



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE  
MESQUITA FILHO”**

**CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE**

*Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas*

**BRUNA RIBEIRO SILVA**

**ANÁLISE DA SUPERELEVÇÃO EM CURVAS HORIZONTAIS DE  
RODOVIAS POR MEIO DO USO INTEGRADO DE PRODUTOS DE  
FOTOGRAMETRIA.**



Presidente Prudente – SP

2023



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE  
MESQUITA FILHO”**

**CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE**

*Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas*

**ANÁLISE DA SUPERELEVÇÃO EM CURVAS HORIZONTAIS DE  
RODOVIAS POR MEIO DO USO INTEGRADO DE PRODUTOS DE  
FOTOGRAMETRIA.**

Dissertação de mestrado apresentada  
ao Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Cartográficas da Faculdade de Ciências e  
Tecnologia – UNESP - Universidade Estadual  
Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus  
de Presidente Prudente - SP, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Mestre  
em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Erivaldo Antônio da  
Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Artur Pantoja  
Marques.

Presidente Prudente – SP

2023

S586a Silva, Bruna Ribeiro

Análise da superelevação em curvas horizontais de rodovias por meio do uso integrado de produtos de fotogrametria. / Bruna Ribeiro Silva. -- Presidente Prudente, 2023

159 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Erivaldo Antonio da Silva

Coorientador: Artur Pantoja Marques

1. Fotogrametria. 2. Projeto geométrico de rodovias. 3. Superelevação. 4. Veículos aéreos remotamente pilotados. 5. Produtos fotogramétricos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** ANÁLISE DA SUPERELEVAÇÃO EM CURVAS HORIZONTAIS DE  
RODOVIAS POR MEIO DO USO INTEGRADO DE PRODUTOS DE  
FOTOGRAMETRIA

**AUTORA:** BRUNA RIBEIRO SILVA

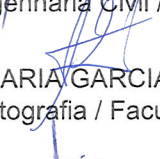
**ORIENTADOR:** ERIVALDO ANTONIO DA SILVA

**COORIENTADOR:** ARTUR PANTOJA MARQUES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciências Cartográficas,  
área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ARTUR PANTOJA MARQUES (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI (Participação Presencial)  
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente



Prof. Dr. JAIRÓ SALIM PINHEIRO DE LIMA (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Presidente Prudente, 06 de março de 2023

## EPÍGRAFE

*“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”.*

*Josué 1:9*

## **AGRADECIMENTOS**

Demonstro meus sinceros agradecimentos a todos que colaboraram com o desenvolvimento desse trabalho, em especial:

A Deus, que me guiou e me concedeu discernimento e sabedoria para conseguir seguir em frente e alcançar meus objetivos.

A meus pais, Rosemeire e Milton, por sempre me incentivarem nos estudos e darem total apoio. Ao meu marido, Gustavo, pela paciência, ajuda na realização de diversas etapas, incentivo e apoio.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográfica (PPGCC) e à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento da pesquisa de mestrado.

Ao meu orientador e coorientador, Prof. Dr. Erivaldo Antonio da Silva e ao Prof. Dr. Artur Pantoja Marques, pela paciência, atenção e por todo conhecimento transmitido a mim.

Ao Prof. Dr. Guilherme Henrique Barros de Souza, pela ajuda na realização dos experimentos, pela paciência, dedicação e incentivo transmito a mim.

Aos meus amigos do PPGCC pelas conversas e troca de conhecimento, contribuição na execução de campo dessa pesquisa, Renata Faustino, Vinícius e Matheus.

A todos os meus professores, que sempre estiveram dispostos a transmitirem seus conhecimentos e mostrar que a educação pode transformar o mundo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

Os avanços tecnológicos na área da aerofotogrametria com Veículos Aéreos Remotamente Pilotados – VARP – possibilitaram a obtenção de produtos fotogramétricos com alto nível de acurácia de maneira ágil e menos onerosa, trazendo, assim, vantagens que podem ser aproveitadas pelos engenheiros civis da área de infraestrutura rodoviária. No Brasil, o uso de aerofotogrametria com VARP para aplicação em projeto geométrico de rodovia é pouco implementado, no entanto, no aspecto global a técnica é consolidada a bastante tempo. Diante disso, este trabalho visa apresentar uma metodologia que permite realizar análise de inconsistência em parâmetros geométricos de trechos concordados por curvas horizontais (raio e superelevação), a partir de produtos fotogramétricos obtidos por VARP. O método proposto consiste, resumidamente, em gerar um mapeamento com VARP para um trecho de rodovia concordado por curva horizontal, extrair o raio da curva a partir da nuvem de pontos e a superelevação a partir das informações do Modelo Digital de Superfície, e, posteriormente, realizar um estudo comparativo entre as informações extraídas dos produtos fotogramétricos com as técnicas clássicas de topografia atual. Para a análise dos resultados, utilizaram-se as especificações técnicas para o uso de mapeamento aéreo em projetos rodoviários no Brasil e em outros países. Os resultados demonstram o alto potencial que os produtos de aerofotogrametria obtidos por VARP possuem na determinação de parâmetros de curva horizontal como a superelevação e raio de curvatura, para fim de análises de inconsistência geométrica. A partir do método proposto, a acurácia dos produtos fotogramétricos corresponde à classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos (PEC) para a escala de 1:500. Além disso, o estudo comparativo entre método de determinação da superelevação por meio MDS e das técnicas clássicas de topografia, apresentou um RMSE (*Root Mean Square Error*) < 1%. Por fim, ao comparar o raio atual da via com o raio mínimo estabelecido pela norma do Departamento de Estrada de Rodagem de São Paulo, esse ficou abaixo cerca de 138,21 metros. Dessa forma, ao comparar o método proposto com as normas e literaturas atuais, verificou-se que o mesmo apresenta resultados promissores.

**Palavras-chave:** Projeto Geométrico de Rodovias; Curvas horizontais; Veículos Aéreos Remotamente Pilotados; Produtos Fotogramétricos; Superelevação.

## ABSTRACT

Technological advances in the area of aerial photogrammetry with Remotely Piloted Air Vehicles - VARP made it possible to obtain photogrammetric products with a high level of accuracy in an agile and less costly manner; thus bringing advantages that can be used by civil engineers in the area of road infrastructure. In Brazil, the use of aerial photogrammetry with VARP for application in highway geometric design is little implemented, however, in the global aspect, the technique has been consolidated for a long time. Given this, this work aims to present a methodology that allows performing inconsistency analysis in geometric parameters of sections agreed by horizontal curves (radius and superelevation), from photogrammetric products obtained by VARP. The proposed method consists, in summary, in generating a mapping with VARP for a stretch of road agreed by a horizontal curve, extracting the radius of the curve from the point cloud and the superelevation from the DSM (Digital Surface Model) information, and later, carrying out a study comparison between the information extracted from the photogrammetric products with the classic techniques of current topography. For the analysis of the results, the technical specifications for the use of aerial mapping in road projects in Brazil and other countries were used. The results demonstrate the high potential that the aerial photogrammetry products obtained by VARP have in the determination of horizontal curve parameters such as superelevation and radius of curvature, for geometric inconsistency analyses. From the proposed method, the accuracy of the photogrammetric products corresponds to class A of the Cartographic Accuracy Standard for Cartographic Products (PEC) for the scale of 1:500. In addition, the comparative study between the superelevation determination method using MDS and classical topography techniques, showed an RMSE (*Root Mean Square Error*)  $< 1\%$ . Finally, when comparing the current radius of the road with the minimum radius established by the DER/SP standard, this was below about 138,21 meters. Thus, when comparing the proposed method with current norms and literature, it was found that it presents promising results.

**Keywords:** Highway Geometric Design; Horizontal Curves; Remotely Piloted Air Vehicles; Photogrammetric Products; Superelevation.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Processo de ortorretificação pelo modelo de retificação diferencial. ....                                                                          | 39 |
| Figura 2 - Fatores de atrito lateral assumidos para projeto. ....                                                                                             | 48 |
| Figura 3 - Veículos em trajetória circular representada em planta. ....                                                                                       | 51 |
| Figura 4 - Variação da seção transversal da pista do trecho em tangente para o curvo.<br>.....                                                                | 53 |
| Figura 5 - Trecho rodoviário em estudo Rodovia Estadual Júlio Budisk – SP -501, km<br>26. ....                                                                | 55 |
| Figura 6 - Fluxograma de execução da pesquisa.....                                                                                                            | 57 |
| Figura 7 - Disposição dos voos feita por mapeamento linear. O voo um direção N-S e<br>o voo dois direção O-L. ....                                            | 58 |
| Figura 8 - Distribuição dos pontos de apoio ao longo do acostamento da rodovia. ..                                                                            | 60 |
| Figura 9 - Distribuição dos pontos de apoio ao longo da área de vegetação. ....                                                                               | 61 |
| Figura 10 - Pontos de apoio compartilhados pela sobreposição dos voos um e dois na<br>curva horizontal 1. ....                                                | 62 |
| Figura 11 - Alvo fotogramétrico pintado ao longo do acostamento da rodovia.....                                                                               | 62 |
| Figura 12 - Demarcação dos alvos nas áreas de vegetação. A estaca era utilizada<br>para que não houvesse perda do ponto caso a pintura com cal apagassem..... | 63 |
| Figura 13 - Receptor fixo do aparelho geodésico Hiper Lite ++, nivelado em um dos<br>pontos .....                                                             | 64 |
| Figura 14 - Lançamento do VARP eBee. ....                                                                                                                     | 65 |
| Figura 15 - Área mapeada com VARP eBee utilizando a câmera S110 NIR com altura<br>de voo de 77,3 m.....                                                       | 66 |
| Figura 16 - Distribuição dos pontos de apoio utilizados efetivamente no<br>processamento das imagens.....                                                     | 68 |
| Figura 17 - Modelo Digital de Superfície obtido pelo merge dos voos fotogramétricos.<br>.....                                                                 | 69 |
| Figura 18 - Nível Digital Leica DNA03 com mira codificada. ....                                                                                               | 70 |
| Figura 19 - Disposição das seções transversais ao longo da curva 1.....                                                                                       | 71 |
| Figura 20 - Estação Total Cygnus 2LS.....                                                                                                                     | 75 |
| Figura 21 - Representação da poligonal apoiada em duas bases e seus respectivos<br>pontos irradiados.....                                                     | 76 |

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 22 - Poligonal ajustada pelo Método dos Mínimos Quadrados dentro das tolerâncias da NBR 13133/2021.....       | 77  |
| Figura 23 - Extração dos pontos que compõe o eixo rodoviário no software QGIS. .                                     | 78  |
| Figura 24 – Exemplo de um trecho na inspeção visual do eixo extraído (amarelo) com o eixo de referência (verde)..... | 79  |
| Figura 25 - Interface do AutoCad Civil 3D para reconstrução do eixo rodoviário. ....                                 | 80  |
| Figura 26 - Diagrama de caixa do voo realizado. ....                                                                 | 83  |
| Figura 27 - Seções transversais em planta da estação E <sub>0</sub> . ....                                           | 87  |
| Figura 28 – Valor do RMSE na determinação da superelevação para cada uma das estações.....                           | 101 |
| Figura 29 - Traçado do eixo rodoviário reconstituído por meio de produtos fotogramétricos. ....                      | 102 |
| Figura 30 - Raio de referência determinado a partir das coordenadas irradiadas...                                    | 103 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Requisitos por Nível de Qualidade para dados digitais de elevação.....                                                                            | 26 |
| Tabela 2 - Classes da acurácia horizontal para dados digitais planimétricos. ....                                                                            | 27 |
| Tabela 3 - Valores previstos no PEC para cada classe. ....                                                                                                   | 43 |
| Tabela 4 - Parâmetros intrínsecos à classe de projeto I-B.....                                                                                               | 47 |
| Tabela 5 - Valores de raio mínimo adotado para curvas horizontal em rodovias estaduais do estado de São Paulo.....                                           | 48 |
| Tabela 6 - Comprimento mínimo desejado para a espiral de transição. ....                                                                                     | 51 |
| Tabela 7 - Parâmetros de calibração da câmera SNIR. ....                                                                                                     | 67 |
| Tabela 8 - Caderneta de cálculo do nivelamento e contranivelamento da estação E0. ....                                                                       | 72 |
| Tabela 9 - Relatório de qualidade dos produtos gerados.....                                                                                                  | 81 |
| Tabela 10 - Teste de hipóteses para a média do voo. ....                                                                                                     | 82 |
| Tabela 11 - Teste de hipóteses para a variância do voo.....                                                                                                  | 82 |
| Tabela 12 - Avaliação dos produtos fotogramétricos obtidos de acordo com as normas canadenses.....                                                           | 84 |
| Tabela 13 - Requisitos por Nível de Qualidade para dados digitais de elevação.....                                                                           | 85 |
| Tabela 14 - Classes da acurácia horizontal para dados digitais planimétricos. ....                                                                           | 85 |
| Tabela 15 - Superelevação determinada nas seções transversais da estação E0. ..                                                                              | 86 |
| Tabela 16 - Cálculo das superelevações ao longo das estações E <sub>3</sub> a E <sub>5</sub> , localizadas ao longo de todo desenvolvimento da curva 1. .... | 87 |
| Tabela 17 - Determinação da superelevação a partir dos valores de elevação do DSM para estação E0. ....                                                      | 92 |
| Tabela 18 - Cálculo das superelevações ao longo das estações E3 a E5, localizadas ao longo de todo desenvolvimento da curva 1. ....                          | 93 |
| Tabela 19 - Indicadores de qualidade da superelevação para as bordas interna e externa da estação E0. ....                                                   | 97 |
| Tabela 20 - Indicadores de qualidade da superelevação para os bordos interno e externo da estação E1. ....                                                   | 98 |
| Tabela 21 - Indicadores de qualidade da superelevação para os bordos interno e externo da estação E2. ....                                                   | 99 |
| Tabela 22 - Indicadores de qualidade da superelevação para as bordas interna e externa da estação E3. ....                                                   | 99 |

