,1%	34,9%	4,7%	3,9%	74,6%	48,3%	6,1%	81,4%	97,3%	97,3%	92,9%
	2	0,2%	7,2%	3,5%	0,9%	0,4%	18,2%	5,2%	1,3%	5,8%	97,3%	77,8%	35,3%
	3	0,4%	2,8%	6,3%	0,8%	3,9%	74,6%	48,3%	6,1%	67,8%	97,3%	97,3%	85,3%
	4	0,0%	0,3%	1,0%	0,0%	0,4%	18,2%	5,2%	1,3%	4,2%	97,3%	64,0%	14,2%
Faixa 2	1	2,9%	93,4%	69,9%	3,8%	3,6%	97,3%	83,2%	4,9%	89,2%	97,3%	97,3%	97,3%
	2	0,2%	4,6%	3,0%	1,0%	0,3%	20,3%	4,2%	1,4%	28,0%	97,3%	89,0%	62,3%
	3	0,5%	2,5%	4,7%	0,8%	3,6%	97,3%	83,2%	4,9%	79,9%	97,3%	97,3%	93,8%
	4	0,0%	0,4%	1,0%	0,0%	0,3%	20,3%	4,2%	1,4%	13,0%	97,3%	85,3%	50,8%
Faixa 3	1	2,9%	72,7%	68,1%	3,9%	14,1%	79,6%	71,0%	40,3%	73,5%	97,3%	89,0%	80,5%
	2	0,2%	25,9%	15,7%	0,9%	0,4%	47,9%	34,0%	1,4%	43,5%	97,3%	73,2%	67,7%
	3	0,5%	4,5%	36,5%	0,8%	14,1%	79,6%	71,0%	40,3%	72,1%	97,3%	85,8%	78,8%
	4	0,0%	0,4%	1,0%	0,0%	0,4%	47,9%	34,0%	1,4%	35,1%	97,3%	71,6%	57,3%

O arquivo com os dados para análise detalhada está disponível no Apêndice C.

A partir dos resultados apresentados é possível notar que há uma redução na extensão dos locais onde pode ocorrer aquaplanagem, principalmente nas combinações que utilizam o modelo de espessura de lâmina de água de Gallaway e do PAVDRN. De maneira geral verifica-se que praticamente todos os locais sujeitos à ocorrência do fenômeno continuaram com o risco de tal fenômeno, porém sempre em uma extensão reduzida.

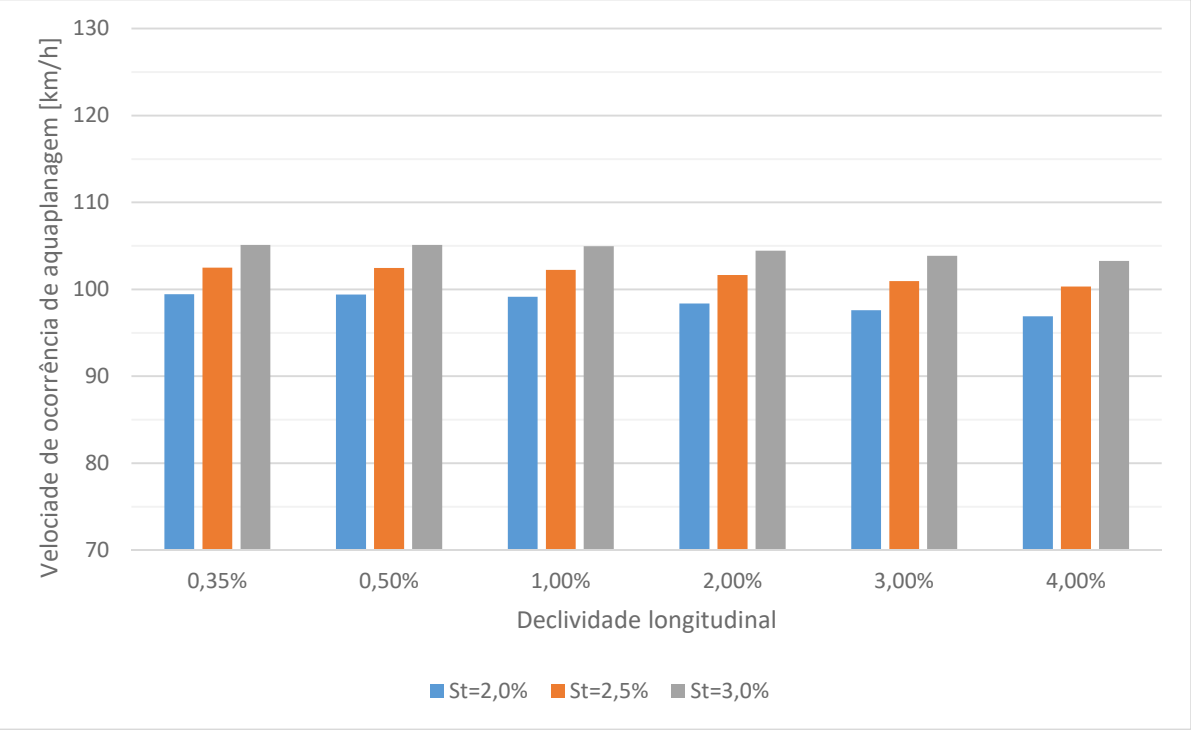
6.4.3. Mudança na superelevação básica em tangente

Esta última alternativa de mitigação do risco de aquaplanagem está relacionada ao problema de elevadas espessuras de lâmina de água na faixa de tráfego situada na cota mais baixa. Tal problema é evidenciado neste estudo de caso com o uso da Combinação 8.

Assim, ao aumentar a declividade básica utilizada nos trechos em tangente é possível reduzir a extensão da linha de fluxo ao mesmo tempo em que se aumenta sua declividade. Conforme apresentado no item 2.3.5 esta solução apresenta uma variação pequena na velocidade de ocorrência de aquaplanagem; contudo a adoção de uma declividade básica de 2,5% é suficiente para aumentar a velocidade de

ocorrência de aquaplanagem de aproximadamente 97 km/h para 100 km/h, como apresentado na Figura 6-10.

Figura 6-10 – Variação da velocidade de ocorrência de aquaplanagem no meio da faixa 3 para diferentes declividades transversais



7. Conclusões e recomendações

7.1. Conclusões

Os resultados obtidos indicam que o fenômeno da aquaplanagem pode ocorrer em determinadas extensões ao longo de uma rodovia de alto padrão. Contudo, a severidade de sua ocorrência depende fortemente das condições climáticas e da reação dos condutores diante de tais condições.

Por essa razão, no presente trabalho foi destacada a necessidade de complementação dos critérios de projeto de rodovias utilizados no Brasil para o estabelecimento do procedimento para verificação do risco deste fenômeno, de maneira que o mesmo possa ser reduzido. Também foi evidenciada a necessidade de se considerar as diferentes características regionais relacionadas às intensidades pluviométricas no estabelecimento dos critérios utilizados no procedimento.

Também foi possível avaliar que os modelos da NASA e de Gunaratne não são indicados para análise das condições com possibilidade de ocorrência de aquaplanagem em rodovias, por não permitirem a identificação de trechos críticos, assim como as equações do PAVDRN e do RRL, que se mostraram muito conservadoras na estimativa da espessura da lâmina de água.

Com base nas análises desenvolvidas destacaram-se os métodos propostos por Herrmann e por Gallaway na previsão da espessura de lâmina de água sobre o pavimento e os de Gengenbach e Gallaway na previsão da velocidade a partir da qual pode ocorrer a aquaplanagem. Com base nas mencionadas análises e resultados obtidos no estudo de caso, a utilização da combinação da equação de Herrmann para a espessura da lâmina de água com o modelo de Gallaway para a velocidade de ocorrência de aquaplanagem apresenta resultados mais conservadores, ainda que sem aparentar exageros. Assim, essa última combinação mostrou-se como a mais indicada para a análise de ocorrência de aquaplanagem em rodovias.

Os trechos mais críticos identificados nas avaliações desenvolvidas são as transições de superelevação, onde há inversão do sentido da declividade transversal. Em tais casos ficou evidenciada a necessidade de que, sempre que possível, sejam evitadas

taxas de transição muito suaves, sendo, porém, a solução de mitigação mais efetiva a adoção do critério de transição oblíqua da superelevação.

O procedimento proposto viabiliza a avaliação de um traçado rodoviário de modo prático e permite a identificação dos trechos favoráveis à ocorrência de aquaplanagem e as extensões destes. Apesar da influência esperada da extensão dos trechos sujeitos à ocorrência deste fenômeno na condição de segurança de rodovias, tal característica ainda é pouco considerada nestas análises. O procedimento auxilia também na avaliação e comparação do efeito de alternativas para mitigação do risco de ocorrência deste problema.

O levantamento de dados para estabelecer os valores das variáveis utilizadas nos modelos serve de base para avaliações futuras. Entretanto, ainda é necessária complementação de estudos nesta área, conforme indicado no a seguir no item 7.2.

7.2. Recomendações

Conforme descrito no decorrer deste trabalho, existem diversos pontos em que o aprofundamento de investigações se faz necessário para melhor avaliação do risco referente à aquaplanagem. Assim, seguem algumas recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Avaliação da relação de velocidade operacional ao longo da rodovia em diferentes condições de intensidades de chuva, de forma a ser considerada a influência da redução da velocidade no procedimento de verificação;
- Avaliação das intensidades de chuva para outras regiões do país e considerando séries históricas maiores, para melhor avaliação da probabilidade de ocorrência da aquaplanagem em rodovias de outros Estados;
- Levantamento das condições de manutenção dos pneus para o Estado de São Paulo, permitindo avaliar se os dados de conservação considerados neste trabalho são condizentes com as condições reais;
- Estudos que permitam correlacionar as extensões de locais com possibilidade de ocorrência de aquaplanagem com dados de acidentes em diferentes condições de precipitação de chuva, permitindo assim avaliar qual o

comprimento mínimo para que a ocorrência da aquaplanagem se converta em risco de acidente;

- Avaliação do efeito de sinalização estática e dinâmica no comportamento dos condutores durante a ocorrência de precipitações pluviométricas, inclusive quando conjugado com a implantação de sistemas ITS.

Referências

AGARWAL, M.; MAZE, T. H.; SOULEYRETTE, R. **Impact of weather on urban freeway traffic flow characteristics and facility capacity**. Ames, IA: Center for Transportation Research and Education, 2005.

AGRAWAL, S. K.; MEYER, W. E.; J.J., H. **Measurement of hydroplaning potential**. Pennsylvania Tranportation Institute, Pennsylvania State University, PA, USA, 1977.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **A policy on Geometric Design of Highways and Streets**. 6th Edition. ed. Washington, D.C., 2011.

AOUN, et al. Operational and Safety Performance Investigation of Skew Superelevation Runoff. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 2638, p. 35-44, 2017.

APS, M. **CLASSIFICAÇÃO DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO PELO ÍNDICE COMBINADO IFI – INTERNATIONAL FRICTION INDEX PARA REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006.

ARIAWAN, I. M. A.; SUBAGIO, B. S.; SETIADJI, B. H. **Development of asphalt pavement temperature model for tropical climate conditions in West Bali region**. The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), 2015. p. 474-480.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E303-93, Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester**. West Conshohocken, PA: American Society for Testing Materials, 2013.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E965-15, Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. West Conshohocken, PA: American Society for Testing Materials, 2015.

AUSTROADS. **Guide to Road Design Part 5A:** Drainage – Road Surface, Networks, Basins and Subsurface. 1ª. ed. Sydney, Australia: Austroads Ltd., 2013.

BIN YU, L. J. F. N. &. J. Y. Long-term field performance of porous asphalt pavement in China. **Road Materials and Pavement Design**, p. 214-226, 2014.

BLYTHE, W.; SEGUIN, D. E. Commentary: Legal Minimum Tread Depth for Passenger Car Tires in the U.S.A.—A Survey. **Traffic Injury Prevention** , Philadelphia, PA, v. 7, n. 2, p. 107-110, Jan 2007. ISSN http://dx.doi.org/10.1080/15389580500500640.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. DNIT (Publicação IPR 720). Rio de Janeiro. 2006.

BROWNE, A. L. A Mathematical Analysis for Pneumatic Tire Hydroplaning. **Surface Texture Versus Skidding: Measurements, Frictional Aspects and Safety Features of Tire-Pavement Interactions, ASTM STP 583**, p. 75-94, Julho 1975.

CEREZO, V. et al. Hydroplaning speed and infrastructure characteristics. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology** , v. 224, n. 9, p. 891–898., 2010.

CHABENEAU, R. J.; JEONG, J.; BARRET, M. E. **Highway drainage at superelevation transitions**. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin. Austin, Texas. 2008.

CHESTERTON, J.; NANCEKIVELL, N.; TUNNICLIFFE, N. **The Use of Gallaway Equation for Aquaplaning Evaluation in New Zealand**. NZIHT & Transit NZ 8th Annual Conference. Auckland. 2006.

CHIN, S. M. et al. **Temporary loss of highway capacity and impact on performance: phase 2**. Oak Ridge National Laboratoy, 2004.

CLEVELAND, T. G. et al. **New Rainfall Coefficients -- Including tools for estimation of intensity and hyetographs in Texas**. Lubbock, TX, 2015.

CONGRESSO NACIONAL. **Código de Trânsito Brasileiro**. Brasília, 1997.

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. on the approximation of the laws of the Member States relating to the tread depth of tyres of certain categories of motor vehicles and their trailers. **Official Journal of the European Communities**, Bruxelas, 18 jul. 1989.

CPRM. Atlas Pluviométrico do Brasil. **Serviço geológico do Brasil**, 2006. Disponivel em:<http://www.cprm.gov.br/publique/media/Isoietas_Totais_Anuais_1977_2006.pdf>. Acesso em: 20 Maio 2017.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **PRECIPITAÇÕES INTENSAS NA BACIA DO ALTO TIETÊ**. São Paulo, 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Notas técnicas de projeto geométrico - NT-DE-F00/001**. A. ed. São Paulo, 2006.

DEUTSCHER WETTERDIENST. **KOSTRA-DWD-2000**. Offenbach am Main, 2005.

DIETRICH, K.; ROTACH, M.; BOPPART, E. **Strassen-Projektierung**. 1ª. ed. Zürich: Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau IVT an der ETH Zürich, 1989.

FLORIDA DEPARTAMENT OF TRANSPORTATION. Drainage Manual. **Florida departament of Transportation**, 2015. Disponivel em: <http://www.fdot.gov/roadway/Drainage/Manualsandhandbooks.shtm>. Acesso em: 10 nov. 2016.

FRANÇA, A. Q. D. S. **A Comodidade e a Segurança como Critérios Condicionantes da Geometria de Traçado**. Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 1988.

GALLAWAY, B. M. et al. **Pavement and geometric design criteria for minimizing Hydroplanning, Report No. FHWARD-79-31**. Washington, DC, USA: Federal Highway Administration, 1979.

GENGENBACH, W. **Das Verhalten von Kraftfahrzeugreifen auf trockener und insbesondere auf nasser Fahrbahn**. Karlsruhe: Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Universität Karlsruhe, 1967.

GONÇALVEZ, L. S. **Relações Intensidade-Duração-Frequência com base em estimativas de precipitação por satélite**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

GOODYEAR AVIATION. **Aircraft Tire Care & Maintenance**. Akron, OH: The Goodyear Tire & Rubber Company, 2016.

GOTHIÉ, M. **Water influence on skid resistance - Standardization:** input of the HERMES programme. International Surface Friction Conference: roads and runways: improving safety through assessment and design. Christchurch, New Zealand . 2005. p. 50.

GOVERNMENT OF SOUTH AUSTRALIA. Information and services for South Australians. **Standards and modifications - Wheels and Tyres**, 2016. Disponivel em: <https://www.sa.gov.au/topics/driving-and-transport/vehicles/vehicle-standards-and-modifications/wheels-and-tyres>. Acesso em: 22 abr. 2017.

GUNARATNE, M. et al. **Hydroplaning on multi lane facilities, Report No. BDK84 977-14**. FHWA. University of South Florida, Tampa, FL, p. 130. 2012.

HABLAS, H. **A study of inclement weather impacts on freeway free-flow speed**. [S.l.]: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.

HARTZ, B. **Speed on German highways in heavy rain**. International Simposium of Highway Geometric Design. Valencia, Spain. 2010.

HERRMANN, S. R. **Simulationsmodell Zum Wasserabfluss- Und Aquaplaning-Verhalten Auf Fahrbahnoberflächen**. Stuttgart: Universität Stuttgart Institut für Straßen- und Verkehrswesen, 2008.

HÖCKER, H. J. **Die Oberflächenentwässerung von Fahrbahnen und ihre Bedeutung für den Straßenentwurf**. Aachen: Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, 1971.

HOLDENER, D. J. M. The effect of rainfall on freeway speeds. **Institute of Transportation Engineers Journal**, v. 68, n. 11, p. 16, Fevereiro 1998.

HORNE, W. B.; DREHER, R. C. **Phenomena of pneumatic tire hydroplaning**. Langley Research Center, Langley Station, Washington D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1963.

HORNE, W. B.; JOYNER, U. T. Pneumatic Tire Hydroplaning and Some Effects on Vehicle Performance. **SAE Technical Paper**, Fevereiro 1965. ISSN 10.4271/650145.

HORNE, W. B.; YAGER, T. J.; IVEY, D. L. Recent Studies to Investigate Effects of Tire Footprint Aspect Ratio on Dynamic Hidroplaning Speed. **The Tire Pavement Interface, ASTM STP 929**, Philadelphia, p. 22-46, 1986.

HORNE, W. B.; YAGER, T. J.; TAYLOR, G. R. **Review Of Causes And Alleviation Of Low Tire Traction On Wet Runways**. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1968.

HRANAC, R. et al. **Empirical studies on traffic flow in inclement weather, technical report**. FHWA. Washington, D.C. 2006.

HUEBNER, R. et al. PAVDRN computer model for predicting water film thickness and potential for hydroplaning on new and reconditioned pavements. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 1599, p. 128–131, 1997.

HUEBNER, R. S.; REED, J.; HENRY, J. Criteria for Predicting Hydroplaning Potential. **Journal of Transportation Engineering 112(5)**, p. 549-553, 1986.

IBRAHIM, A. T.; HALL, F. L. Effect of adverse weather conditions on speed-flow-occupancy relationships. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., p. 184-191, 1994.

IVEY, D. L.; LEHTIPUU, E. K.; BUTTON, J. W. **Rainfall and Visibility, The View from Behind the Wheel, Research Report 135-3**. College Station, Texas: Texas Transport Institute, 1975.

KYTE, M. et al. Effect of weather on free-flow speed. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 1776, p. 60-68, 2001.

LAMM, R.; PSARIANOS, B.; MAILANDER, T. **Highway design and traffic safety engineering handbook**. 1ª. ed. New York, NY: McGraw-Hill Handbooks, 1999.

LANTIERI, C. et al. Mobile Laser Scanning System for Assessment of the Rainwater Runoff and Drainage Conditions on Road Pavements. **International Journal of Pavement Research and Technology** , New Taipei City, v. 8, n. 1, p. 1-9, Jan 2015. ISSN DOI: 10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(1).1.

MAHMASSANI, H. S. et al. **Incorporating weather impacts in traffic estimation and prediction systems, Final report**. FHWA. Washington, D.C. 2009.

MOORE, D. F. Drainage Criteria for Runway Surface Roughness. **The Aeronautical Journal**, Cambridge, v. 69, n. 653, p. 337-342, Maio 1965. ISSN https://doi.org/10.1017/S0001924000059595.

NHCRP. **Improved surface drainage of pavements (Project 1-29 Final Report)**. Washington, D.C.: Transportation Review Board, 1998.

NIKURADSE, J. Strömungsgesetze in rauhen Rohren. **VDI-Forschungsheft**, v. 361, Julho/Agosto 1933.

OKANO, T.; KOISHI, M. **Hydroplaning Simulation using MSC.Dytran**. THE YOKOHAMA RUBBER CO., LTD. 2-1 Oiwake Hiratsuka Kanagawa 254-8601, Japan, p. 15. 2009.

ONG, G. P.; FWA, T. F. Analysis of effectiviness of longitudinal grooving against hidroplaning. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 1949, p. 113-125, 2006.

ONG, G. P.; FWA, T. F. Effectiviness of transverse and longitudinal pavement grooving in wet-skidding control. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 2005, p. 172-182, 2007.

ONG, G. P.; FWA, T. F. Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: modeling. **ASCE Journal of transportation Engineering**, v. 133, n. 10, 2007.

ONG, G. P.; FWA, T. F. Modeling and analysis of truck hydroplaning on highways. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 2068, p. 99-108, 2008.

RÄMÄ, P. **Effects of Weather-Controlled Variable Speed Limits and Warning Signs on Driver Behavior**. Espoo: Technical research centre of Finland, 2001.

ROSS, N. F.; RUSSAM, K. **The depth of rain water on road surfaces**. London: Ministry of Transport, 1968.

ROUX, C. **Analyse des précipitations en hydrologie urbaine. Exemple de la Seine-Saint-Denis**. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1996.

SALPICO, F. **Estudo de Segurança Rodoviária, O Perido Grave de Hidroplanagem nas Estradas Portuguesas – Formulação de Cálculo e Propostas para Resolução de Problemas**. OSEC – Observatório de segurança de Estradas e Cidades, p. 47. 2009.

SILVA, J. P. S. **Aderência Pneu-Pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários**. Brasília: Universidade de Brasília, 2008.

SOARES, A. F. D. S. **Análise Da Ocorrência De Hidroplanagem Num Caso Real**. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Nova de Lisboa, 2011.

SUBRAMANIAN, R.; THIRIEZ, K. **Tire Pressure Special Study Tread Depth Analysis**. National Center for Statistics and Analysis of the National Highway Traffic Safety Administration. Washington, D.C. 2001.

SUZUKI, C. Y. **Notas de Aula - PTR5748 DRENAGEM DE ESTRADAS E AEROPORTOS**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Transportes-POLI/USP, 2015.

THOMAS, F. THE TECHNOLOGY OF WORKING BEHIND THE RADAR SPEED SIGNS. **Photon Play**, 2016. Disponivel em: <http://www.photonplayinc.com/blog/the-technology-behind-working-behind-the-radar-speed-signs/>.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Highway capacity manual**. 6th. ed. Washington, D.C., 2016.

TREPADO, A. M. A. **Modelação do escoamento em pavimentos rodoviários**. Lisboa: Universidade Nova Lisboa, 2013.

VERDON-KIDD, D. C.; KIEM, A. S. Regime shifts in annual maximum rainfall across Australia - implications for intensity-frequency-duration (IDF) relationships. **Hydrology and Earth System Sciences** , Göttingen, n. 19, p. 4735-4746, Dezembro 2015. ISSN doi:10.5194/hess-19-4735-2015.

ANEXO A – Resposta da ARTESP à solicitação do projeto utilizado no estudo de caso

Henrique Foster de Oliveira <henrique.foster@usp.br>

SICSP - Solicitação de Informação

noreplysic@sp.gov.br <noreplysic@sp.gov.br> Wed, Mar 1, 2017 at 12:05 PM
To: henrique.foster@usp.br

Prezado(a) Sr(a) Henrique Foster de Oliveira,

A sua solicitação de acesso a documentos, dados e informações, de protocolo 33412171576, data 31/01/2017, FOI ATENDIDA.

Órgão/Entidade: Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo
SIC: Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo - ARTESP

Solicitação:
Gostaria de solicitar acesso aos projetos geométricos do trecho leste do Rodoanel apara utilização em pesquisa de mestrado.
apenas o trecho referente ao tronco da rodovia é necessário, não sendo necessitando das informações referentes as interseções e preferencialmente em formato .dwg ou .Dgn.

Resposta:

Prezado Sr. Henrique Foster de Oliveira

Em atenção à demanda SIC 33412171576, a Artesp (Agência de Transporte do Estado de São Paulo) esclarece que o projeto geométrico do trecho leste da SP021 em extensão *.dwg. está disponível para cópia na sede da Agência. Cabe informar que, devido ao tamanho total dos arquivos (1.60 GB), não é possível enviá-los via Sistema ou e-mail.

Assim, solicitamos que entre em contato com o SIC Artesp através do e-mail artesp@sic.sp.gov.br informando a data e horário em que poderá comparecer na sede da Agência (Rua Iguatemi, 105 – Itaim Bibi/São Paulo – SP) para copiar o projeto. Nosso horário de atendimento é de segunda à sexta-feira, exceto feriados, das 08:30 às 12:30 e das 13:30 às 17:30. Os dados ficarão disponíveis por 15 dias.

Atenciosamente,

SIC Artesp

Caso não fique satisfeito com a resposta ou com o serviço, recomendamos os procedimentos abaixo indicados:
1) NOVA SOLICITAÇÃO - Formule uma nova solicitação de informação ao SIC, esclarecendo melhor o solicitado. www.sic.sp.gov.br
2) CONTATE UMA OUVIDORIA - Formalize uma reclamação e/ou sugestão junto à Ouvidoria do órgão que prestou o atendimento. https://www.ouvidoria.sp.gov.br/Portal/PossoAjudar.aspx

3) Entre com um recurso: [Link]

O PRAZO para entrar com recurso é de 40 (quarenta) dias, a contar da data do protocolo da solicitação.

Atenciosamente,
SIC.SP
Governo do Estado de São Paulo

Apêndice A – Ábacos para verificação expedita de projetos

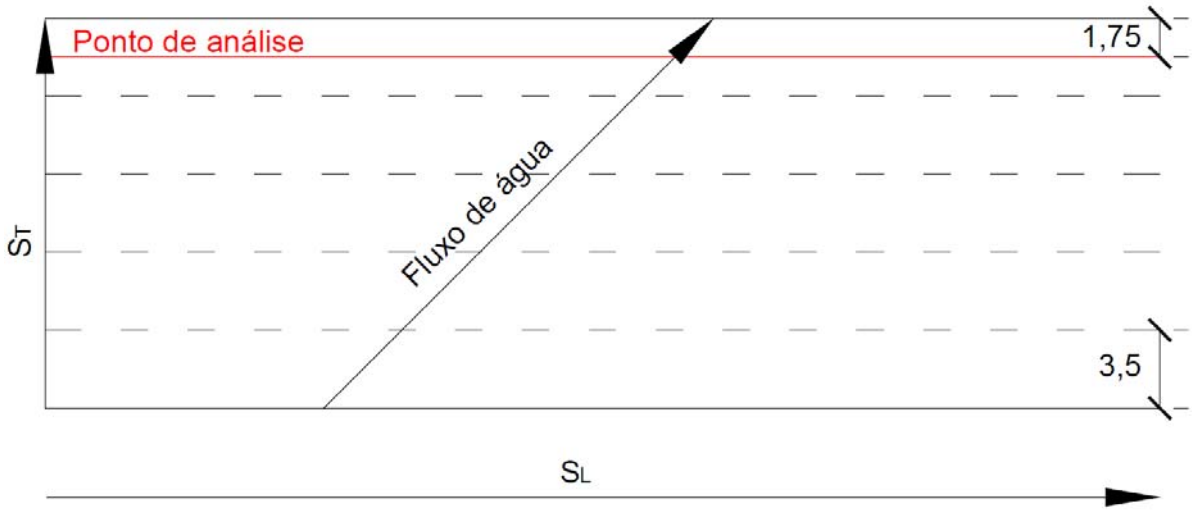
Neste apêndice são apresentados os ábacos para verificação expedita do projeto de rodovias de alto padrão e as premissas adotadas na elaboração destes.

1. Premissas

Os ábacos aqui apresentados se dividem e duas categorias básicas:

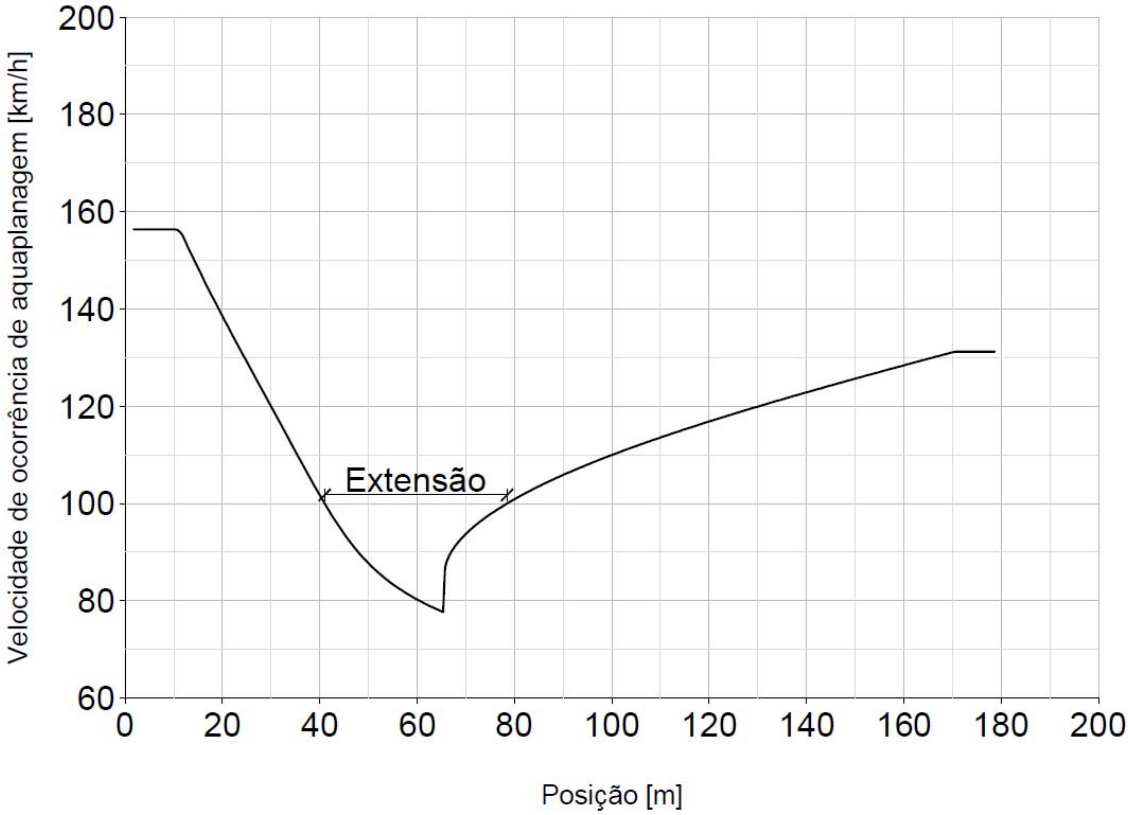
Para os trechos de declividade constante serão apresentadas tabelas com as velocidades a partir das quais ocorre a aquaplanagem para o meio da faixa de tráfego no lado mais baixo da pista. Uma vez que trechos de declividade constante aparecem em projetos por longas extensões, se faz necessária especial atenção a estes casos. A situação típica utilizada na elaboração destes ábacos é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Situação típica de declividade transversal constante



Nos casos de transição de superelevação o aumento da espessura da lâmina de água na pista é localizado, assim, faz-se necessário avaliar a extensão que estará sujeita à ocorrência da aquaplanagem. Para tanto, foram elaborados gráficos de velocidade de ocorrência de aquaplanagem x posição relativa ao início da transição e foram medidas as extensões em que a velocidade praticada resultava maior do que a velocidade necessária para ocorrência da aquaplanagem, como indicado na Figura 2.

Figura 2 - Gráfico de Velocidade de ocorrência de aquaplanagem x posição



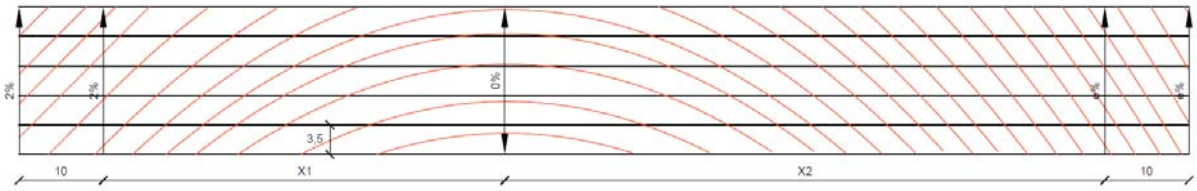
Para o comprimento de transição da superelevação, foram adotados os valores mínimos de acordo com os critérios apresentados Green Book da AASHTO (2011), apresentados na Tabela 1, sendo os ábacos são validos apenas para estes valores.

Tabela 1 - Comprimentos adotados para transição de 1% na superelevação

		Velocidade de projeto [km/h]	
		100	120
Nº de faixas	1	7,96 m	9,21 m
	2	11,93 m	13,82 m
	3	15,91 m	18,42 m
	4	19,89 m	23,03 m
	5	23,86 m	27,63 m

Na determinação do trecho para simulação foi adotada uma extensão de 10 m com declividades constantes nas extremidades para evitar distorções nos resultados apresentados. A situação típica é demonstrada na Figura 3.

Figura 3 - Situação típica de transição de superelevação



Na Figura 3 em vermelho estão representadas algumas das linhas de fluxo de água, os valores X1 e X2 variam de acordo com os valores apresentados na Tabela 1.

Para todos os casos, foram consideradas duas combinações de modelos, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Combinações de modelos utilizados

Nº da combinação	Modelo de previsão da velocidade de ocorrência da aquaplanagem	Modelo de previsão da espessura de lâmina de
1	Gengenbach	Gallaway
2	Gallaway	Herrmann

O número de combinações foi reduzido para simplificar o processo de decisão, assim optou-se, dentre os modelos considerados mais indicados para avaliação de projetos, pelas combinações que representassem os valores máximo e mínimo, assim como optou-se por omitir a variação da superelevação máxima pela semelhança dos resultados. Os valores de velocidade resultantes foram limitados ao valor máximo de 200 km/h.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos valores considerados para cada variável de acordo com as premissas apresentadas anteriormente.

Tabela 3 - Valores adotados para elaboração dos ábacos

Variável	Valor	Descrição	Unidade
	3,5	Largura da faixa de tráfego	
TMP	0,6	Altura média da macrotextura do pavimento	mm
I	10 / 30	Intensidade pluviométrica	mm/h
P_P	165 / 210	Pressão do pneu	kPa
SD	10	Redução relativa da rotação da roda no início da aquaplanagem	%
S_P	1,6 / 5,5	Profundidade de sulco da banda de rodagem	mm
P_C	2,5	Carga por roda	kN
P_L	175	Largura da área de contato do Pneu	mm

2. Ábacos para trechos de declividade longitudinal constante

Velocidade de ocorrência de aquaplanagem - S_T=2%					
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	129	129	128	128	128
3	106	106	106	105	105
4	94	94	94	94	93
5	86	86	86	86	86
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	122	121	120	119	118
2	106	105	104	103	103
3	98	98	97	97	96
4	94	94	93	92	92
5	91	91	90	89	89
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	188	185	179	174	169
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200

Velocidade de ocorrência de aquaplanagem - S_T=2,5%					
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	147	146	146	146	145
3	117	117	117	116	116
4	103	103	103	102	102
5	94	94	94	93	93
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	128	127	126	125	124
2	109	109	108	107	107
3	101	101	101	100	99
4	97	97	96	95	95
5	93	93	93	92	92
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	197
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200

Velocidade de ocorrência de aquaplanagem - S_T=3%					
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	166	166	166	165	165
3	128	128	127	127	127
4	111	111	111	111	111
5	101	101	101	100	100
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	133	132	131	130	129
2	112	112	112	111	110
3	104	104	103	103	102
4	99	99	99	98	97
5	96	95	95	95	94
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200

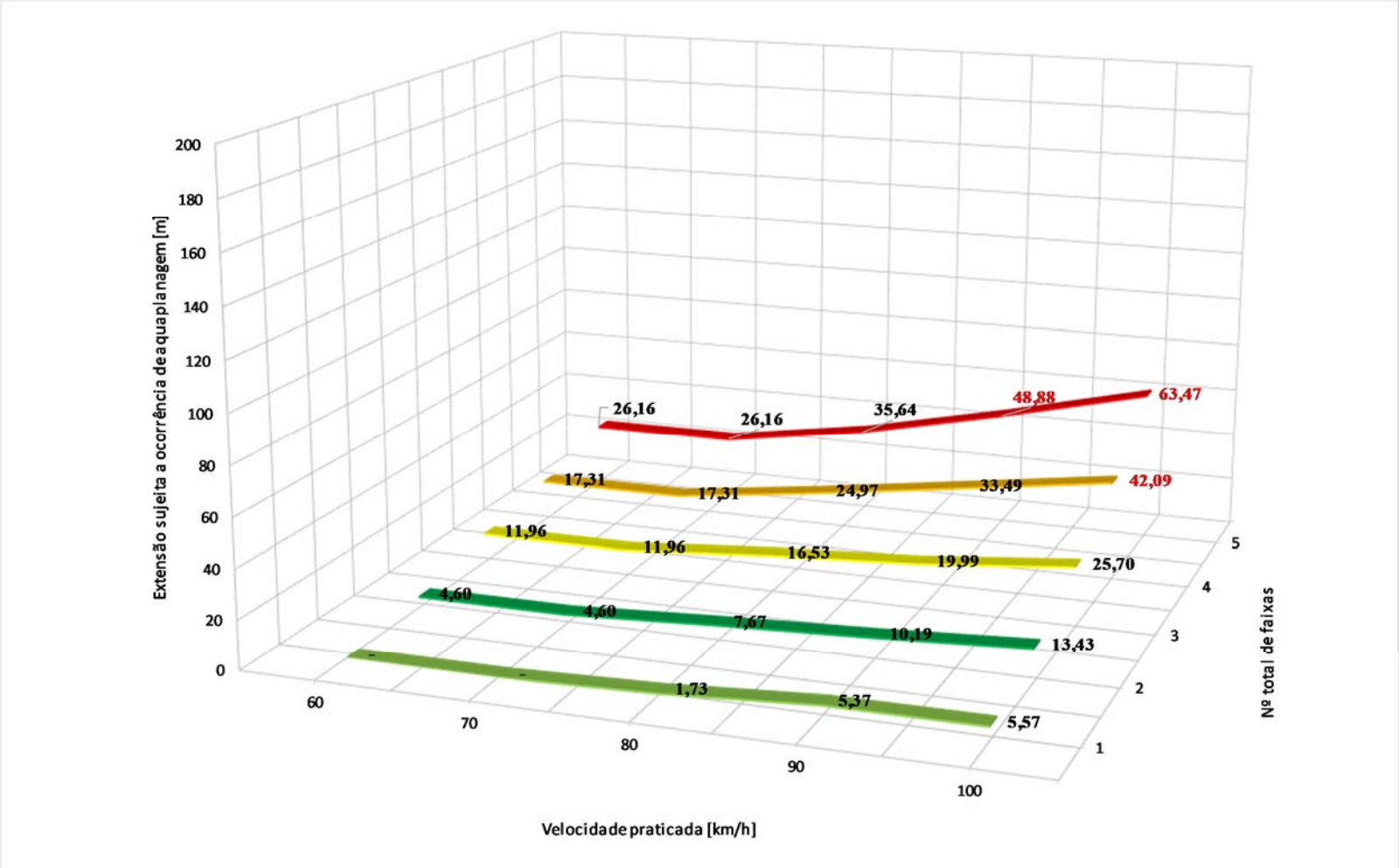
Velocidade de ocorrência de aquaplanagem - S_T=4%					
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	152	152	152	151	151
4	128	128	128	127	127
5	114	114	114	114	114
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	143	143	142	141	140
2	118	118	118	117	116
3	109	109	108	108	107
4	103	103	103	102	102
5	99	99	99	99	98
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200

Velocidade de ocorrência de aquaplanagem - S_T=6%					
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	164	164	164	164	164
5	141	141	141	141	141
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	164	163	163	162	161
2	128	128	127	127	127
3	116	116	116	116	115
4	109	109	109	109	109
5	105	105	105	105	104
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200

Velocidade de ocorrência de aquaplanagem - S_T=8%					
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	172	172	171	171	171
Nº de faixas	Combinação 1 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário A				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	190	190	189	188	186
2	136	136	136	136	136
3	122	122	122	122	122
4	115	115	114	114	114
5	110	110	109	109	109
Nº de faixas	Combinação 2 - Cenário B				
	S_L=0,5%	S_L =1%	S_L =2%	S_L =3%	S_L =4%
1	200	200	200	200	200
2	200	200	200	200	200
3	200	200	200	200	200
4	200	200	200	200	200
5	200	200	200	200	200

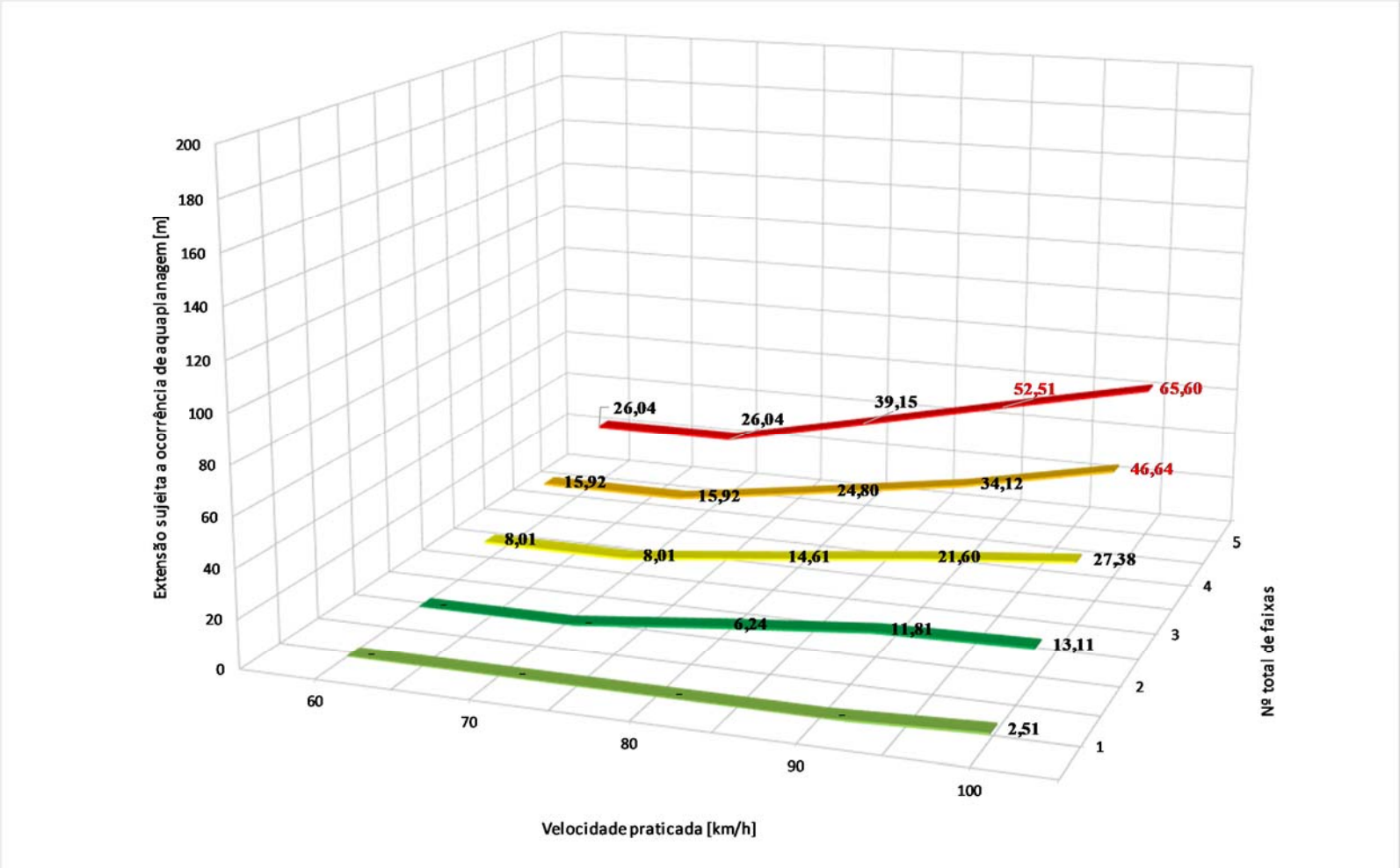
3. Ábacos para trechos de transição de superelevação

Figura 4 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=100 km/h; S_L=0,5% combinação 1, cenário A



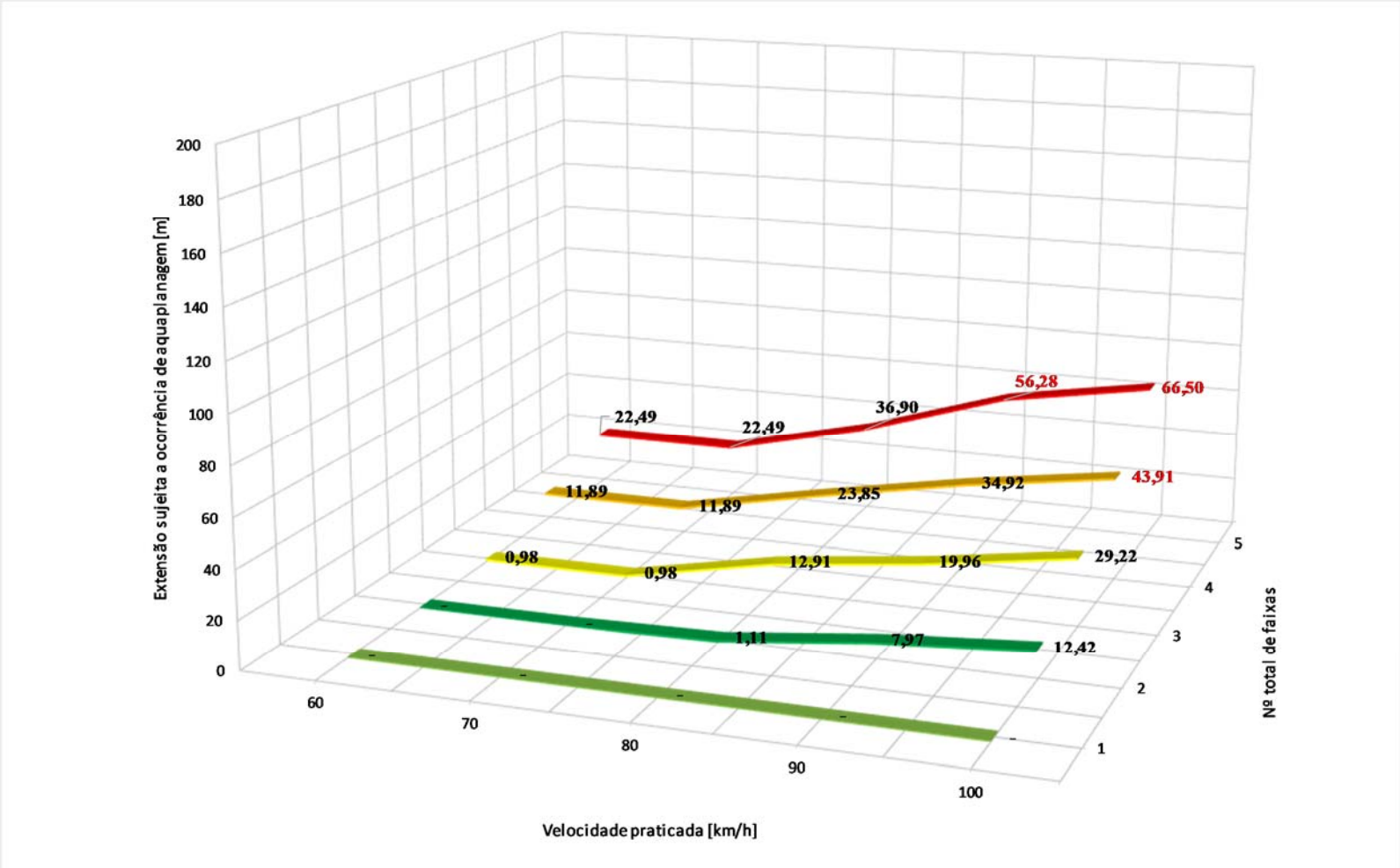
Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 5 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=100 km/h; S_L=2% combinação 1, cenário A



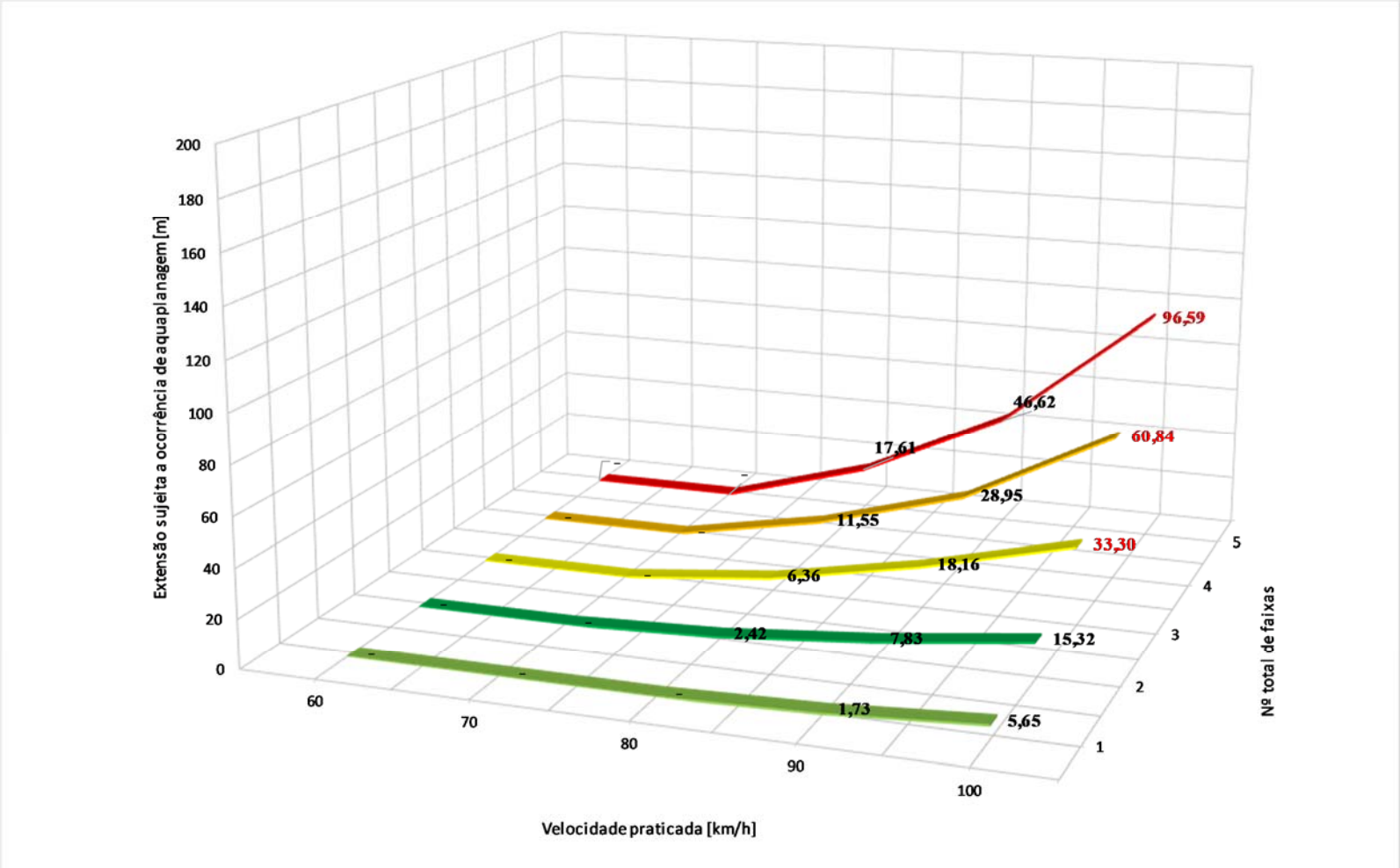
Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 6 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=100 km/h; S_L=4% combinação 1, cenário A



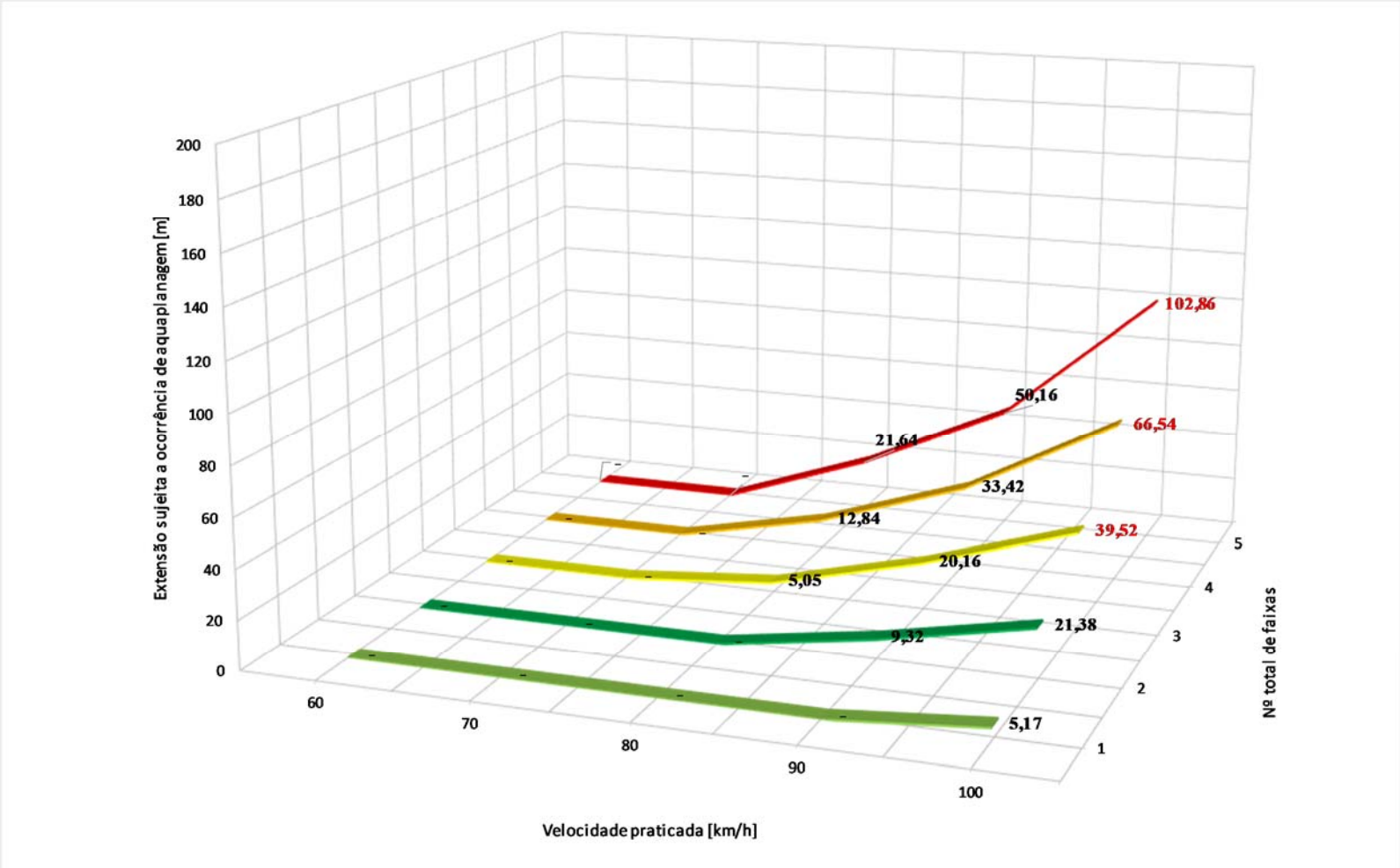
Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 7 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=100 km/h; S_L=0,5% combinação 2, cenário A



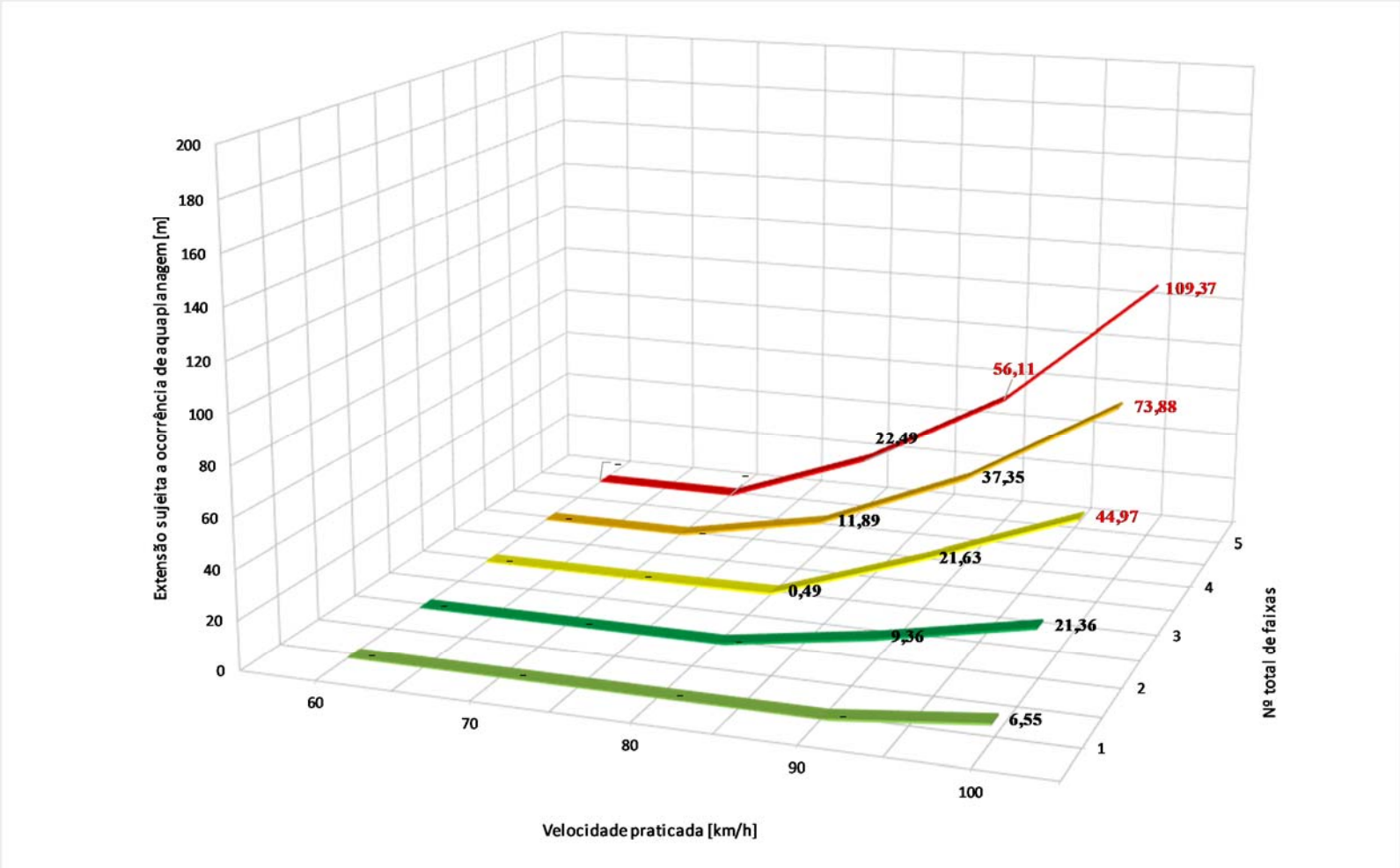
Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 8 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=100 km/h; S_L=2% combinação 2, cenário A



Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 9 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=100 km/h; S_L=4% combinação 2, cenário A



Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 10 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=100 km/h; S_L=0,5%, 2% ou 4%, combinação 1, cenário B

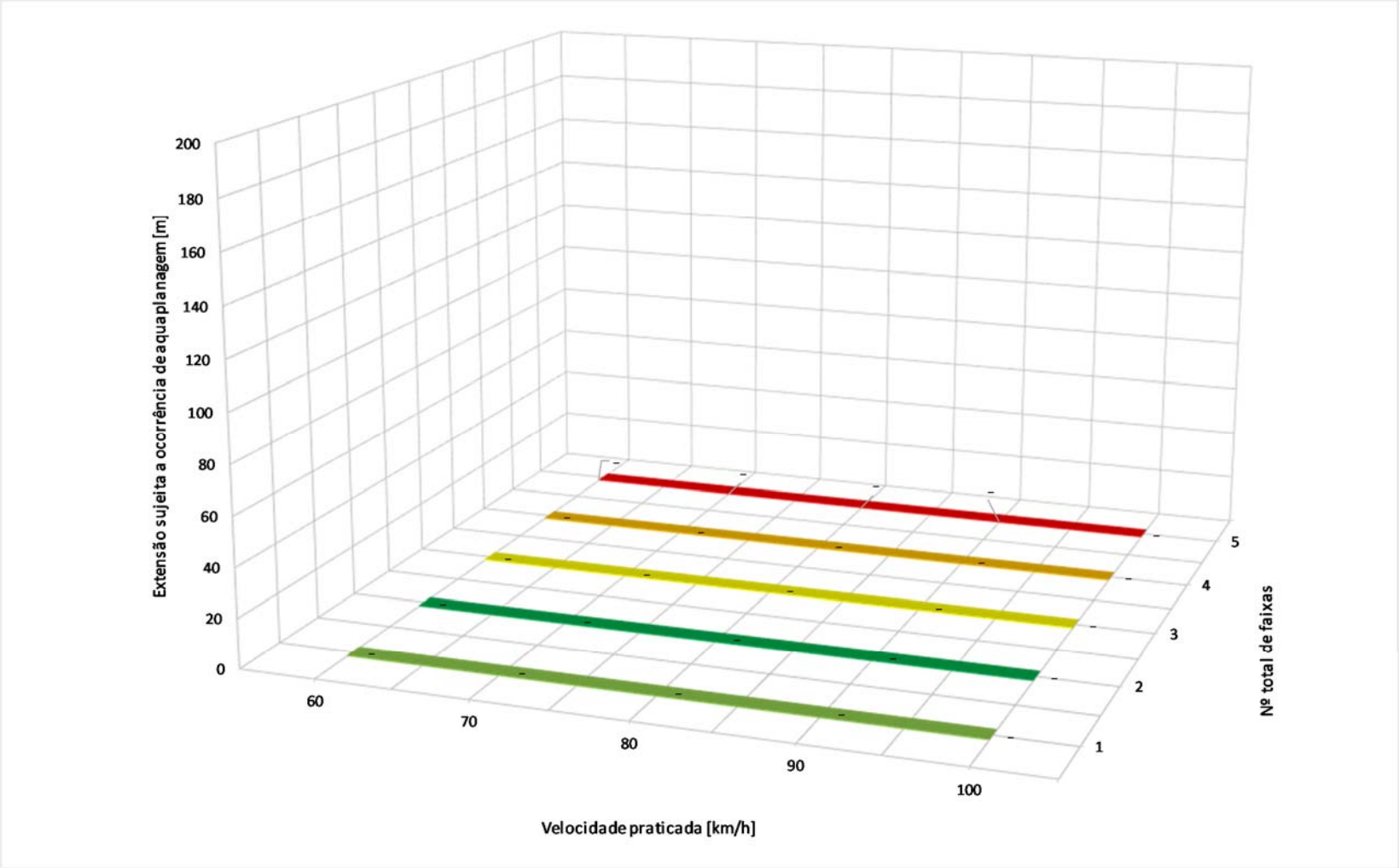


Figura 11 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=100 km/h; S_L=0,5% combinação 2, cenário B

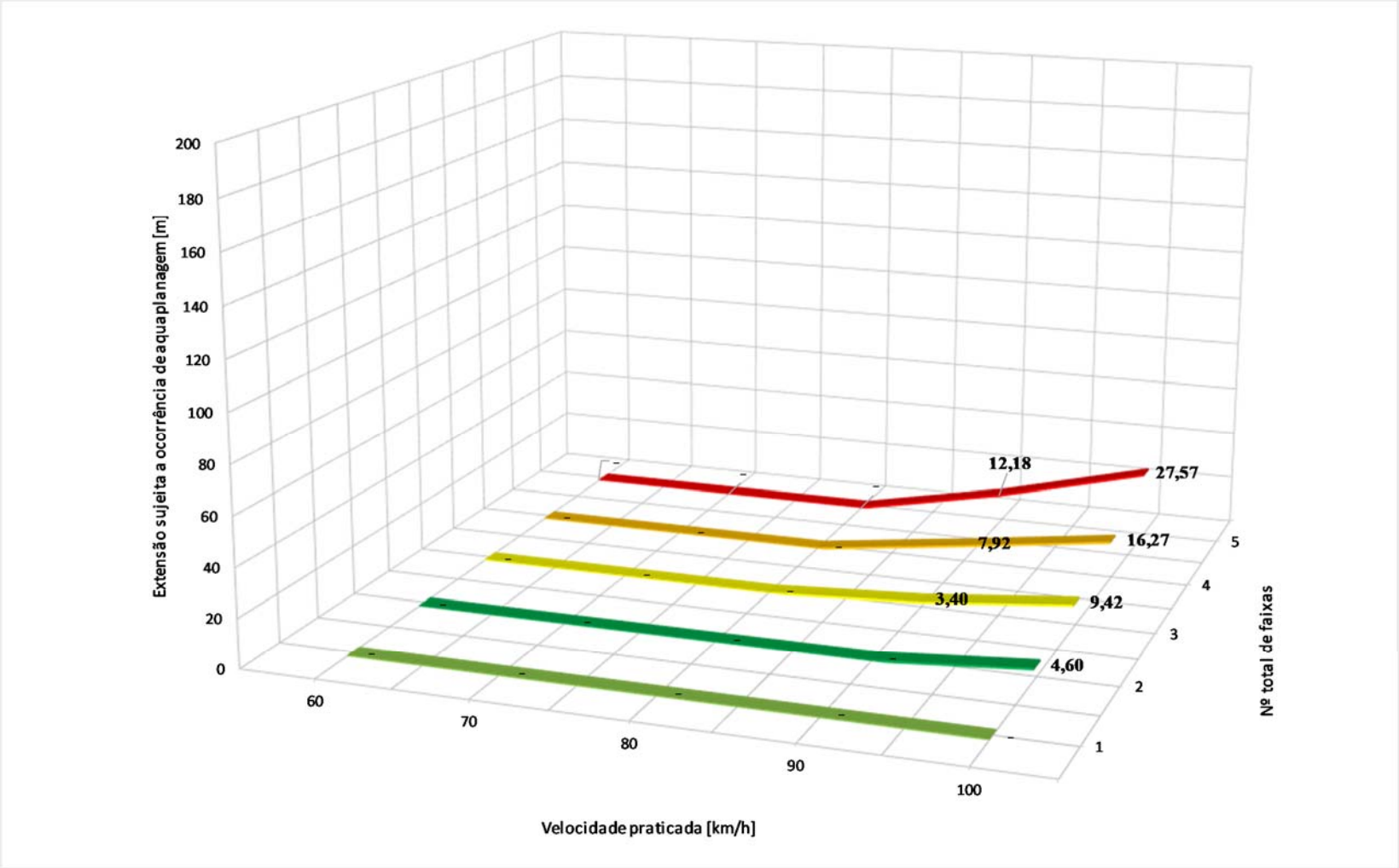


Figura 12 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=100 km/h; S_L=2% combinação 2, cenário B

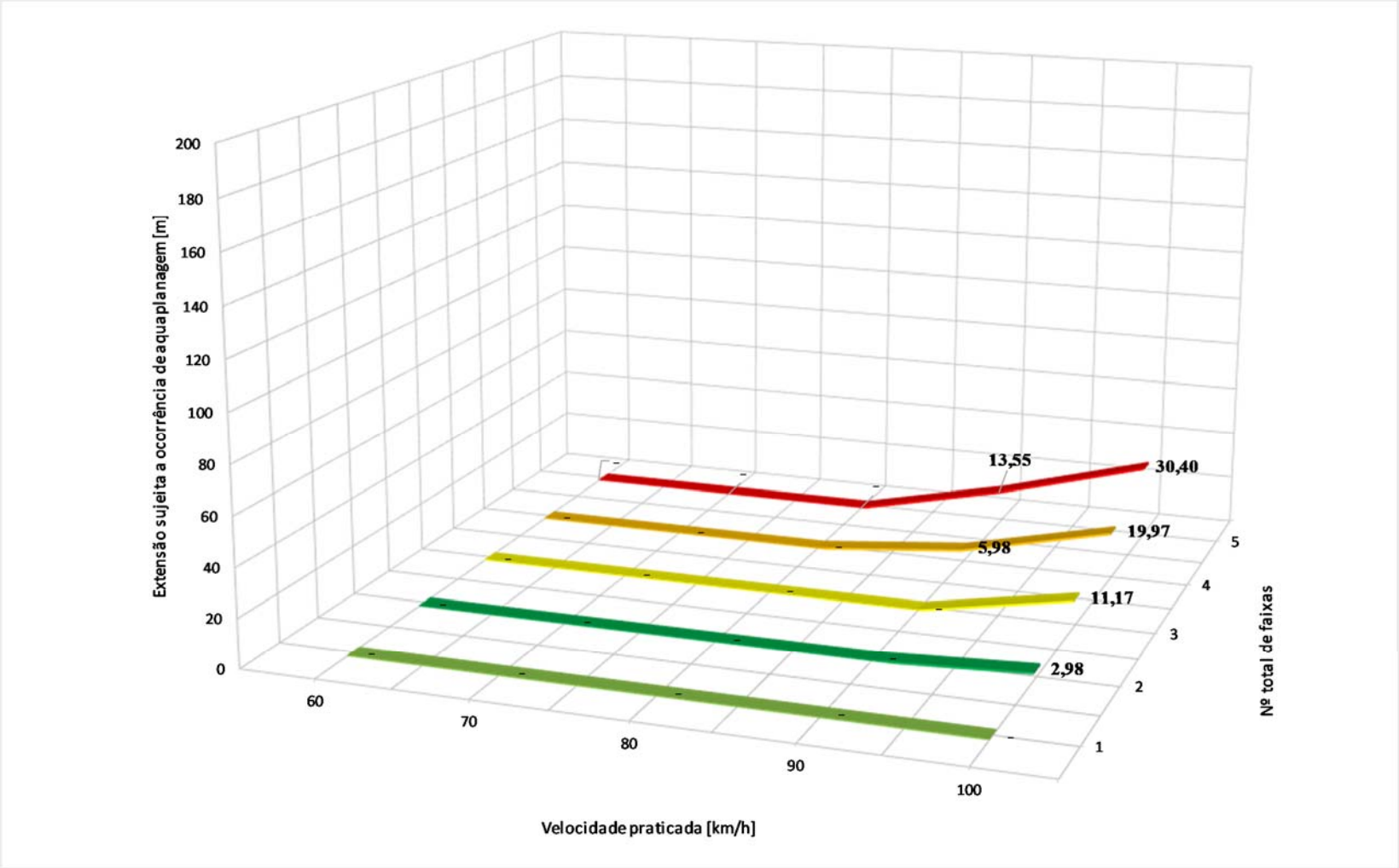


Figura 13 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=100 km/h; S_L=4% combinação 2, cenário B

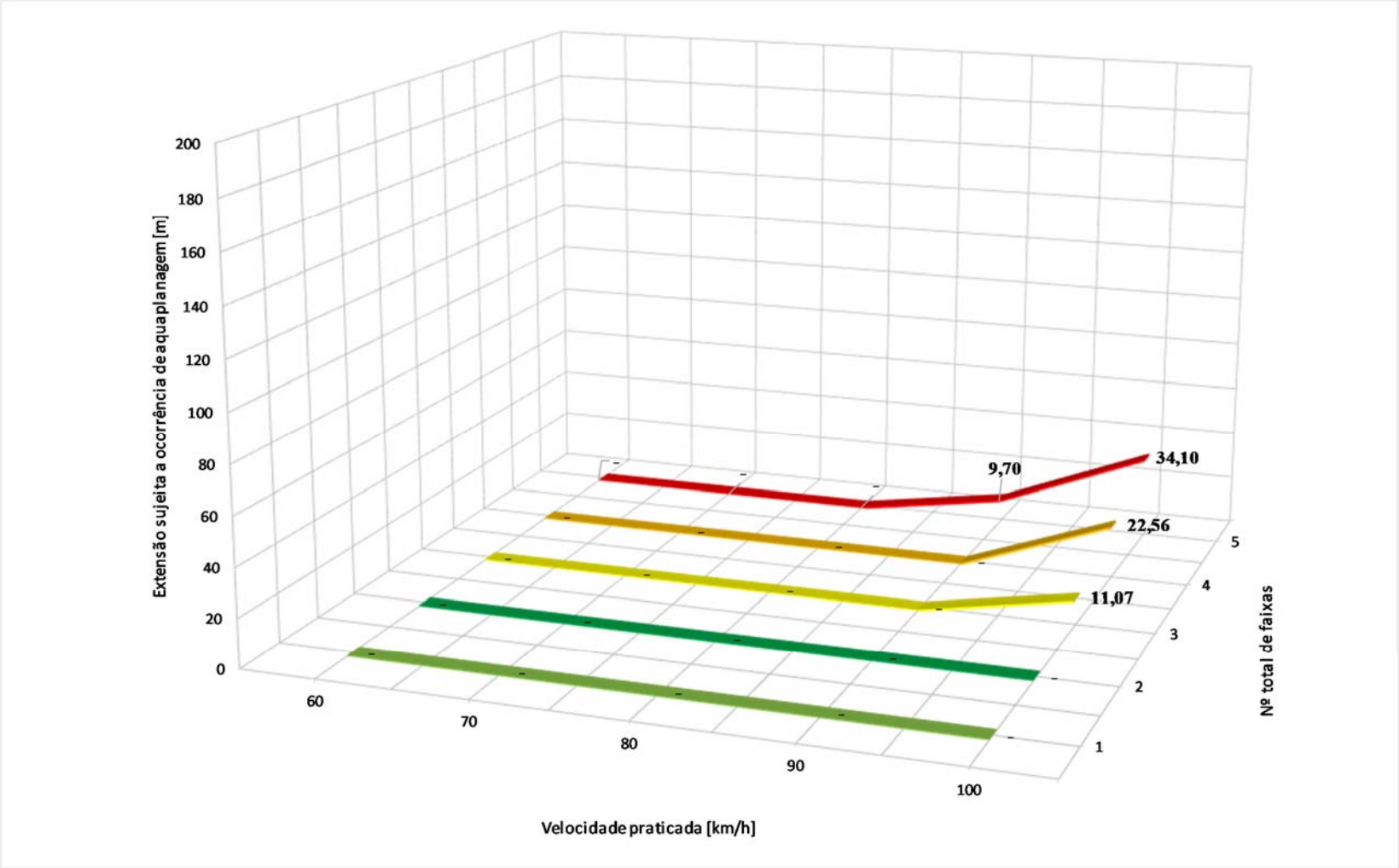
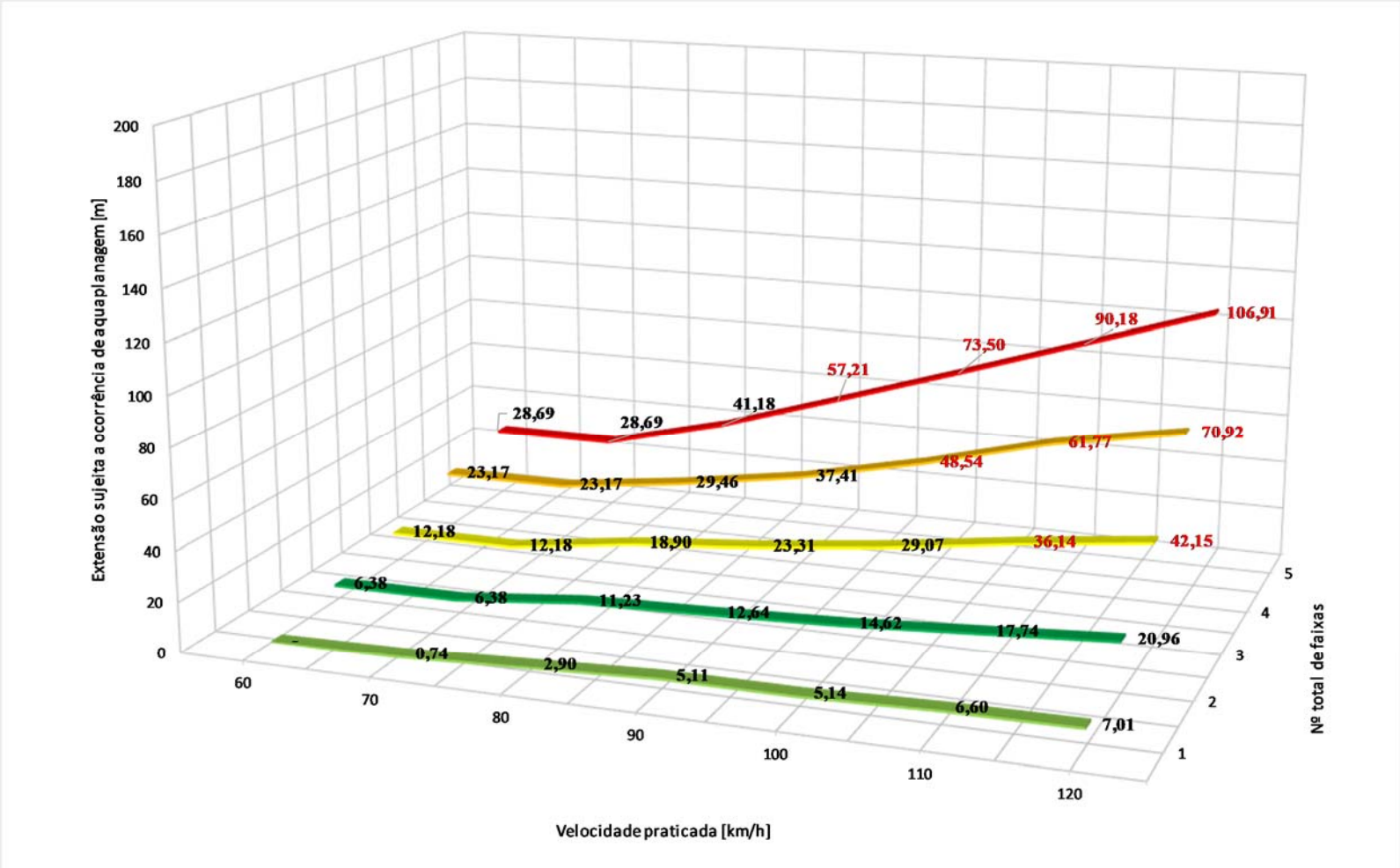
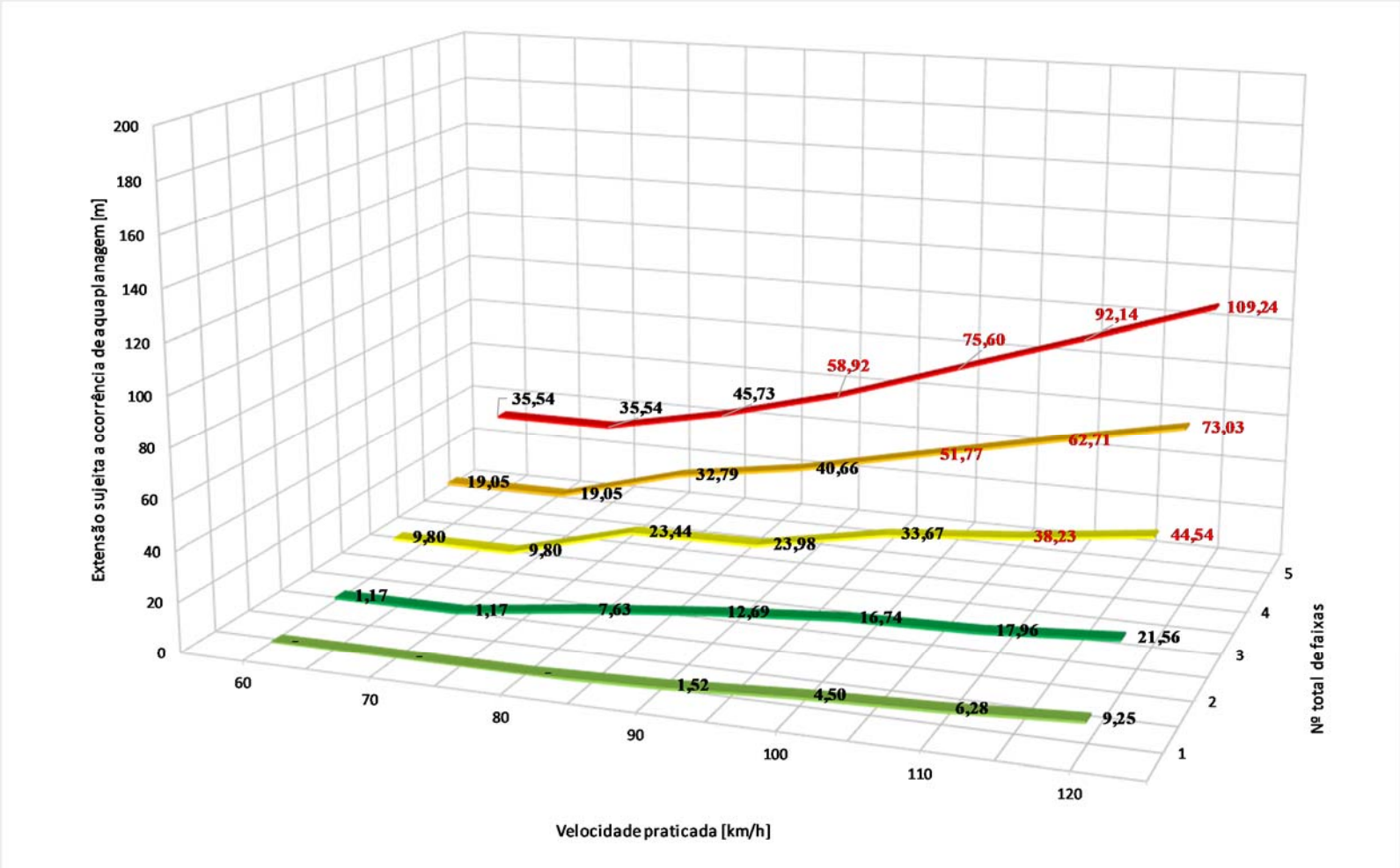


Figura 14 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=120 km/h; S_L=0,5% combinação 1, cenário A



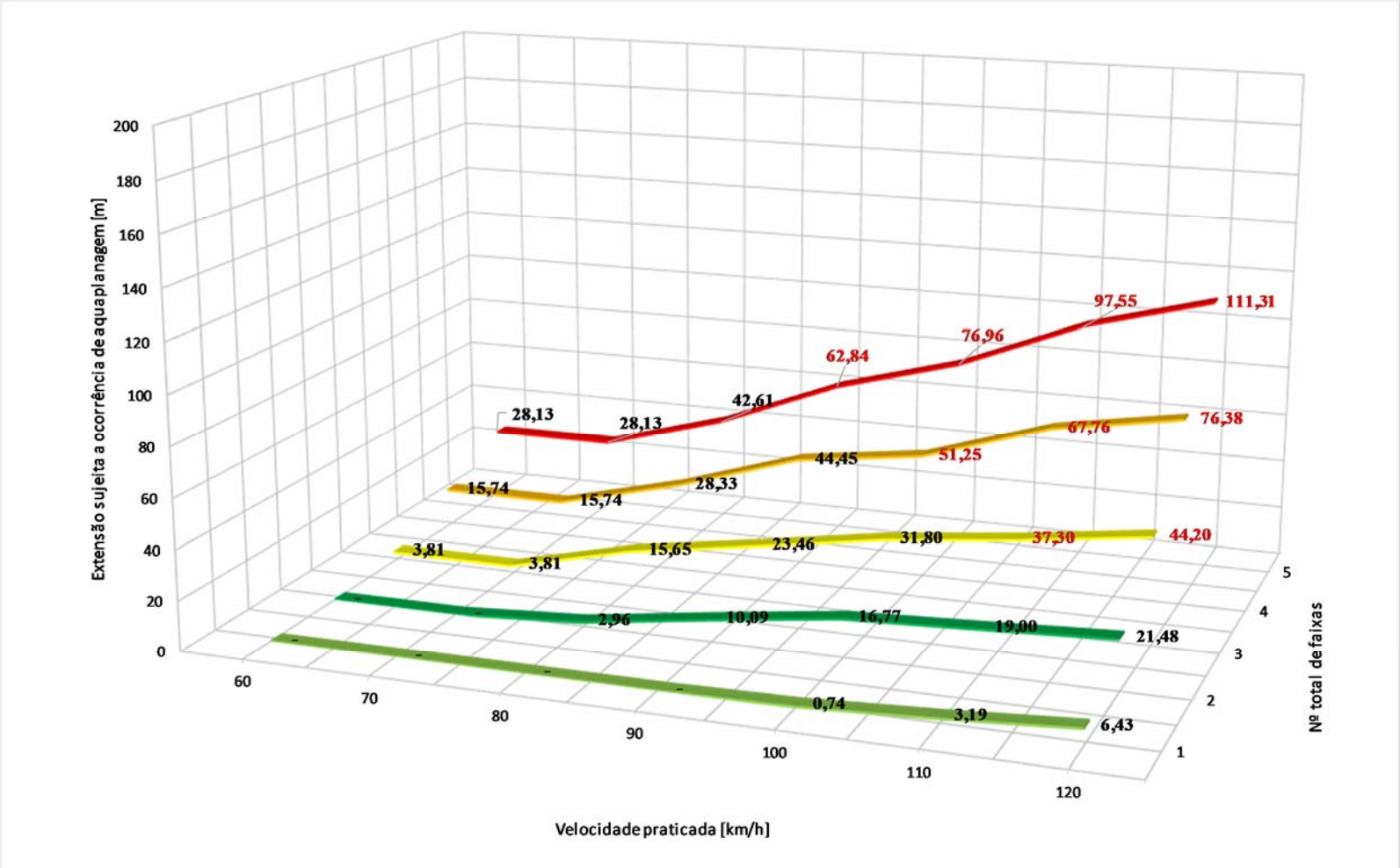
Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 15 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=120 km/h; S_L=2% combinação 1, cenário A