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 23 - Indicadores de qualidade da superelevação para as bordas interna e externa da estação E4. .... | 100 |
| Tabela 24 - Indicadores de qualidade da superelevação para as bordas interna e externa da estação E5. .... | 100 |
| Tabela 25 - Valores de raio mínimo para diferentes velocidades de projetos e taxa de superelevação. ....   | 102 |

## LISTA DE SIGLAS

|         |                                                                     |
|---------|---------------------------------------------------------------------|
| AASHTO  | American Association of State Highways and Transportation Officials |
| ASPRS   | American Society for Photogrammetry and Remote Sensing              |
| CH      | Ponto de check                                                      |
| CNT     | Confederação Nacional do Transporte                                 |
| CS      | Curve to Spiral                                                     |
| DECEA   | Departamento de Controle do Espaço Aéreo                            |
| DER     | Departamento de Estradas de Rodagem                                 |
| DNER    | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem                        |
| DNIT    | Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes               |
| DOT     | Department of Transportation                                        |
| GEOBC   | Geospatial services in British Columbia                             |
| GNSS    | Global Navigation Satellite System                                  |
| GSD     | Ground Sample Distance                                              |
| HV      | Ponto de controle                                                   |
| IGC     | Instituto Geográfico e Cartográfico                                 |
| IMU     | Unidade de Medida Inercial                                          |
| INS     | Inertial Navigation System                                          |
| ISF     | Instruções de Serviço Ferroviário                                   |
| ISO     | Integrated Sensor Orientation                                       |
| LiDAR   | Light Detection and Ranging                                         |
| MDS     | Modelo Digital de Superfície                                        |
| MDT     | Modelo Digital do Terreno                                           |
| MMQ     | Método dos mínimos quadrados                                        |
| NBR     | Norma técnica brasileira                                            |
| NVA     | Non-Vegetated Accuracy                                              |
| NYS-DOT | New York State Department of Transportation                         |
| PEC-PCD | Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais |
| PPK     | Post Processed Kinematic                                            |
| RBMC    | Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo.                          |
| RMSE    | Root Mean Square Error                                              |

|         |                                          |
|---------|------------------------------------------|
| RTK     | Real Time Kinematic                      |
| SC      | Spiral to curve                          |
| SfM-MVS | Structure from Motion- Multi-View Stereo |
| SMD     | Square Mean of the Differences           |
| ST      | <i>Spiral to Tangent</i>                 |
| TS      | Tangent to Spiral                        |
| VARP    | Veículo Aéreo Remotamente Pilotado       |
| VDM     | Volume Diário Médio                      |

## SUMÁRIO

|                                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                     | <b>16</b> |
| 1.1 Estado da arte .....                                                                                      | 17        |
| 1.2 Manuais e notas técnicas de projeto geométrico de rodovias .....                                          | 22        |
| 1.3 Uso de aerofotogrametria em projetos rodoviários.....                                                     | 23        |
| 1.3.1 Especificações técnicas para o uso de mapeamento aéreo em projetos rodoviários no Brasil .....          | 23        |
| 1.3.2 Especificações técnicas para o uso de mapeamento aéreo em projetos rodoviários em outros países.....    | 24        |
| 1.4 OBJETIVO.....                                                                                             | 27        |
| 1.5 JUSTIFICATIVA .....                                                                                       | 28        |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                                                                         | <b>30</b> |
| 2.1 Fotogrametria e Veículo Aéreo Remotamente Pilotado .....                                                  | 30        |
| 2.2 Mapeamento aéreo e Planejamento de voo.....                                                               | 32        |
| 2.2.1 Pontos de apoio .....                                                                                   | 33        |
| 2.3 Posicionamento relativo cinemático pós-processado (PPK) .....                                             | 37        |
| 2.4 Produtos fotogramétricos: Ortomosaico e Modelo Digital de Superfície/ Terreno – MDS/MDT.....              | 38        |
| 2.4.1 Avaliação da acurácia de produtos fotogramétricos .....                                                 | 40        |
| 2.5 Projeto Geométrico de Rodovias: classificação das rodovias, velocidade diretriz e veículo de projeto..... | 46        |
| 2.5.1 Raio mínimo de curva horizontal .....                                                                   | 47        |
| 2.5.2 Curvas de transição.....                                                                                | 49        |
| 2.5.3 Superelevação .....                                                                                     | 51        |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                                                           | <b>54</b> |
| 3.1 Área de Estudo.....                                                                                       | 54        |
| 3.2 Metodologia.....                                                                                          | 56        |
| 3.2.1 Planejamento de voo.....                                                                                | 57        |
| 3.2.2 Demarcação dos pontos de apoio .....                                                                    | 59        |

|           |                                                                                                                  |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.3     | Determinação das coordenadas dos pontos de apoio .....                                                           | 63         |
| 3.3       | Execução dos voos .....                                                                                          | 65         |
| 3.4       | Produção do Ortomosaico e do MDS/MDT .....                                                                       | 65         |
| 3.4.1     | Processamento das imagens .....                                                                                  | 65         |
| 3.5       | Levantamento topográfico .....                                                                                   | 69         |
| 3.5.1     | Nivelamento Geométrico das Seções Transversais .....                                                             | 70         |
| 3.5.2     | Nivelamento Trigonométrico e Irradiações .....                                                                   | 74         |
| 3.6       | Extração e reconstrução do eixo rodoviário .....                                                                 | 77         |
| <b>4.</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                                                             | <b>81</b>  |
| 4.1       | Avaliação dos produtos fotogramétricos.....                                                                      | 81         |
| 4.1.1     | Avaliação do PEC e normas nacionais para o uso de produtos fotogramétricos em projetos rodoviários .....         | 81         |
| 4.1.2     | Avaliação em relação a normas internacionais .....                                                               | 84         |
| 4.2       | Determinação da Superelevação .....                                                                              | 85         |
| 4.2.1     | Cálculo da superelevação por meio do nivelamento geométrico.....                                                 | 85         |
| 4.2.2     | Cálculo da superelevação por meio do MDS/MDT .....                                                               | 92         |
| 4.2.3     | Estudo comparativo entre o método proposto e o levantamento topográfico para determinação da superelevação ..... | 97         |
| 4.3       | Determinação do raio atual e mínimo da curva horizontal.....                                                     | 101        |
| <b>5.</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>                                         | <b>105</b> |
|           | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                          | <b>107</b> |
|           | APÊNDICE A - RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO DOS VOOS FOTOGRAFÉTICO GERADO PELO SOFTWARE PIX4D.....                   | 110        |
|           | APÊNDICE B - CADERNETAS DE CÁLCULO DO NIVELAMENTO E CONTRANIVELAMENTO PARA CADA ESTAÇÃO.....                     | 119        |
|           | APÊNDICE C - TABELA DE CÁLCULO DA SUPERELEVÇÃO – NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.....                                     | 132        |
|           | APÊNDICE D - SEÇÕES TRANSVERSAIS EM PLANTA DA SUPERELEVÇÃO NO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.....                        | 138        |

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| APÊNDICE E - TABELA DE CÁLCULO DA SUPERELEVAÇÃO – MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE.....                 | 143 |
| APÊNDICE F - SEÇÕES TRANSVERSAIS EM PLANTA DA SUPERELEVAÇÃO NO MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE.....    | 149 |
| APÊNDICE G - ANÁLISES ESTATÍSTICAS GERADAS NO ESTUDO COMPARATIVO DO PARÂMETRO DE SUPERELEVAÇÃO..... | 155 |

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o modo de transporte com maior contribuição aos sistemas de transporte é o rodoviário. As rodovias de jurisdição federal são gerenciadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT – e as rodovias estaduais pelo Departamento de Estrada de Rodagem – DER – de cada estado.

De acordo com uma pesquisa desenvolvida pela Confederação Nacional do Transporte em 2021, o estado geral da qualidade geométrica das rodovias brasileiras é classificado como regular/ruim. Esse fato pode estar atrelado à desatualização da malha viária para o atual volume de tráfego ou da falta de melhorias para que os veículos possam circular na velocidade regulamentada de forma segura e sem interrupções (CNT, 2021).

A grande dependência do Brasil de um único modo de transporte, alinhada com a falta de investimento em tecnologias que possam contribuir para um melhor desenvolvimento de projetos rodoviários, faz com que haja a obsolescência das vias e, conseqüentemente, o comprometimento da segurança rodoviária.

A qualidade geométrica de uma rodovia pode ser comprometida por diversos aspectos, entre eles, má construção das vias e/ou por um projeto geométrico inadequado, inexistente e/ou desatualizado para a condição atual. Essa degradação na qualidade por desatualização no projeto geométrico está atrelada a alteração no volume e na característica do tráfego após a sua abertura.

De acordo com o DER/SP, (2006), a composição do tráfego influencia na classificação técnica da via, e com isso, os parâmetros intrínsecos à classe de projeto se alteram, indicando assim, uma desatualização da via para a demanda de tráfego atual.

Com a ampla utilização dos VARP em diversas áreas atualmente, faz com que seu uso também seja explorado em projetos geométricos rodoviários. No Brasil, a utilização da aerofotogrametria em projeto rodoviário ainda é pouco implementada, no entanto, em âmbito global, o uso da técnica é bem difundido e consolidado por outros países há décadas.

O projeto ‘MapKITE’ desenvolvido pelo programa ‘*European Community’s Horizon 2020*’ em parceria com empresas e a Universidade Estadual Paulista, demonstra a utilização de VARP juntamente com mapeamento terrestre móvel com LiDAR para mapeamento de vias.

Desta forma, este trabalho visa realizar análises sobre o raio de curvatura e superelevação em trechos concordados por curvas horizontais que possam vir a ter alguma inconsistência geométrica no que se refere aos parâmetros intrínsecos do traçado do eixo em planta. De modo apresentar a viabilidade da técnica de aerofotogrametria por VARP na determinação de informações de forma rápida, menos onerosas e mais eficientes serão a fiscalização e a manutenção das vias brasileiras.

Para isso, pretende-se obter as informações sobre o eixo rodoviário e a superelevação do trecho em estudo, por meio do ortomosaico e do Modelo Digital de Superfície, respectivamente. E, assim então, desenvolver os cálculos dos parâmetros mínimos estabelecidos nos manuais do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo para garantir a segurança da via.

Para avaliar a extração e determinação dos parâmetros por meio de fotogrametria, um estudo comparativo entre as técnicas clássicas de levantamento topográfico e os produtos fotogramétricos gerados será desenvolvido para apresentar a precisão e a viabilidade desses produtos em projeto geométrico rodoviário.

Dessa forma, essa dissertação busca fazer uso integrado de produtos de Ciências Cartográficas, com a competência técnica da Engenharia Civil em desenvolver projeto geométrico de rodovias. Para analisar, extrair, determinar e avaliar os parâmetros mínimos de segurança em curvas circular horizontal a partir de produtos fotogramétricos obtidos por Veículo Aéreo Remotamente Pilotado – VARP.

Atualmente existem literaturas referentes ao uso de produtos fotogramétricos obtidos por VARP em projeto geométrico de rodovias, entretanto, quando direcionada a extração de informações para análises de inconsistência de parâmetros geométricos horizontais, o assunto torna-se escasso.

Na seção seguinte será apresentada sobre o estado da arte do uso da técnica de VARP em rodovias.