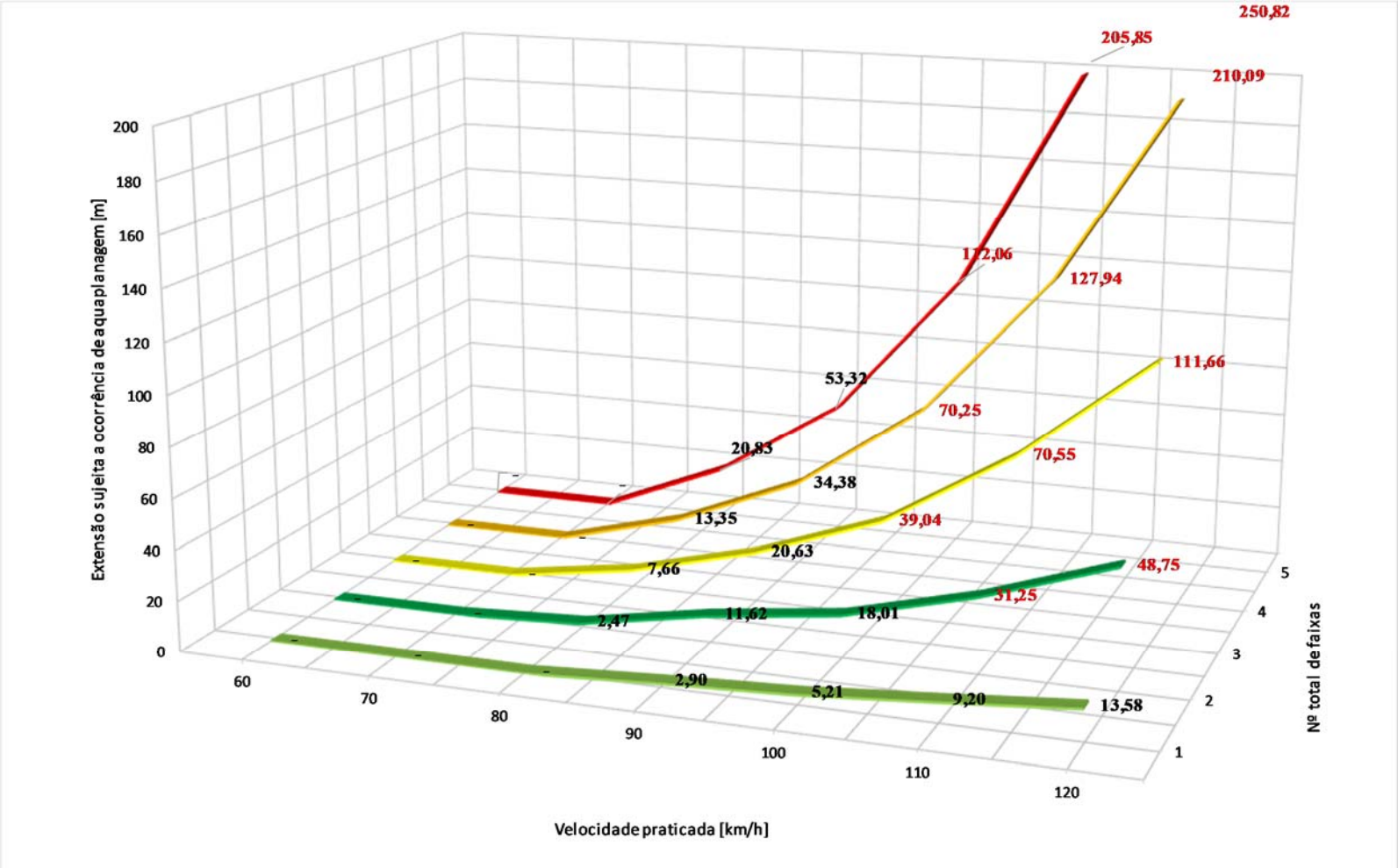
Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 16 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=120 km/h; S_L=4% combinação 1, cenário A



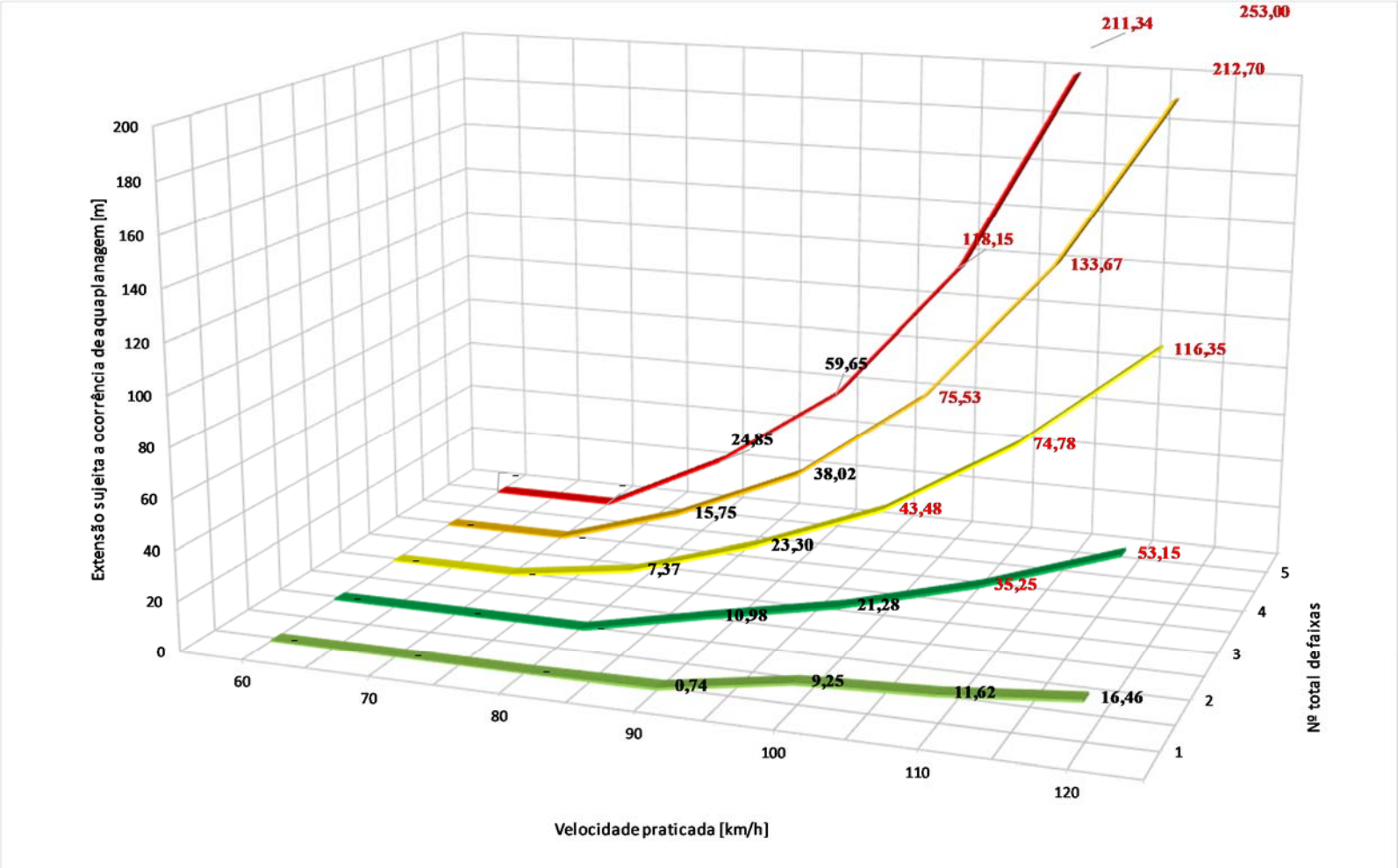
Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 17 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=120 km/h; S_L=0,5% combinação 2, cenário A



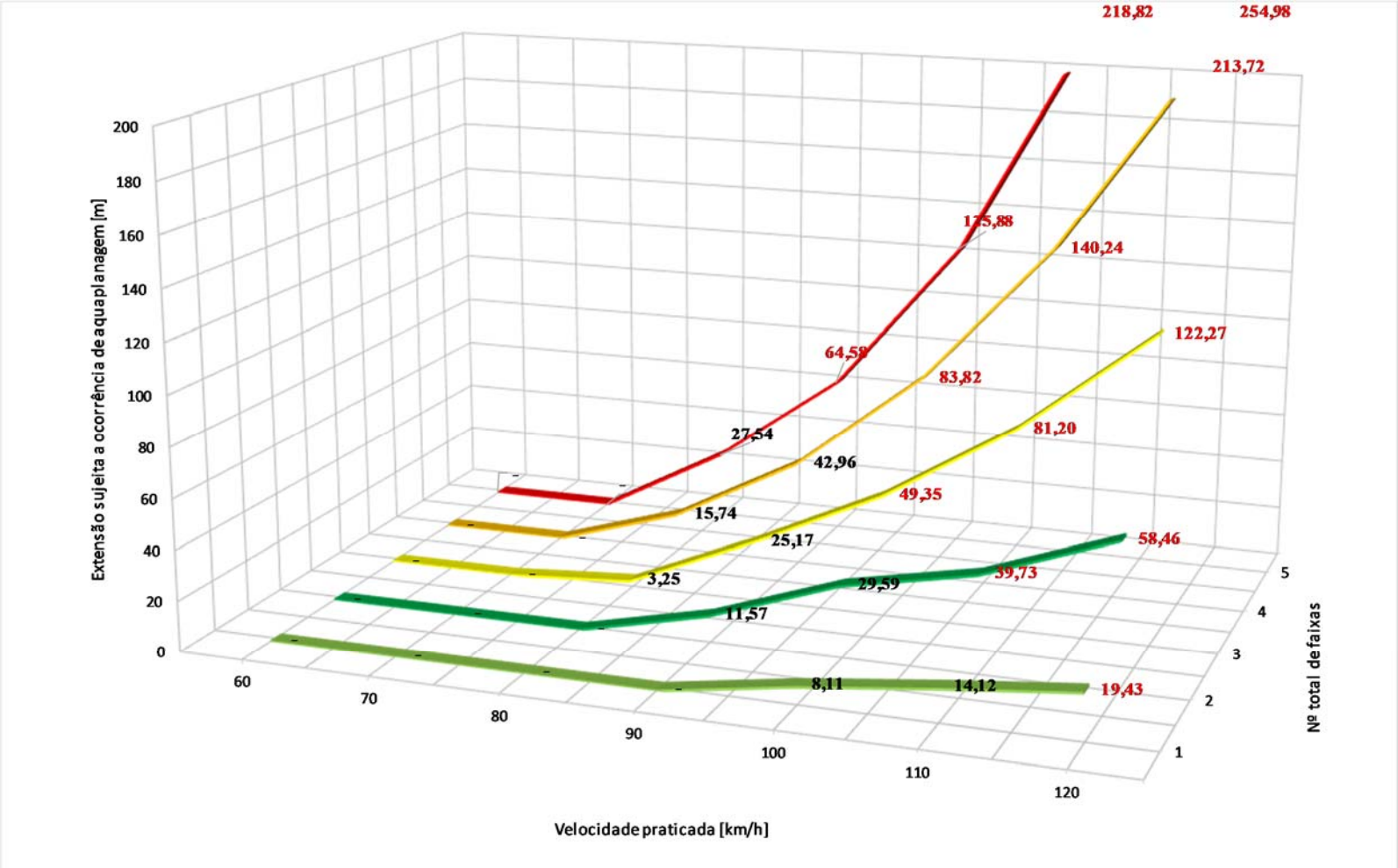
Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 18 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=120 km/h; S_L=2% combinação 2, cenário A



Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 19 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=120 km/h; S_L=4% combinação 2, cenário A



Os locais com extensão apresentada em cor vermelha indicam condições em que a ocorrência de aquaplanagem é esperada no em trechos de declividade transversal constante. Portanto exigem avaliação especial.

Figura 20 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=120 km/h; S_L=0,5%, 2% ou 4%, combinação 1, cenário B

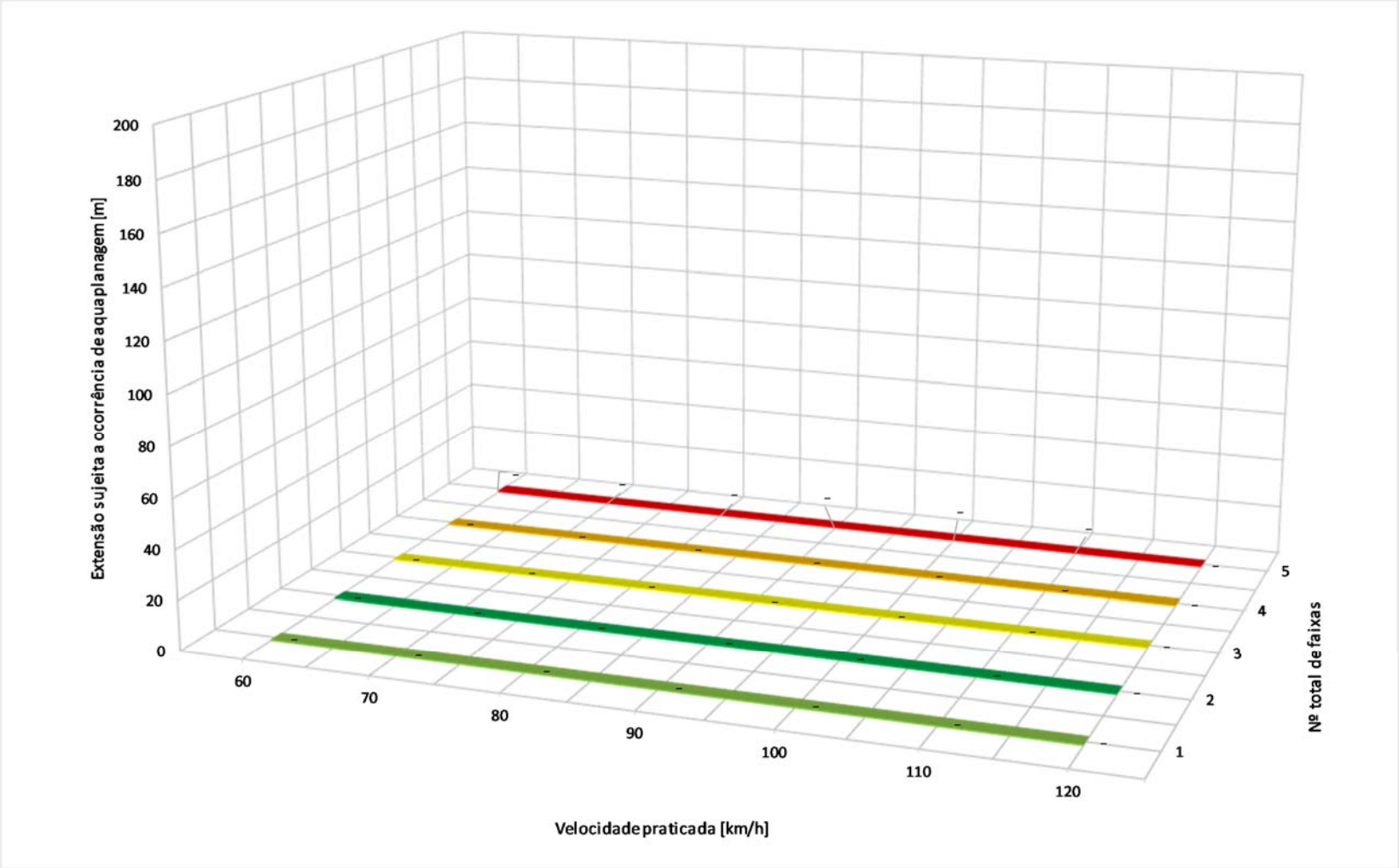


Figura 21 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=120 km/h; S_L=0,5% combinação 2, cenário B

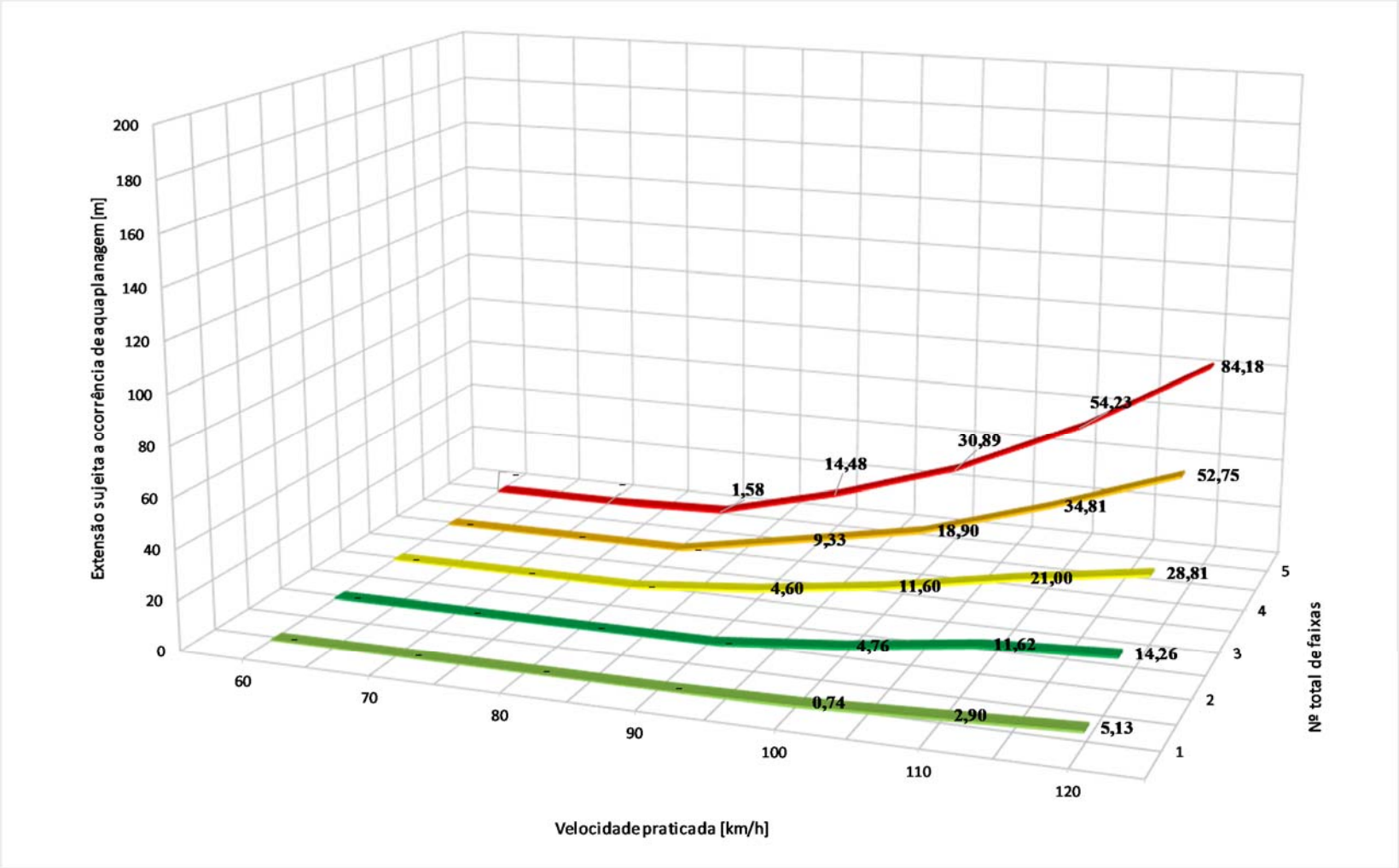


Figura 22 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=120 km/h; S_L=2% combinação 2, cenário B

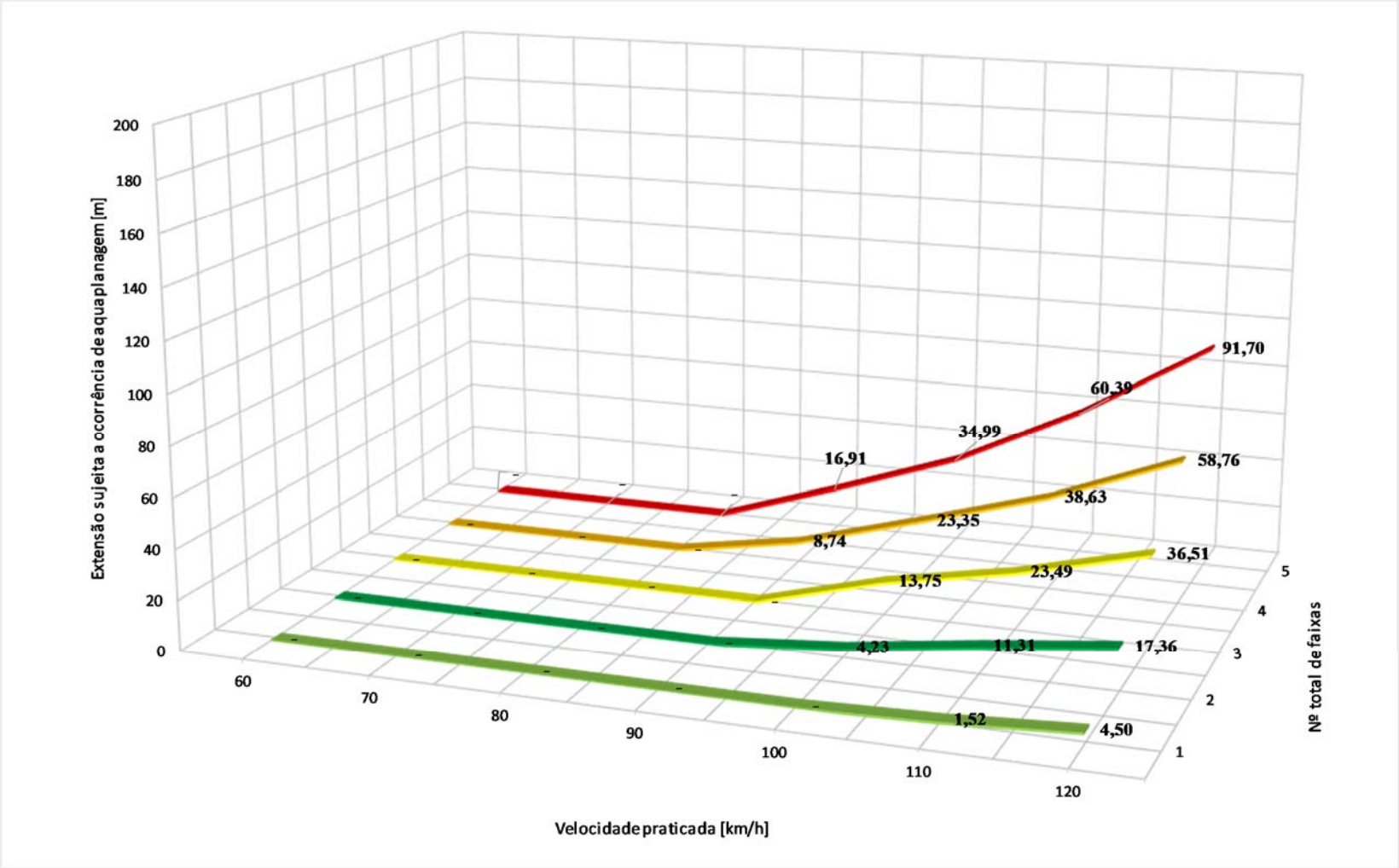
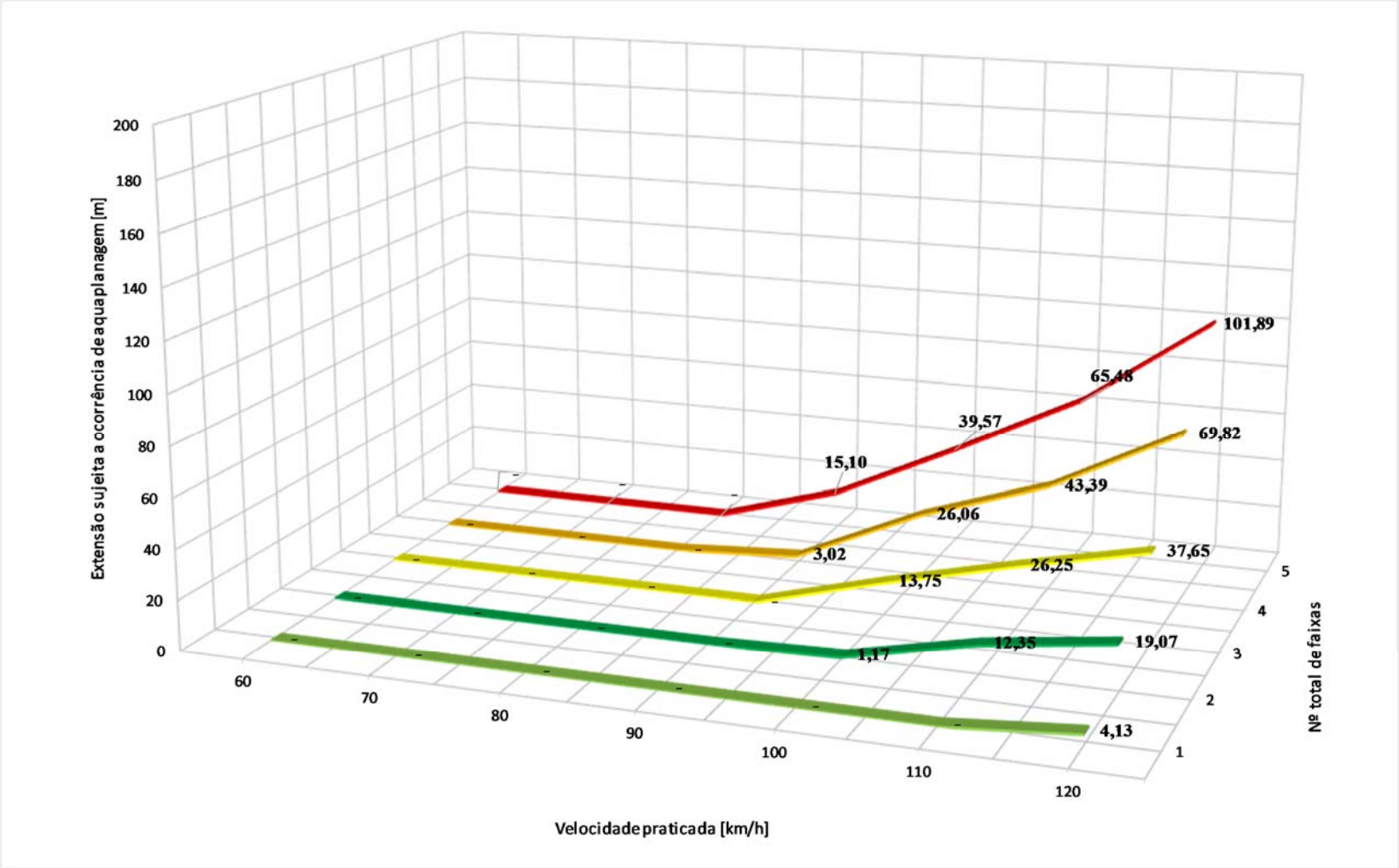


Figura 23 – Extensão sujeita à ocorrência de aquaplanagem para Velocidade de projeto=120 km/h; S_L=4% combinação 2, cenário B



Apêndice B – Gráficos para análise da ocorrência de aquaplanagem do estudo de caso – Cenário 1

Neste apêndice são apresentados os gráficos elaborados para análise dos dados do estudo de caso para o cenário 1.

Figura 1 – Combinação 1 – km 85+000 a km 94+000.

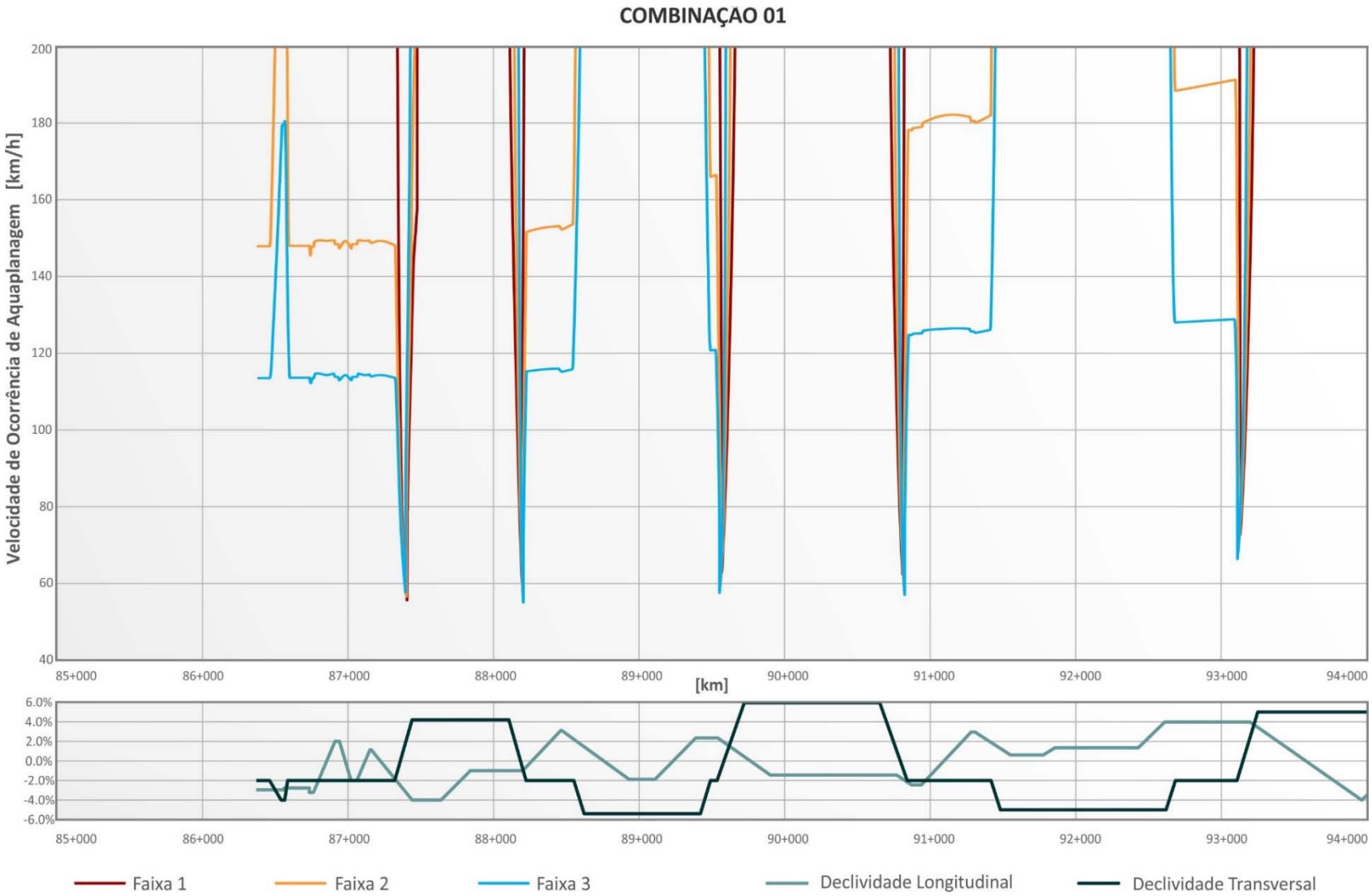


Figura 2 – Combinação 1 – km 94+000 a km 103+000.

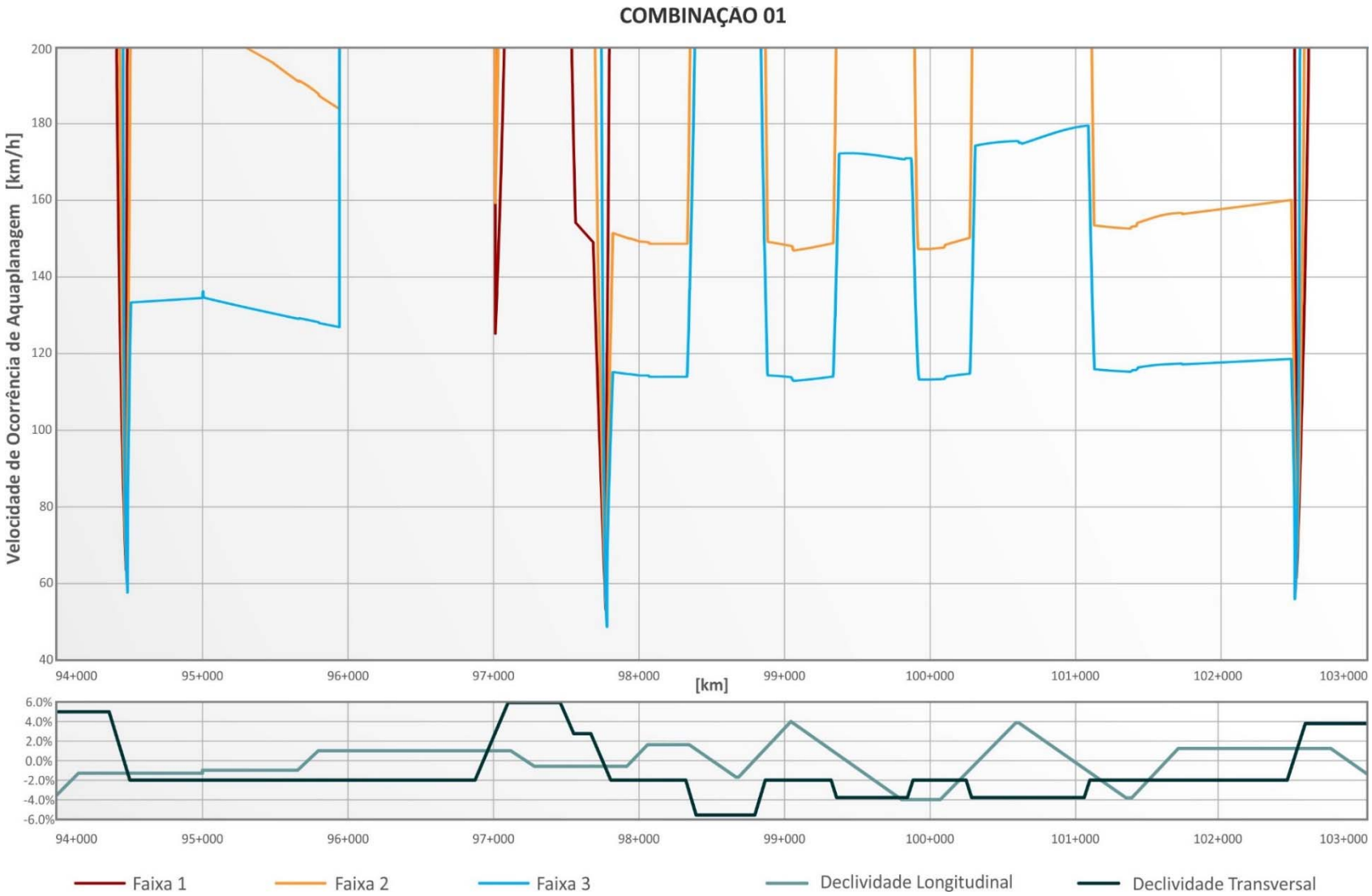


Figura 3 – Combinação 1 – km 103+000 a km 112+000.

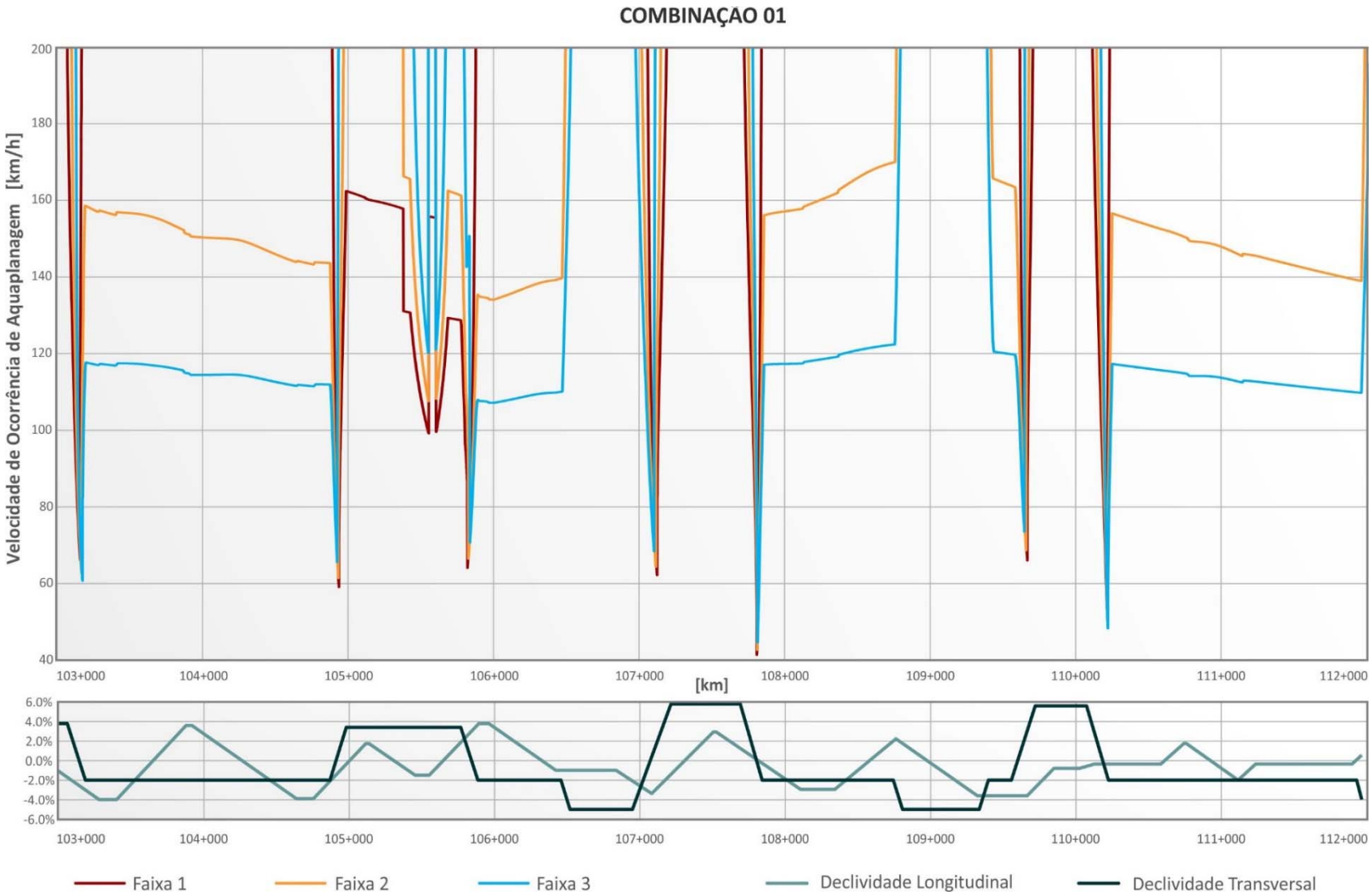


Figura 4 – Combinação 1 – km 112+000 a km 121+000.

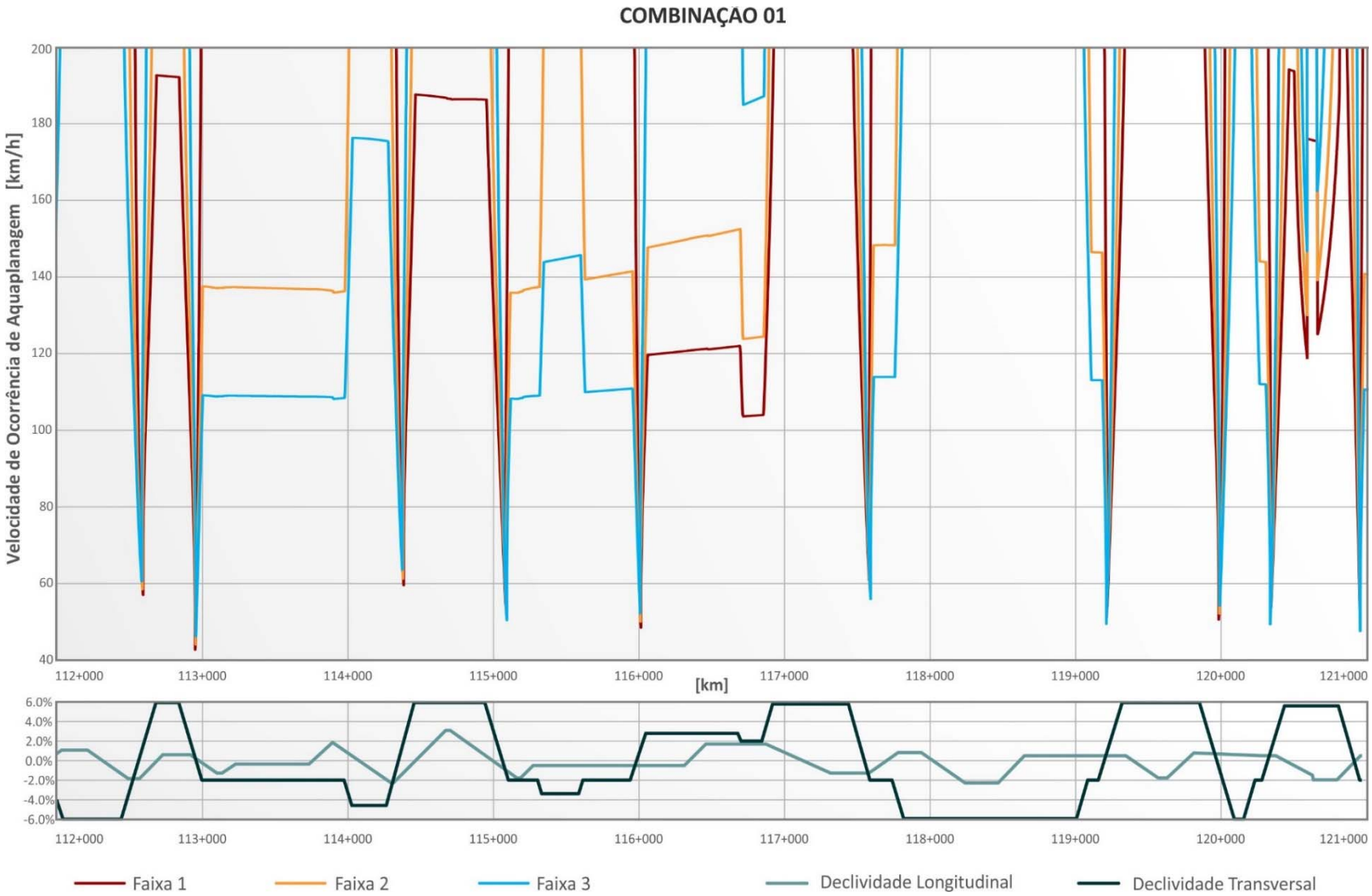


Figura 5 – Combinação 1 – km 121+000 a km 130+000.