### **1.1 Estado da arte**

O uso da técnica de aerofotogrametria por meio de VARP tem tido aplicações bem abrangentes em diversas áreas, inclusive dentro da engenharia civil. A aplicabilidade da técnica voltada para a engenharia civil tem auxiliado no monitoramento de áreas em torno de ferrovias, em projeto de terraplanagem, na identificação de patologia em pavimento asfáltico, monitoramento de acidentes e tráfego nas vias, e no desenvolvimento de cidades inteligentes.

Em Gupta et al. (2021), os autores apresentam um estudo sobre o avanço do uso de VARP para os sistemas de transporte no futuro, bem como oportunidades e desafios, além de apresentarem aplicações atuais já desenvolvidas por uso desses, como o monitoramento de tráfego e acidentes, entregas de mercadorias, patrulhamento de fronteiras, auxílio em busca e resgate em áreas após desastres e detecção de focos de incêndio.

O mesmo artigo ainda aborda sobre o potencial que esses veículos têm para o desenvolvimento de um sistema de transporte inteligente, feito a partir da integração de VARP com outras tecnologias de inteligência artificial. Algumas das contribuições que esses sistemas de transporte inteligentes podem promover a essas cidades incluem geração de relatório com as unidades de acidentes em determinado trecho da via, criação de unidades aéreas à beira de rodovias para monitoramento por autoridades, criação de unidade aérea para uma central de atendimentos e informações em trechos e planejamento urbano (GUPTA et al., 2021).

Todas essas contribuições do uso de VARP vêm da flexibilidade de aquisição de dados e a integração de sensor, que tem efeito diretamente no planejamento urbano, uma vez que a coleta de dados abrange uma grande extensão espacial. E com isso, uma gama de informações sobre as áreas urbanas são obtidas, como uso e parcelamento do solo e tipos de cobertura da terra, dados que podem ser relacionados ao censo e detecção de mudanças ao longo de um período de tempo (GUPTA et al., 2021).

Iglesias et al. (2019) demonstram a aplicabilidade de VARP para modelagem de rodovias que tenham margens arborizadas para determinação da distância de visibilidade em trechos de curvas horizontais e verticais.

Para isso, um estudo foi realizado em um trecho de rodovia rural de pista dupla localizado em Madri (Espanha), com característica de relevo ondulado. A curva horizontal em estudo possui raio de 75 metros, e as curvas verticais com rampas de 365 e 725 metros, respectivamente. Os autores ainda ressaltam que, nos últimos sete anos, houve três acidentes com feridos.

Para a reconstrução da rodovia, os autores realizam um mapeamento aéreo com VARP com as disposições das faixas de voo em dois sentidos: Norte-Sul e Leste-Oeste. O processamento dos dados foi feito no *software* Agisoft PhotoScan®Professional v. 1.5.1 para obtenção dos produtos Ortomosaico e MDT. O

diferencial do estudo desenvolvido é que, por se tratar de uma rodovia com margens arbóreas, os autores se utilizam de uma técnica de classificação da nuvem de pontos, que tem como objetivo principal organizar os pontos da nuvem LAS em diferentes categorias, que servirão para criar elementos destacados do modelo tridimensional como, por exemplo, a feição de interesse.

A classificação utilizada foi desenvolvida pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*, sendo utilizadas três classes para as feições: “não atribuída”, “solo” e “vegetação alta”. No final, apenas a classe “solo” foi utilizada no estudo, sendo que as demais classes não se destinavam a representar com precisão qual tipo o ponto capturado pertencia. Diante disso, a geração do MDT da via fez-se apenas com o uso dos pontos classificados como “solo”. Dessa forma, a via e suas margens foram bem definidas.

Iglesias et al. (2019) ainda apresentam os cálculos da distância de visibilidade determinada com base nos manuais de projeto geométrico de rodovias da Espanha, onde é indicado que, para duas seções transversais na via, a distância de visibilidade calculada não atende aos padrões estabelecidos. Uma dessas seções está localizada na curva vertical que tem o menor raio. Já a segunda trata da curva horizontal que não atende às normas de segurança.

Diante disso, os autores concluem que as limitações na distância de visibilidade podem ser um fator relevante no desempenho de insegurança viária nas seções citadas da rodovia. E estabelecem que contramedidas podem ser propostas para resolver o problema, como aumentar o desenvolvimento da curva, reduzir a velocidade da via, ou, até mesmo, readequar o alinhamento nas seções irregulares.

Em Cicco, (2017) é apresentado o uso de VARP para monitoramento e análise de áreas de invasão as faixas de domínio e não edificáveis de ferrovias. Situação bastante comum devido ao crescimento urbano desenfreado e sem planejamento que traz diversos riscos à vida das pessoas que habitam em torno de ferrovias.

Por lei, a faixa de domínio da ferrovia deve ser de 15 metros a partir do eixo ferroviário, e a faixa não edificável, a partir de 30 metros do eixo da ferrovia. O trabalho ainda justifica o uso de VARP para a realização dessa análise em decorrência do baixo custo comparado com os custos de levantamentos aerofotogramétricos em aviões e a topografia tradicional, além da questão principal, que é a aquisição dos dados sem interferir diretamente nas atividades da ferrovia.

A metodologia proposta pelo autor foi aplicada em uma ferrovia com extensão de 2,2 km no bairro Chapada, no Município de Ponta Grossa - Paraná, utilizando o drone PHANTOM 4 PRO DJI com câmera MODELO FC6310, com o propósito de gerar a nuvem de pontos, modelo digital de superfície e ortofoto, que serviram de base para a realização de uma análise quantitativa de residências dispostas na faixa de domínio da ferrovia (CICCO, 2017).

Em Knyaz e Chibunichev, (2016), o uso da aerofotogrametria é apresentado para análises em superfície asfáltica, onde são utilizadas técnicas de medição acuradas no pavimento, e reconstrução da superfície a partir das imagem obtidas com VARP.

Parente, Felix e Picanço (2017) também abordam o uso da técnica de aerofotogrametria com VARP na identificação de patologias em superfícies de revestimento asfáltico para as rodovias brasileiras. O uso da técnica é justificado pelos autores pela rápida aquisição de dados, por ser possível criar bancos de dados temporais para identificar, monitorar e realizar medições dessas patologias por meio de ortoimagem e Modelo Digital de Superfície (MDS).

A metodologia desenvolvida no estudo foi aplicada para uma rodovia estadual do Estado de Tocantins (TO-050) de pista simples com revestimento flexível que interliga as cidades de Palmas, Porto Nacional e Silvanópolis, totalizando 124 km de extensão. Para a realização das coletas das fotografias aéreas, duas câmeras métricas compatíveis com as aeronaves foram utilizadas, sendo elas S110 NIR e S110 RBG (PARENTE, D. FELIX, N. PICANÇO, 2017).

Os resultados gerados pelos autores foram determinados por meio da fotointerpretação do ortomosaico e o estudo comparativo da extensão da patologia no MDS e no levantamento in loco, que aponta uma margem de acerto de 95,43% do produto MDS na determinação da extensão da patologia.

Dessa forma, a metodologia desenvolvida torna-se promissora por obter resultados rápidos, porém os autores também deixam claro que essa pode ser utilizada como subsídio para identificação de patologias. Contudo, não substitui as normas de engenharia para levantamentos de manifestações patológicas em pavimento.

Em Souza (2019), o uso do MDS é apresentado para a utilização nos cálculos de volume de terraplenagem em projeto rodoviário, com o intuito de auxiliar na

fiscalização de obras, uma vez que a etapa de terraplanagem é uma atividade mais onerosa do ponto de vista econômico – cerca de 19% do custo total da implantação de uma rodovia.

O autor apresenta um levantamento aéreo realizado pela empresa DronEng Drones & Engenharia em conjunto com a Empresa Júnior de Engenharia Cartográfica da Universidade Estadual Paulista (UNESP) em março de 2016, com o objetivo de comparar o uso a aerofotogrametria e a topografia clássica na determinação do volume de terraplanagem (SOUZA, 2019).

O estudo comparativo apresentou resultados em que é possível observar que a topografia clássica em termos de acurácia em X, Y e Z alcançou ordem milimétrica (5 mm; 0,7 mm e 5 mm, respectivamente). Em contrapartida, a acurácia da fotogrametria foi da ordem centimétrica (1,7 cm; 5,1 cm e 8,2 cm, respectivamente). No entanto, o autor argumenta que o uso da técnica de fotogrametria pode otimizar tempo, custo e o número de profissionais envolvidos no serviço.

Ainda de acordo com Souza, (2019), a diferença na determinação do volume para ambos os métodos foi cerca de 56 m<sup>3</sup>, sendo o volume determinado por meio da topografia clássica de 1.167,16 m<sup>3</sup> e o volume determinado pela técnica de aerofotogrametria para a mesma área, cerca de 1.233,23 m<sup>3</sup>. A diferença entre os métodos chega a 5,65% considerando como referência o volume obtido por meio da topografia.

Com base nisso, o autor conclui que o uso de VARP na fiscalização de volumes apresentou escalas compatíveis a 1:5.000 (referente à etapa de anteprojeto de uma rodovia) e 1:2.000 (projeto executivo) permitindo aferir os elementos horizontais e verticais do perfil longitudinal. Sendo assim, há a possibilidade concreta da utilização dessa tecnologia na fiscalização de fases de terraplanagem (SOUZA, 2019).

Em Zulkipli e Tahar (2018), aborda-se a respeito dos desafios enfrentados por países desenvolvidos em gerenciar e manter o modo rodoviário atualizado e seguro, e que seja economicamente viável. Para isso, os autores ressaltam que as informações topográficas de alta acurácia são extremamente importantes, pois, a partir delas, bons alinhamentos rodoviários são desenvolvidos dentro do projeto geométrico da via.

Dessa forma, é proposta por eles a avaliação da acurácia de produtos obtidos por VARP para mapeamento rodoviário e selecionada uma rodovia existente como

área de estudo. No entanto, o artigo deixa alguns questionamentos sem respostas sobre como foi realizado o planejamento de voo e a distribuição e coleta dos pontos de apoio. Ao final, os autores apresentam a acurácia do ortomosaico por meio do RSME na componente X de 0,15 m, em Y de 0,228 m e Z de 0,479 m. No entanto, as brechas existentes no artigo trazem alguns questionamentos a respeito da acurácia mencionada.

Diante de todas literaturas citas acima, observa-se um aumento significativo na utilização de VARP em diversas etapas no desenvolvimento de um projeto rodoviário. À vista disso, essa dissertação torna-se um arcabouço teórico e prático no desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de traçado em curvas horizontais por meio de produtos de aerofotogrametria.

Nas seções seguintes, serão apresentados manuais, notas técnicas e instruções de serviços para projeto geométricos de rodovias utilizados atualmente na elaboração, desenvolvimento e manutenção de vias brasileiras, além das instruções de serviço a respeito do uso da aerofotogrametria em projetos rodoviários no Brasil e em outros países.

## **1.2 Manuais e notas técnicas de projeto geométrico de rodovias**

O manual base no Brasil trata do 'Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais' desenvolvido pelo extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER – de 1999 para rodovias federais. O manual tem como documentos de referência as 'Instruções para Projeto Geométrico de Rodovias Rurais', criadas em 1979 também pelo DNER, e o manual norte americano '*A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*' da instituição *American Association of State Highways and Transportation Officials* – AASHTO – na versão de 1994.

No entanto, cabe ressaltar que a AASHTO, ao longo dos anos, tem desenvolvido versões mais recentes da edição, e, atualmente no site da AASHTO, é possível encontrar a sétima edição desenvolvida em 2018.

Com a extinção do DNER em 2001, o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT – foi criado em 2002. No site do DNIT, é possível encontrar manuais, instruções de serviço e diretrizes do Instituto de Pesquisas em Transporte – IPR –, para o desenvolvimento e a modernização da infraestrutura rodoviária.

Os manuais das rodovias estaduais do estado de São Paulo, são apresentados pelo DER/SP, no qual, os dois principais são intitulados de: 'Instruções de Elaboração

de Projeto Geométrico – IP-DE-F00/001, 2005’ e ‘Manual de Notas Técnicas de Projeto Geométrico – NT-DE-F00/001, 2006’.

Ambos os documentos têm como referência ‘*A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*’ de 2004 da AASHTO e o manual do DNER de 1999, além do ‘*Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*’ do New York, MacGraw-Hill de 1999.

No site do DER/SP, é possível consultar tabelas, normas, manuais técnicos e arquivos rodoviários a respeito de rodovias estaduais e vicinais dentro do estado de São Paulo.

### **1.3 Uso de aerofotogrametria em projetos rodoviários**

#### **1.3.1 Especificações técnicas para o uso de mapeamento aéreo em projetos rodoviários no Brasil**

O uso de produtos de fotogrametria e sensoriamento remoto em projetos rodoviários surgiu no Brasil entre as décadas de 1920 e 1950. Na época em questão, o país começava a manifestar interesse em promover construções de estradas de rodagem que ligassem as capitais de qualquer estado.