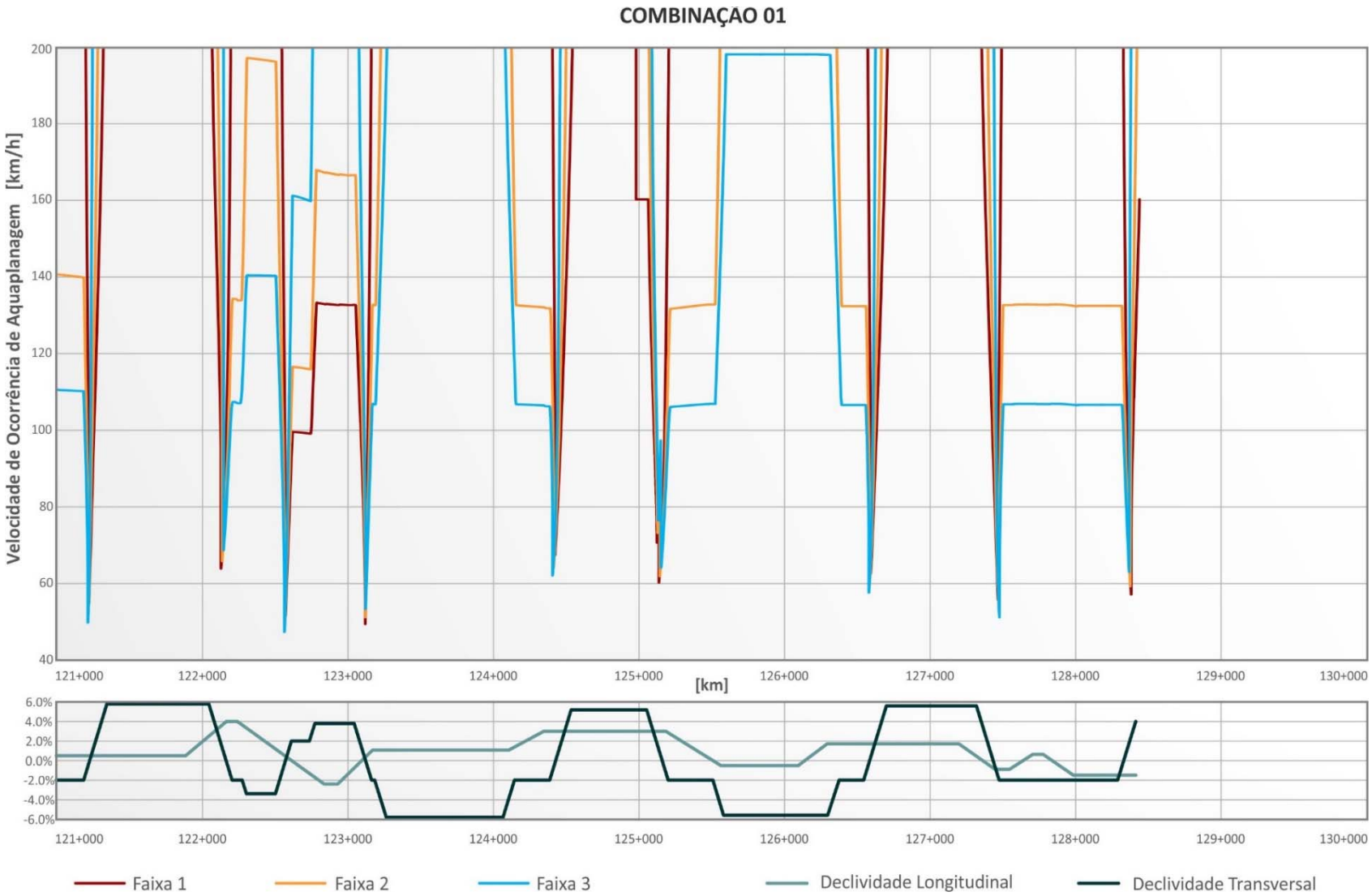


Figura 6 – Combinação 2 – km 85+000 a km 94+000.

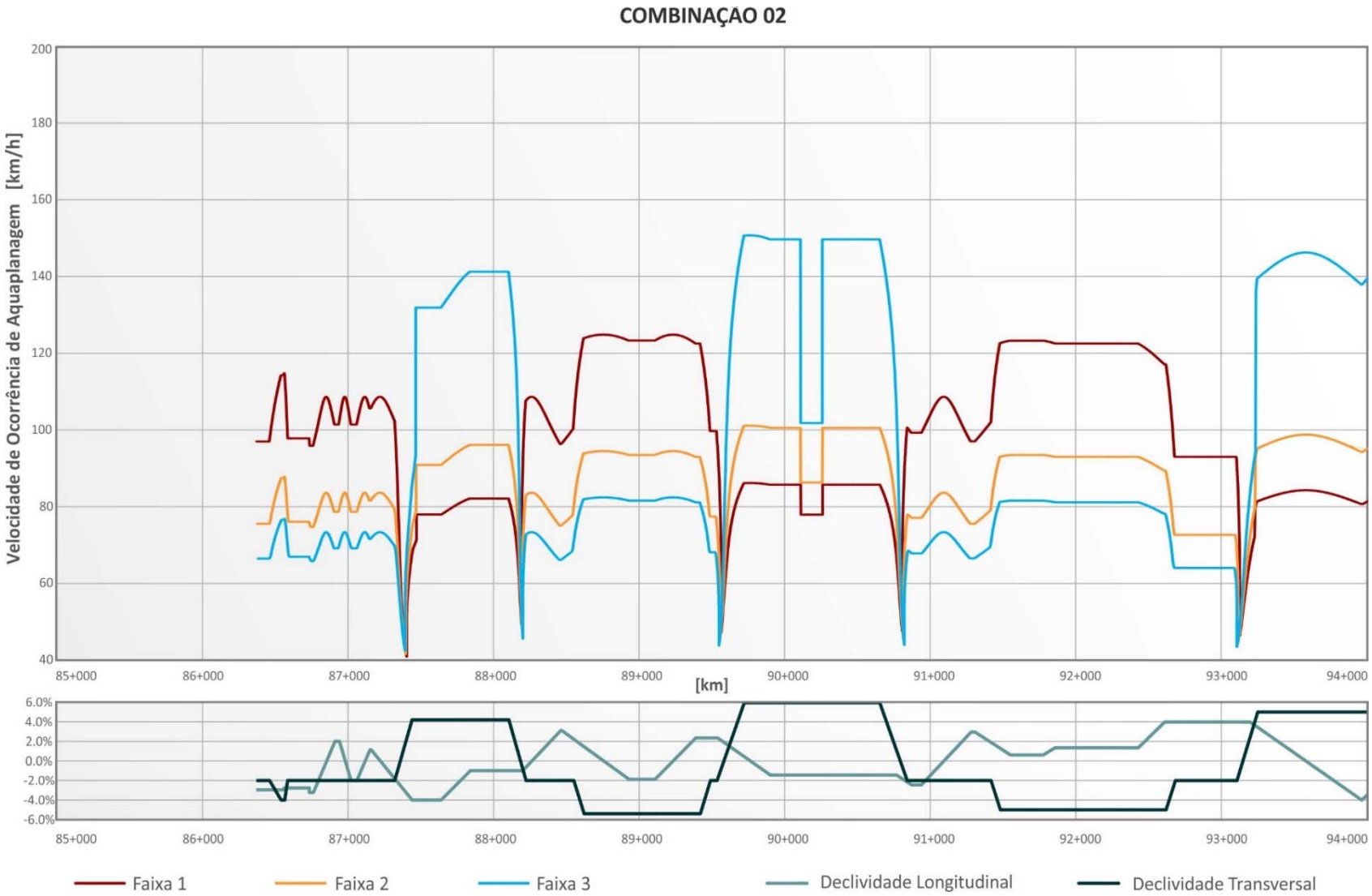


Figura 7 – Combinação 2 – km 94+000 a km 103+000.

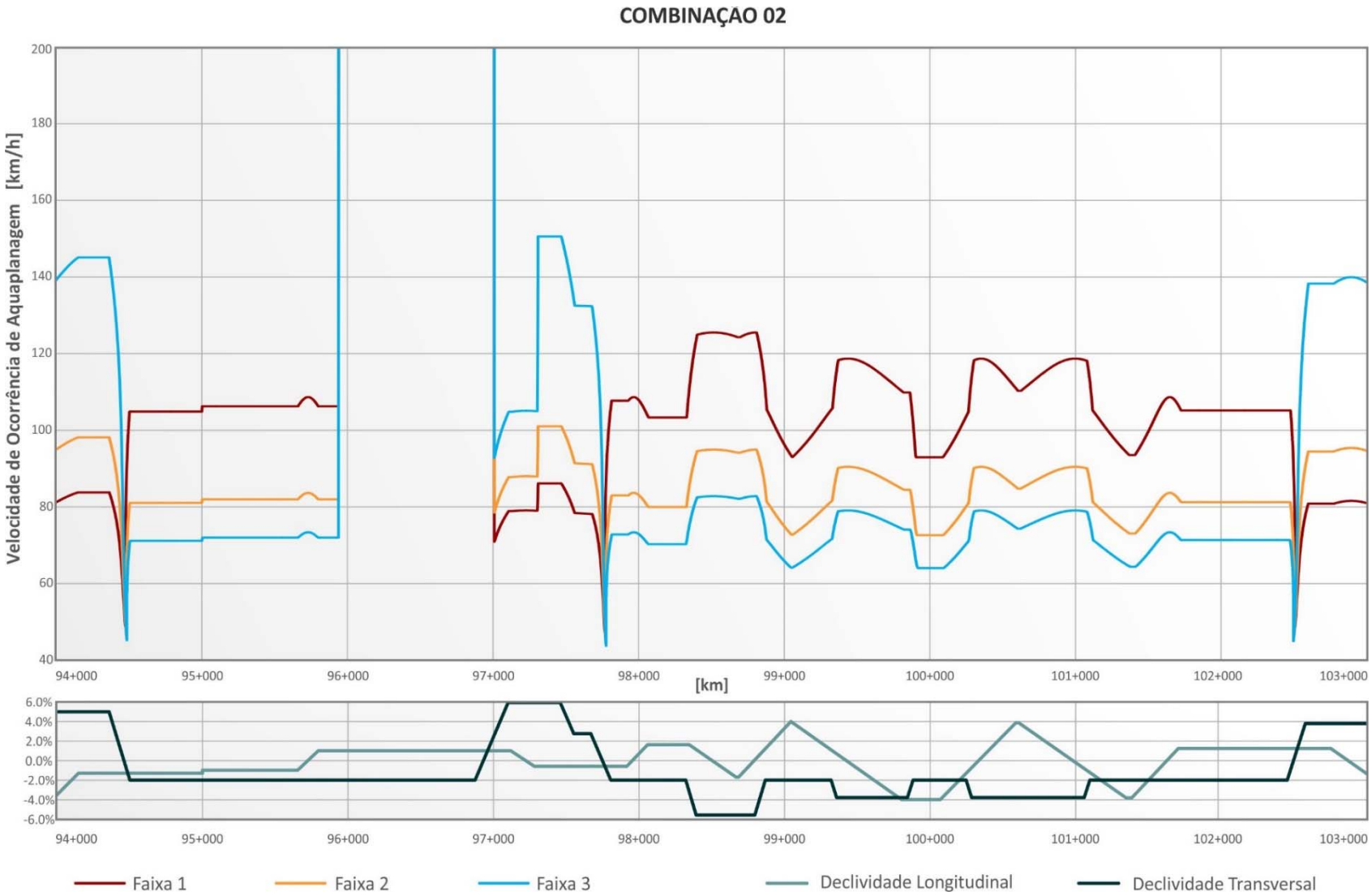


Figura 8 – Combinação 2 – km 103+000 a km 112+000.

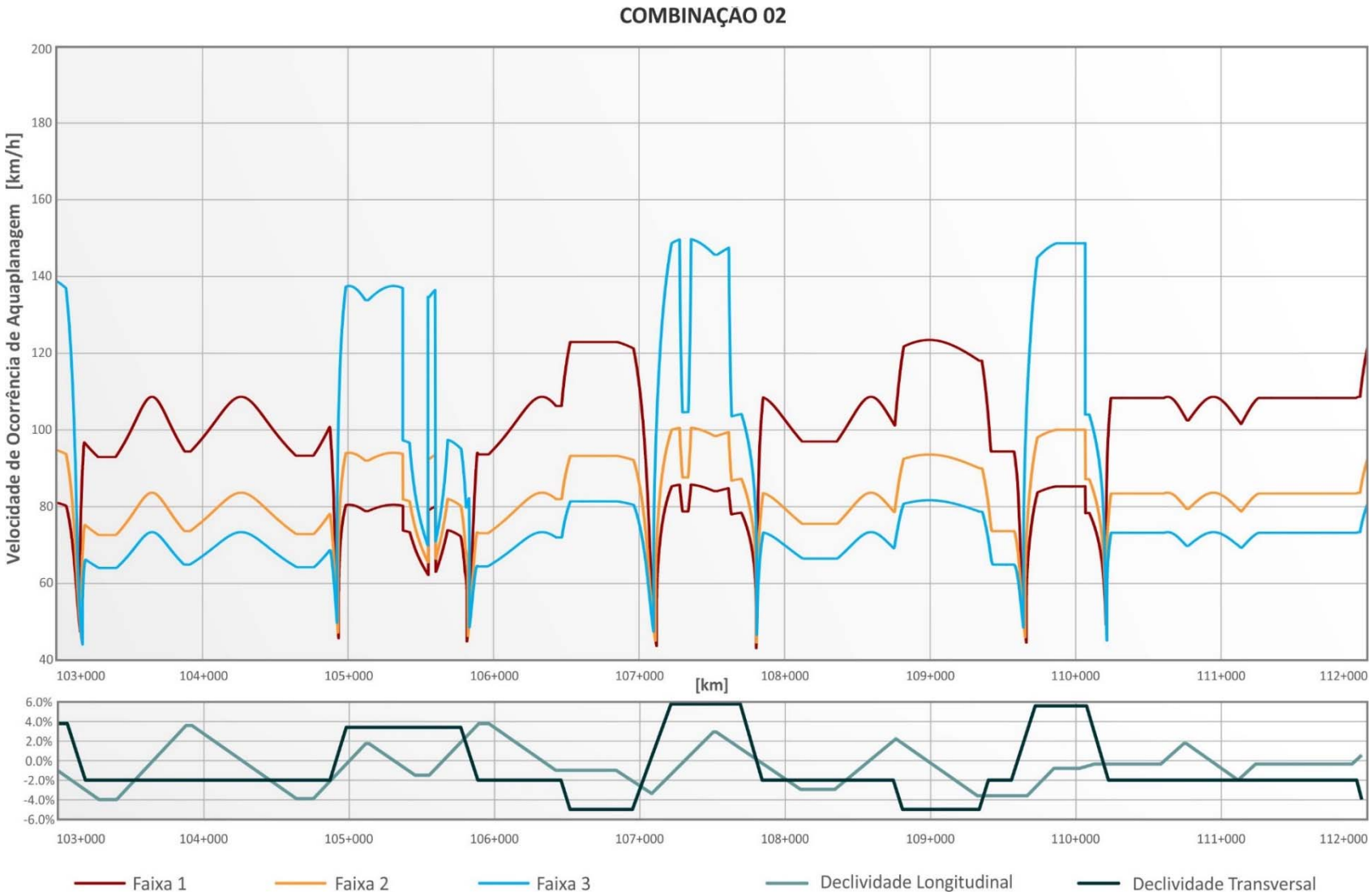


Figura 9 – Combinação 2 – km 112+000 a km 121+000.

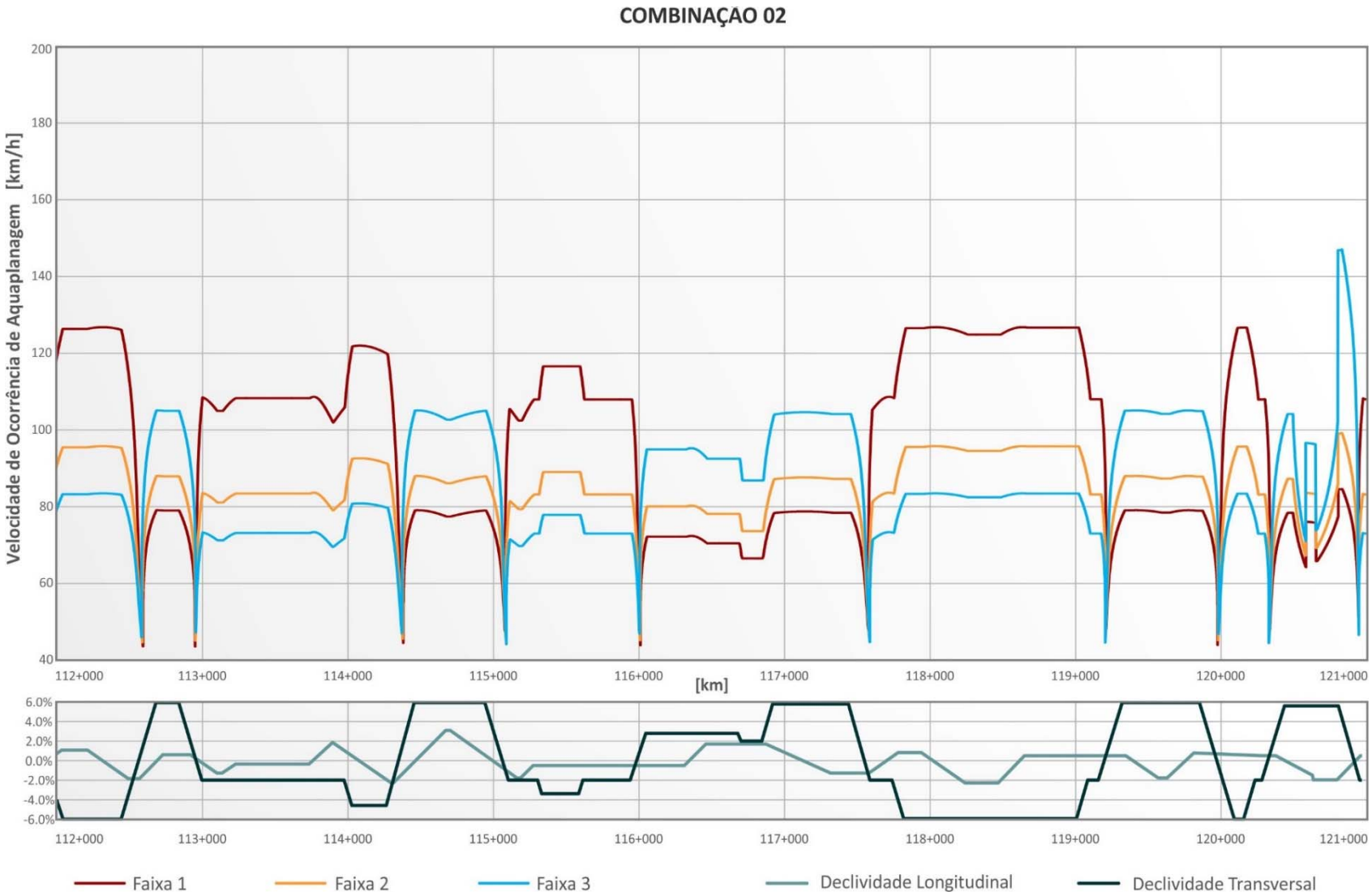


Figura 10 – Combinação 2 – km 121+000 a km 130+000.

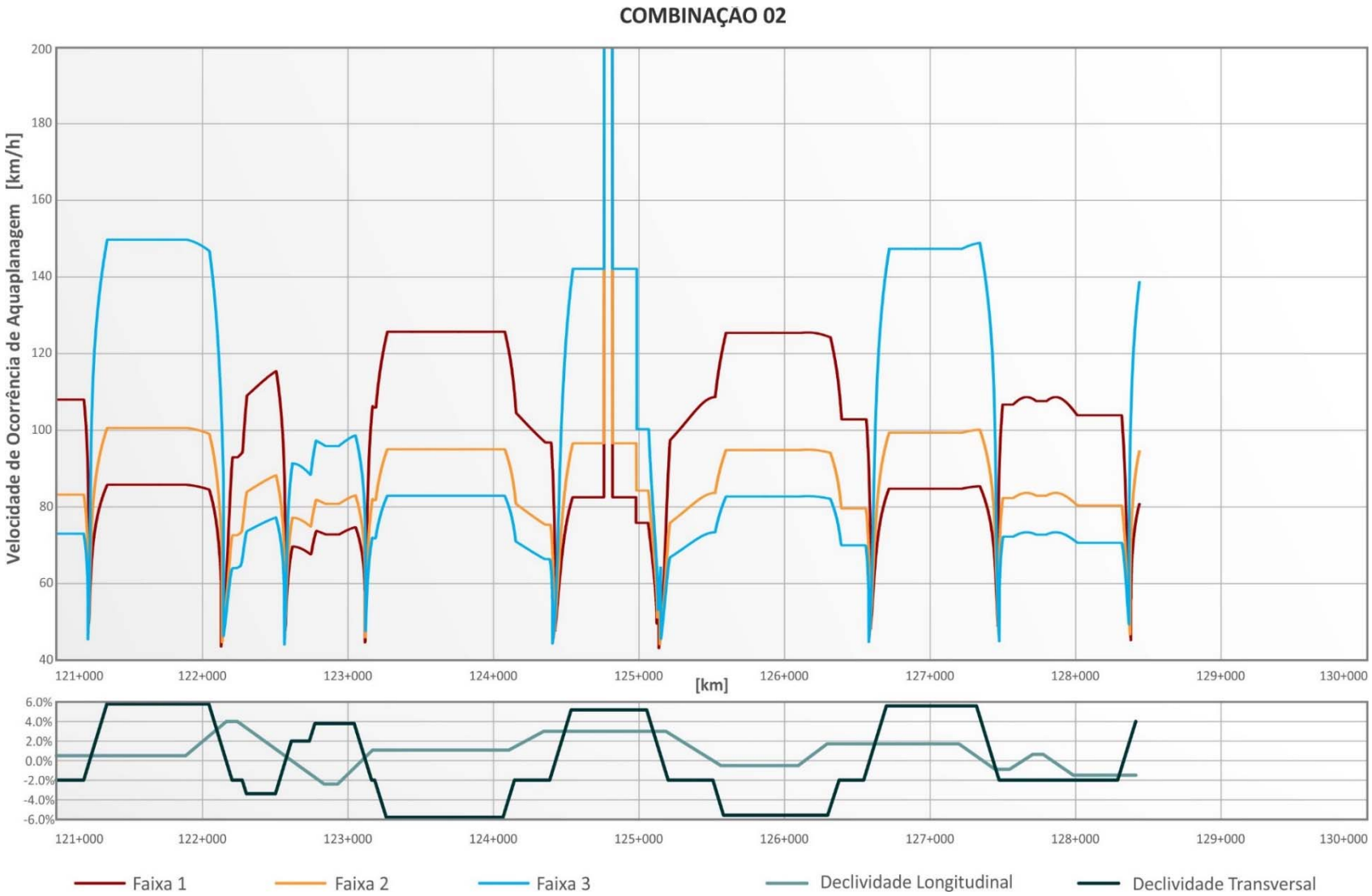


Figura 11 – Combinação 3 – km 85+000 a km 94+000.

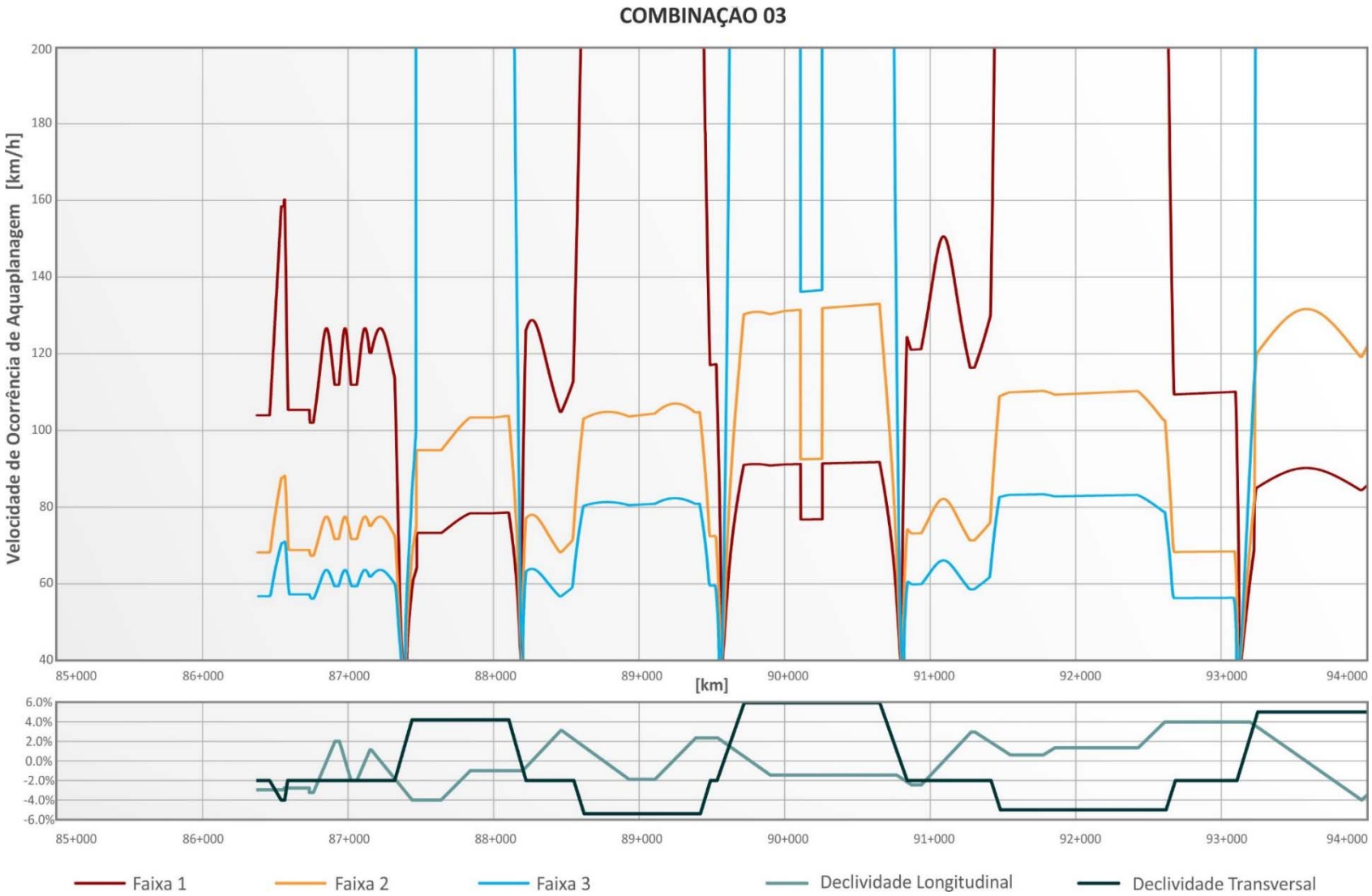


Figura 12 – Combinação 3 – km 94+000 a km 103+000.

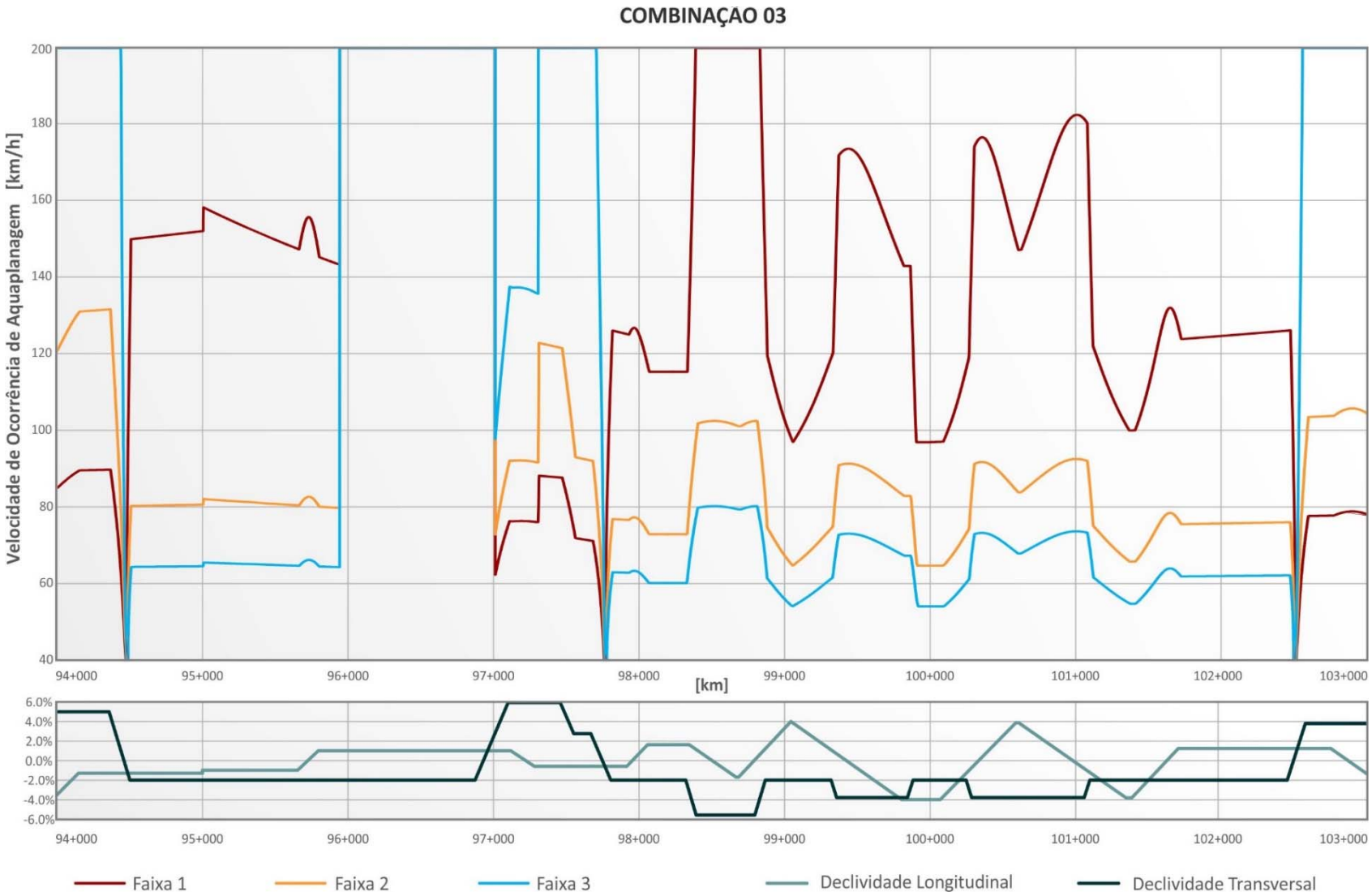


Figura 13 – Combinação 3 – km 103+000 a km 112+000.

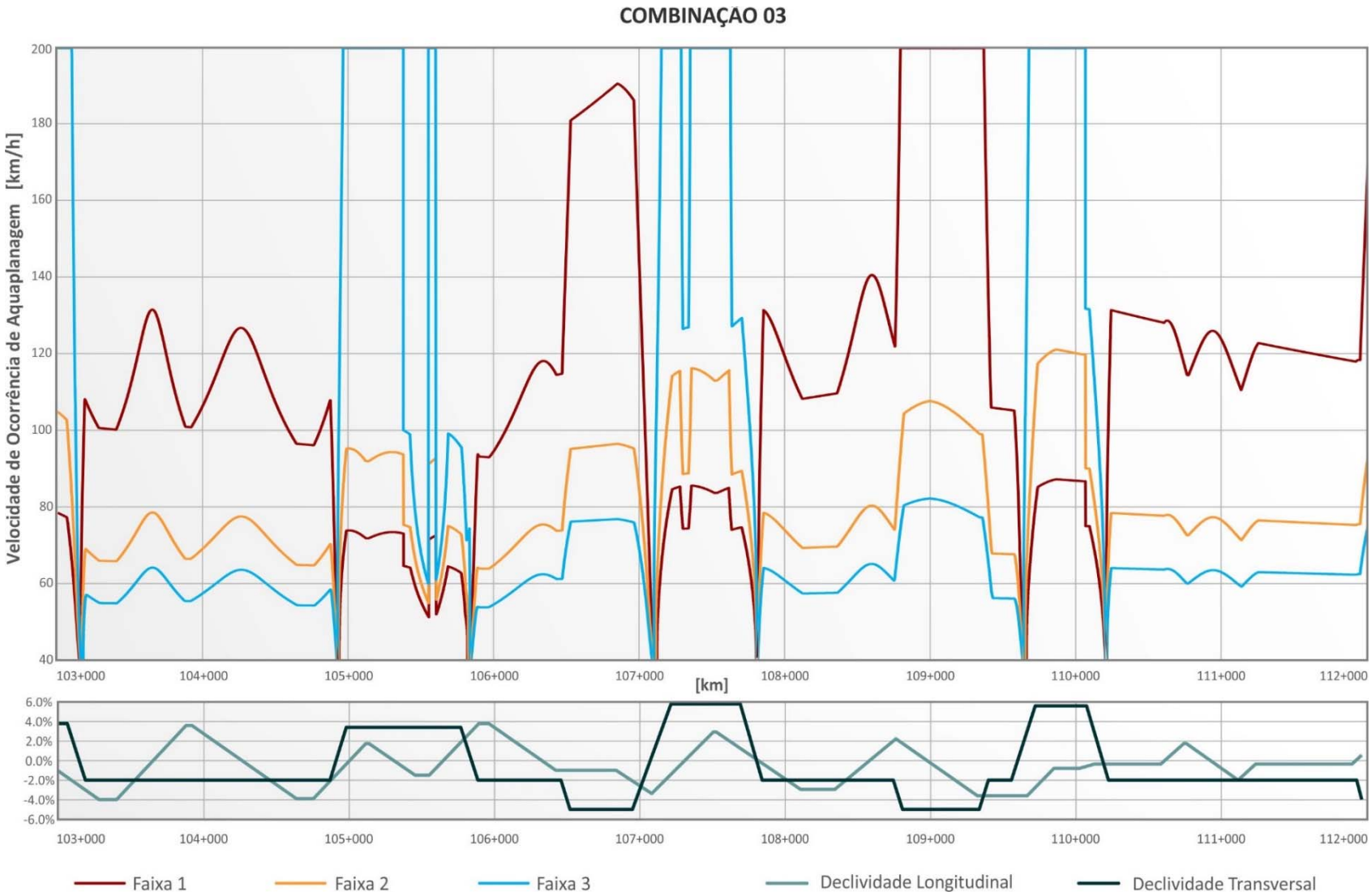


Figura 14 – Combinação 3 – km 112+000 a km 121+000.

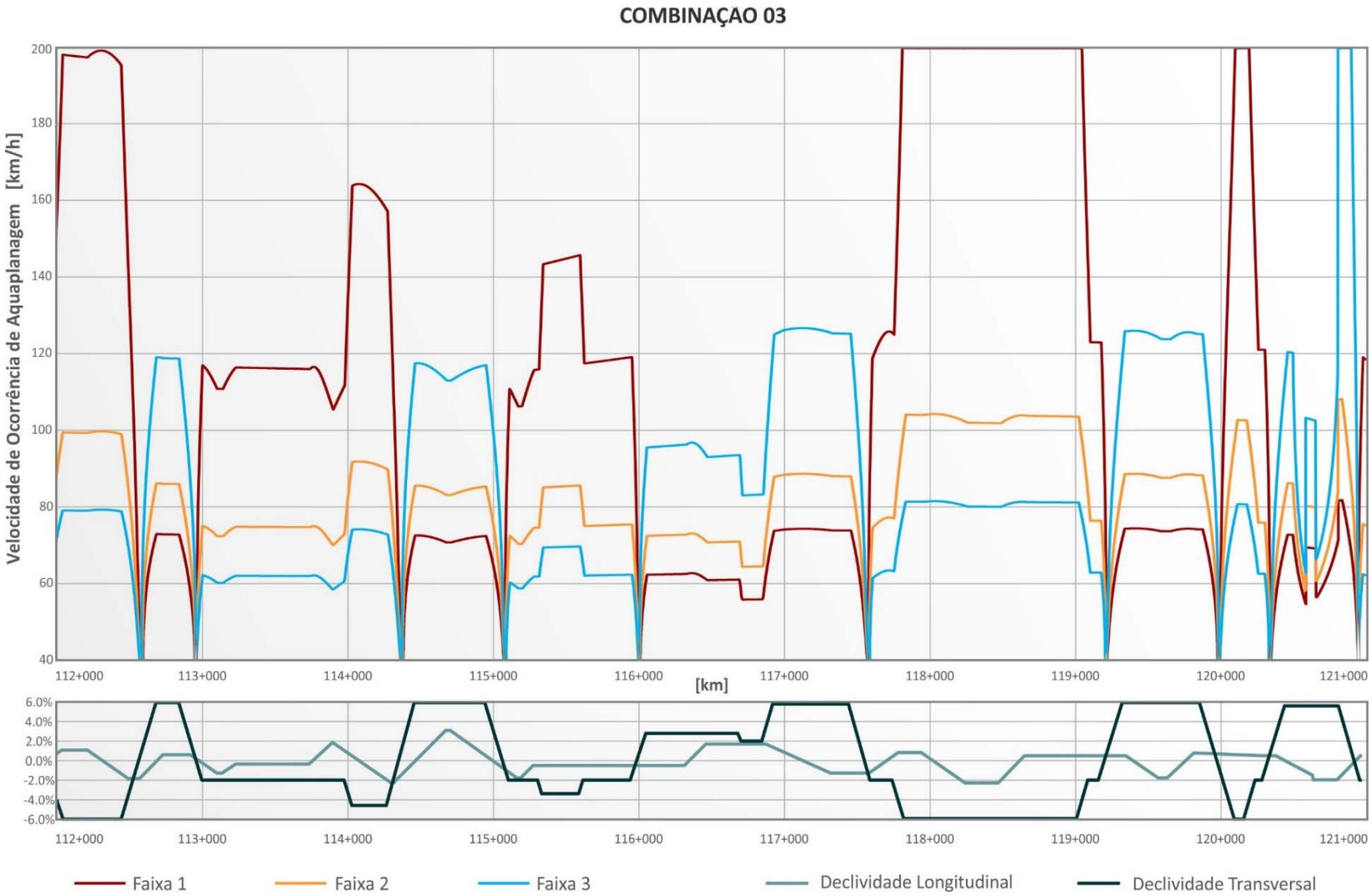


Figura 15 – Combinação 3 – km 121+000 a km 130+000.

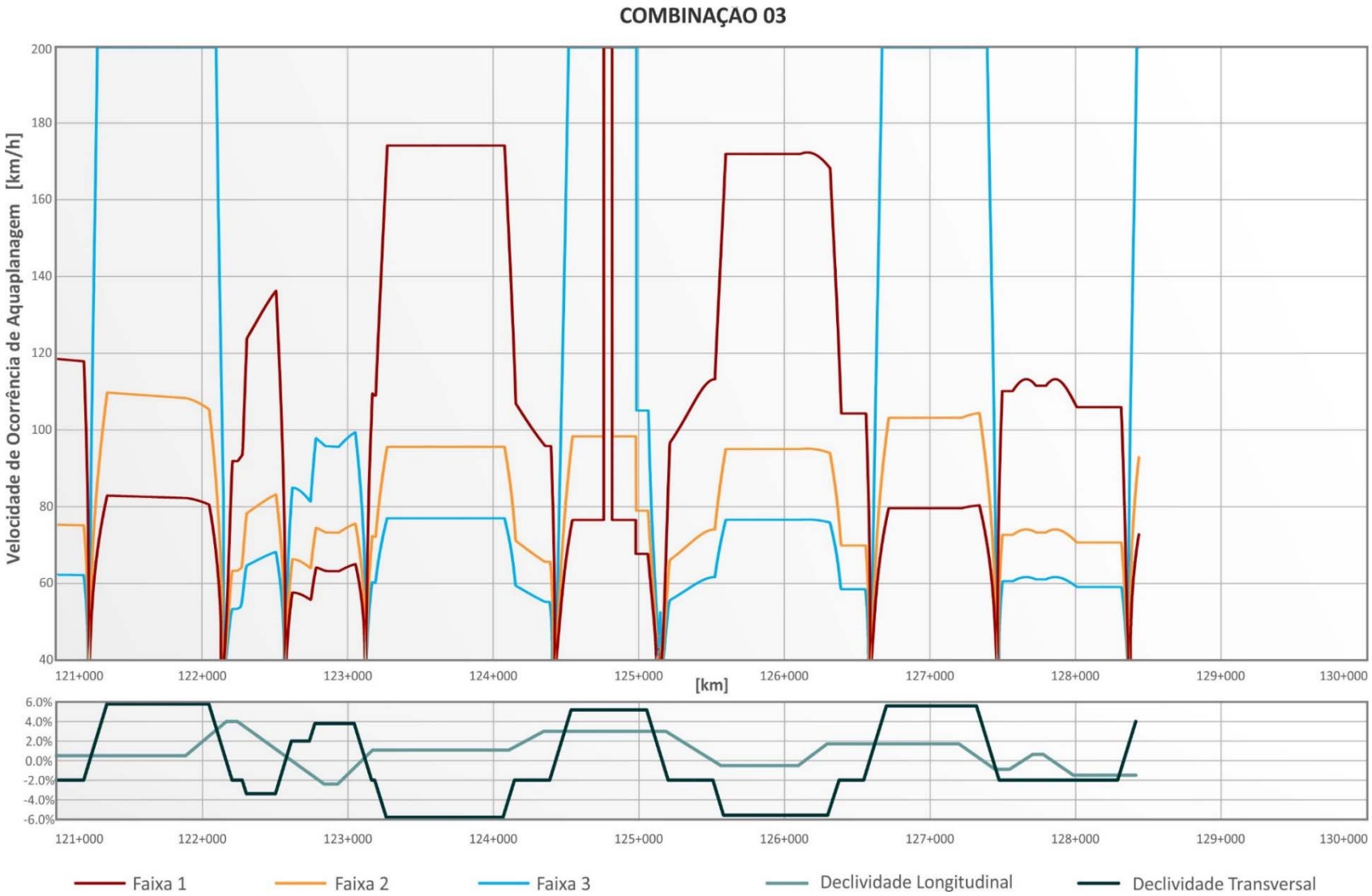


Figura 16 – Combinação 4 – km 85+000 a km 94+000.