No entanto, o uso dessas técnicas era importado de países como Estados Unidos e Canadá que já faziam uso das fotogrametrias terrestre e aérea (a bordo de avião) para estudo físico da área com escalas de 1:30.000 até 1:50.000 na fase de anteprojeto (SCHAFFER; VIEIRA; LOCH, 2006).

As primeiras instruções a respeito do assunto no país foram desenvolvidas pelo DNER em seu manual ‘Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários’, que as Instruções de Serviço – IS 226 e 227 abordam a respeito da escala das fotografias obtidas por cobertura aerofotogramétrica para a fase de anteprojeto da via. Nas instruções, orientações são descritas sobre como deve ser a execução dos serviços, bem como a apresentação dos produtos, sendo estabelecida a escala 1:20000 na fase de anteprojeto (DNER, 1999).

Atualmente para as rodovias federais, o DNIT (2015a, 2015b) possui as Instruções de Serviço Ferroviário ISF – 201 e 202, as quais tratam a respeito das técnicas de varredura a LASER aerotransportados e levantamento aerofotogramétrico para as fases de anteprojeto e projeto executivo de rodovias. Entretanto, essas instruções, a princípio, foram direcionadas a projetos ferroviários, mas, posteriormente, foram sendo utilizadas para projetos rodoviários também.

Para ambas as ISF, são estabelecidas as atividades obrigatórias que devem conter nos levantamentos, como a execução dos estudos e a sua apresentação.

A ISF – 201 descreve as instruções para levantamento aerofotogramétrico e perfilamento a LASER para projetos básicos de ferrovia, em que a escala do mapeamento deve ser 1:5000 com GSD máximo de 35 cm alinhado ao Padrão de Exatidão Cartográfica classe A (DNIT, 2015a).

Já a ISF – 202 contém as instruções para projetos executivos. A escala para esse tipo de projeto deve ser 1:2000 com GSD máximo de 15 cm e também deve atingir a classe A do Padrão de Exatidão Cartográfico (DNIT, 2015b).

As rodovias estaduais possuem seus próprios manuais que são elaborados pelo Departamento de Estradas de Rodagem – DER de cada estado, contudo, o manual federal é tido com base nos demais.

Diante disso, cada estado pode elaborar instruções de serviço diferentes que atendam seus próprios objetivos. DAER, (2022) estabelece em seu documento *'Instruções de Serviço para Projetos Finais de Engenharia'* que para levantamento aerofotogramétrico nas rodovias estaduais de Rio Grande do Sul, nas ortofotos digitais obtidas por VARP deve ser utilizado GSD de 5 cm para estudos referente aos Projetos Básicos e aos Projetos Executivos.

Além de ter uma precisão para os *check points* de produtos obtidos por VARP, desejável  $\leq 5$  cm por ponto e na média nos eixos X, Y e Z, e admissível  $\leq 10$  cm por ponto e na média nos eixos X, Y e Z.

Para as rodovias do Estado de São Paulo, o DER/SP também estabelece especificações técnicas a respeito do uso da aerofotogrametria nas etapas que compõem um projeto geométrico. Na etapa de estudo da faixa do terreno para estudo da implantação da futura via, as ortofotos devem apresentar escala de 1:10.000 ou 1:5.000 (DER/SP, 2006b).

Para o desenvolvimento do projeto executivo a cobertura fotogramétrica deve ter escala entre 1:8.000 a 1:4.000 (DER/SP, 2006b).

### **1.3.2 Especificações técnicas para o uso de mapeamento aéreo em projetos rodoviários em outros países**

A utilização de produtos de fotogrametria em projetos geométricos de rodovias já é bastante implementada em outros países como Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Espanha, entre outros, os quais possuem especificações e

regulamentações técnicas bem definidas a respeito da acurácia do uso desses produtos para determinadas aplicações.

Nos Estados Unidos, o órgão responsável pelas normas técnicas de tecnologia LiDAR e produtos fotogramétricos é o *Department of Transportation* – DOT – da Instituição Federal *Highway Administration*, que estabelece que 90% dos pontos devem ter acurácia fotogramétrica de 0,2 foot (cerca de 6,096 cm) para a componente vertical e 0,4 foot (cerca de 12,192 cm) na horizontal (DOT, 2007).

O DOT do estado de Nova Iorque (NYSDOT) também estabelece especificações para o uso de produtos de fotogrametria dentro do estado. De acordo com o (NYSDOT, 2005), a acurácia horizontal é atestada quando 90% de todas as feições e pontos bem definidos em uma escala de projeto fotogramétrico padrão (normalmente 1:3000), de maneira que posições sejam precisas dentro de 60 mm (0,06 m) da localização real no solo. Os 10% restantes devem possuir posições que sejam precisas dentro de 120 mm da localização real no solo.

A acurácia vertical é subdividida em duas partes, denominadas de ‘A’ e ‘B’. Sendo que a acurácia vertical ‘A’ trata dos pontos e os critérios são semelhantes à acurácia horizontal.

Já a acurácia vertical ‘B’ refere-se à superfície do MDT para estereoscopia, no qual é analisada a diferença entre os pontos de check e os pontos extraídos do MDT em uma mesma localização; sendo aceita uma diferença média cerca de 25 mm, além da determinação do *Square Mean of the Differences* (SMD), pela Eq. (1) para cada aplicabilidade.

$$SMD = \sqrt{\frac{\sum (MDT\ Surface - Checkpoint)^2}{Number\ of\ checkpoints}} \quad (1)$$

Cabe ressaltar que o SMD, refere-se a mesma métrica estatística do RMSE (Root Mean Squared Error), ou seja, deve ser analisado se o RMSE atende a finalidade de uso para cada aplicação.

A partir do valor obtido pelo SMD, é designada a finalidade de uso para o MDT. Caso o  $SMD \leq 60$  mm, esse está apto para ser utilizado para superfícies de transporte;  $SMD \leq 120$  mm utilizado em superfícies projetadas e rede de drenagem; e por fim  $SMD \leq 300$  mm outras superfícies não projetadas.

Para a província canadense de British Columbia, as especificações a respeito do uso de imagens aéreas digitais e de seus produtos são disponibilizadas em seu

manual ‘*Specifications for the Production of Digital Elevation Models for the Province of British Columbia*’ (GEOBC, 2017), onde as acurácias absolutas horizontal e vertical do DEM e ortomosaicos devem ser avaliadas e relatadas de acordo com o manual da *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* de 2014.

A ASPRS (2014) e GEOBC (2017) utilizam como estatística de avaliação das acurácias horizontal e vertical o *Root-Mean-Square-Error* (RMSE), e esse deve ser calculado para um nível de confiança de 95% para as componentes.

Os valores da acurácia horizontal e vertical absolutas são determinados pelos coeficientes do nível de confiança de 95%, conforme a Eq. (2) e Eq. (3), respectivamente. Aqui cabe ressaltar que, para a componente vertical, a acurácia absoluta varia de acordo com a cobertura do terreno. No caso de ambientes com cobertura não vegetal, ou seja, *Non-Vegetated Accuracy* – NVA –, a acurácia vertical absoluta é determinada de acordo com a Eq. 3.

$$\text{Acurácia horizontal p/nível de confiança de 95\%} \leq 2,448 \cdot \left( \frac{RMSE_R}{1,4142} \right) \text{ (cm)} \quad (2)$$

Onde:

RMSE<sub>r</sub>: raiz do erro médio quadrático radial.

$$NVA \leq 1,96 \cdot RMSE_z \text{ (cm)} \quad (3)$$

O valor da acurácia vertical absoluta estabelecida pela Eq. (3) deve ser menor ou igual ao requisito NVA, estabelecido pelo manual canadenses, conforme é apresentado na Tabela 1. Dessa forma, com NVA determinado, torna-se possível estabelecer a acurácia da classe que deve ser comparada com o RMSE<sub>z</sub> obtido no MDS. O valor do RMSE<sub>z</sub> deve ser menor ou igual à acurácia da classe estabelecida para o nível de qualidade (GEOBC, 2017).

Tabela 1 - Requisitos por Nível de Qualidade para dados digitais de elevação.

| Nível de qualidade | Acurácia da classe (cm) | Requisito NVA (cm) | Requisito VVA (cm) | Tamanho do Grid DEM (m) | Densidade de TIN points (pts/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|
| QL1                | 5,0                     | ± 9,80             | ± 15,0             | ≤ 0,50                  | > 8                                           |
| QL2                | 10,0                    | ± 19,6             | ± 30,0             | 1,0                     | > 2                                           |
| QL3                | 20,0                    | ± 39,2             | ± 60,0             | 2,0                     | > 0,5                                         |
| QL4                | 100                     | ± 196              | ± 300,0            | 5,0                     | > 0,05                                        |
| QL5                | 300                     | ± 653              | ± 1000,0           | ≥ 10,0                  | > 0,01                                        |

Fonte: Adaptado do manual do GEOBC (2017).

Para a componente horizontal, a ASPRS (2014) apresenta, na tabela B.6 em seu manual, como é possível obter a acurácia da classe horizontal por meio da

acurácia horizontal para um nível de confiança de 95%, o RMSE radial e o GSD aproximado das imagens. O RMSE, para as componentes x e y, deve ser menor ou igual ao valor da acurácia da classe determinado pela Tabela 2.

Tabela 2 - Classes da acurácia horizontal para dados digitais planimétricos.

| <b>Acurácia da classe horizontal<br/>RMSE<sub>X</sub> e RMSE<sub>Y</sub> (cm)</b> | <b>RMSE<sub>R</sub> (cm)</b> | <b>Acurácia horizontal absoluta para um nível de confiança de 95% (cm)</b> | <b>GSD aproximado das imagens de origem (cm)</b> | <b>Equivalente à escala do mapa em ASPRS 1990 – classe 1</b> | <b>Equivalente à escala do mapa em ASPRS 1990 – classe 2</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 0,63                                                                              | 0,9                          | 1,5                                                                        | 0,31 a 0,63                                      | 1:25                                                         | 1:12,5                                                       |
| 1,25                                                                              | 1,8                          | 3,1                                                                        | 0,63 a 1,25                                      | 1:50                                                         | 1:25                                                         |
| 2,5                                                                               | 3,5                          | 6,1                                                                        | 1,25 a 2,5                                       | 1:100                                                        | 1:50                                                         |
| 5,0                                                                               | 7,1                          | 12,2                                                                       | 2,5 a 5,0                                        | 1:200                                                        | 1:100                                                        |
| 7,5                                                                               | 10,6                         | 18,4                                                                       | 3,8 a 7,5                                        | 1:300                                                        | 1:150                                                        |
| 10,0                                                                              | 14,1                         | 24,5                                                                       | 5,0 a 10,0                                       | 1:400                                                        | 1:200                                                        |
| 12,5                                                                              | 17,7                         | 30,6                                                                       | 6,3 a 12,5                                       | 1:500                                                        | 1:250                                                        |
| 15,0                                                                              | 21,2                         | 36,7                                                                       | 7,5 a 15,0                                       | 1:600                                                        | 1:300                                                        |
| 17,5                                                                              | 24,7                         | 42,8                                                                       | 8,8 a 17,5                                       | 1:700                                                        | 1:350                                                        |
| 20,0                                                                              | 28,3                         | 49,0                                                                       | 10,0 a 20,0                                      | 1:800                                                        | 1:400                                                        |
| 22,5                                                                              | 31,8                         | 55,1                                                                       | 11,3 a 22,5                                      | 1:900                                                        | 1:450                                                        |
| 25,0                                                                              | 35,4                         | 61,2                                                                       | 12,5 a 25,0                                      | 1:1000                                                       | 1:500                                                        |
| 27,5                                                                              | 38,9                         | 67,3                                                                       | 13,8 a 27,5                                      | 1:1100                                                       | 1:550                                                        |
| 30,0                                                                              | 42,4                         | 73,4                                                                       | 15,0 a 30,0                                      | 1:1200                                                       | 1:600                                                        |
| 45,0                                                                              | 63,6                         | 110,1                                                                      | 22,5 a 45,0                                      | 1:1800                                                       | 1:900                                                        |
| 60,0                                                                              | 84,9                         | 146,9                                                                      | 30,0 a 60,0                                      | 1:2400                                                       | 1:1200                                                       |
| 75,0                                                                              | 106,1                        | 183,6                                                                      | 37,5 a 75,0                                      | 1:3000                                                       | 1:1500                                                       |
| 100,0                                                                             | 141,4                        | 244,8                                                                      | 50,0 a 100,0                                     | 1:4000                                                       | 1:2000                                                       |
| 150,0                                                                             | 212,1                        | 367,2                                                                      | 75,0 a 150,0                                     | 1:6000                                                       | 1:3000                                                       |
| 200,0                                                                             | 282,8                        | 489,5                                                                      | 100,0 a 200,0                                    | 1:8000                                                       | 1:4000                                                       |
| 250,0                                                                             | 353,6                        | 611,9                                                                      | 125,0 a 250,0                                    | 1:10000                                                      | 1:5000                                                       |
| 300,0                                                                             | 424,3                        | 734,3                                                                      | 150,0 a 300,0                                    | 1:12000                                                      | 1:6000                                                       |
| 500,0                                                                             | 707,1                        | 1223,9                                                                     | 250,0 a 500,0                                    | 1:20000                                                      | 1:10000                                                      |
| 1000,0                                                                            | 1414,2                       | 2447,7                                                                     | 500,0 a 1000,0                                   | 1:40000                                                      | 1:20000                                                      |

Fonte: Adaptado da ASPRS (2014).

A Espanha também estabelece recomendações para o uso de produtos fotogramétricos em projetos de rodovia. De acordo com a Secretaría General de Infraestructuras (2014), e o seu manual de 'Recomendaciones para o Desenvolvimento de Projetos Rodoviários' juntamente a 'Notas de serviço 2/2010' do Ministerio del Fomento (2010), os voos fotogramétricos, com finalidade de projetos de cartografia para o desenvolvimento de projetos rodoviários, devem ser feitos com câmara digitais com um GSD de 10 cm, sistema de navegação GPS, sistema de medida inercial (IMU) e plataforma estabilizadora (FMC).

O voo também deve ser apoiado com dados de campo para determinação da posição planimétrica e altimétrica nas fotografias verticais obtidas. A restituição digital deve ser realizada na escala 1:1000 utilizando restituidores digitais e deve conter a exata posição de todos os detalhes obtidos a partir do voo. Nas ortofotos, se realizada uma montagem em layout na escala 1:5.000 do Plano Nacional de Ortofotografia Aérea (PNOA) e, posteriormente, uma vez realizada a cartografia na escala 1:1.000 será feito um ortomosaico de toda a área incluída na restituição fotogramétrica com resolução de 10 cm.

#### **1.4 OBJETIVO**

##### **1.4.1 Geral**

Estudar, aplicar metodologia para evidenciar o potencial de uso da técnica de fotogrametria por meio de VARP para obtenção de produtos fotogramétricos que irão auxiliar na identificação e análise de parâmetros em curvas horizontais mal projetadas e/ou construídas em rodovias estaduais do estado de São Paulo que possam comprometer a segurança viária.

##### **1.4.2 Específicos**

1. Identificar trechos de curvas horizontal em produtos de sensoriamento remoto/fotogrametria que possam vir a ter alguma irregularidade de projeto de acordo com as normas técnicas do manual vigente da via;
2. Avaliar e analisar a qualidade de produtos fotogramétricos obtidos por VARP, para determinação de parâmetros de curva horizontal como superelevação e raio de curvatura;
3. Fazer um estudo comparativo da superelevação obtida por meio modelo digital de superfície e por levantamento altimétrico, determinando o erro absoluto e erro relativo;
4. Apresentar a confiabilidade de produtos de fotogrametria em análises de parâmetros de trechos rodoviários curvos.

#### **1.5 JUSTIFICATIVA**

Essa pesquisa busca desenvolver uma metodologia que contribua para a realização de análises em parâmetros intrínsecos ao traçado do eixo rodoviário em planta, especialmente em trechos concordados por curvas horizontais que possam apresentar algum tipo de inconsistência geométrica.

Para isso, os parâmetros a serem analisados nesses trechos tratam do raio mínimo de curvatura e a superelevação adotada, no qual busca-se extrair, analisar e avaliar por meio de produtos de fotogrametria.

A explicação para a avaliação desses parâmetros é dada porque trechos concordados por curvas horizontais devem atender a um valor de raio mínimo estabelecido com base na taxa de superelevação máxima, de maneira que ambos os parâmetros façam a atenuação dos esforços laterais causados nos veículos ao percorrem uma trajetória curvilínea.

Ao estabelecer uma taxa de superelevação máxima em projeto geométrico, deve-se calcular o raio mínimo que garanta a segurança do trecho para que não haja desconfortos aos usuários e nem os induza ao erro.

Dessa forma, essa pesquisa justifica-se pelo fato de a aerofotogrametria obter informações sobre o terreno sem interferir no tráfego da região, reduzindo e otimizando tempo dentro de um projeto rodoviário, uma vez que, com os produtos ortomosaicos e MDS, é possível extrair informações do eixo rodoviário e, conseqüentemente, determinar os parâmetros intrínsecos a ela.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, será apresentada a fundamentação teórica que dará embasamento teórico para o desenvolvimento da metodologia desta dissertação.

### 2.1 Fotogrametria e Veículo Aéreo Remotamente Pilotado

Para a American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS, 2009), a Fotogrametria consiste na arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente por meio de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes.

Atualmente, o uso da fotogrametria aérea vem sendo bastante disseminado por meio dos Veículos Aéreos Remotamente Pilotados – VARP –, pois a sua principal vantagem é a redução dos custos e de tempo em mapeamentos aéreos.

Porém, ao se trabalhar com VARP, cada país possui suas próprias regulamentações sobre uso, restrições e limitações desses veículos. No Brasil, a instituição responsável por essas regulamentações é o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), que, por meio da Instrução do Comando da Aeronáutica – ICA\_100-40 de 1 de julho de 2020, estabelece as normativas vigentes do uso desses veículos e do acesso ao espaço aéreo brasileiro (DECEA, 2020).

A obtenção dos produtos fotogramétricos com os VARP tornou-se uma solução bastante popular, especialmente por fornecer informações sobre o terreno de forma rápida e econômica (FERRER-GONZÁLEZ et al., 2020).

No Brasil, a utilização de equipamentos com câmeras e sistema de posicionamento global (GNSS) vem tendo aplicação em diversas áreas como agricultura de precisão, monitoramento das Áreas de Preservação Permanente (APP), monitoramento de fenômenos ambientais e em áreas de deslizamento, além de monitoramento de linhas de transmissão de energia, fronteira, rodovias, ferrovias, entre outros (GUIMARÃES, 2017 ;SILVA et al., 2014) .

Os VARP utilizados em mapeamento aéreo possuem sistemas de navegação autônomo são compostos por sistema de navegação inercial (INS – *Inertial Navigation System*) e sistema de navegação baseado em GNSS (*Global Navigation Satellite System*), em que o sistema inercial (INS), contido nos veículos, mede as acelerações lineares e velocidade angular por meio de sensores utilizados na sua construção, como os acelerômetros e giroscópios. Enquanto o *Global Navigation Satellite System*

(GNSS) trata-se de sistema de navegação por satélite que fornece informações sobre localização e tempo (LIMA, 2018; MORI, 2013).

Segundo Toth e Józków (2016) existem três soluções de georreferenciamento de fotografias obtidas por VARP e correlacionadas ao tipo de sistema de navegação autônoma da aeronave.

A primeira solução, denominada de georreferenciamento direto, baseia-se na integração de dados de sensores de GPS e IMU que fornecem boas estimativas globais sobre o posicionamento do VARP. Dependendo do sistema essas informações são incoerentes com o seu movimento real devido ao grande erro de posicionamento do GPS, cerca de 5 metros.

Entretanto, atualmente já existem soluções de georreferenciamento direto que fazem a utilização de receptor GNSS de dupla frequência com o sistema IMU, alcançando uma acurácia centimétrica sem a necessidade de pontos de controle. Essa solução pode ser feita a partir de um receptor *Real Time Kinematic* – RTK acoplado na aeronave ou pelo método *Post Processed Kinematic* – PPK (TOTH; JÓZKÓW, 2016).

A segunda solução de georreferenciamento é dada pelo método indireto, no qual pode ser obtido por meio de pontos de controle no campo usados para a orientação do sensor sem quaisquer dados GPS e/ou IMU. E, por fim, a terceira e última solução é *Integrated Sensor Orientation* – ISO –, a qual irá integrar o georreferenciamento direto e o indireto por meio de pontos de controle em campo (TOTH; JÓZKÓW, 2016).

No georreferenciamento ISO, os benefícios estão na disponibilidade e redundância dos dados, uma vez que os dados da navegação GPS/IMU obtêm as informações de posição no instante em que as imagens foram adquiridas servindo de pontos de controle aéreo. E os pontos de controle no solo serão usados em um cálculo semelhante à orientação indireta (TOTH; JÓZKÓW, 2016).

Para orientação e determinação da acurácia dos produtos fotogramétricos gerados por essa dissertação, a solução ISO será utilizada, uma vez que, o VARP a ser usado no mapeamento possui sistema de navegação GNSS e IMU com precisão na ordem do metro. Para atingir a precisão centimétrica desejada, uma rede de pontos de controle também será implementada.

## 2.2 Mapeamento aéreo e Planejamento de voo

O mapeamento aerofotogramétrico consiste em um dos métodos utilizados para realização do mapeamento da superfície terrestre. Sendo necessário a realização de um planejamento do voo fotogramétrico por uma aeronave na qual é acoplada uma câmera fotogramétrica.

O voo fotogramétrico irá mapear uma dada região, e esta operação é sujeita a diversas limitações que restringem o tempo de voo, e também deve seguir parâmetros para garantir a natureza da Fotogrametria (DA SILVA; DAL POZ, 2004).

Em Kraus, (2004), o autor aborda que para a formação tridimensional das feições mapeadas torna-se necessário que cada ponto sobre a superfície seja imageado, pelo menos, em duas fotografias métricas. Diante disso, para que haja a estereoscopia, alguns parâmetros devem ser estabelecidos para garantir os princípios da fotogrametria.

As operações fotogramétricas para fins de mapeamento requerem que alguns parâmetros sejam determinados no planejamento de voo. Esses parâmetros são usados no desenvolvimento de projetos de fotogrametria para garantir acurácia desejada nos produtos a serem gerados.

Os principais parâmetros a serem determinados no planejamento de um voo fotogramétrico são (DA SILVA; DAL POZ, 2004):

1. localização da região e delimitação da área a ser fotografada;
2. parâmetros da câmera;
3. definição do GSD;
4. escala das fotos ( $E_F$ );
5. altitude de voo ( $H$ ) e altitude média ( $h_m$ );
6. superposição longitudinal ( $S_v$ ) e lateral ( $S_L$ );
7. intervalo de exposição entre as fotos ( $\Delta T$ );
8. tempo de exposição ( $\Delta t_E$ );
9. número de faixas ( $N_{FX}$ ) e direção de voo;
10. número de fotos por faixa ( $N_{FF}$ ); e por fim
11. total de fotos ( $N_{TF}$ )

Os atuais softwares de planejamento de voo desenvolvem os cálculos dos parâmetros fotogramétricos com base nas informações inseridas pelo usuário. E para um maior conhecimento sobre as deduções dos cálculos, é sugerido o livro de Kraus

(2004) onde são demonstradas as equações para cada um dos parâmetros anteriormente citados.

Um dos principais parâmetros a se determinar durante o planejamento de voo, é a escala. A escala fotográfica está em função da altura de voo e distância principal da câmera e pode variar de acordo com altitude do terreno.

De acordo com Neumann (2008), em decorrência das câmeras digitais possuírem tamanhos de sensores diversos, faz-se com que, na determinação na escala, as dimensões do pixel no CCD (*Charge Coupled Devices*) devam ser consideradas.

Diante disso, a Eq. (4) está diretamente relacionada à escala pelo parâmetro *Ground Sample Distance* – GSD que irá ditar o nível de detalhamento (nitidez) do mapeamento.

Neumann (2008) e Felipe-García; Hernández-López; Lerma (2012) apresentam a formulação do GSD como sendo a escala fotogramétrica, multiplicada pelo tamanho do pixel do CCD, conforme a Eq. (6).

$$GSD = \frac{h}{c} \times \text{tamanho do pixel} \quad (4)$$

Onde:

h: altura de voo (m)

c: distância focal (mm)

Ao observar a Eq. (4), nota-se a relação entre o tamanho do pixel e o GSD. Essa relação é dada meio da escala, na qual a altura de voo e o tamanho do pixel influenciam diretamente o tamanho do GSD.

Ter conhecimentos sobre essa relação é de suma importância, pois, ao realizar o planejamento de voo, deve-se considerar as variações de altitude no terreno, pois essa variação será percebida também na altura de voo, impactando diretamente no GSD. Isto posto, é preciso levar em consideração essa variação do GSD dentro planejamento de voo, para que não se perca o nível de detalhamento desejado.

### **2.2.1 Pontos de apoio**

Dentro do planejamento de um mapeamento aéreo, pode haver a necessidade de se planejar pontos de apoio. A necessidade de pontos de apoio varia com a natureza e a finalidade do projeto.