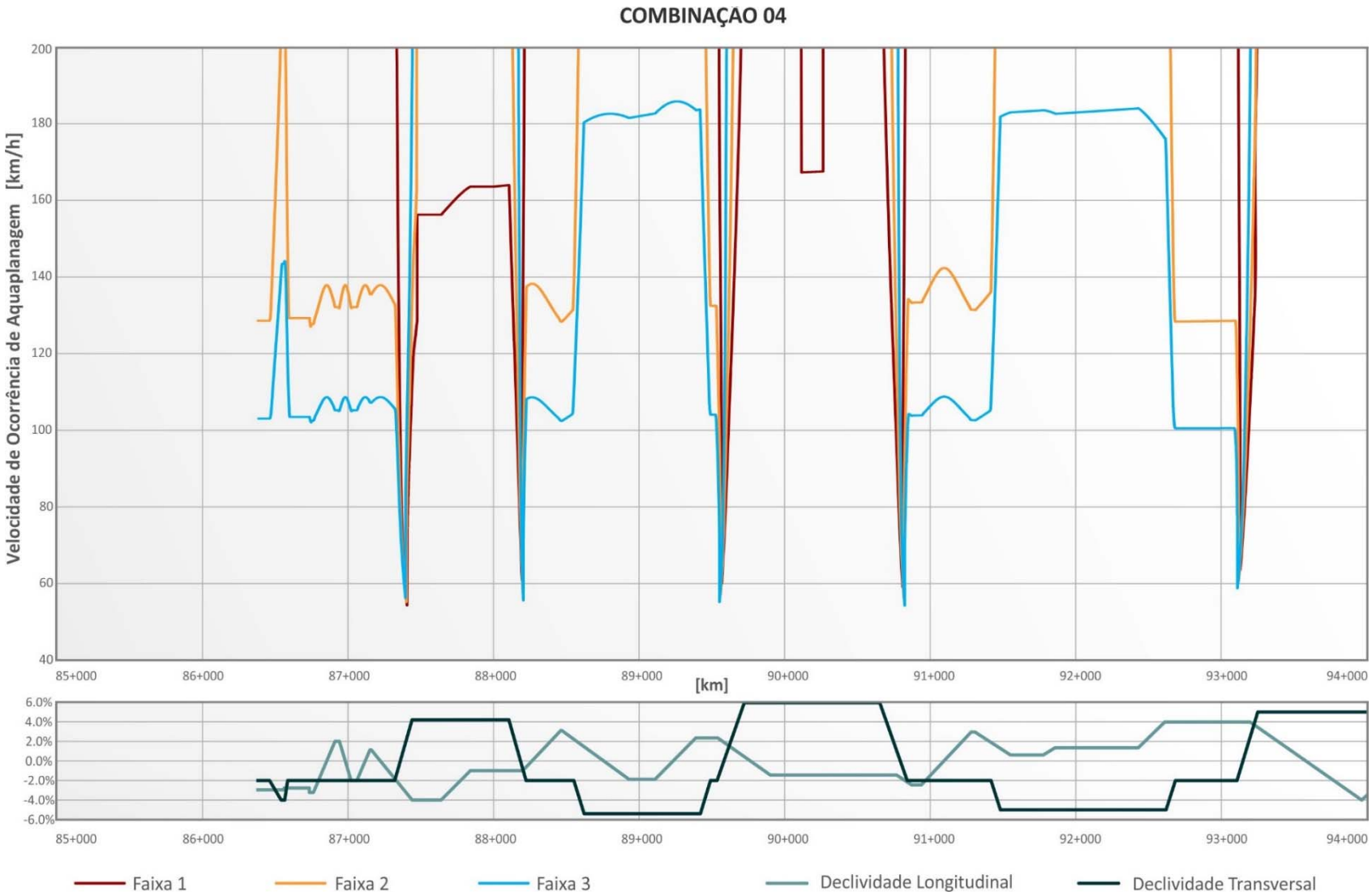


Figura 17 – Combinação 4 – km 94+000 a km 103+000.

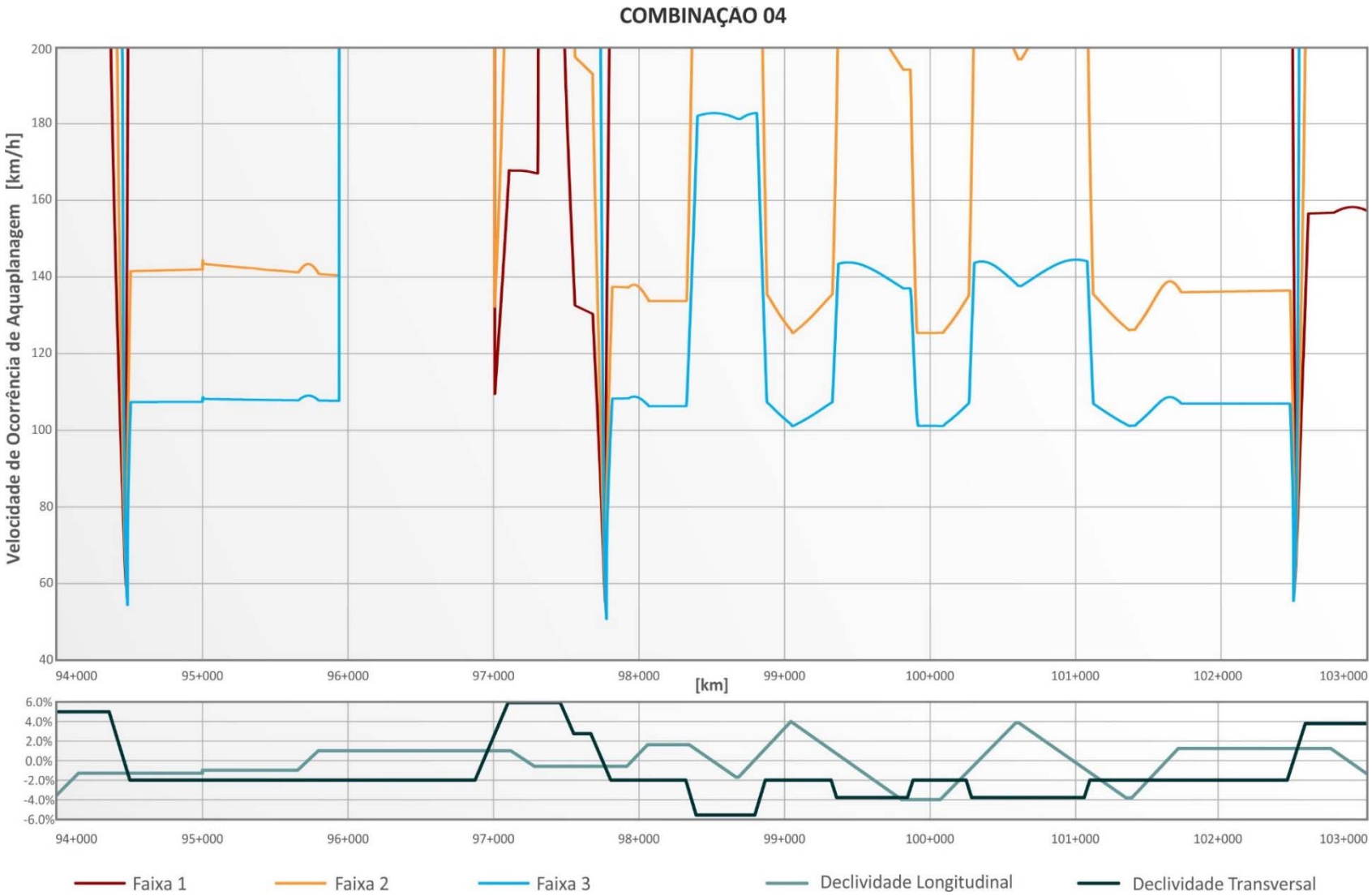


Figura 18 – Combinação 4 – km 103+000 a km 112+000.

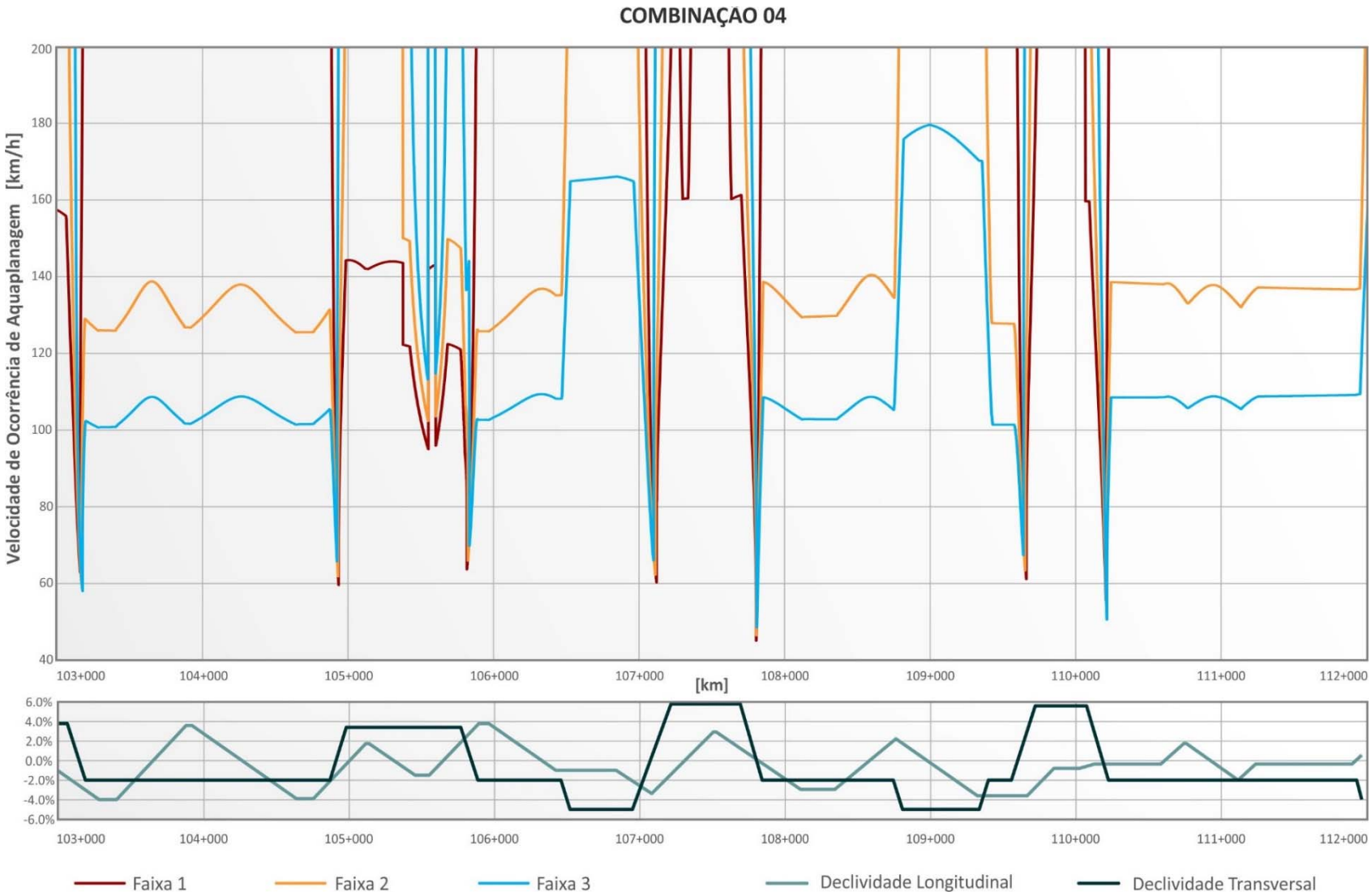


Figura 19 – Combinação 4 – km 112+000 a km 121+000.

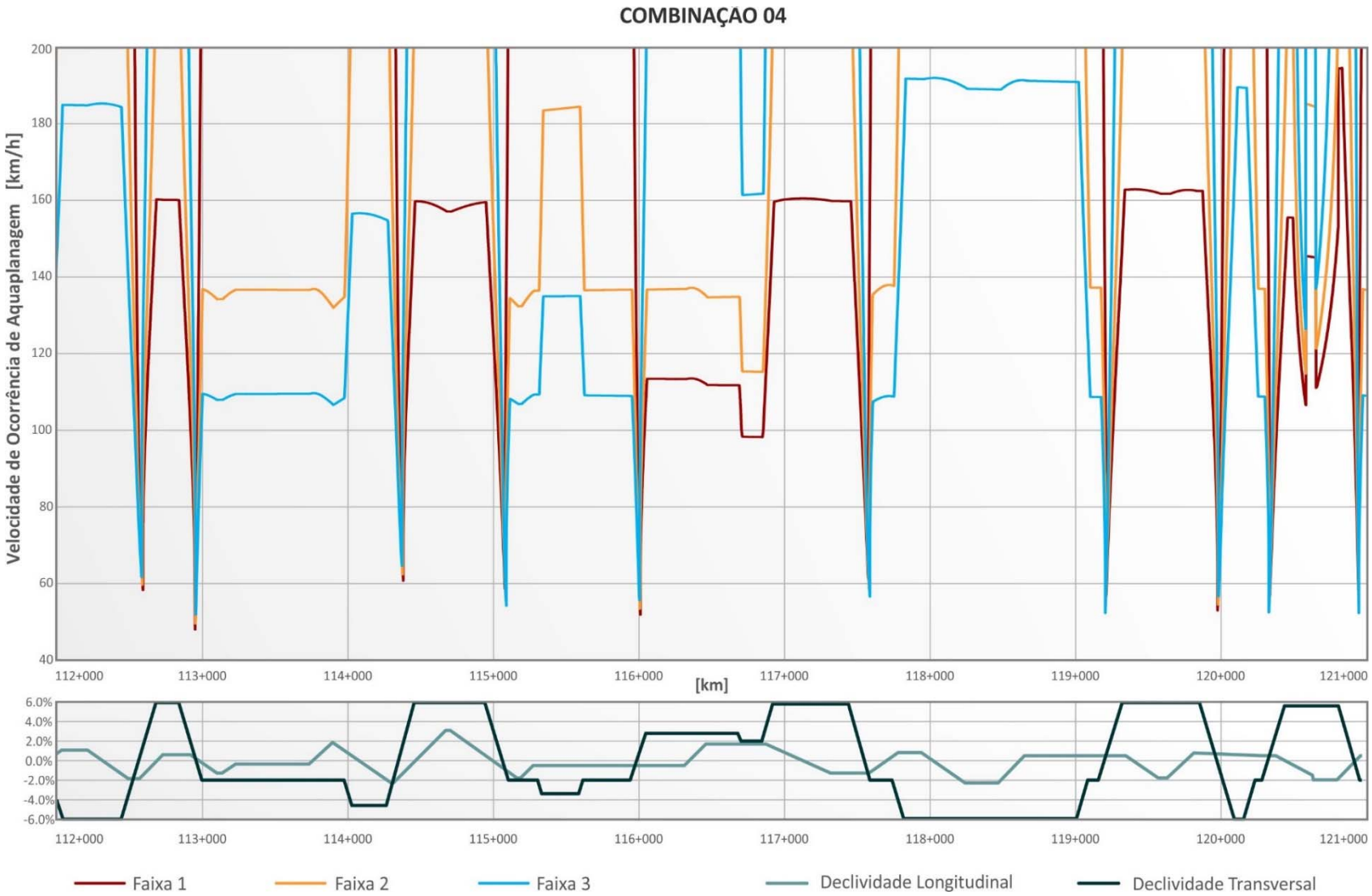


Figura 20 – Combinação 4 – km 121+000 a km 130+000.

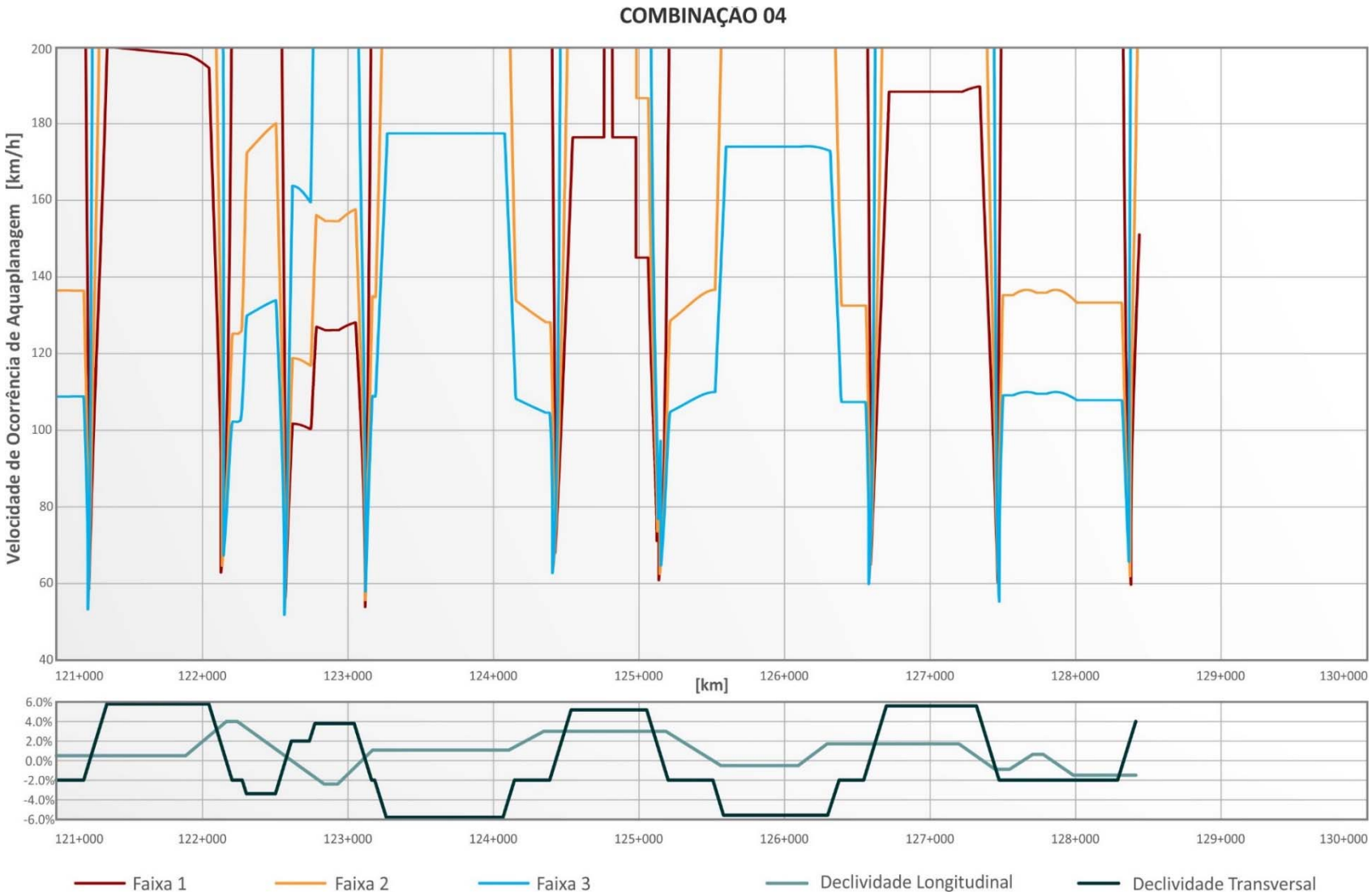


Figura 21 – Combinação 5 – km 85+000 a km 94+000.

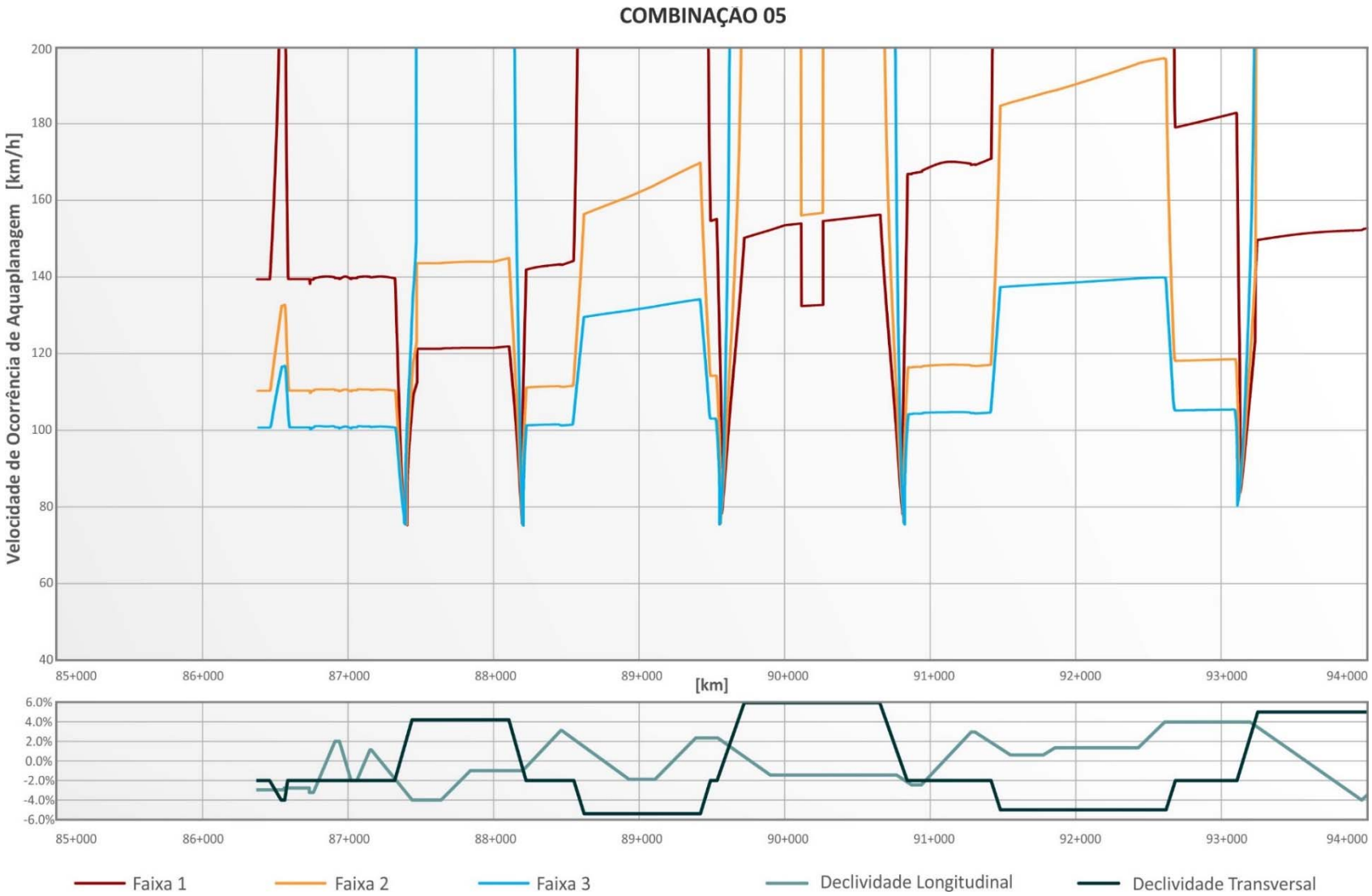


Figura 22 – Combinação 5 – km 94+000 a km 103+000.

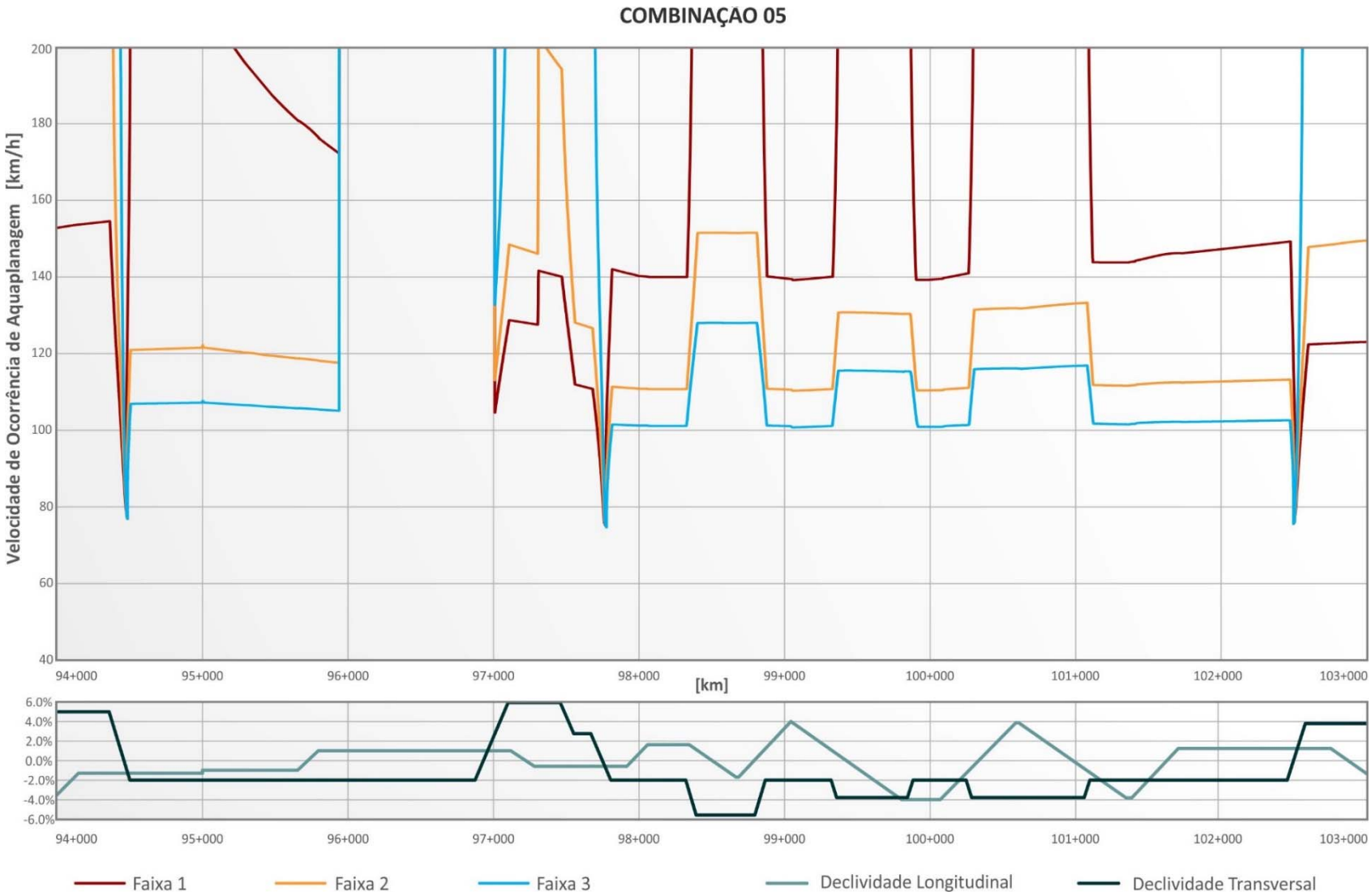


Figura 23 – Combinação 5 – km 103+000 a km 112+000.

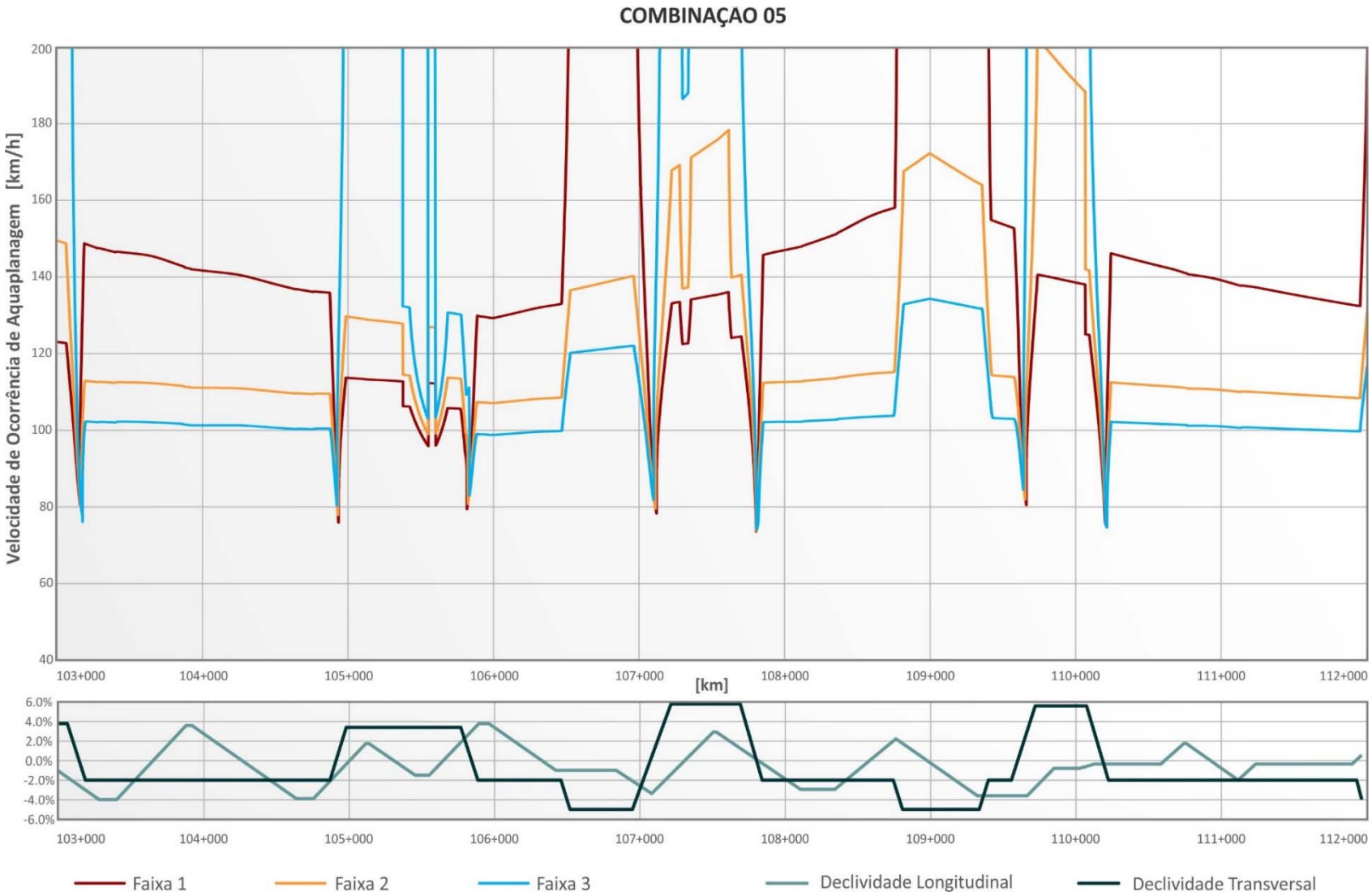


Figura 24 – Combinação 5 – km 112+000 a km 121+000.

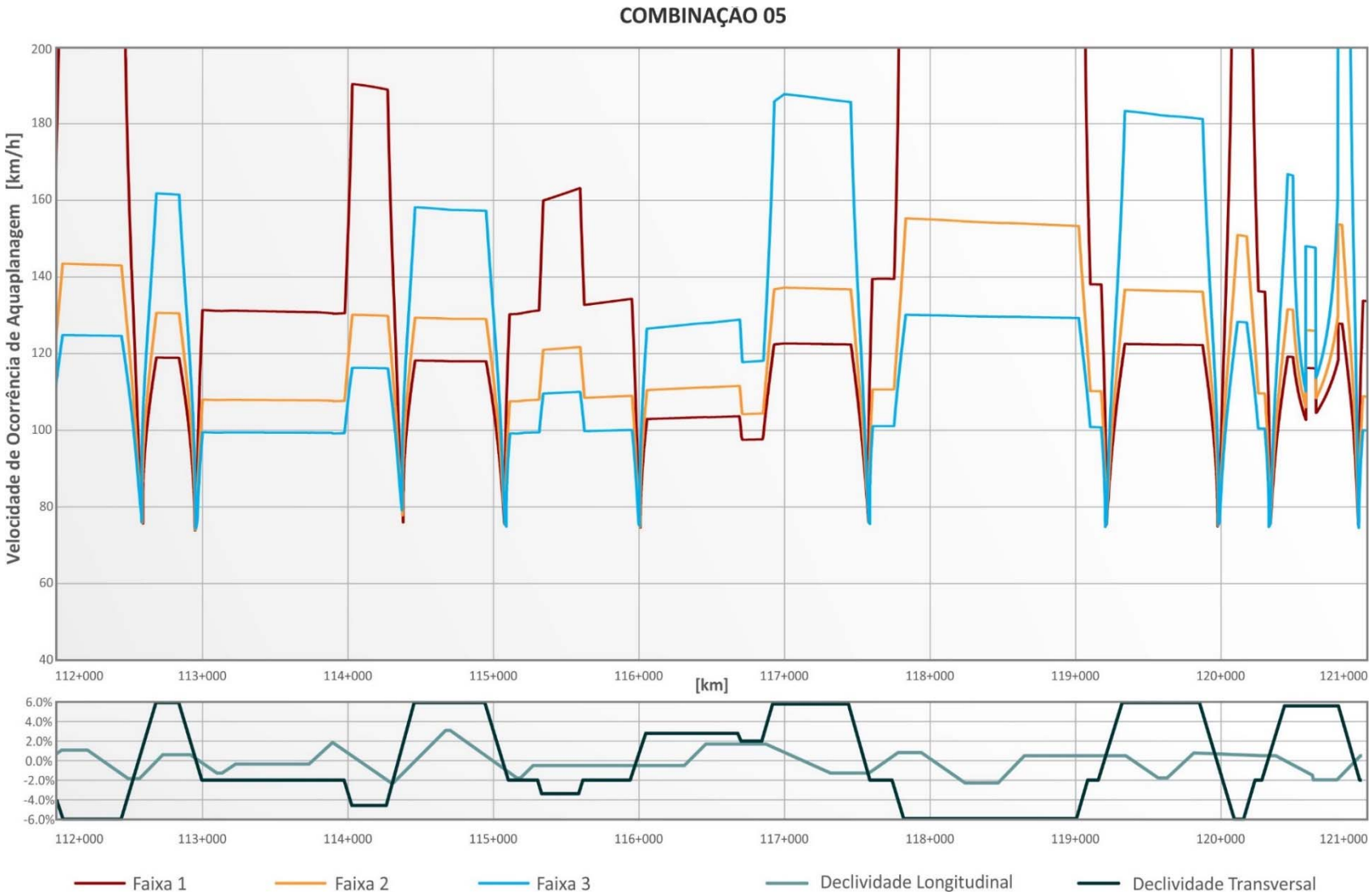


Figura 25 – Combinação 5 – km 121+000 a km 130+000.

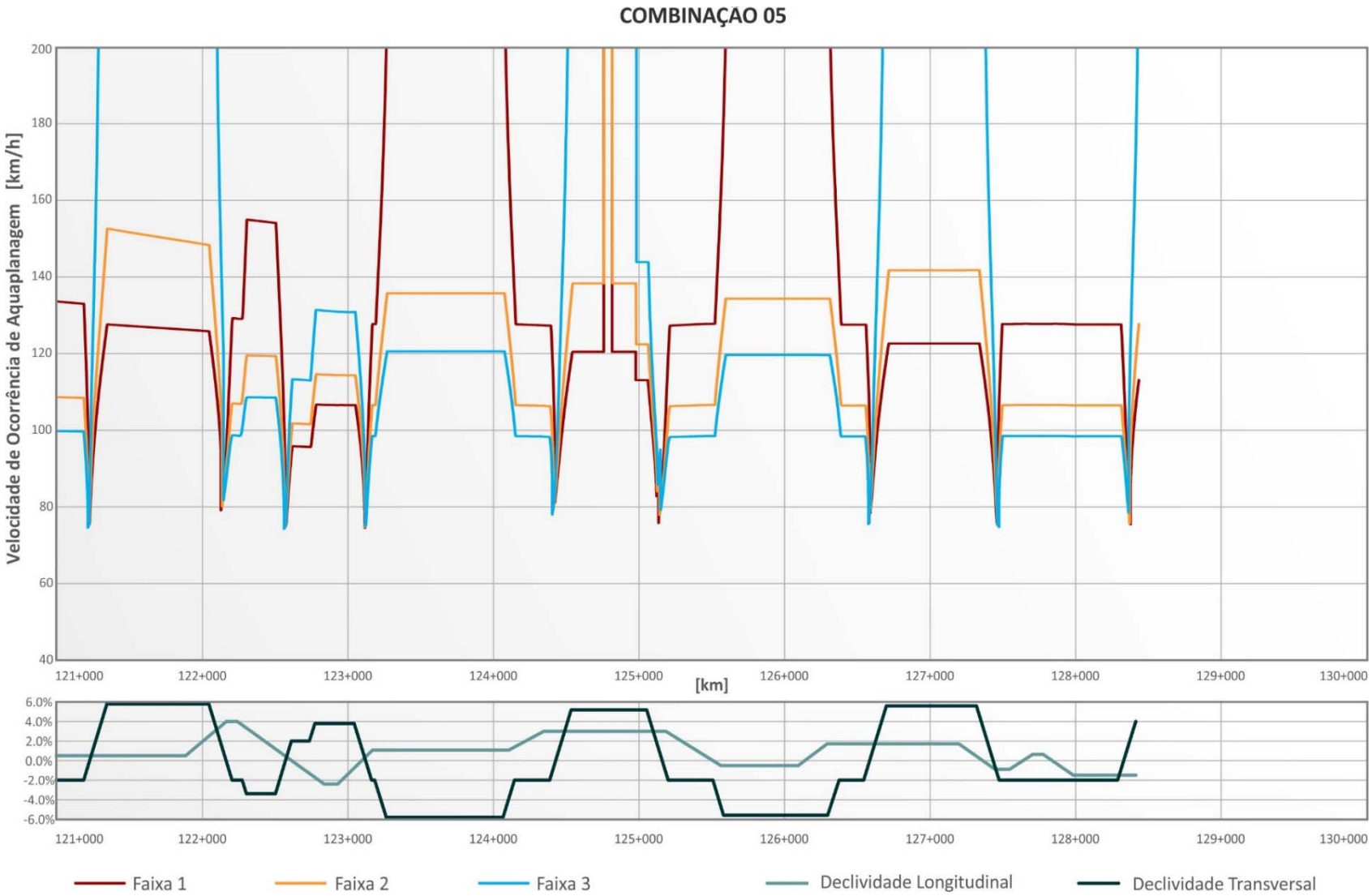


Figura 26 – Combinação 6 – km 85+000 a km 94+000.

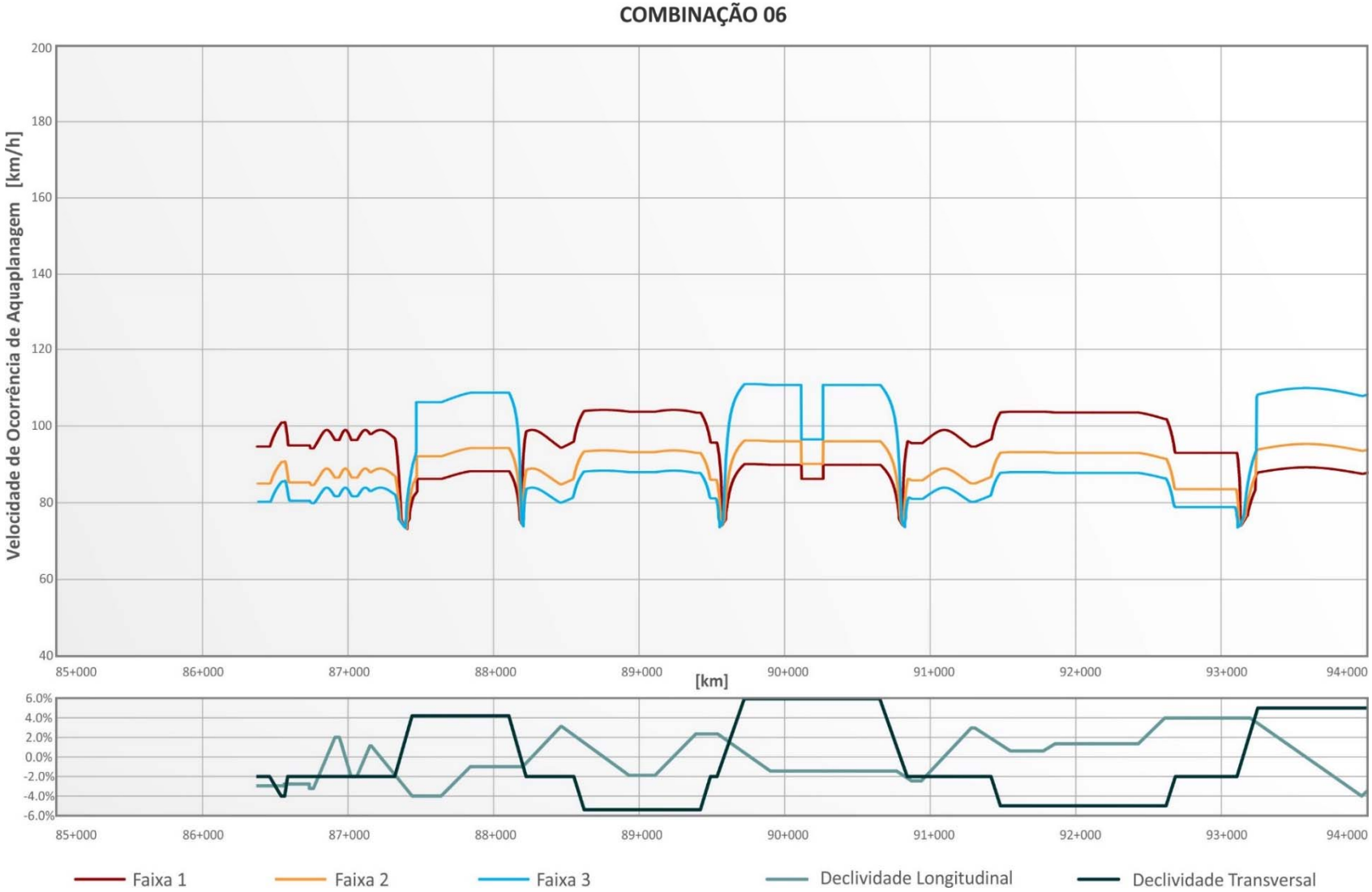


Figura 27 – Combinação 6 – km 94+000 a km 103+000.