Os pontos de apoio referem-se à rede de pontos foto identificáveis, sinalizados ou não, no terreno, para os quais são estabelecidos valores de coordenadas referenciados em *datum* horizontal e vertical (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

De acordo com Kraus, (2004), os pontos de apoio são utilizados em etapas distintas do processo fotogramétrico, sendo uma delas o ajustamento de blocos das fotografias métricas (*Bundle Block Adjustment*).

Andrade (2003) ressalta que a finalidade primordial, mas não única, dos pontos de apoio é a materialização do referencial com que se deseja trabalhar, pois para materializar um referencial tridimensional sete parâmetros são requeridos.

Os pontos de terreno são subdivididos em dois tipos: (i) pontos de controle, em inglês *Ground Control Points – GCP*; e (ii) pontos de verificação, em inglês *check points* (CH). A diferença entre eles é a utilização dentro do processamento fotogramétrico (GRAHAM; KOH, 2003).

Para Wolf; Dewitt; Wilkinson, (2014), o número e a distribuição dos pontos de controle dentro do mapeamento irá depender diretamente do objetivo a que serão destinados. Se o uso dos pontos de controle for para determinação da resseção espacial, no mínimo três pontos se fazem necessários, distribuídos de maneira a formar um triângulo equilátero.

No entanto, se a finalidade for a orientação dos estereomodelos, os pontos de controle devem ser distribuídos para cada estereomodelo de modo que sejam três pontos de controle horizontais bem espaçados, e quatro pontos verticais distribuídos próximo aos cantos do modelo. Por fim, quando os pontos de controle são necessários para realizar aerotriangulação (*Bundle Block Adjustment*), recomenda-se, no mínimo, dois pontos de controle horizontais, e de três a quatro pontos de controle verticais, distribuídos a cada cinco modelos ao longo da faixa de voo (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Para Andrade (2003), a experiência demonstra que, nas extremidades das faixas, deve haver pontos de controle com as três coordenadas conhecidas em áreas comuns entre as faixas. E, ao longo das áreas externas, os pontos de controle tridimensional devem ser distribuídos a cada 3 e 5 bases. Os pontos altimétricos devem ser dispostos ao centro dos blocos e alinhados com os das extremidades.

Porém, a distribuição dos pontos de controle para aerotriangulação se altera quando o voo é feito com sistemas GNSS e IMU embarcado. Kraus (2004) discute

sobre a redundância que esses dois sistemas trazem para aerotriangulação, uma vez que, com os sistemas GNSS e IMU, os parâmetros da orientação exterior podem ser diretamente determinados, e as imagens podem ser processadas utilizando o método de georreferenciamento direto. Dessa forma, o sistema GNSS oferece os centros de perspectiva dentro dos blocos fotogramétricos, que auxiliam na aerotriangulação, e portanto, evitam a necessidade de uma série de pontos de controle verticais.

Cabe ressaltar que, uma vez que os pontos de controle irão compor o processamento fotogramétrico, é de suma importância que eles possuam alta acurácia, pois a qualidade dos produtos a serem gerados depende diretamente deles (GRAHAM; KOH, 2003).

Além disso, outros fatores também influenciam na acurácia dos produtos fotogramétricos. Segundo Ferrer-González et al. (2020), a distribuição, a quantidade de pontos, a altitude de voo, morfologia do terreno, metodologia de calibração da câmera e a sobreposição das imagens podem afetar diretamente na acurácia.

De acordo com os estudos de Agüera-Vega; Carvajal-Ramírez; Martínez-Carricondo (2017), os resultados demonstram que, para componente horizontal, a morfologia do solo e altitude de voo não têm influência na acurácia. No entanto, o aumento no número de GCP's tem influência. Já para a componente vertical, a altitude de voo e o número de GCP's afetam a sua acurácia.

Entre os fatores citados pelos autores que afetam acurácia, não é discutido a respeito da influência que o ângulo de abertura das câmeras (tipo de câmera) tem sobre a componente vertical. Porém, Kraus (2004) explica que a acurácia da componente vertical é diretamente proporcional à distância câmera-objeto. Dessa maneira, a acurácia altimétrica depende diretamente da acurácia da medida de paralaxe, bem como a razão aerobase e altura de voo, e a escala da foto.

Sanz-Ablanedo et al. (2018) também analisam a acurácia dos produtos gerados por VARP alterando o número e a localização dos pontos de controle. Os resultados indicam que, se poucos pontos de controle forem utilizados, o RMSE será cerca de 5 vezes o GSD médio do projeto. Contudo, se for introduzido um número maior de GCP's, o RMSE convergirá lentamente para um valor aproximadamente o dobro do GSD médio. Todavia, a quantidade de pontos de controle deve ser uma questão sempre a ser analisada, pois, mesmo com o aumento na quantidade de pontos, pode

ser que não haja melhora significativa na acurácia dos produtos, uma vez que a distribuição deve ser adequada ao objetivo.

Diante disso, Ferrer-González et al. (2020) propuseram um estudo cujo objetivo principal era determinar a influência que o número e a distribuição de GCP's tem em mapeamentos lineares para geração de Modelo Digital do Terreno (MDT).

Para isso, os autores fizeram o mapeamento de uma rodovia com extensão e largura do trecho de 2,1 x 0,190 quilômetros com um *buffer* de 95 metros a partir do eixo da via. O recobrimento longitudinal das imagens é de 80% e o lateral de 60%. A altitude de voo foi constante de 65 m acima do solo e a área de cobertura de cada foto foi de 85,12 x 63,84 m<sup>2</sup>, equivalente a um GSD de 1,75 cm/pixel. A aeronave utilizada foi DJI Phantom 4 Pro, equipada com uma câmera grande angular com sensor CMOS de 20 megapixel e tamanho equivalente a uma polegada, *f-stop* *f2.8/f11* e distância focal equivalente a 24 mm. Mais uma vez, os autores não abordam a influência que o ângulo de abertura tem na acurácia da componente vertical e também não especificam quantas faixas de voo foram feitas.

Para avaliar a influência na acurácia dos produtos fotogramétricos em mapeamentos lineares, os autores utilizaram-se de 47 pontos de apoio no total, dos quais 18 pontos eram de check (CH) e 29 pontos de controle (GCP). A partir desses pontos, treze diferentes configurações de distribuição foram feitas.

As quatro distribuições foram desenvolvidas alternando o número de pontos de controle e a sua localização, embora a quantidade de pontos de controle variasse em cada distribuição. Os pontos de check (CH) eram mantidos os mesmos para as treze diferentes configurações.

As quatro distribuições foram usadas no processo de fototriângulação por feixes de raios perspectivos e desenvolvida da seguinte maneira:

- distribuição 1: os GCP foram inseridos dos dois lados da rodovia: um de frente para o outro no início, no meio e no fim da via. Seguindo esse estilo, quatro configurações distintas foram realizadas usando respectivamente 4, 6, 10 e 18 GCP;
- distribuição 2: os GCP foram dispostos dos dois lados da rodovia, no entanto, de modo alterado, zigzagueando a via, e não mais em pares. Para essa segunda distribuição, três projetos foram feitos utilizando respectivamente 3, 5 e 9 GCP;

- distribuição 3: os GCP foram colocados apenas de um lado da rodovia, no início, no meio e no fim. Para esse tipo de distribuição, foram feitos três projetos com 3, 5 e 9 pontos de controle respectivamente;
- distribuição 4: combina a distribuição um e dois, no qual os GCP foram distribuídos nos dois lados da rodovia em ziguezague, sendo adicionados aos pares no início e no final do corredor, mas não no meio. Os autores para essa configuração de distribuição realizaram três projetos usando 7, 9 e 11 GCP's.

No final, os autores apresentam que a distribuição quatro com 9 GCP foi a que produziu melhor acurácia quando comparada com as demais ( $RMSE_{xy}$ :0,029 m e  $RMSE_z$ :0,057 m), tanto na quantidade de GCP's utilizados, quanto na sua disposição dentro do projeto.

Diante das referências apresentadas, o mapeamento linear a ser gerado nesta dissertação seguirá as metodologias de Kraus (2004); Ferrer-González et al. (2020); Agüera-Vega; Carvajal-Ramírez; Martínez-Carricondo (2017) e Sanz-Ablanedo et al. (2018) como referência para a distribuição e o número de pontos de apoio.

### **2.3 Posicionamento relativo cinemático pós-processado (PPK)**

Entre os métodos de posicionamento via receptores GNSS, o posicionamento relativo cinemático consiste na medição da observável fase da onda portadora, e da pseudodistância para solução do vetor de ambiguidades. Para os dados desse tipo de posicionamento, há duas maneiras de processamentos: (i) após a coleta (pós-processado) ou (ii) durante a coleta (em tempo real denominado *Real-Time Kinematic* - RTK) (MONICO, 2007).

No modo pós-processado, um receptor ocupa uma estação de coordenadas conhecidas enquanto o outro receptor se desloca entre as feições de interesse. Com as observações simultâneas dos receptores, é possível determinar as duplas diferenças, o que possibilita a redução de vários erros envolvidos nas observáveis (MONICO, 2007).

De acordo com Gama; Carneiro e Seixas (2007), o método PPK fornece uma técnica de alta produção em medições cadastrais podendo ser usados em áreas com o mínimo possível de obstruções de satélites. A vantagem do método em comparação aos demais é o tempo de observação reduzido significativamente.

Os requisitos para esse tipo de posicionamento são citados em Monico (2007) e Gama; Carneiro e Seixas (2007). Nesse sentido, a observação de cinco ou mais satélites é fundamental para proporcionar redundância de informações e a solução do modelo matemático. A acurácia atingida nesse tipo de posicionamento é de ordem centimétrica, sendo bastante utilizado em obras de engenharia, agricultura de precisão, entre outros.

Para a determinação das coordenadas de terreno dos pontos de apoio desta dissertação, o posicionamento cinemático pós-processado foi adotado em decorrência de o tempo de observação ser menor, especialmente pelo fato da quantidade de pontos a ser coletada as coordenadas. Entretanto, ressalta-se que outros métodos de posicionamento como relativo estático, estático rápido, semicinemático, cinemático em tempo real poderiam vir a substituir o método atual.

#### **2.4 Produtos fotogramétricos: Ortomosaico e Modelo Digital de Superfície/ Terreno – MDS/MDT**

Os produtos fotogramétricos a serem gerados por esta dissertação tratam-se do ortomosaico e do Modelo Digital de Superfície (MDS). Sendo assim, nesta seção, uma breve introdução a respeito do processamento fotogramétrico desses produtos será descrita.

As ortoimagens ou ortofotos são definidas como imagens em perspectiva ortogonal. Dessa forma, as imagens em perspectiva central não podem ser usadas para informações métricas, uma vez que possuem erros advindos da rotação do sensor e deslocamento do relevo, inerentes à perspectiva cônica (BRITO e COELHO, 2007).

Com base nisso, torna-se necessário aplicar sobre as imagens em perspectiva central, um processo denominado de ortorretificação. O resultado final, é uma imagem em um sistema no qual não possui desvios e nem distorções relativas ao relevo, e pode ser tomada como um documento cartográfico (BRITO e COELHO, 2007; KRAUS, 2004)

A ortorretificação na fotogrametria digital é feita por meio de transformações sobre os números digitais dos pixels que compõem a imagem original, e para isso é necessário conhecer os parâmetros de orientação interior e exterior.

A diferenciação entre a ortorretificação e a retificação é que na primeira são eliminadas tanto as distorções relativas à câmera como rotação quanto as distorções

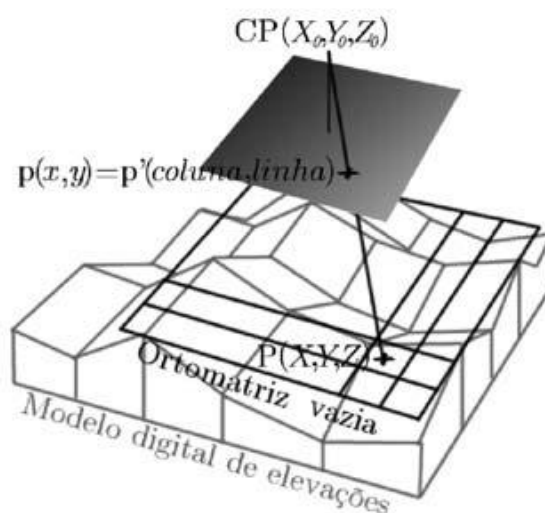
provenientes do relevo por meio da transformação da perspectiva cônica em ortogonal. Dessa forma, as ortoimagens possuem dados importantes que servem para Sistema de Informações Geográficas (SIG) (BRITO e COELHO, 2007; KRAUS, 2004).

Existem três modelos matemáticos usados na ortorretificação: (i) transformação afim; (ii) transformação projetiva; e (iii) retificação diferencial. Para o desenvolvimento da fundamentação desta pesquisa, será dada maior ênfase para o modelo de retificação diferencial, pois é o método efetivamente utilizado.

A retificação diferencial consiste em um método genérico o qual apresenta resultado melhores do que os outros dois métodos. O objetivo desse método é gerar uma nova imagem digital em perspectiva ortogonal removendo os efeitos da inclinação, deriva, variações de escala da câmara aérea e deslocamentos devidos ao relevo (BRITO e COELHO, 2007; TOMMASELLI, 2009).

A Figura 1 esquematiza o processo de ortorretificação por meio da retificação diferencial que auxilia na compressão do mesmo. Em seguida, será feita a explicação do processo.

Figura 1 - Processo de ortorretificação pelo modelo de retificação diferencial.



Fonte: UERJ, 2004.

Primeiramente, o processamento se inicia com a definição de uma ortomatriz vazia sobre o terreno, sendo essa associada a uma imagem digital vazia (em branco) com pixels cujas dimensões são estabelecidas. Em seguida, são determinadas as coordenadas tridimensionais ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ) do centro de cada pixel da ortomatriz vazia. Assim sendo, no método de retificação diferencial torna-se essencial o conhecimento do MDT, pois é a partir das coordenadas tridimensionais ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) do MDT que as equações de colinearidade são utilizadas para determinar as coordenadas no espaço-

imagem, conforme apresenta a Eq. (5). Vale a pena ressaltar que, para a utilização das equações de colinearidade, os parâmetros de orientação exterior e interior devem ser conhecidos (BRITO e COELHO, 2007).

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= y_0 - c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (5)$$

Onde:

x e y: coordenadas no espaço imagem;

X, Y e Z: coordenadas de pontos no espaço objeto no sistema fotogramétrico;

X<sub>0</sub>; Y<sub>0</sub>; Z<sub>0</sub>: coordenadas dos centros de perspectiva (origem do sistema fotogramétrico), referidas ao referencial geodésico;

m<sub>ij</sub>: matriz produto de três matrizes de rotação (R<sub>z</sub>(X).R<sub>y</sub>(φ).R<sub>z</sub>(ω));

c: distância principal.

De acordo com Andrade (2003) e Brito e Coelho (2007), posteriormente reamostra-se o nível de cinza dos pixel vizinhos ao ponto projetado de volta a imagem original digitalizada. Os algoritmos mais adotados para realizar essa etapa são: o vizinho mais próximo, interpolação bilinear, splines cúbicas e o polinômio de Lagrange. E então a cor do pixel dada por alguns dos algoritmos citados é adotada pelo pixel da futura ortofoto digital.

O outro produto a ser gerado nessa pesquisa é o MDS. O *software* utilizado para processamento das imagens aéreas e geração dos produtos fotogramétricos desejados foi o *Pix4Dmapper*. Diante disso, será abordada exclusivamente a técnica utilizada pelo software para geração do MDS.

O *Pix4Dmapper* é baseado no algoritmo *Structure from Motion – SfM* – que tem dois princípios básicos como: (i) a visão binocular e (ii) variação de posição de um objeto que está sendo observado de ponto de observação em movimento. Dessa forma, o algoritmo SfM estima modelos tridimensionais a partir da sobreposição de imagens bidimensionais (IGLHAUT et al., 2019).

Iglhaut et al. (2019) explicam que esse algoritmo se difere das técnicas de fotogrametria tradicional em três aspectos principais: (i) as feições podem ser automaticamente identificadas e compatibilizadas em imagens em diferentes escalas, ângulos de visão e orientações; (ii) as equações utilizadas no algoritmo podem ser

resolvidas sem informações das posições das câmeras ou pontos de controle (no entanto, podem ser adicionadas posteriormente para melhora da acurácia); e (iii) a calibração da câmera pode ser resolvida ou refinada automaticamente durante o processo.

Diante disso, a técnica do algoritmo SfM resolve as equações de colinearidade sem fazer uso de qualquer ponto de controle (menor acurácia, porém podem ser inseridos posteriormente para uma melhora na precisão), fornecendo parâmetros da câmera e uma nuvem de pontos esparsos em um sistema de coordenada arbitrário. Porém, o SfM trabalha em conjunto com o algoritmo de *Multi view stereo matching* – MVS – para a densificação da nuvem de pontos esparsos em uma nuvem de pontos densos; e todo esse processo fotogramétrico pode ser denominado como SfM-MVS (FERRER-GONZÁLEZ et al., 2020).

Em Iglhaut et al. (2019), os autores explicam que o processo SfM-MVS inicia-se com a extração automática de pontos chaves nas imagens, em que são identificados para todas as imagens e para aquelas imagens onde eles aparecem é feita a amarração (*matched*).

Os autores ainda ressaltam que um dos algoritmos mais comuns utilizados para identificação desses pontos chaves é *Scale-Invariant Feature Transform* – SIFT –, que produz um descritor numérico para cada ponto homólogo em cada imagem. E tais descritores são invariáveis à escala e à orientação. Dessa forma, são adequados para conseguirem identificar pontos ou objetos em imagens tomadas sob diferentes perspectivas e condições. Com base na correspondência dos pontos chaves, é testada uma grosseira reconstrução geométrica das imagens e da posição relativas dos pontos-chaves.

Com um número suficiente de imagens e pontos-chaves amarrados (*matches*), o algoritmo de SfM inicia *Bundle Adjustments* (recaindo na fotogrametria clássica) determinando, simultaneamente, posição e os parâmetros da câmera, além da nuvem de pontos esparsos.

Para Brito e Coelho (2007), o método de triangulação por feixes perspectivos – *Bundle Adjustment* – permite a reconstrução ótima da geometria dos feixes de raios luminosos formadores do espaço-imagem no momento da aquisição das imagens fotogramétricas; e o processo se vale do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), de maneira que cada raio ajustado se aproxime o máximo possível de seu homólogo no

espaço-imagem e do centro perspectivo da imagem. Essa condição pode ser expressa pelas equações de colinearidade.

Em Iglhaut et al. (2019), os autores explicam que SfM soluciona o *Bundle Adjustment* utilizando (i) valores iniciais obtidos das sequências de pontos-chaves amarrados juntamente aos parâmetros e posições da câmera; (ii) e um refinamento não linear. Desse modo, os produtos de saída do SfM são produtos que possuem uma escala e são georreferenciados a partir dos GCP's e/ou dados de navegação da câmera/plataforma.

Os parâmetros e a posição da câmera determinada no processo de SfM são utilizados para a geração da nuvem de pontos densa no algoritmo de MVS. E, a princípio, antes da densificação pelo MVS, as imagens são agrupadas (*cluster*) com base em suas localizações. Esse processo é feito para melhorar a eficiência computacional do algoritmo. Dessa forma, a nuvem de pontos densa é determinada separadamente para cada conjunto de imagens (*cluster*), e a sua qualidade depende diretamente das informações das imagens de entrada (IGLHAUT et al., 2019).

A nuvem de pontos densos representa o primeiro produto final do algoritmo SfM-MVS. Em etapas subsequentes, torna-se possível obter MDS, ortomosaicos e o MDT (IGLHAUT et al., 2019).

#### **2.4.1 Avaliação da acurácia de produtos fotogramétricos**

Posteriormente ao processamento dos produtos fotogramétricos, faz-se necessário realizar a análise do Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos<sup>1</sup> (PEC), no qual as análises são geradas a partir dos pontos de check obtidos em campo por receptores GNSS (LIMA, 2018).

No Brasil, essa avaliação dos produtos fotogramétricos é feita por meio do PEC, que se trata de um indicador estatístico de dispersão sendo relativo a 90% de probabilidade que define a exatidão de trabalhos cartográficos. Isto posto, a probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão (IBGE, 2020; LIMA, 2018).

A Tabela 3 apresenta os valores dos PEC planimétrico e altimétrico e os seus respectivos erros-padrão (EP) para cada classe.

---

<sup>1</sup> O Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, estabelece critérios para classificação de cartas com relação a exatidão ou acurácia, utilizando um indicador estatístico da qualidade posicional, denominado de "Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)".

Tabela 3 - Valores previstos no PEC para cada classe.

| Carta    | PEC planimétrico | Erro padrão (EP) | PEC altimétrico   | Erro padrão (EP)  |
|----------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Classe A | 0,5 mm x escala  | 0,3 mm x escala  | 1/2 equidistância | 1/3 equidistância |
| Classe B | 0,8 mm x escala  | 0,5 mm x escala  | 3/5 equidistância | 2/5 equidistância |
| Classe C | 1,0 mm x escala  | 0,6 mm x escala  | 3/4 equidistância | 1/2 equidistância |

Fonte: Adaptado do manual do IBGE (2020).

Para avaliar os produtos gerados de acordo com o PEC determina-se o PEC planimétrico e o erro padrão (EP) para classe e escala desejada, e posteriormente verifica-se se o RMSE planimétrico dos produtos atende a condição descrita na Eq. (6). Em caso afirmativo, os produtos atendem o PEC para classe determinada.

$$RMSE_{xy} < \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

A mesma avaliação é feita para o PEC altimétrico, no qual analisa-se se o RMSE<sub>z</sub> dos produtos é menor do que o EP para a classe desejada, conforme Eq. (7).

$$RMSE_z < EP_{altimétrico} \quad (7)$$

Caso as análises Eq. (6) e Eq. (7) não atenderem a condição, outras duas análises estatísticas poderiam ser feitas: análise de tendência baseada no método ‘*t-student*’ e análise de precisão pelo método ‘*Qui-quadrado*’. Tais análises foram extintas pelo IBGE, (2020), no entanto, podem ser desenvolvidas para averiguar a existência de tendência nos produtos, como por exemplo a presença de arrastamento nas imagens em alguma componente.

A análise de tendência é baseada nas discrepâncias entre as coordenadas observadas e as coordenadas de referência, calculada para cada ponto conforme a Eq. (8) (GALO; CAMARGO, 1994).

$$\Delta X_i = X_i - X_i^r \quad (8)$$

Onde:

X<sub>i</sub>: coordenada X estimada pelo processo fotogramétrico para o respectivo ponto de apoio;

X<sub>i</sub><sup>r</sup>: coordenada X medida em campo com receptor geodésico para o respectivo ponto de apoio.

A média e o desvio-padrão das discrepâncias são calculados conforme a Eq. (9) e Eq. (10):

$$\Delta\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i}{n} \quad (9)$$

$$S_{\Delta X} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \Delta\bar{X})^2}{n - 1}} \quad (10)$$

Para o teste de tendência, duas hipóteses são avaliadas, conforme a condição abaixo:

$$H_0: \Delta\bar{X} = 0, \text{ contra}$$

$$H_1: \Delta\bar{X} \neq 0$$

Para o teste de tendência, deve-se calcular a estatística amostral “t” e verificar se o valor de “t” amostral está dentro do intervalo de aceitação ou rejeição quando a hipótese é nula. A Eq. (11) apresenta o cálculo do valor de “t” amostral, e a Eq. (12) o intervalo de confiança:

$$t_X = \frac{\Delta\bar{X}}{S_{\Delta X}} \cdot \sqrt{n} \quad (11)$$

$$|t_X| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad (12)$$

Caso a estatística amostral “t” esteja fora do intervalo de confiança, a hipótese nula é rejeitada, significando que o produto não pode ser considerado como livre de tendências para o ponto avaliado (GALO; CAMARGO, 1994).

Para a análise de precisão, é feita a comparação do desvio-padrão das discrepâncias com o erro padrão (EP) esperado para a classe que será testada. Dessa forma, o teste de hipótese nula é feito conforme a condição abaixo: (GALO; CAMARGO, 1994):

$$H_0: S_{\Delta X}^2 = \sigma_X^2, \text{ contra}$$

$$H_1: S_{\Delta X}^2 > \sigma_X^2,$$

Sendo o  $S_{\Delta X}$  desvio-padrão esperado para a coordenada X, considerado o erro-padrão para aquela classe, não para uma única coordenada, mas sim, para a resultante. A variância esperada para teste planimétricos, pode ser calculada de acordo com a Eq. (13) (GALO; CAMARGO, 1994):

$$\sigma_X = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

A partir da variância determinada, calcula-se Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) que irá testar se a variância do resíduo ( $\sigma^2$ ) é igual ao erro-padrão estabelecido pelo PEC, conforme a Eq. (14).

$$\chi^2_X = (n - 1) \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \quad (14)$$

Onde:

n: número de amostras;

Posteriormente à determinação de Qui-quadrado, é feita a verificação para saber se o valor calculado está no intervalo de aceitação, segundo a Eq. (15):

$$\chi^2_X \leq \chi^2_{(n-1, \alpha)} \quad (15)$$

Caso não seja aceita a condição acima, rejeita-se a hipótese nula ( $H_0$ ) indicando que o produto não atende à precisão preestabelecida para classe analisada. No caso de aceitação, as resultantes das componentes ficam igual ao erro-padrão (GALO; CAMARGO, 1994).