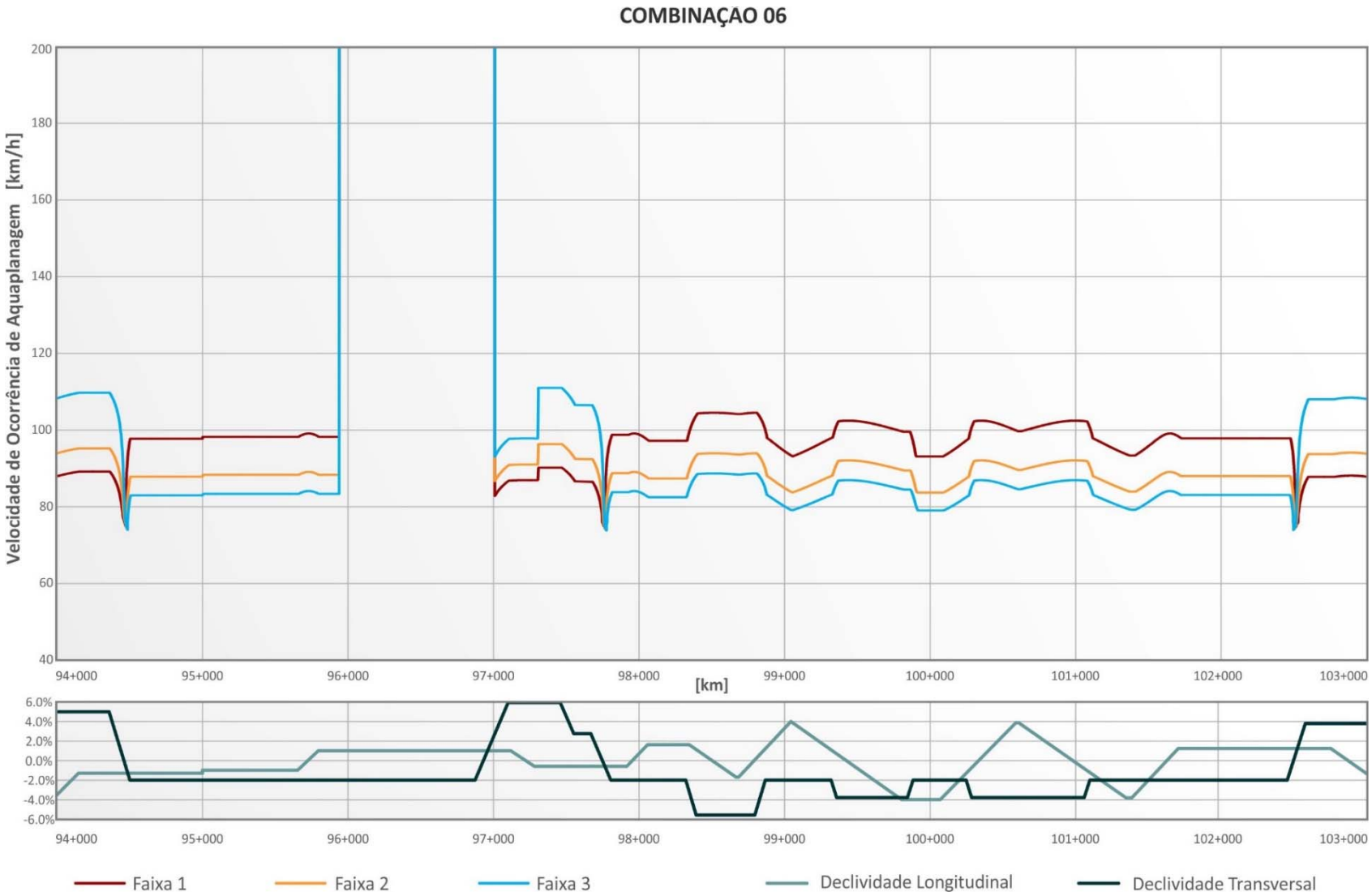


Figura 28 – Combinação 6 – km 103+000 a km 112+000.

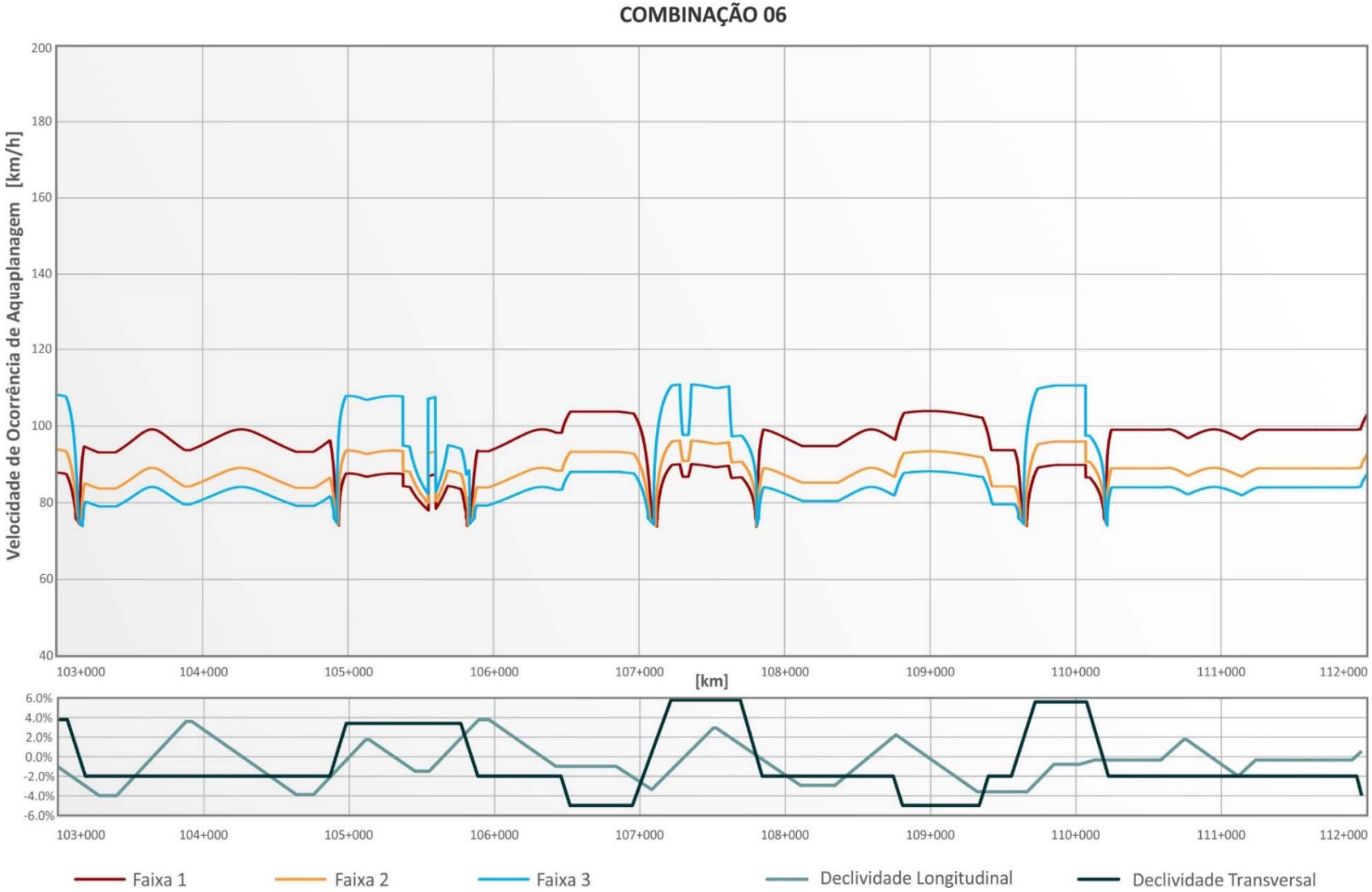


Figura 29 – Combinação 6 – km 112+000 a km 121+000.

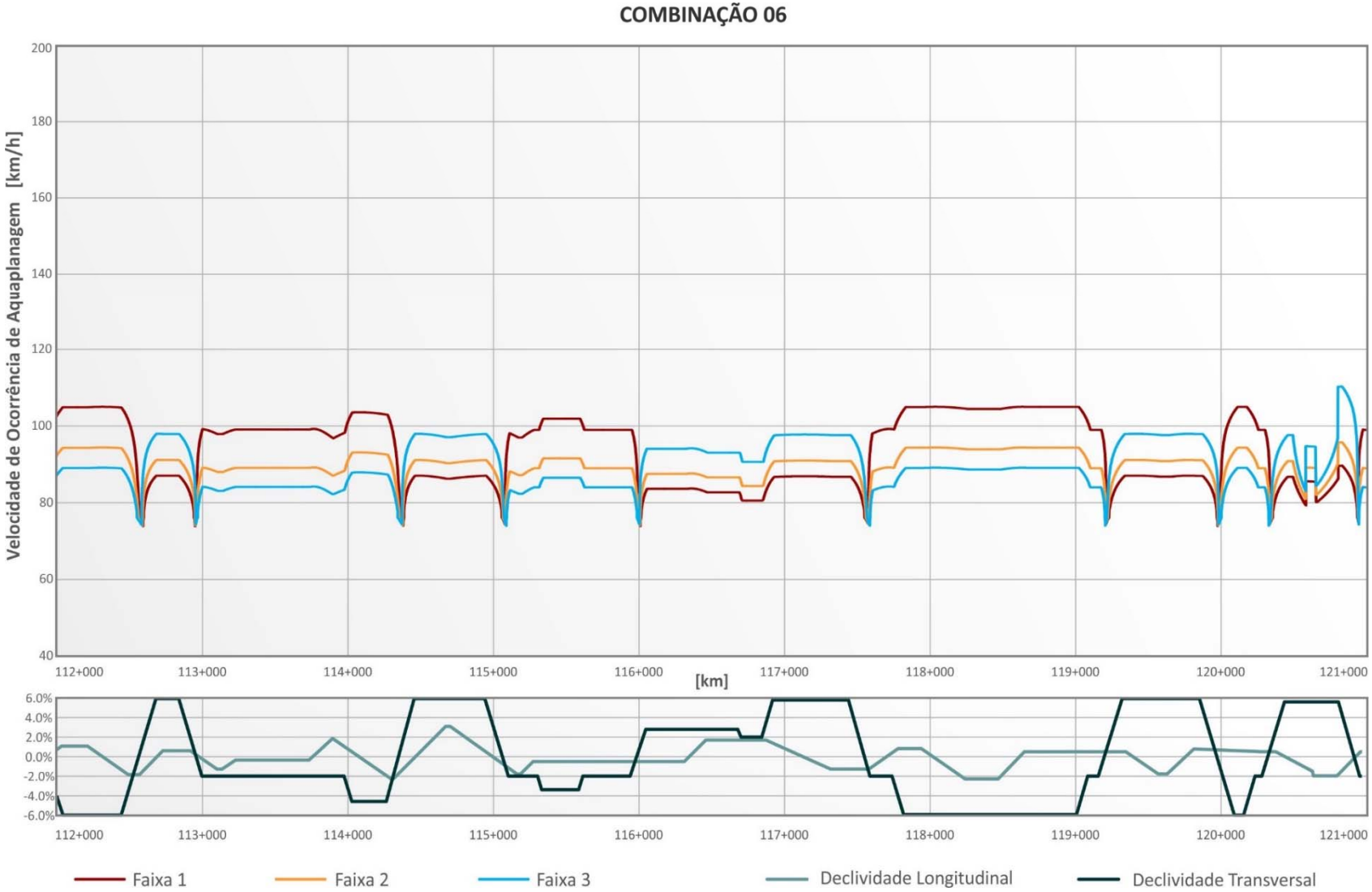


Figura 30 – Combinação 6 – km 121+000 a km 130+000.

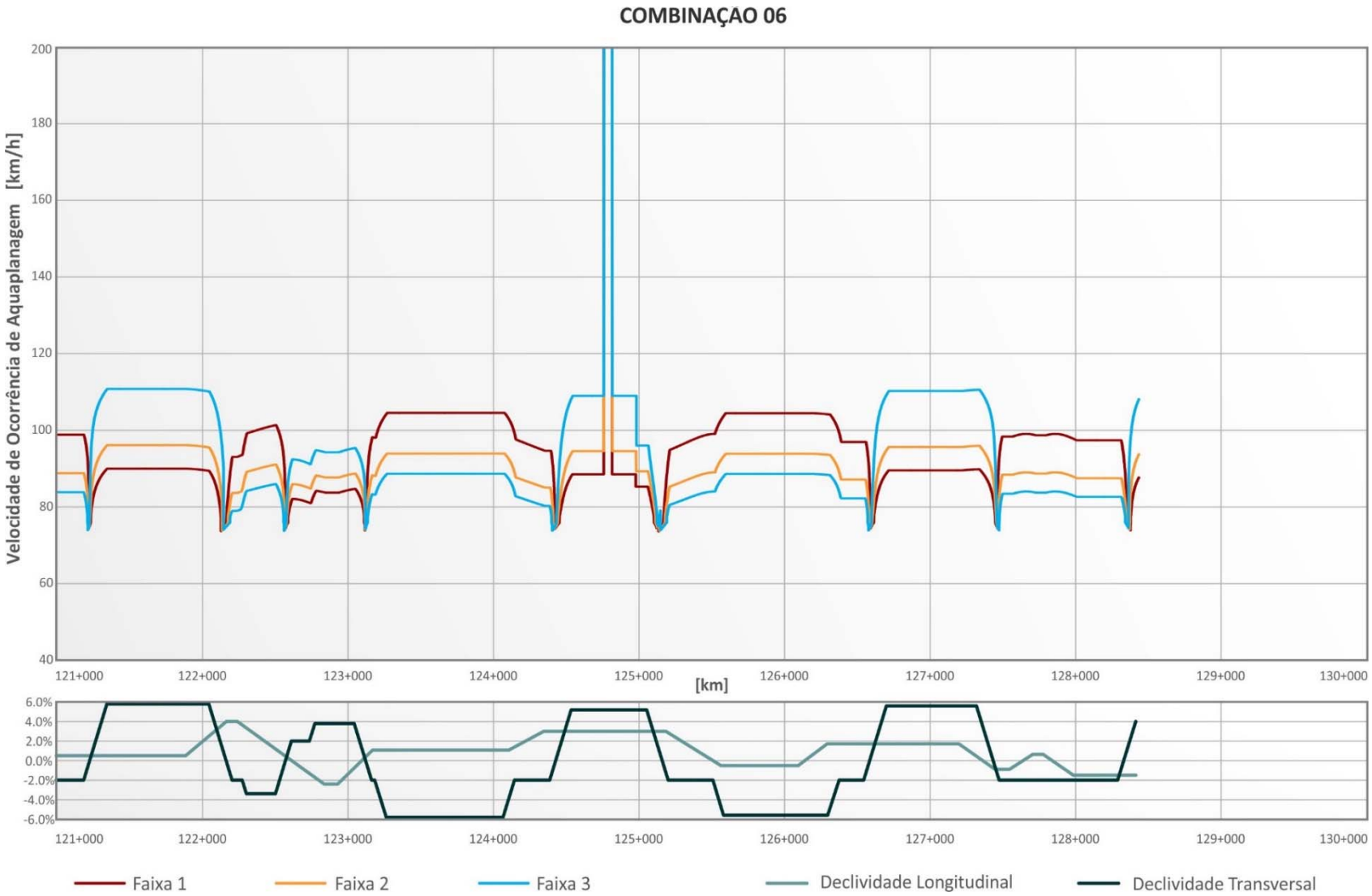


Figura 31 – Combinação 7 – km 85+000 a km 94+000.

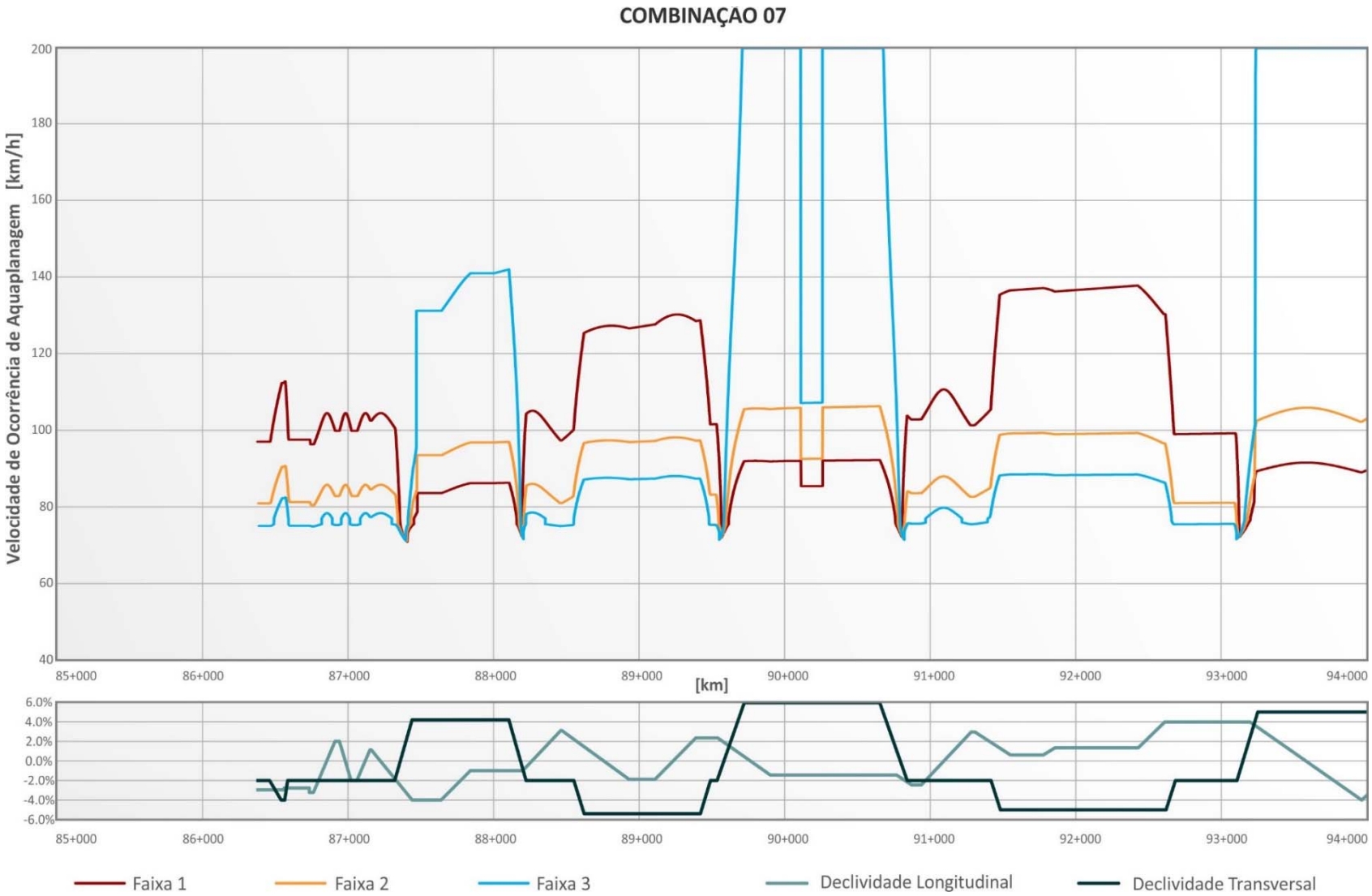


Figura 32 – Combinação 7 – km 94+000 a km 103+000.

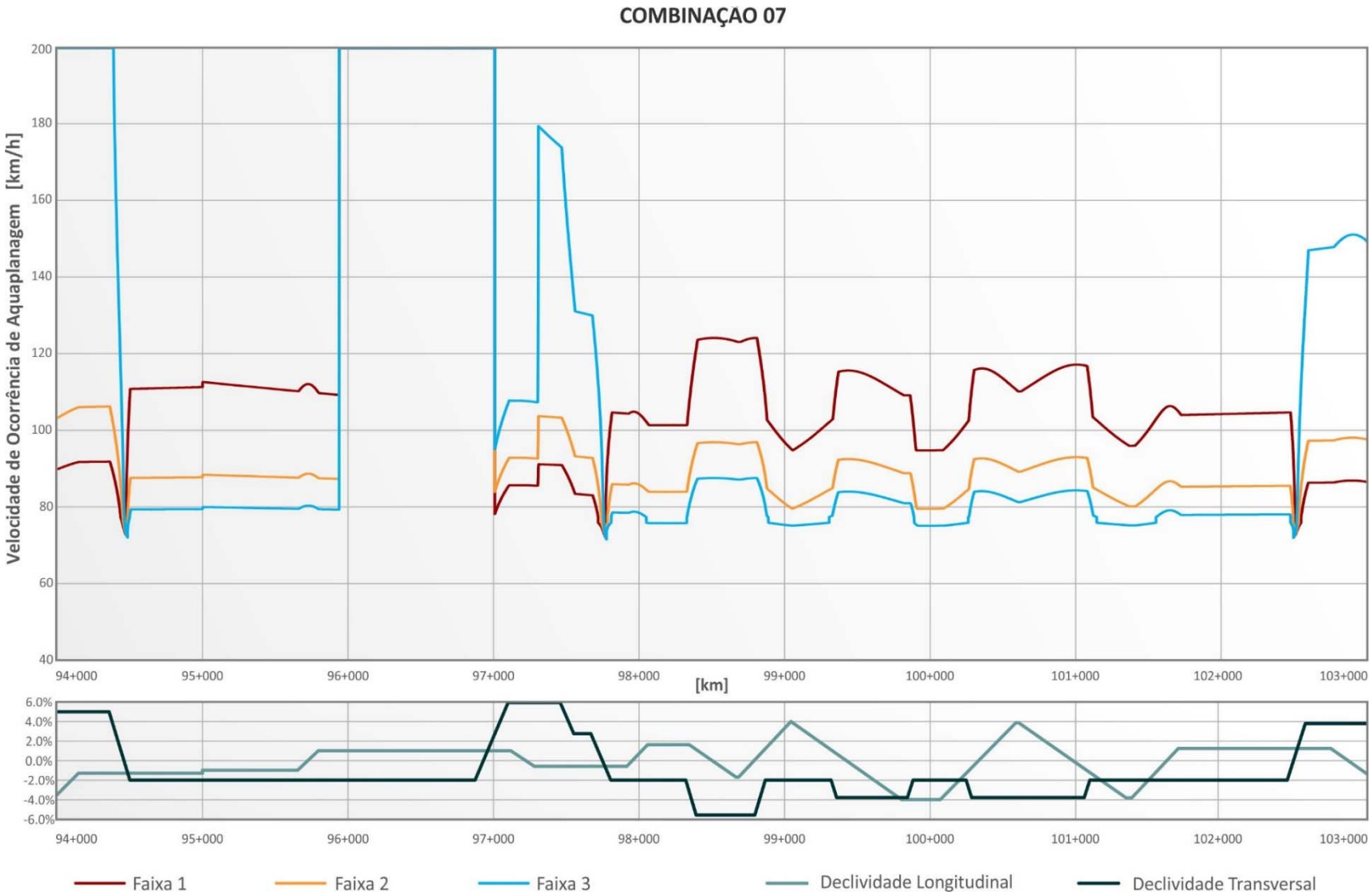


Figura 33 – Combinação 7 – km 103+000 a km 112+000.

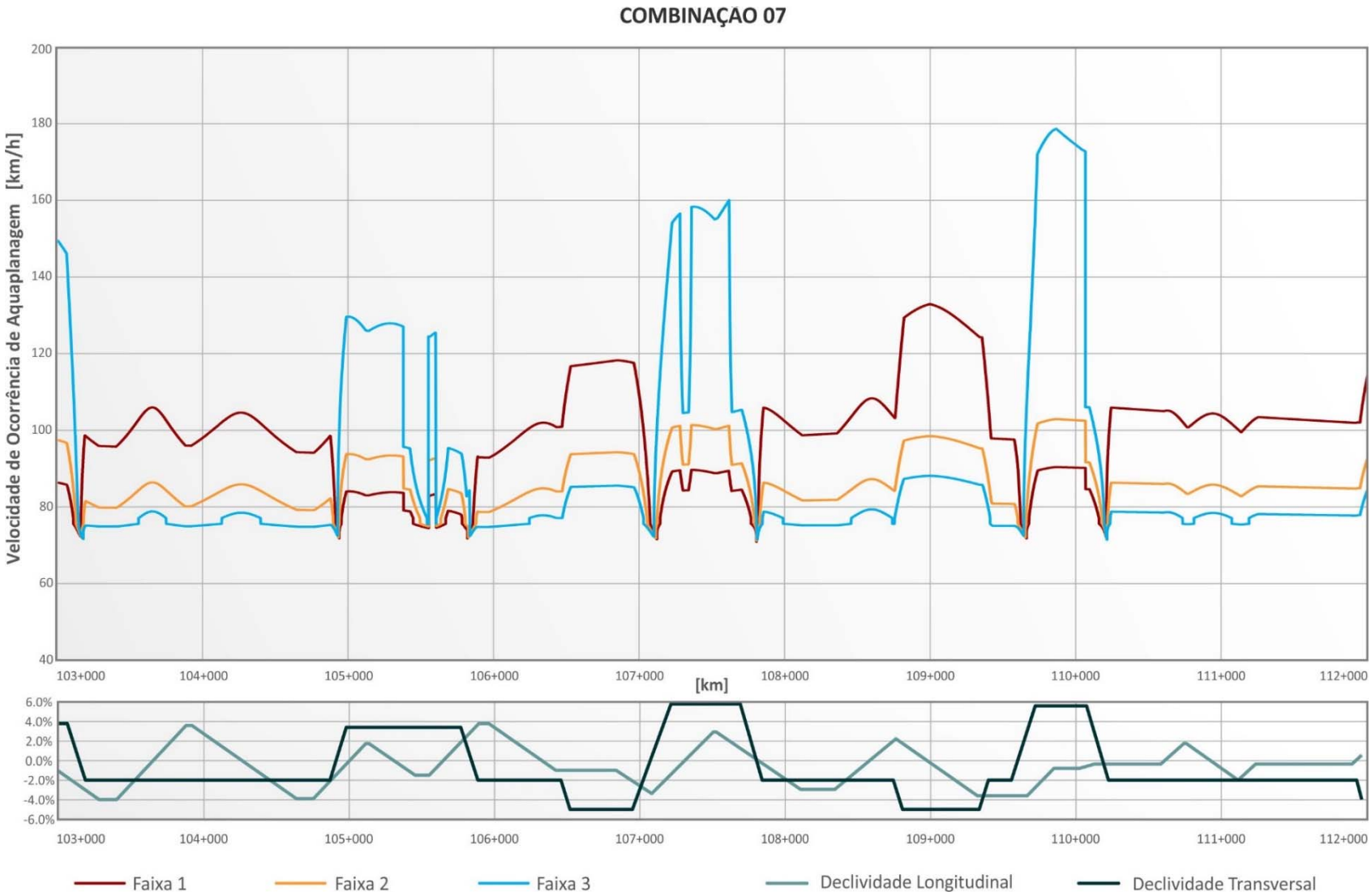


Figura 34 – Combinação 7 – km 112+000 a km 121+000.

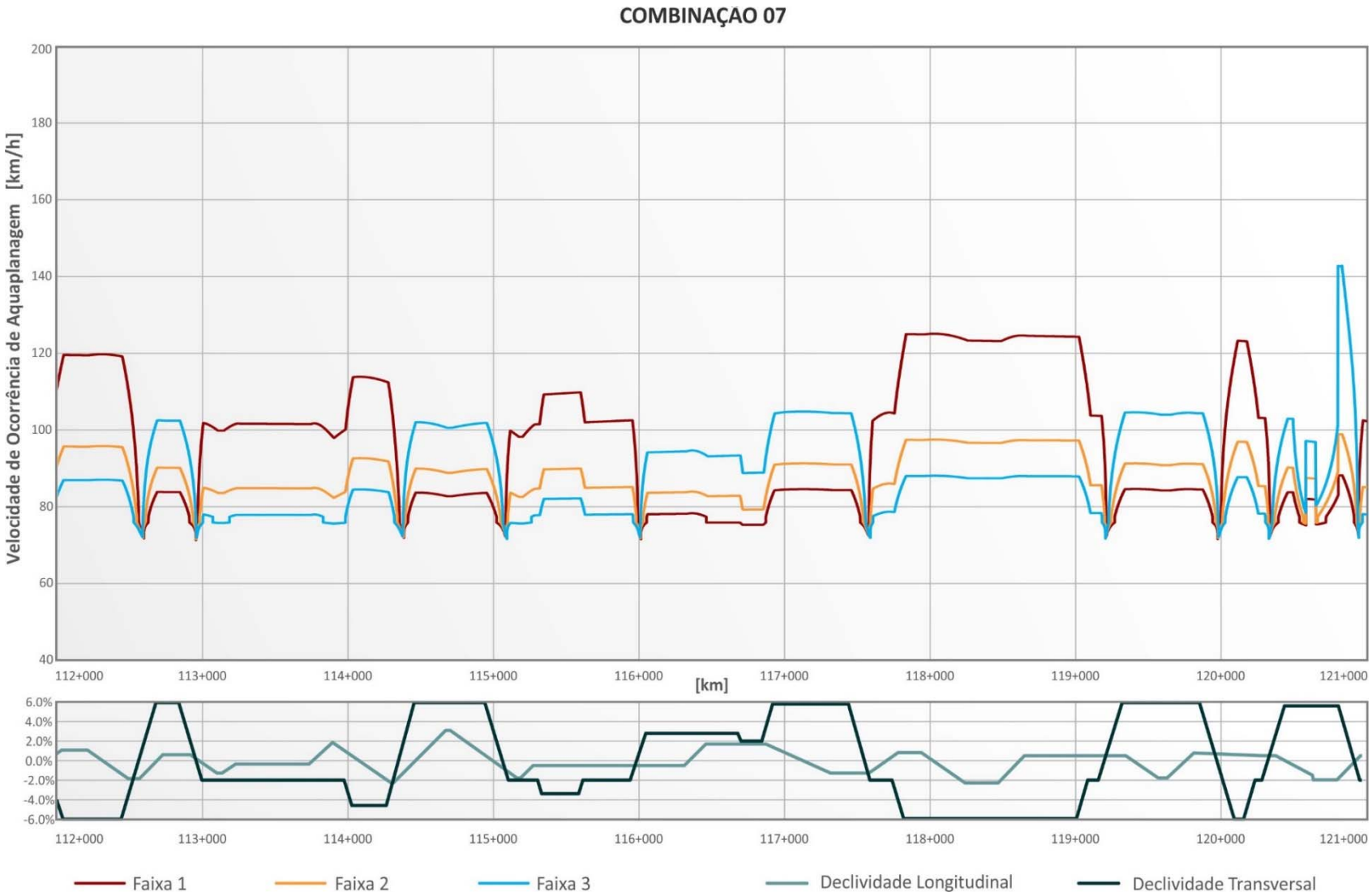


Figura 35 – Combinação 7 – km 121+000 a km 130+000.

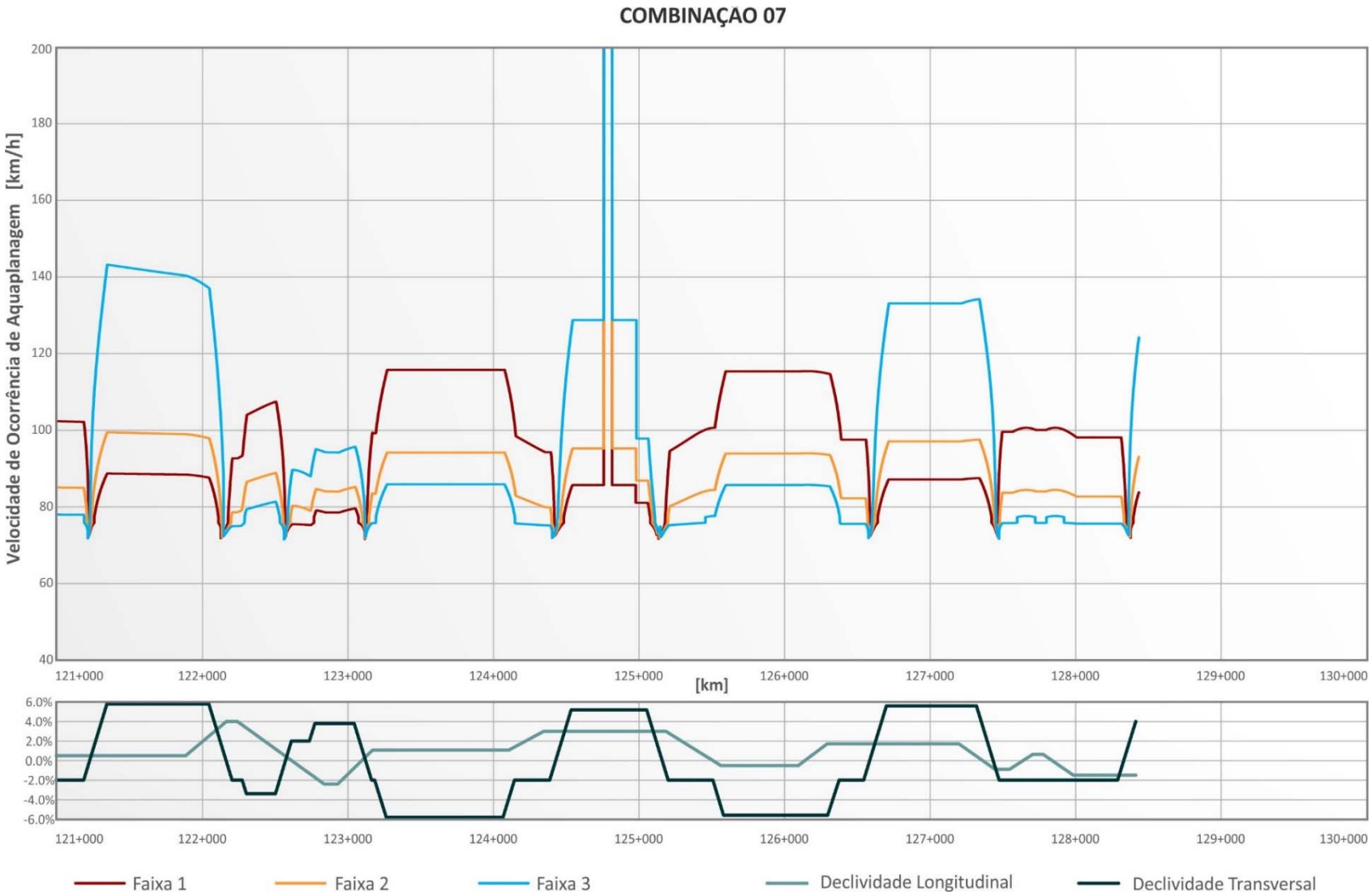


Figura 36 – Combinação 8 – km 85+000 a km 94+000.

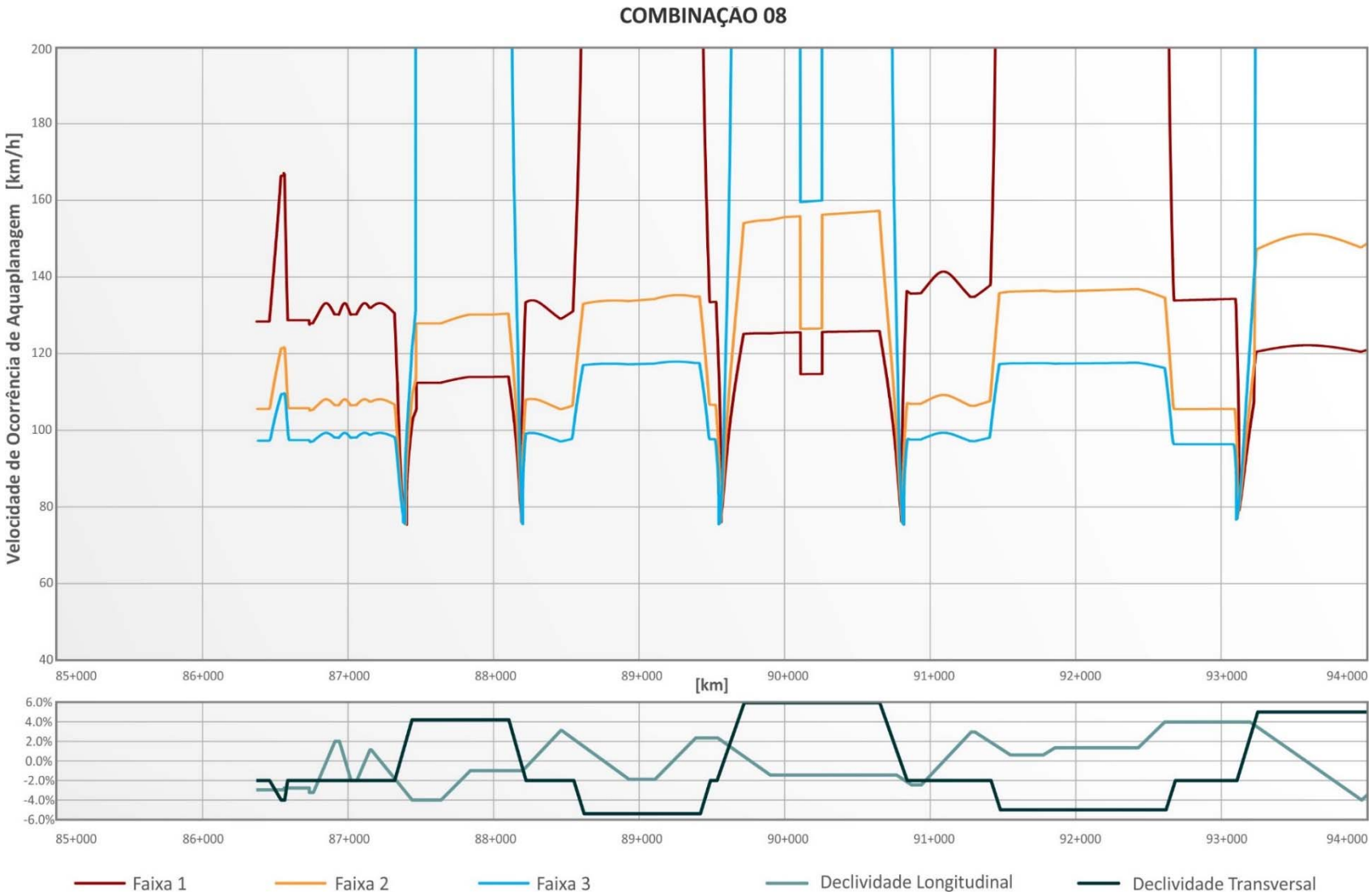


Figura 37 – Combinação 8 – km 94+000 a km 103+000.

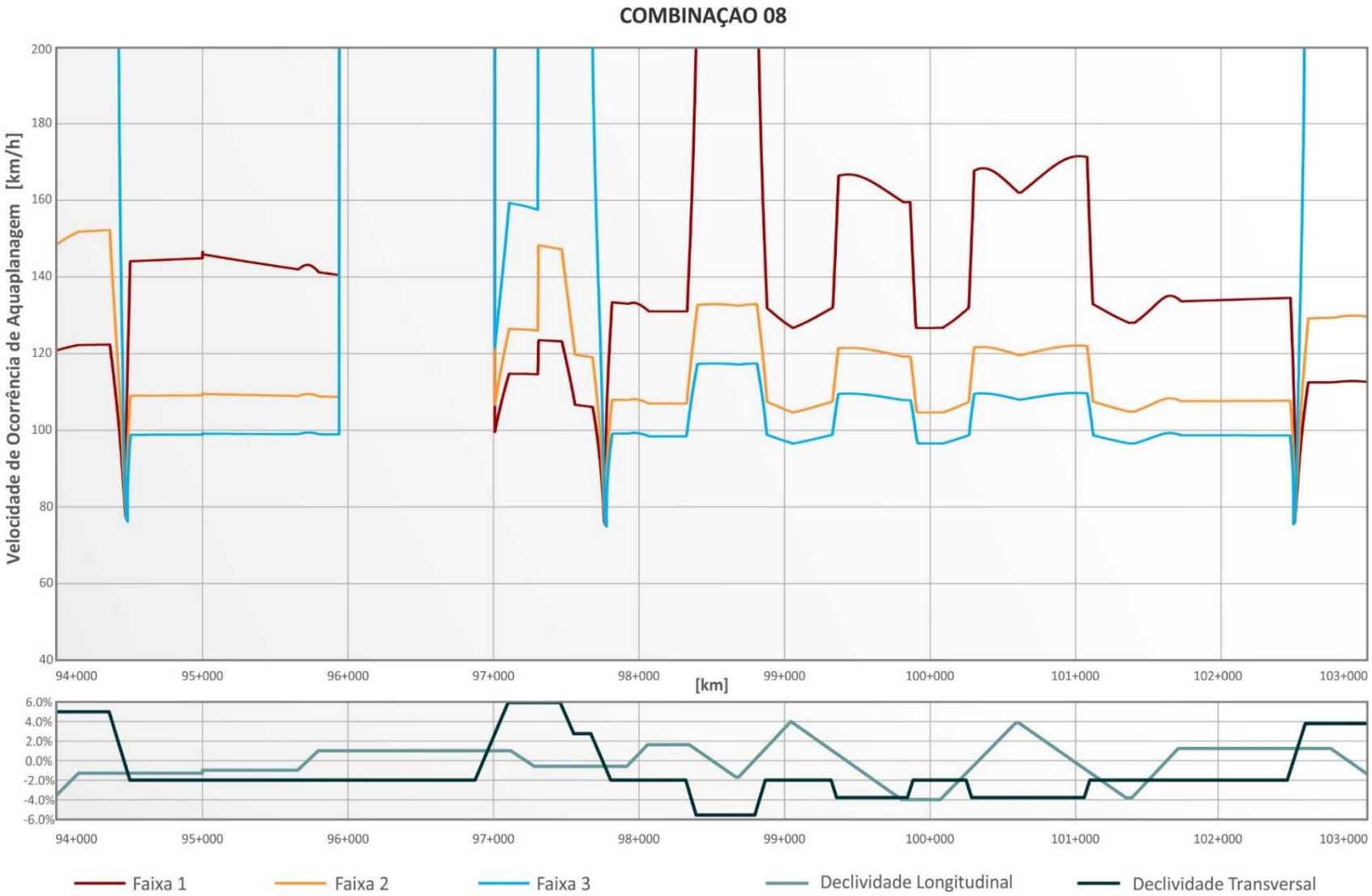


Figura 38 – Combinação 8 – km 103+000 a km 112+000.

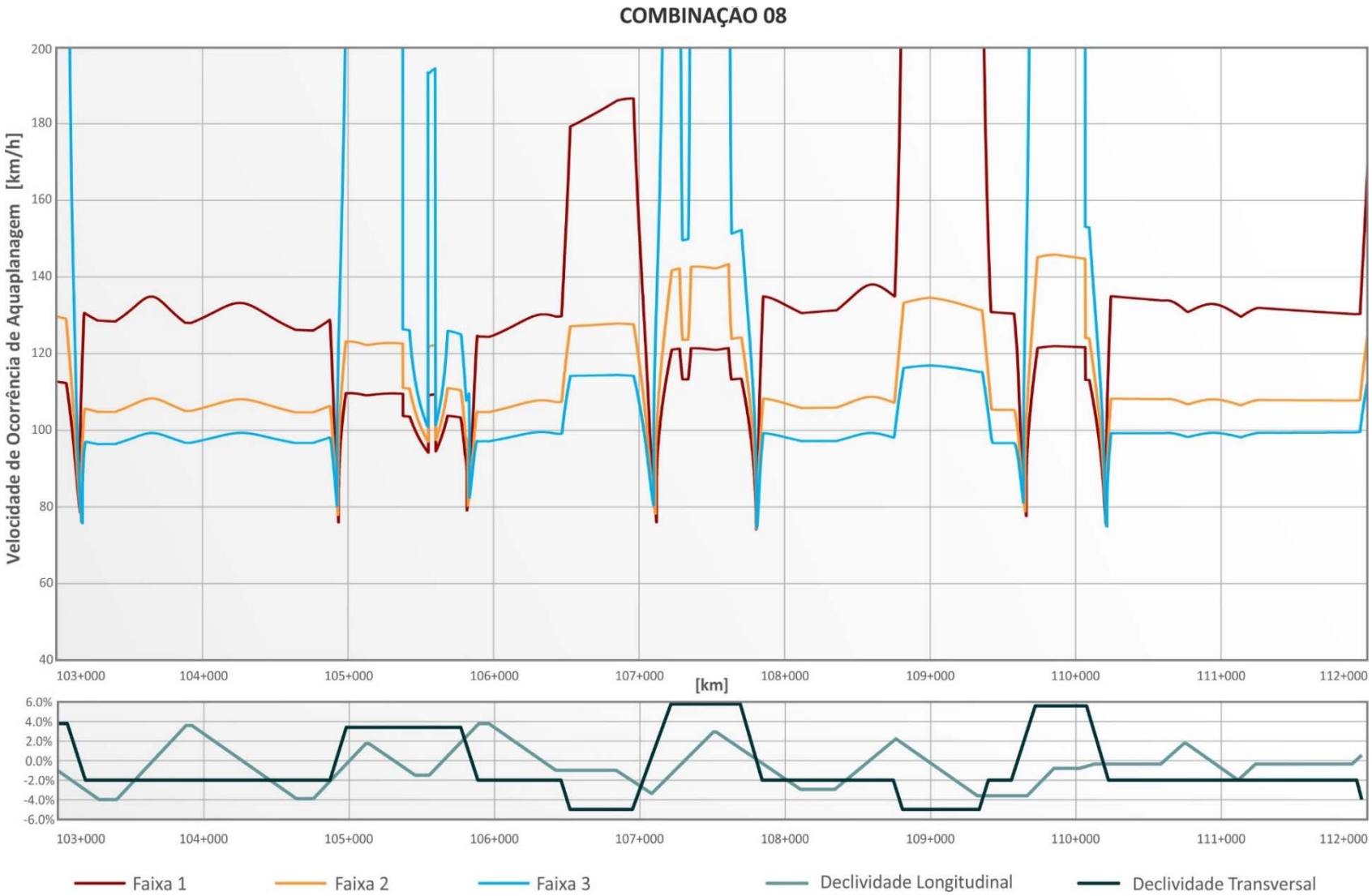


Figura 39 – Combinação 8 – km 112+000 a km 121+000.

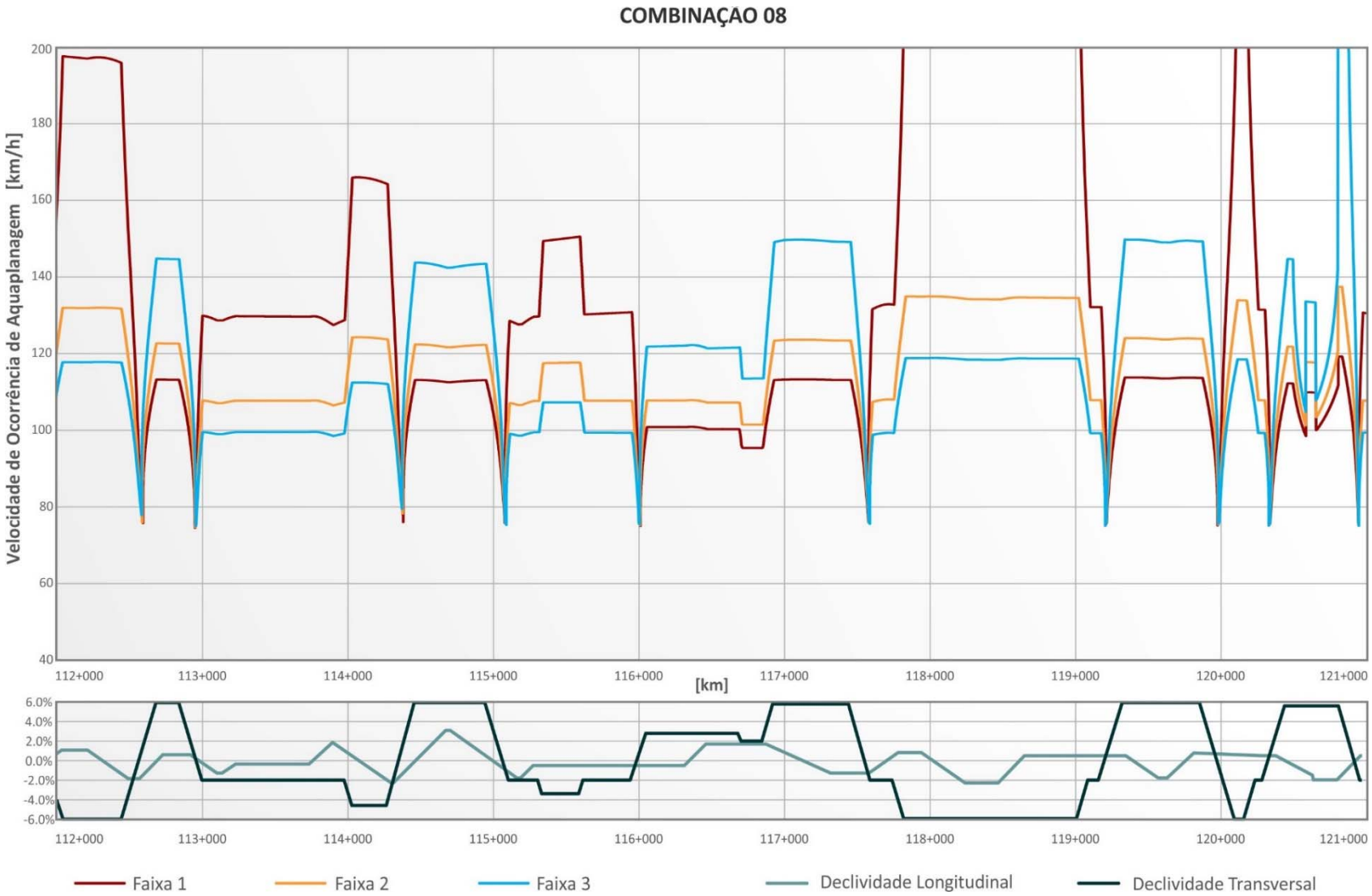


Figura 40 – Combinação 8 – km 121+000 a km 130+000.

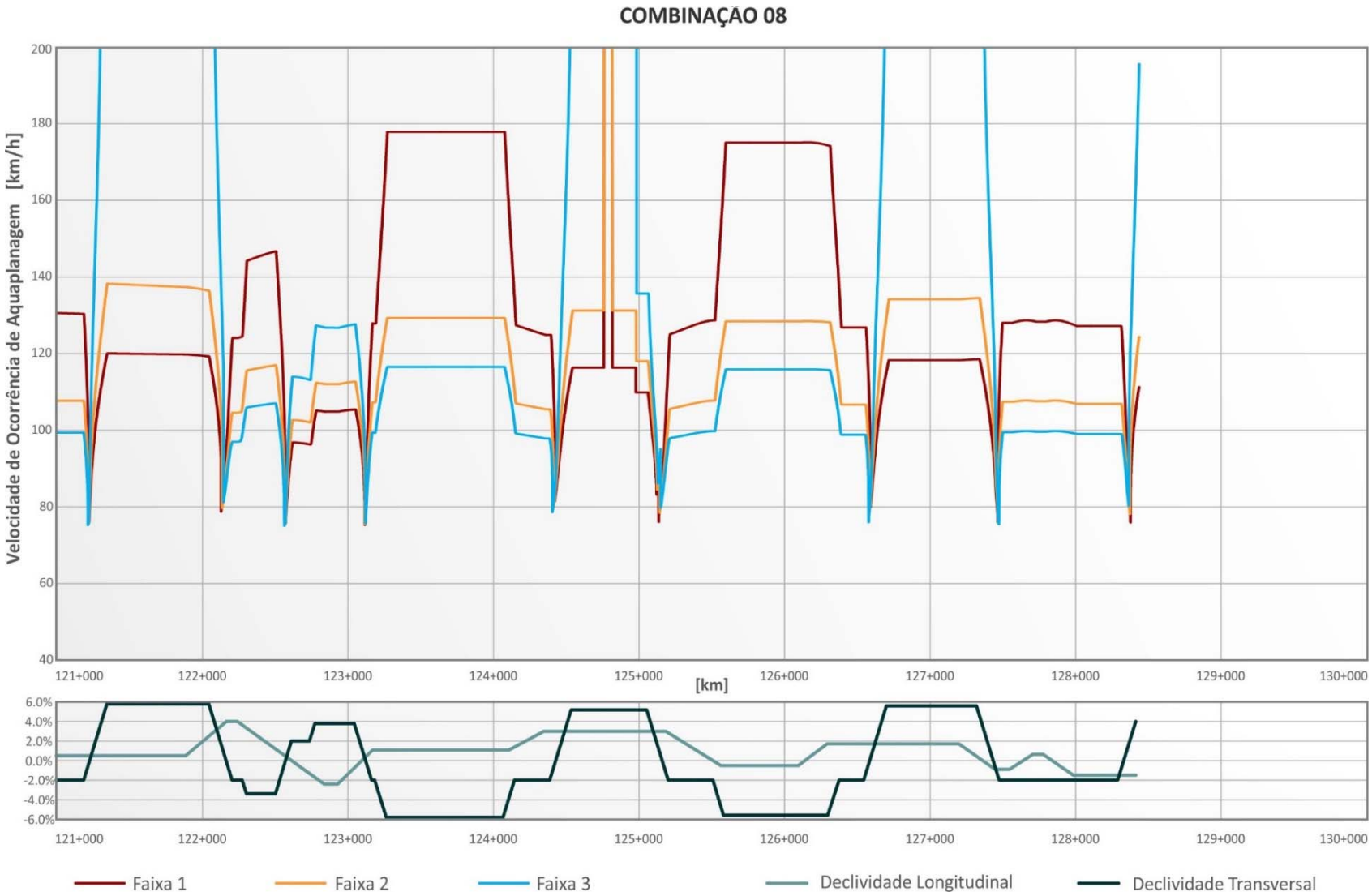


Figura 41 – Combinação 9 – km 85+000 a km 94+000.

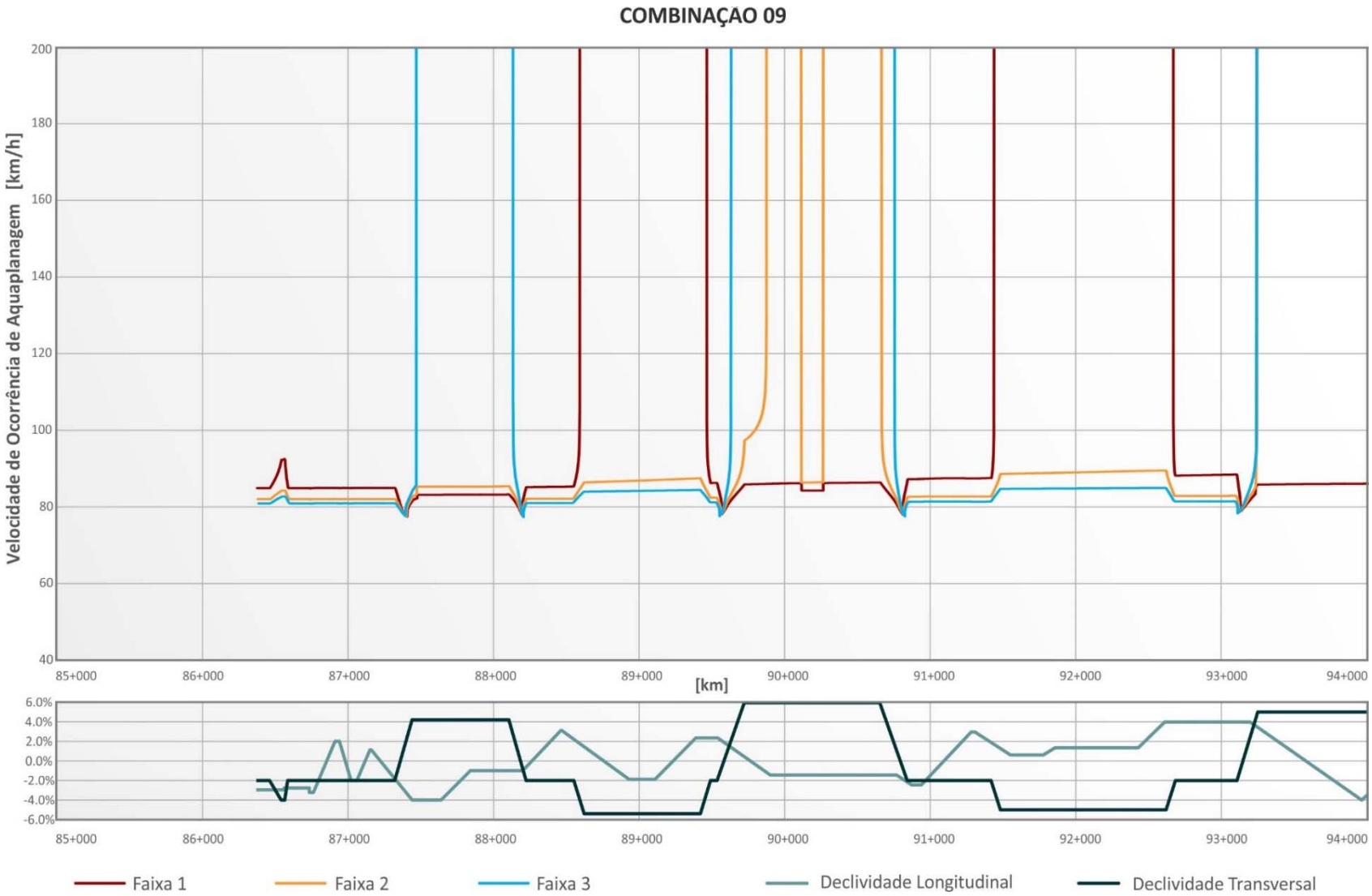


Figura 42 – Combinação 9 – km 94+000 a km 103+000.

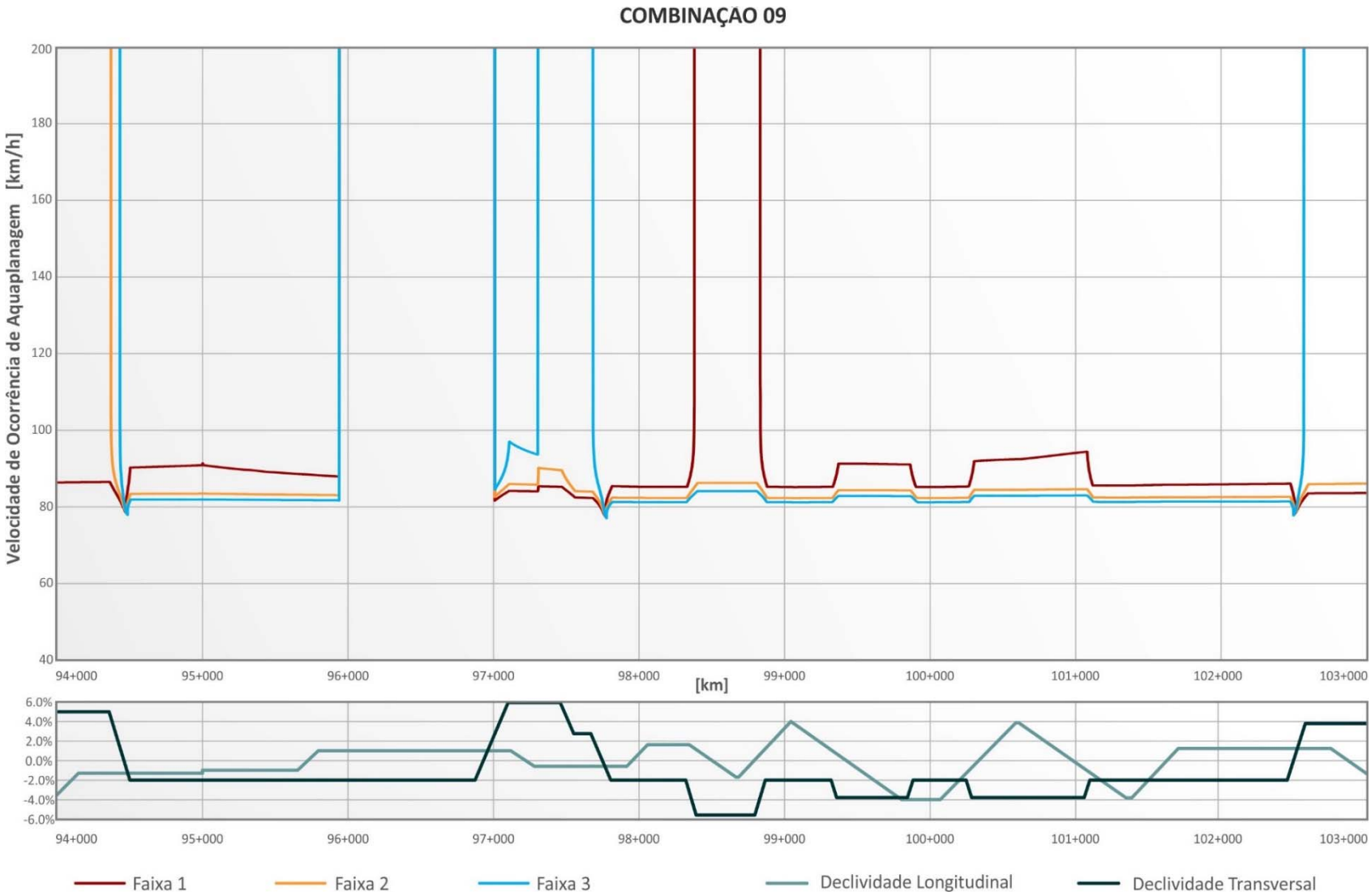


Figura 43 – Combinação 9 – km 103+000 a km 112+000.

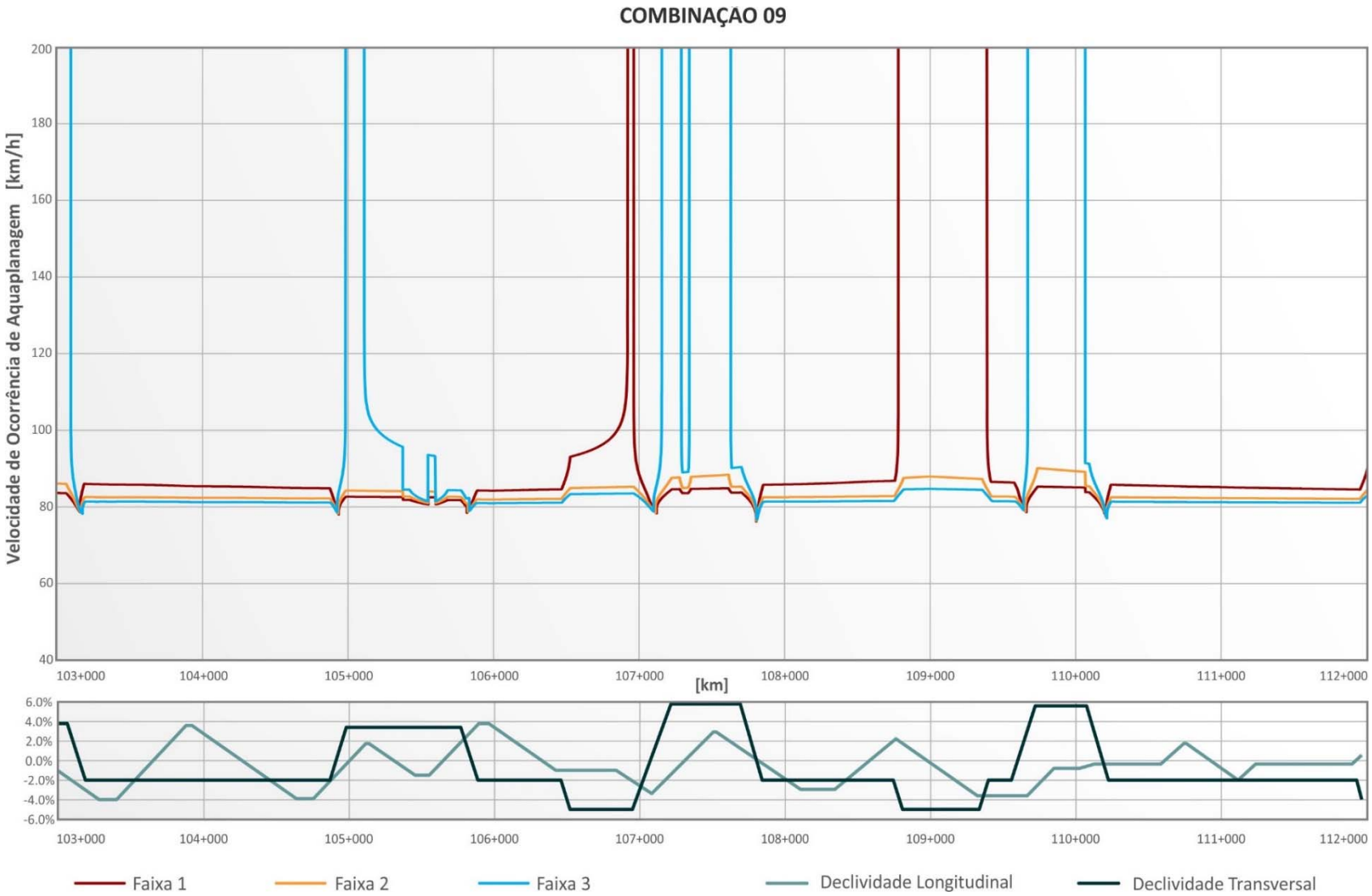


Figura 44 – Combinação 9 – km 112+000 a km 121+000.

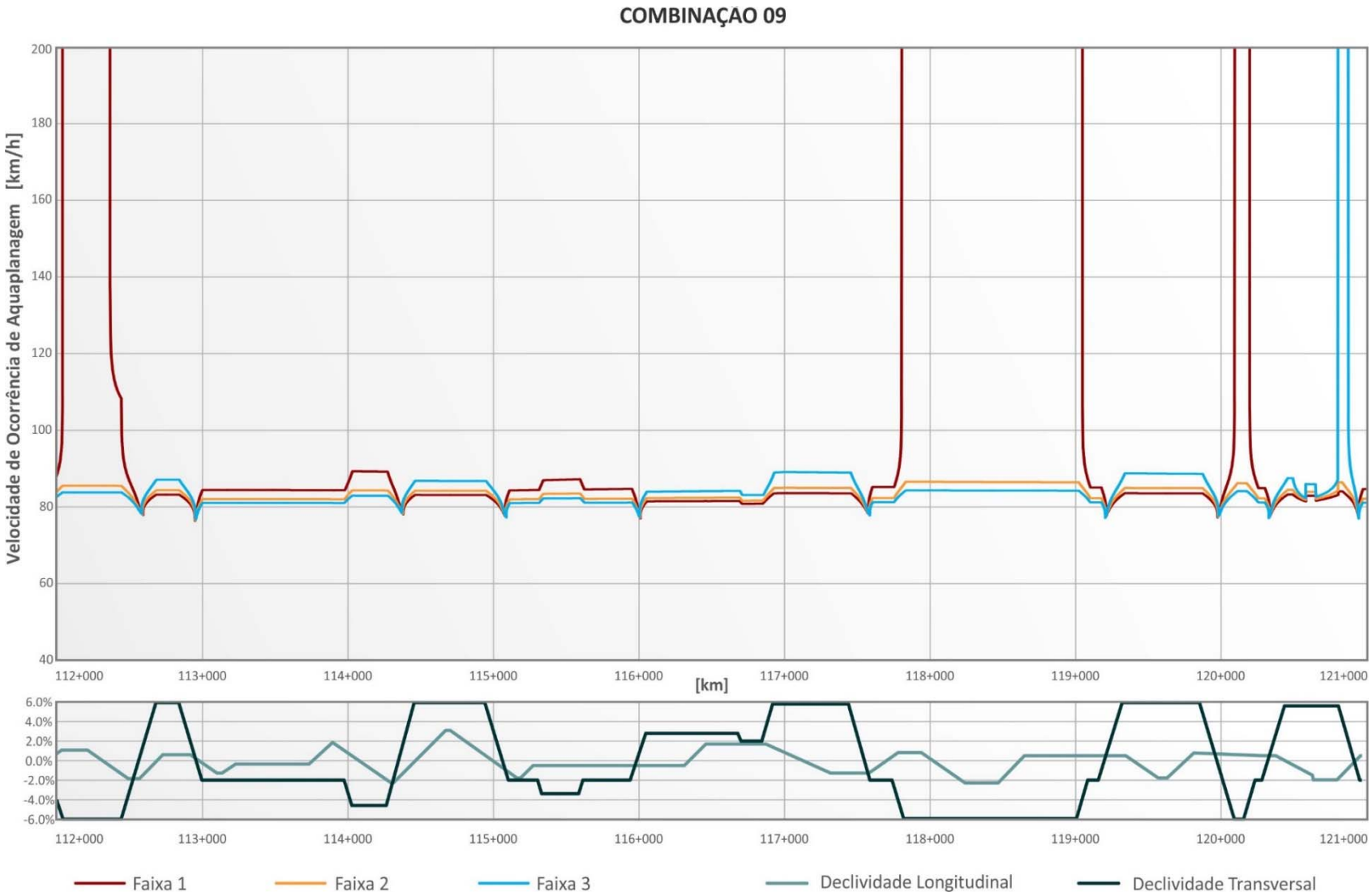


Figura 45 – Combinação 9 – km 121+000 a km 130+000.

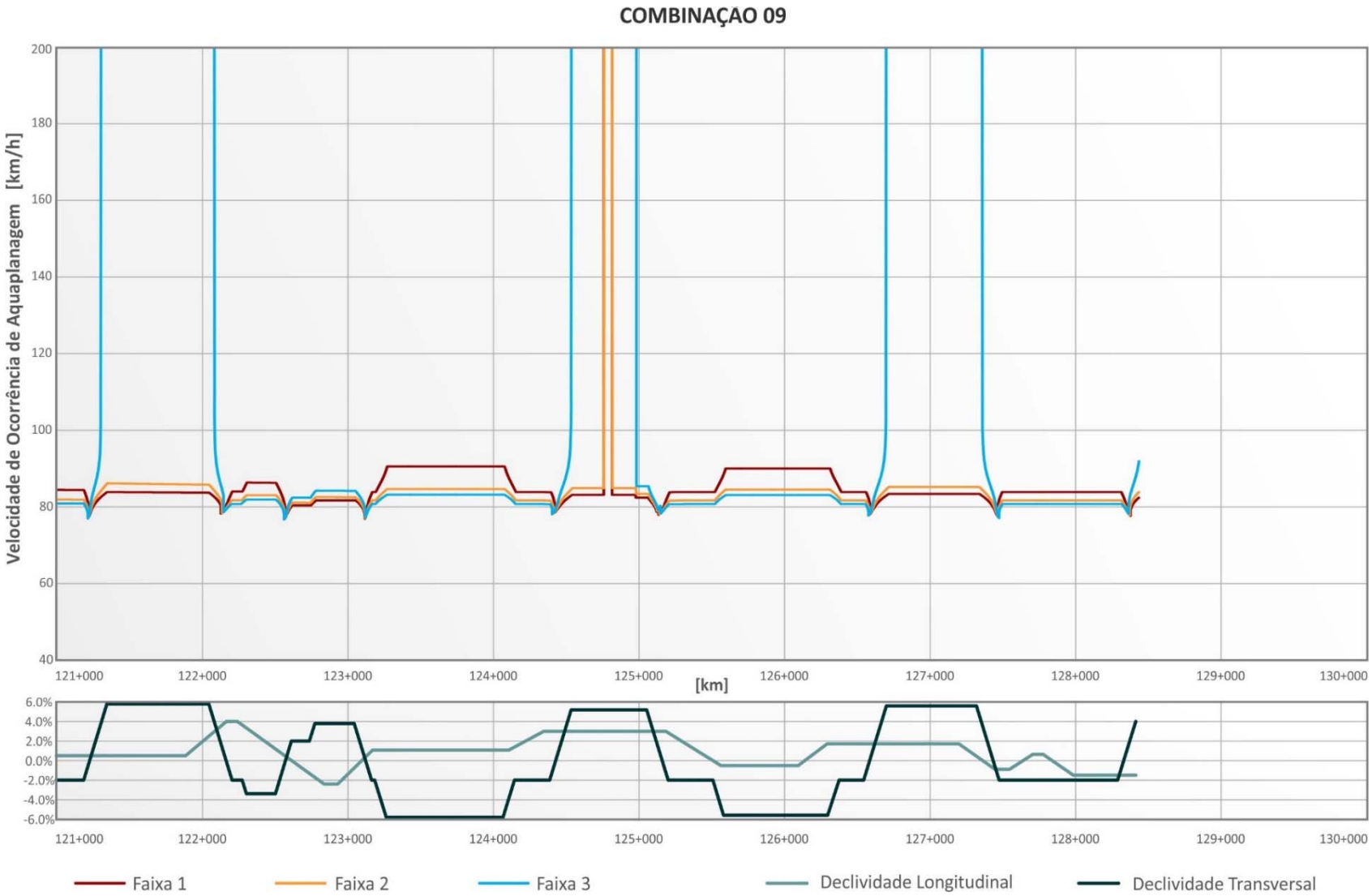


Figura 46 – Combinação 10 – km 85+000 a km 94+000.

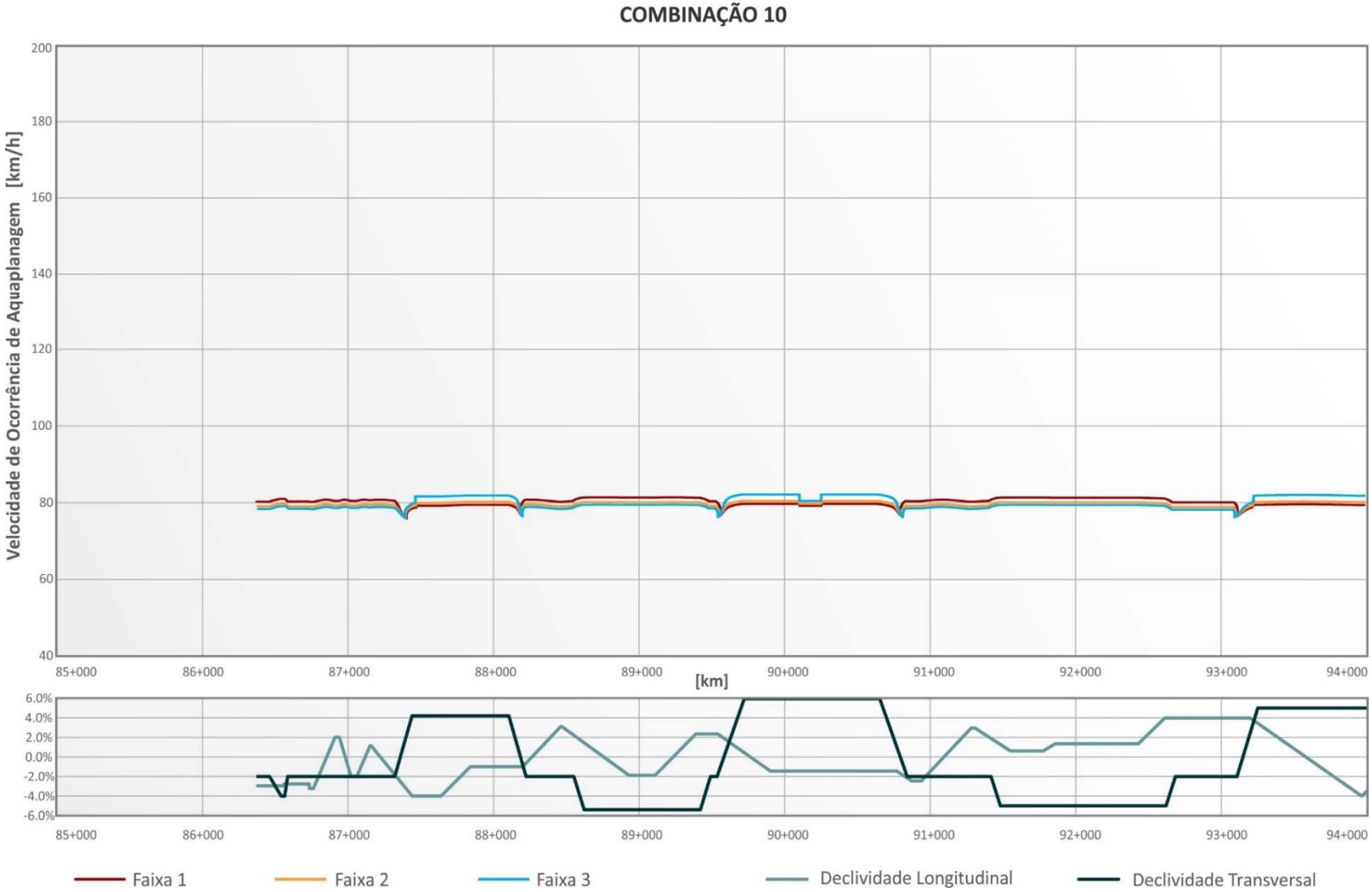


Figura 47 – Combinação 10 – km 94+000 a km 103+000.

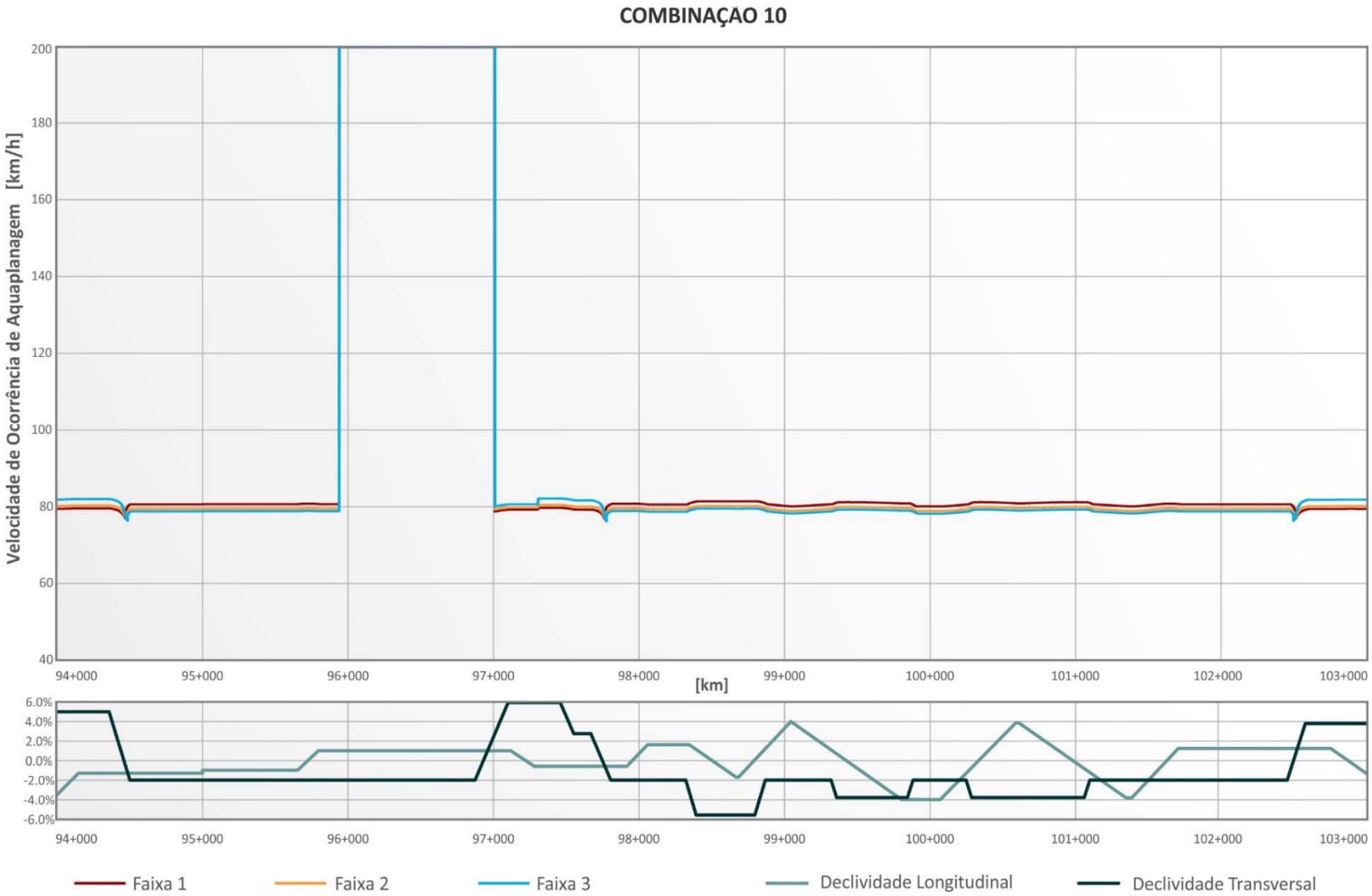


Figura 48 – Combinação 10 – km 103+000 a km 112+000.

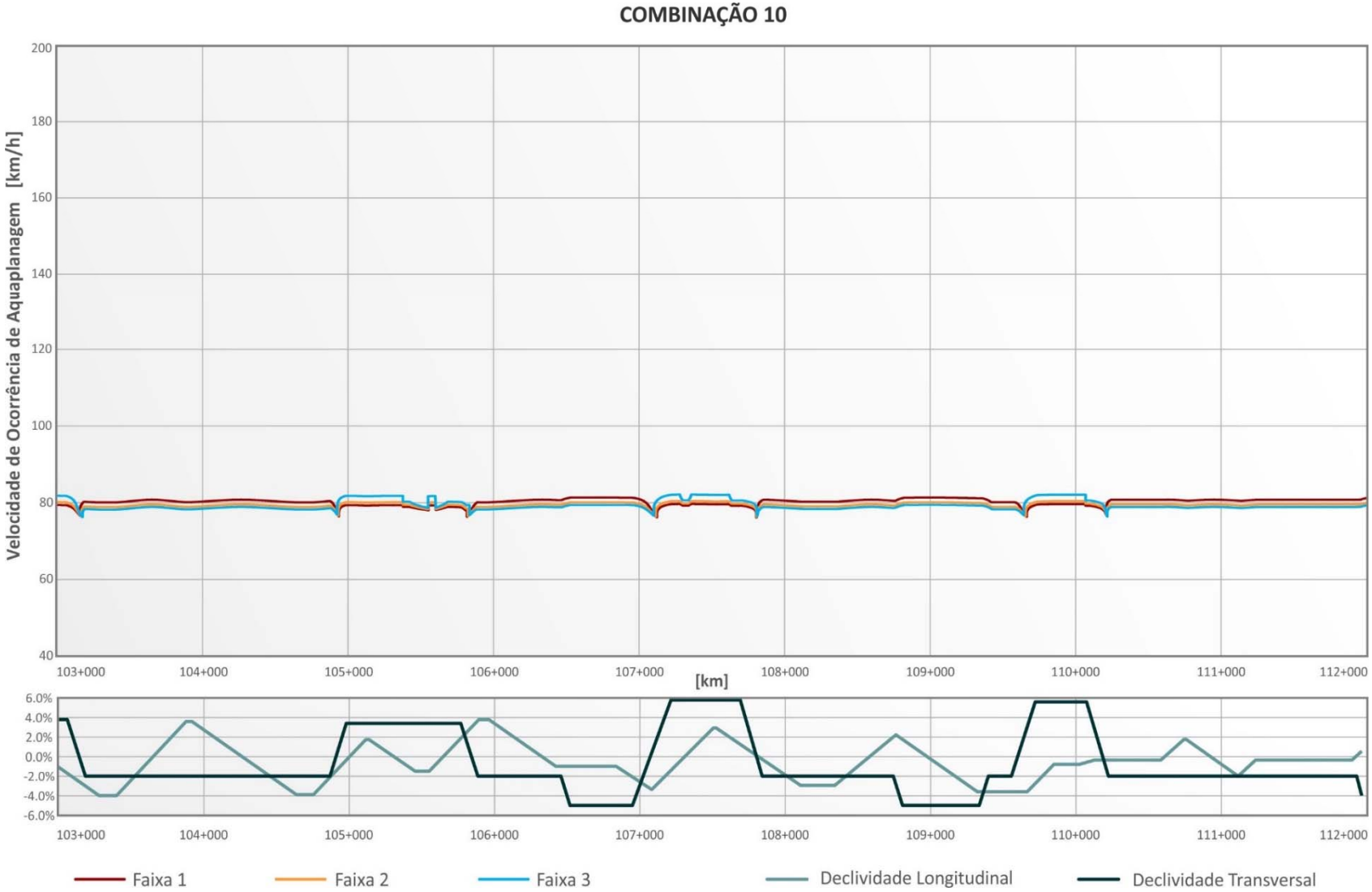


Figura 49 – Combinação 10 – km 112+000 a km 121+000.

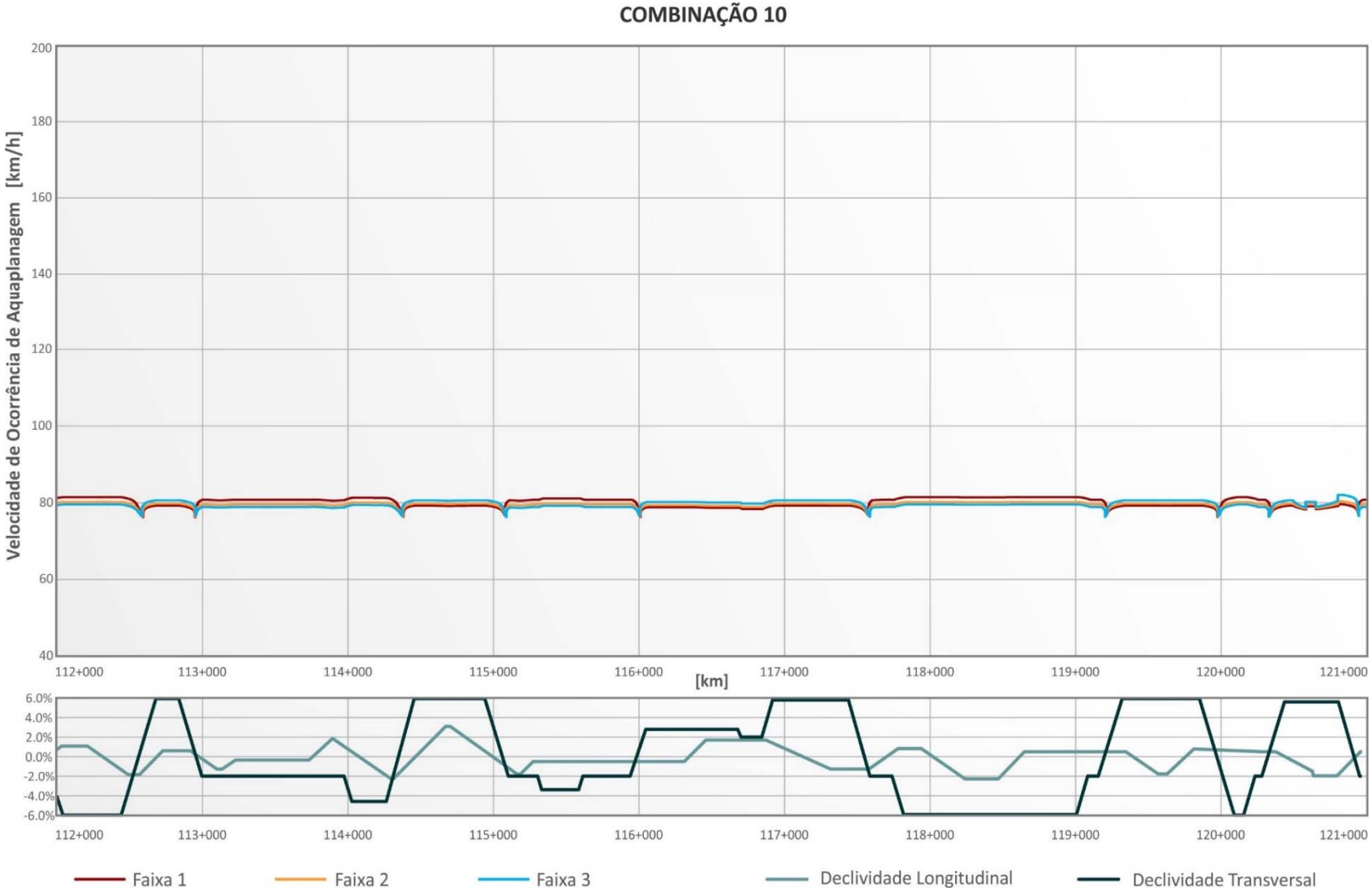


Figura 50 – Combinação 10 – km 121+000 a km 130+000.

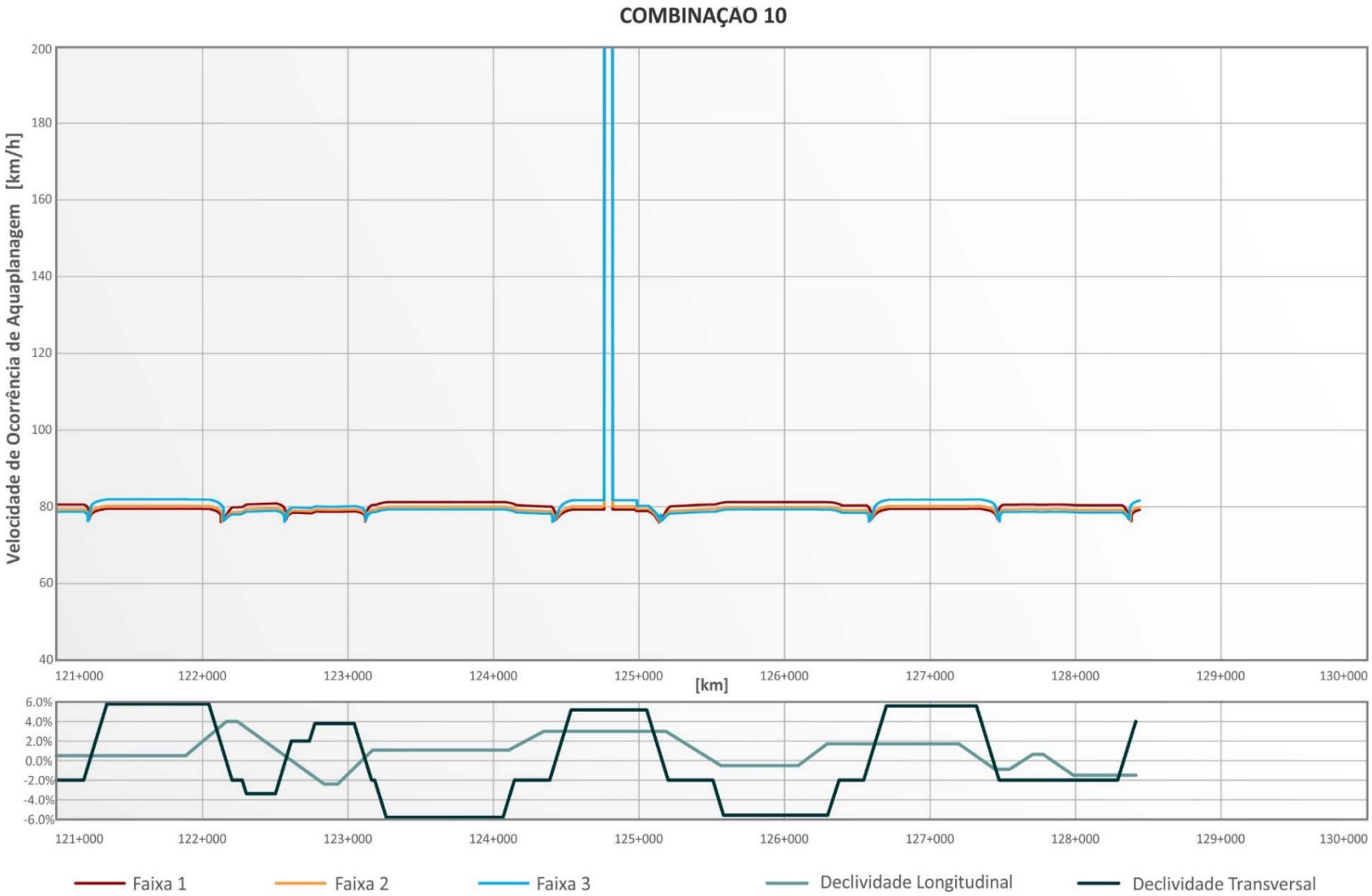


Figura 51 – Combinação 11 – km 85+000 a km 94+000.

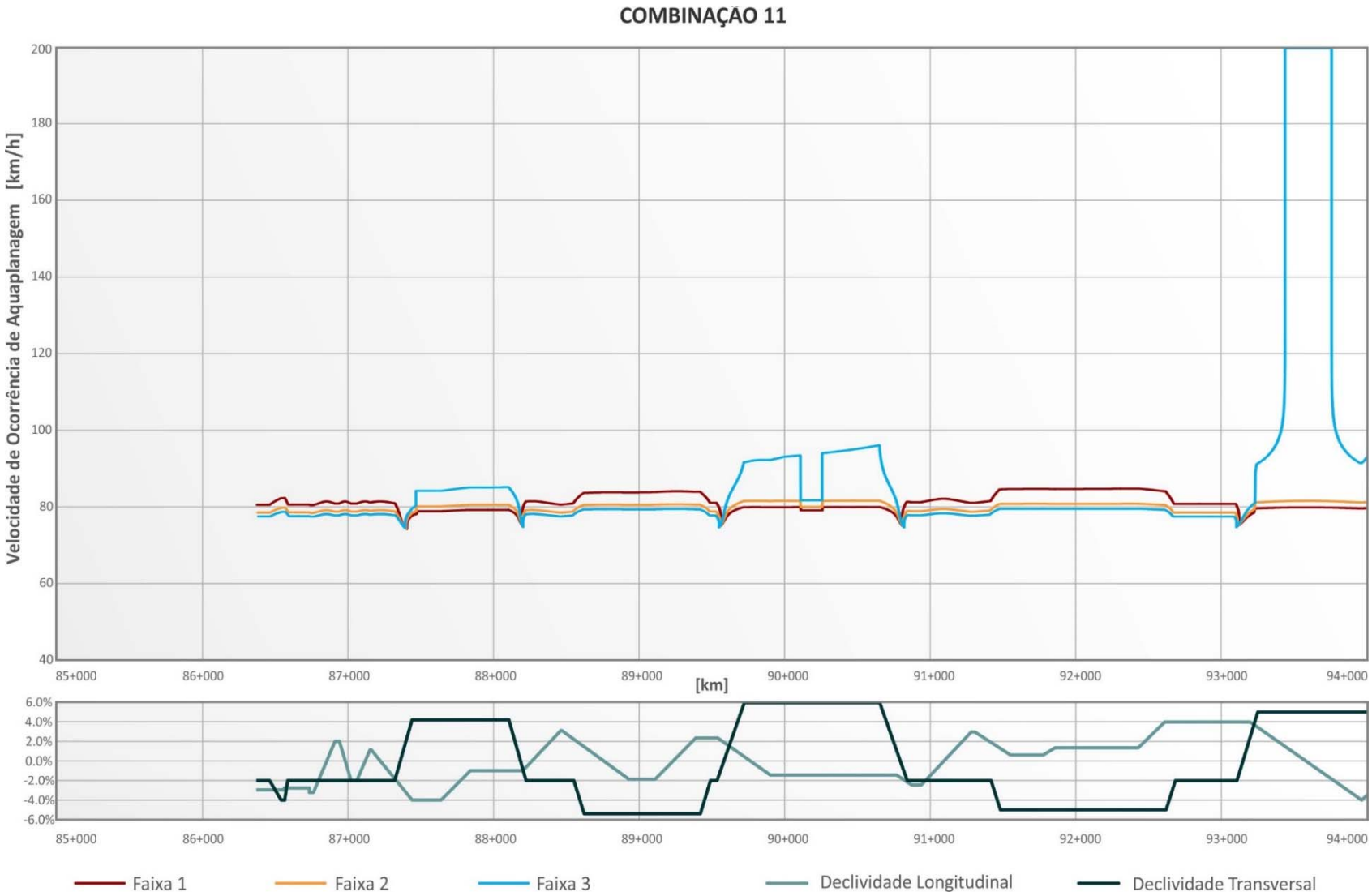


Figura 52 – Combinação 11 – km 94+000 a km 103+000.

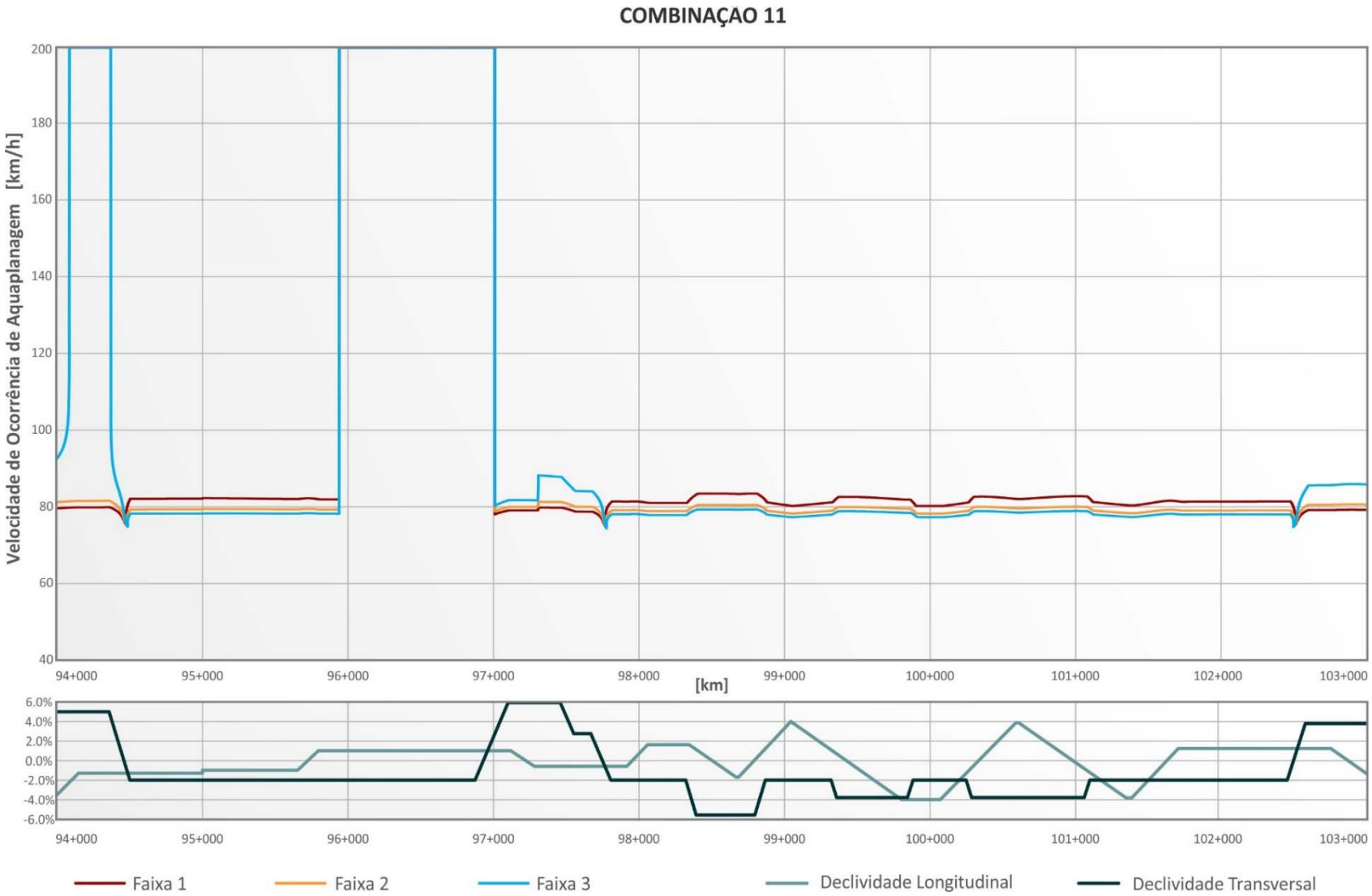


Figura 53 – Combinação 11 – km 103+000 a km 112+000.

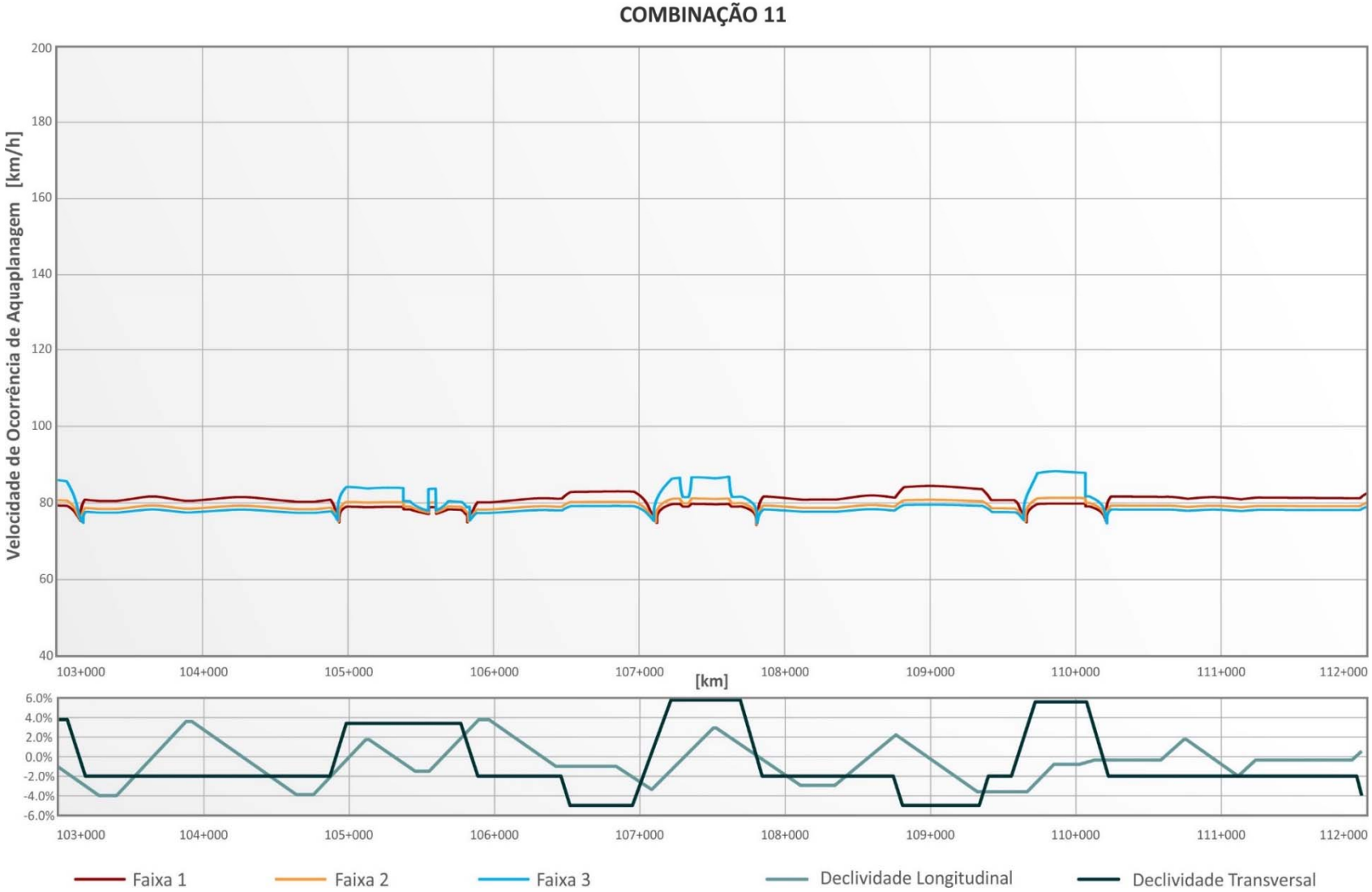


Figura 54 – Combinação 11 – km 112+000 a km 121+000.

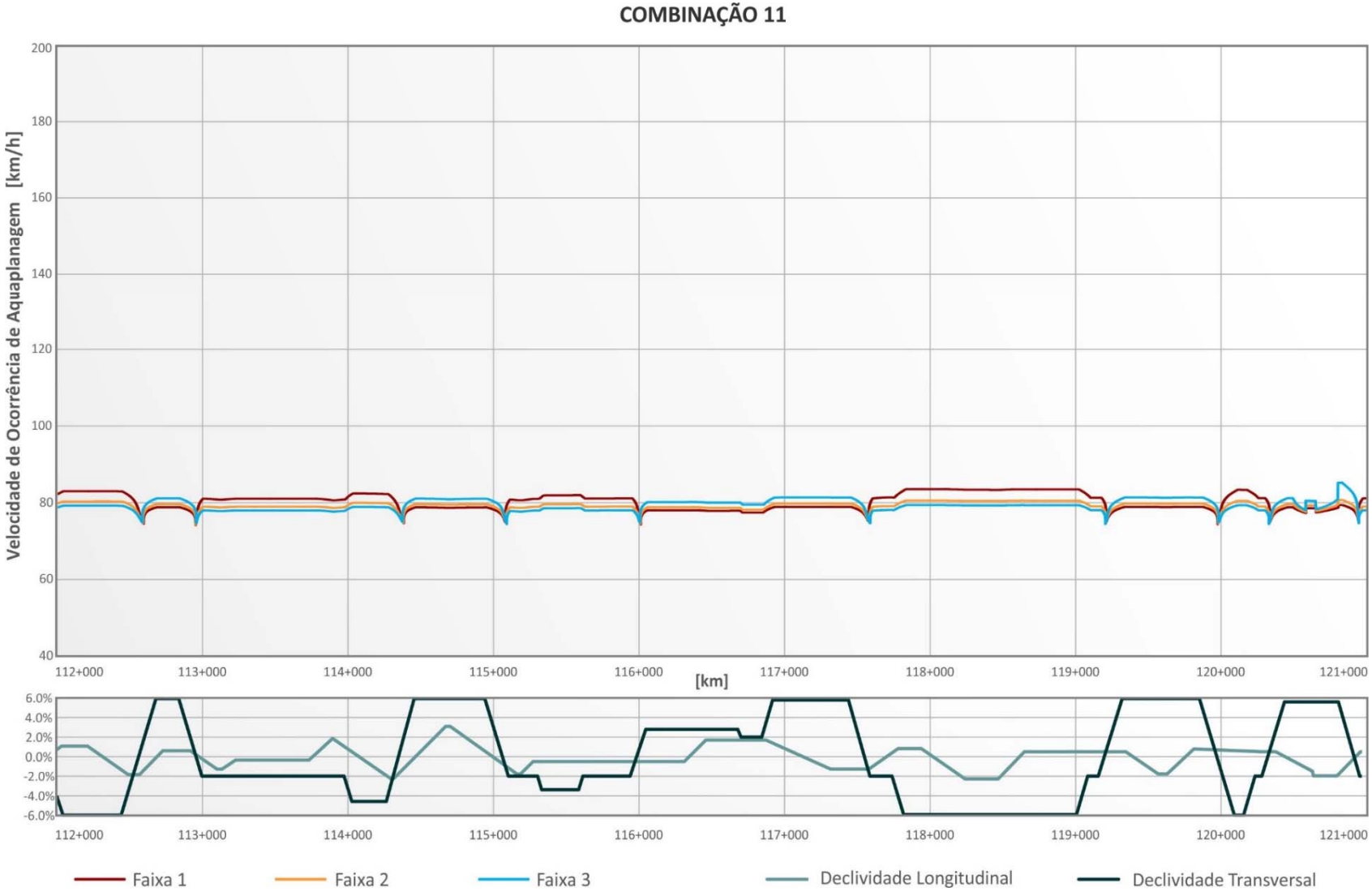


Figura 55 – Combinação 11 – km 121+000 a km 130+000.

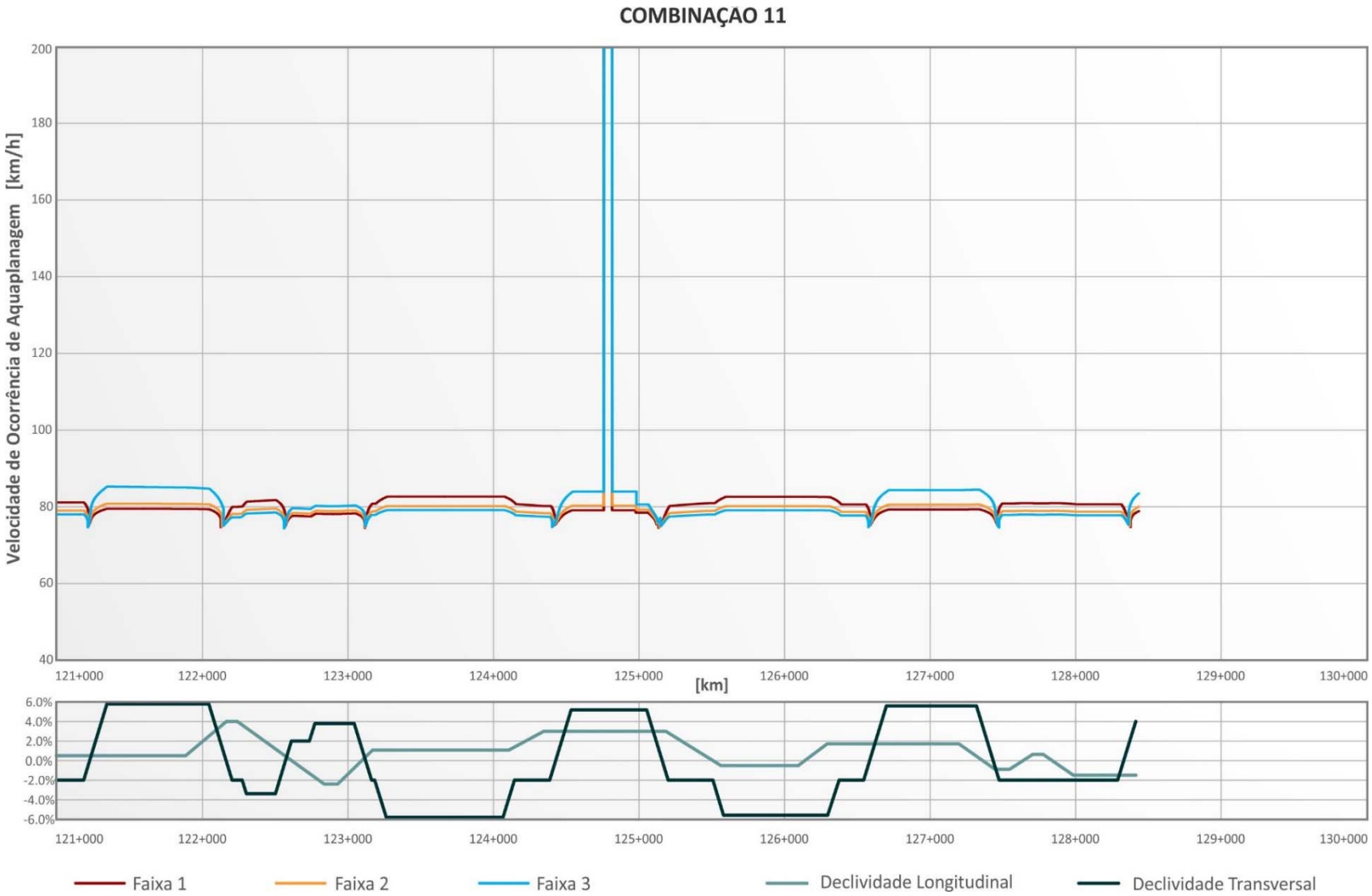


Figura 56 – Combinação 12 – km 85+000 a km 94+000.

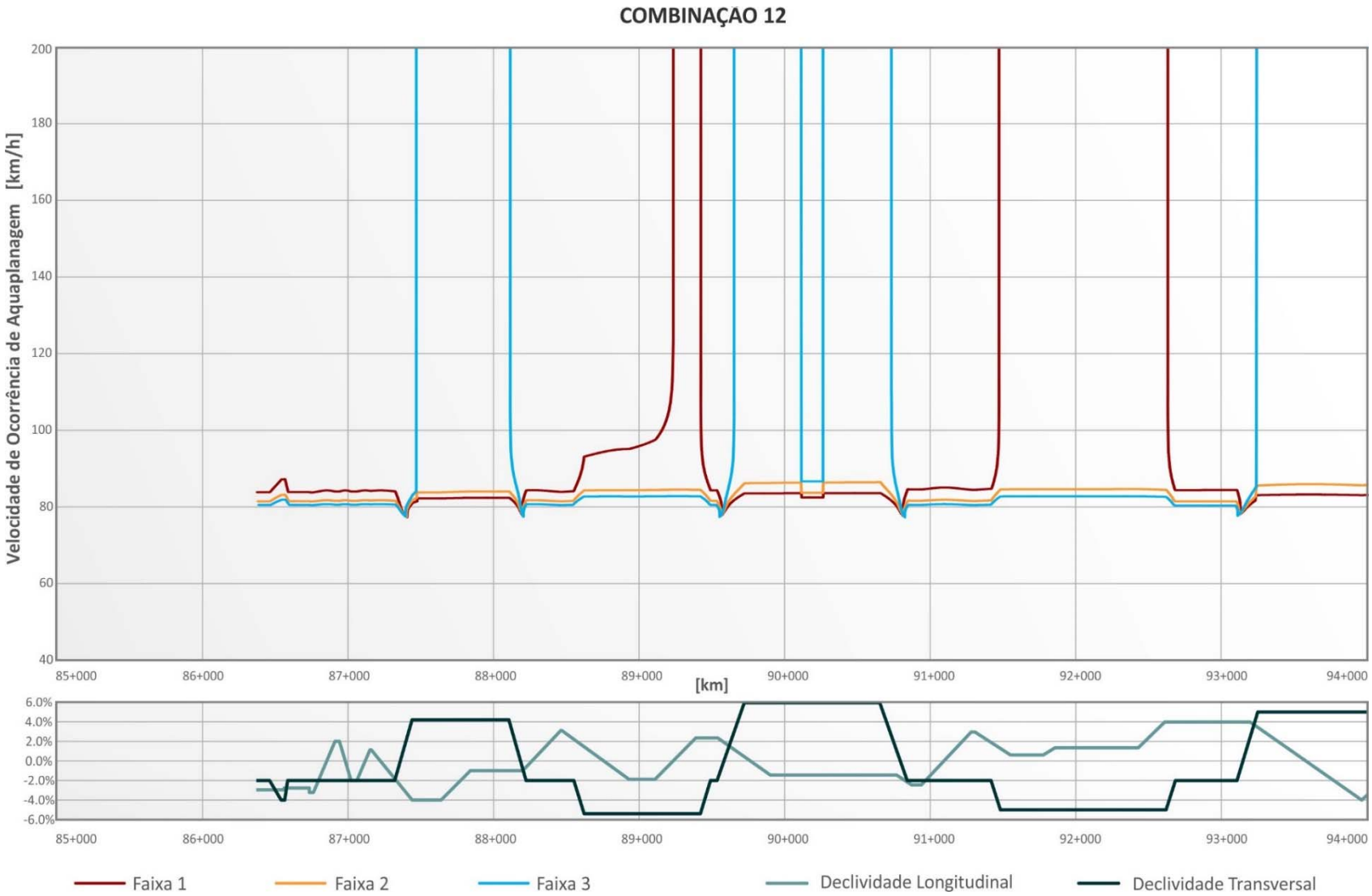


Figura 57 – Combinação 12 – km 94+000 a km 103+000.

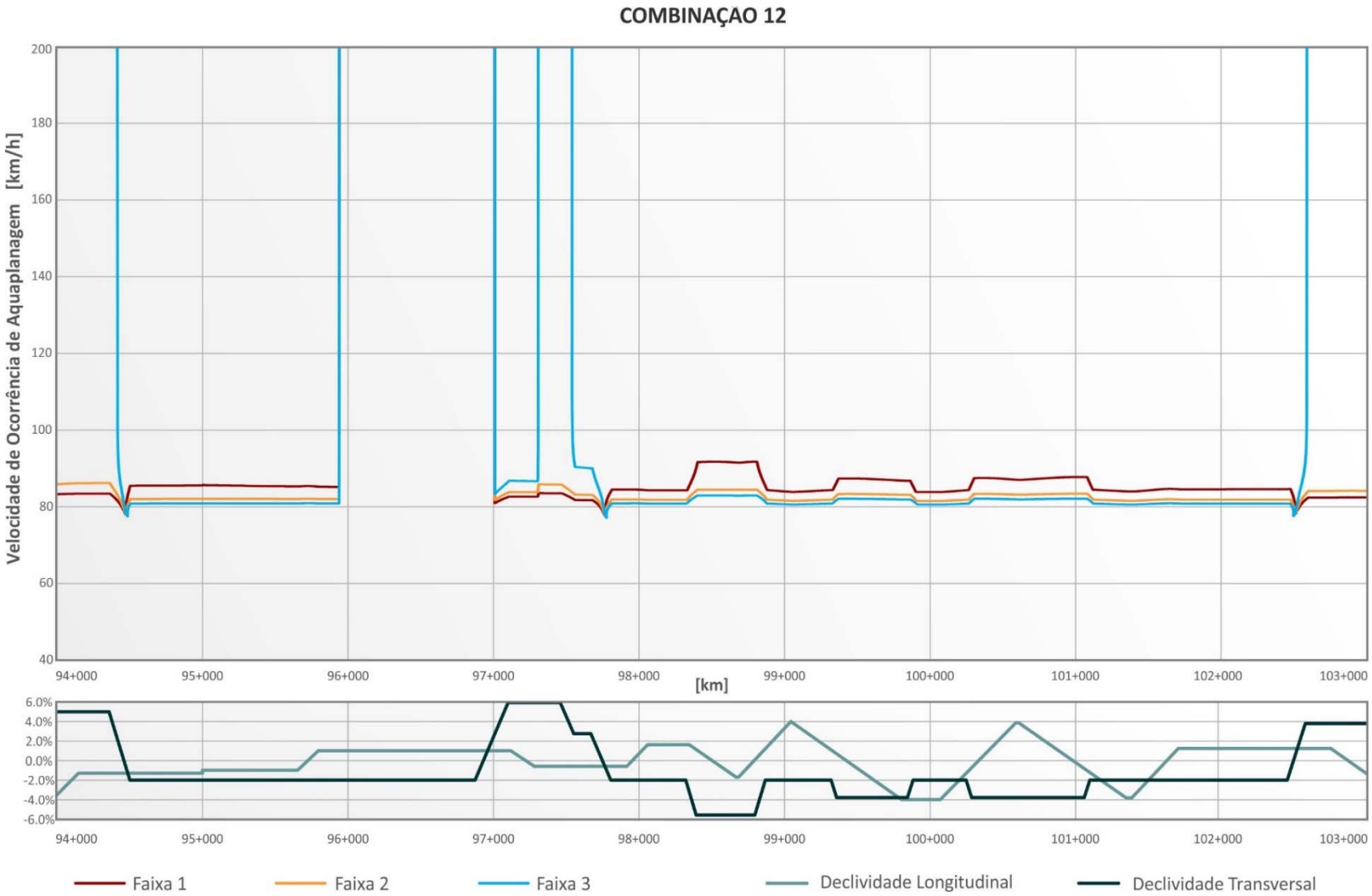


Figura 58 – Combinação 12 – km 103+000 a km 112+000.

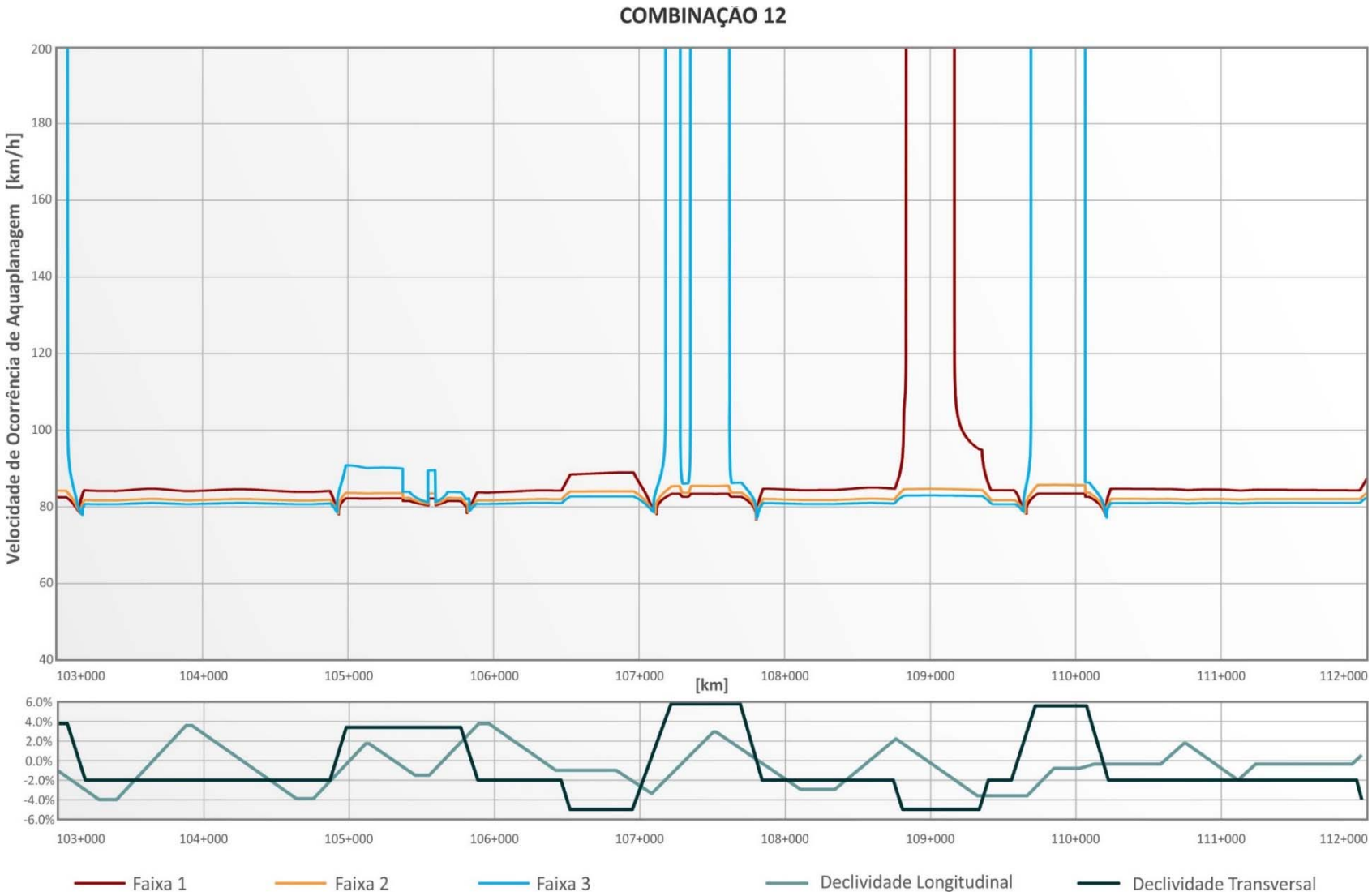


Figura 59 – Combinação 12 – km 112+000 a km 121+000.

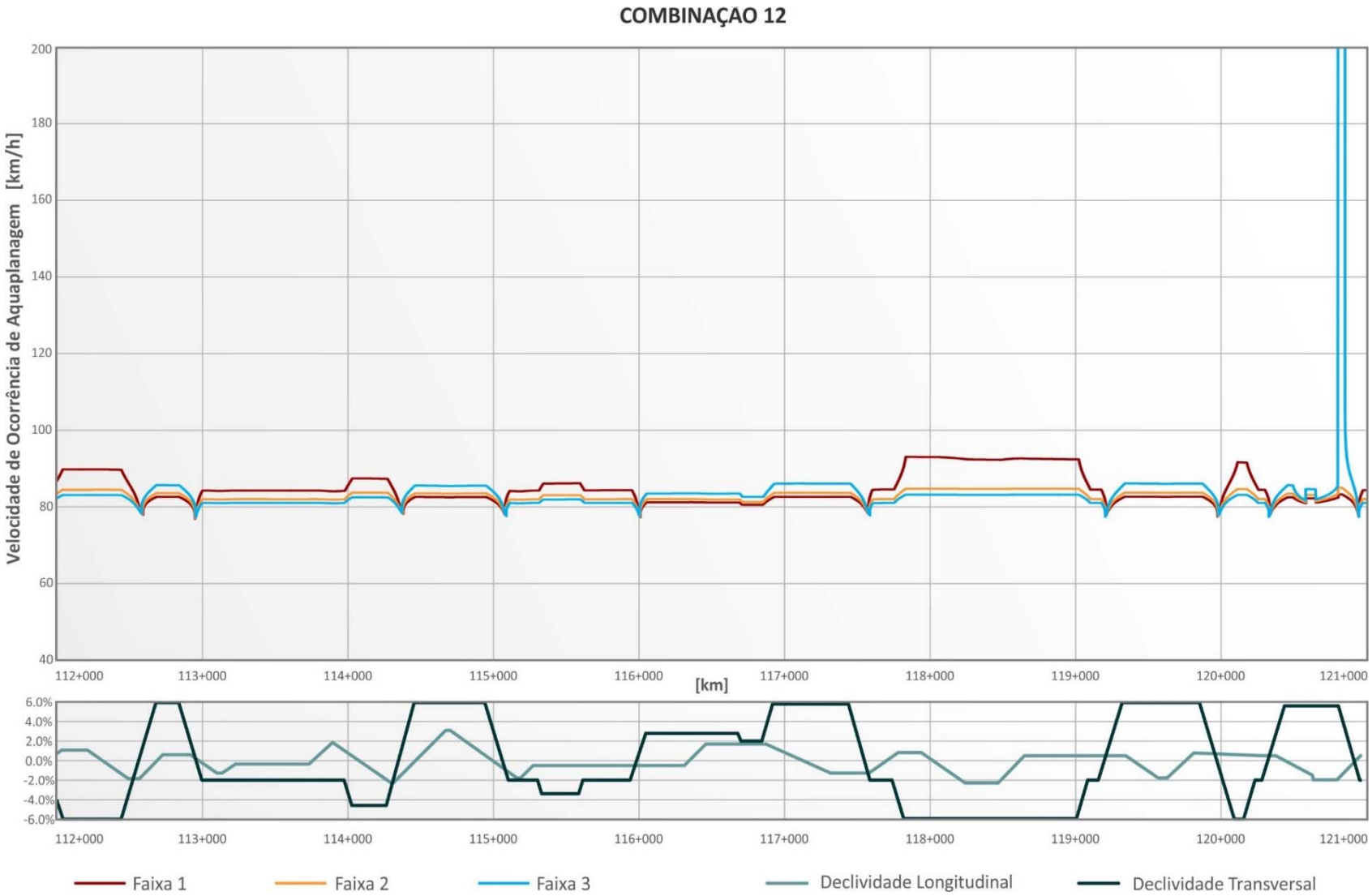
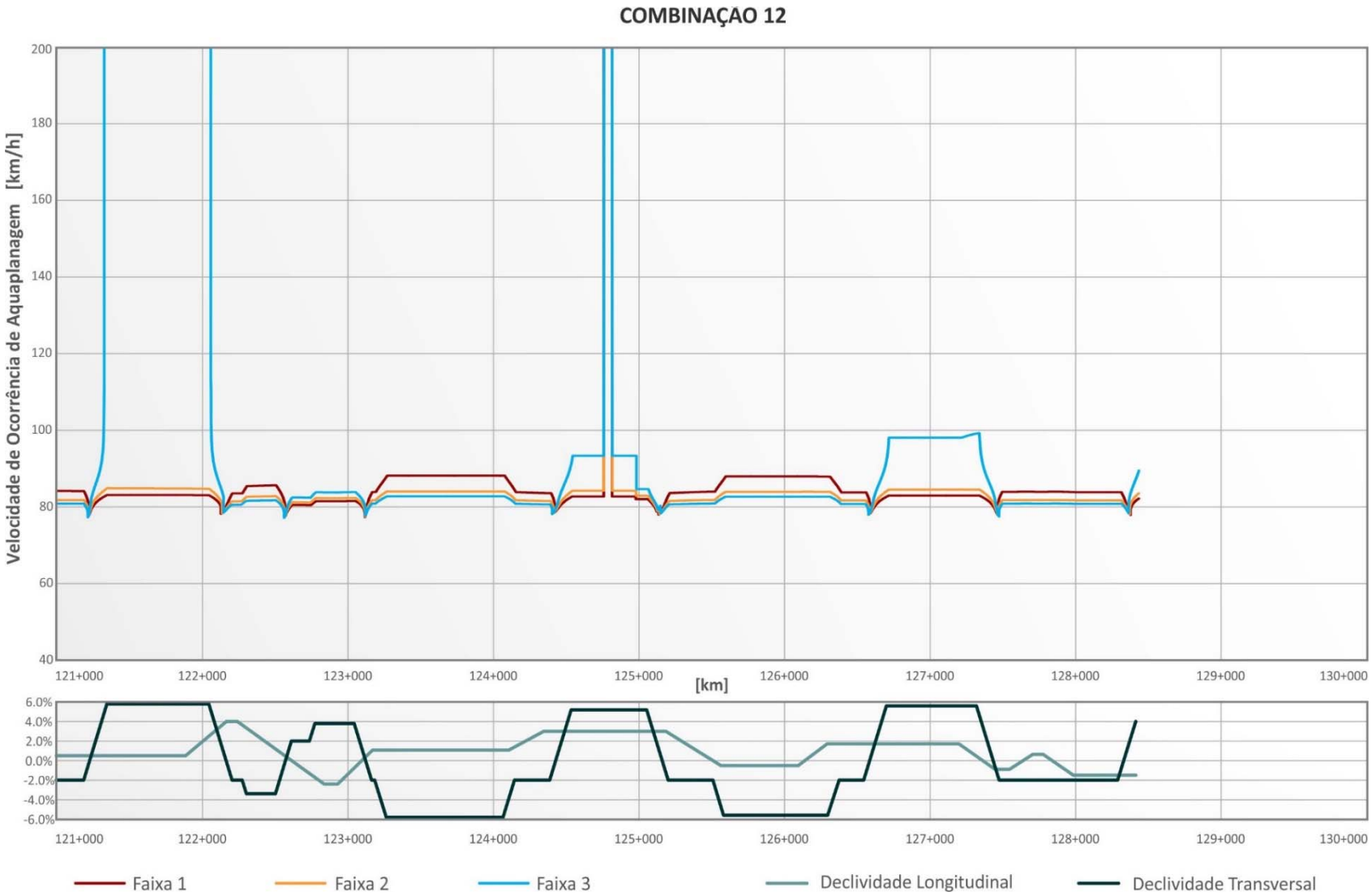


Figura 60 – Combinação 12 – km 121+000 a km 130+000.



APÊNDICE C – Arquivos de dados utilizados no trabalho

Os arquivos contidos no disco anexo também estão disponíveis em:

https://www.dropbox.com/sh/hewu6jfqln14d4k/AABMPsUB5MTMXFR2tY_C529Ya?dl=0