Outros indicadores de qualidade também são usados para indicar a acurácia de produtos fotogramétricos como o PEC- PCD e o RMSE (*Root Mean Square Error*).

O PEC-PCD é utilizado para avaliar os produtos cartográficos digitais, no entanto, cabe ressaltar que o PEC-PCD se trata de uma portaria expedida pelo Exército Brasileiro e não tem poder de lei. Dessa forma, o órgão regulador e fiscalizador de produtos cartográficos, o IBGE, não assume os valores do PEC-PCD como oficiais.

O *Root Mean Square Error (RMSE)* trata-se de uma métrica estatística que determina a diferença entre o modelo reconstruído e as coordenadas de referência, conforme a Eq. (16):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{0i} - X_{GPSi})^2}{n}} \quad (16)$$

Onde:

$X_{0i}$ : Coordenada X estimada pelo processo fotogramétrico para o respectivo ponto de apoio;

$X_{GPSi}$ : Coordenada X medida em campo com receptor geodésico para o respectivo ponto de apoio.

O valor de RMSE é determinado para cada componente (X, Y e Z) separadamente. Dessa forma, o RMSE indica a acurácia do produto final (FERRER GONZÁLEZ et.al., 2020. LIMA; CALDEIRA e CALDEIRA, 2020).

## **2.5 Projeto Geométrico de Rodovias: classificação das rodovias, velocidade diretriz e veículo de projeto**

O projeto geométrico de rodovia consiste em um estudo completo sobre a definição geométrica da via, determinação das características técnicas, quantificação correspondente ao orçamento e avaliação da execução por meio de um planejamento adequado (VICENTINI et al., 2019) .

Dessa forma, ao se iniciar o desenvolvimento do projeto geométrico de rodovias torna-se necessária a definição da classificação técnica da via, bem como as características técnicas e os elementos intrínsecos ao traçado do eixo rodoviário, em planta e em seção transversal.

A classificação técnica das rodovias diz respeito ao padrão construtivo a que as vias devem obedecer, ou seja, as características técnicas que são determinadas com base no volume de tráfego e ao relevo no qual será implantada a via (DER/SP, 2006a).

Atualmente, o DER/SP adota como referência seis classificações técnicas de via (classe 0 a IV-B, sendo a classe 0 o mais alto padrão construtivo) que devem ser adotadas para realização da fase de estudos preliminares que leva em conta os aspectos funcionais e o volume de tráfego previsto (DER/SP, 2005).

Em seguida da classificação técnica da via, outros elementos de projeto devem ser definidos como a velocidade de projeto, que consiste na máxima velocidade segura que pode ser mantida ao longo de todo segmento viário (DER/SP, 2005, 2006a).

Para a rodovia em estudo nessa pesquisa, a classificação técnica atende a classe de projeto I-B, e ela está inserida em uma região de relevo ondulado com velocidade projeto de 80km/h.

A Tabela 4 apresenta todos os parâmetros intrínsecos à classe da via para a velocidade e o relevo onde está inserida. Esses valores são tabelados pelo DER/SP e podem ser consultados em seus manuais 'Notas Técnicas de Projeto Geométrico' e 'Instruções de Elaboração de Projeto Geométrico' (DER/SP, 2005, 2006a).

Tabela 4 - Parâmetros intrínsecos à classe de projeto I-B.

| <b>Tabela de parâmetros intrínsecos a classificação da via</b> |                      |
|----------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b>Descrição</b>                                               | <b>Valor Adotado</b> |
| Classe de projeto:                                             | CLASSE I-B           |
| Volume diário médio (VDM):                                     | 2047 VEÍCULOS        |
| Topografia do terreno:                                         | ONDULADO             |
| Velocidade de Projeto:                                         | 80 km/h              |
| Raio Mínimo das Curvas Horizontais:                            | 229 m                |
| Comprimento mínimo e máximo das espirais:                      | 40/75 m              |
| Superelevação Máxima:                                          | 8,00%                |
| Taxa de superelevação (abaulamento):                           | 2%                   |
| Rampas Mínimas:                                                | 0,5%                 |
| Rampas Máximas:                                                | 4,5%                 |
| Distância mínima de visibilidade de parada:                    | 130 m                |
| Distância mínima de ultrapassagem:                             | 540 m                |

Fonte: O autor, 2023.

Nas seções seguintes, será abordado sobre os parâmetros intrínsecos ao traçado do eixo rodoviário em planta (raio mínimo de curva horizontal, curvas de transição) e em seção transversal (superelevação) que são objetos de estudo nessa pesquisa.

### 2.5.1 Raio mínimo de curva horizontal

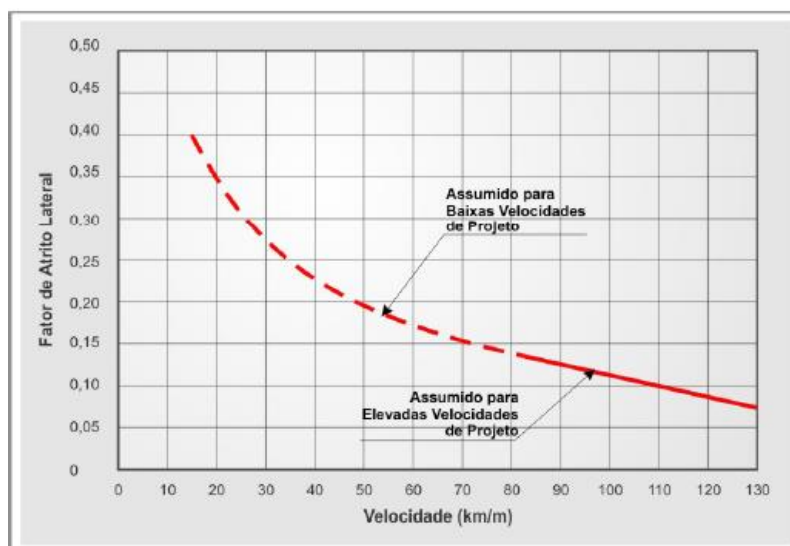
O traçado em planta do eixo rodoviário é concordado por trechos de tangentes e curvas horizontais. Porém, ao fazer a concordância entre esses dois segmentos, deve-se garantir as condições de operação, uma vez que o veículo em trajetória curvilínea está sujeito ao efeito da aceleração centrífuga que passa a atuar sobre o veículo e motorista (LEE, 2008).

Dessa forma, em projetos geométricos, são estabelecidos valores de raios mínimos de curvatura horizontal para taxas de superelevações máximas. Ou seja, ao admitir o valor de superelevação máxima em uma curva horizontal, deve-se adotar o raio mínimo que garanta a segurança e o conforto dos usuários (DER/SP, 2006; LEE, 2008).

O raio mínimo também está associado aos valores máximos admissíveis de fatores de atrito lateral, que está diretamente relacionado à resistência à derrapagem de um veículo ao se percorrer uma trajetória curvilínea. Para determinar esse valor, o DER/SP segue vários testes, pesquisas e estudos elaborados pelo manual da

AASHTO de 2004. A Figura 2 apresenta o gráfico para a determinação do fator máximo de atrito lateral em relação com a velocidade de projeto (DER/SP, 2006a).

Figura 2 - Fatores de atrito lateral assumidos para projeto.



Fonte: Manual de 'Notas Técnicas Notas Projeto Geométrico' DER/SP (2006) *apud* AASHTO (2004).

Para as rodovias estaduais no estado de São Paulo, o DER dispõe de valores tabelados de raio mínimo para cada superelevação e fator de atrito lateral. A Tabela 5 apresenta os valores de raio mínimo a serem adotados de acordo com a velocidade de projeto da classe I-B, para o fator de atrito de 0,14, e os valores de superelevação máxima admissíveis dentro de projetos rodoviários no estado (4%, 6%, 8%, 10% e 12%).

Tabela 5 - Valores de raio mínimo adotado para curvas horizontal em rodovias estaduais do estado de São Paulo.

| Raios mínimos de curvas horizontais estabelecido pelo DER/SP para valores máximos de superelevação e fator de atrito |                              |                            |                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Velocidade de projeto (km/h)                                                                                         | Superelevação máxima 'e' (%) | Fator de atrito máximo 'f' | Raio mínimo adotado (m) |
| 80                                                                                                                   | 4                            | 0,14                       | 280                     |
| 80                                                                                                                   | 6                            | 0,14                       | 252                     |
| 80                                                                                                                   | 8                            | 0,14                       | 229                     |
| 80                                                                                                                   | 10                           | 0,14                       | 210                     |
| 80                                                                                                                   | 12                           | 0,14                       | 194                     |

Fonte: Adaptação do manual de 'Notas Técnicas Notas Projeto Geométrico' DER/SP (2006) *apud* AASHTO (2004).

Os valores de raio mínimo descritos na tabela podem ser calculados conforme a Eq. (17):

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e + f)} \quad (17)$$

Onde:

$R_{\min}$ : raio mínimo da curva circular (m);

V: velocidade de projeto (km/h);

$e_{\max}$ : superelevação máxima admissível (%);

$f_{\max}$ : fator de atrito lateral entre o pneu e o pavimento (adimensional).

Segundo o DER/SP (2006), os valores raio mínimo de curvas horizontais adotados no estado segue o manual da AASHTO de 2004, havendo valores distintos do manual federal do DNER de 1999.

### 2.5.2 Curvas de transição

Ao realizar a concordância de segmentos por curvas horizontais simples, o resultado é um traçado fluente e contínuo no ponto de vista do projeto geométrico. Porém, do ponto de vista dos usuários, isso faz com que os pneus do veículo sigam uma trajetória de transição, uma vez que o condutor não consegue fazer com que o veículo passe instantaneamente da trajetória retilínea para a circular (DER/SP, 2006; LEE, 2008).

Diante disso, a inserção de curvas de transição entre as tangentes e as curvas horizontais proporcionam aos usuários uma trajetória mais natural, de modo que a aceleração radial varie à medida que o veículo entra ou saia da curva (DER/SP, 2006).

As vantagens da implantação de curvas de transição são várias e podem ser encontradas no manual do DER/SP, (2006). No entanto, o DER/SP destaca que a principal vantagem é impedir a tendência que os veículos têm de invadirem as faixas adjacentes em trechos curvos, especialmente aqueles com raios menores (DER/SP, 2005).

Para as rodovias estaduais no estado de São Paulo, o uso de curvas de transição é obrigatório, sendo adotada a clotóide como a curva de transição mais adequada para meio rodoviário. A implantação da clotóide na transição pode ocorrer de três formas distintas; (i) clotóide entre tangente e curva horizontal; (ii) clotóide oval entre curvas horizontais e de mesmo sentido; (iii) clotóide entre curvas horizontais reversas (DER/SP, 2006a).

Um importante parâmetro a se definir na clotóide é o seu comprimento máximo e mínimo. Para a determinação do comprimento máximo, o DER/SP, (2006) estabelece a Eq. (18) seguindo os critérios da AASHTO de 2004.

$$L_{max} = \sqrt{24 \cdot p_{max} \cdot R} \quad (18)$$

Onde:

$L_{máx}$ : comprimento máximo da espiral de transição (m)

$p_{máx}$ : máximo afastamento lateral da curva circular em relação à tangente = 1,0m;

R: raio da curva circular (m).

Para o comprimento mínimo da clotóide, são estabelecidos dois critérios: o de conforto e o da percepção óptica do motorista. A Eq. (19) determina o comprimento mínimo com base no critério de conforto, buscando estabelecer um comprimento mínimo adequado para que o aumento da aceleração lateral a que o veículo fica submetido na trajetória de transição não cause desconforto aos usuários (DER/SP, 2006a).

$$L_{min} = 0,0214 \cdot \frac{V^3}{C \cdot R} \quad (19)$$

Onde:

$L_{min}$ : comprimento mínimo da espiral de transição (m);

V: velocidade de projeto (km/h);

C: taxa máxima admissível de aceleração lateral ( $m/s^2$ ) = 1,2m/s<sup>2</sup>;

R: raio da curva horizontal (m).

Para o comprimento mínimo com base no critério de percepção óptica, a Eq. (20) é descrita.

$$L_{min} = \sqrt{24 \cdot p_{min} \cdot R} \quad (20)$$

Onde:

$L_{min}$ : comprimento mínimo da espiral de transição (m)

$p_{min}$ : máximo afastamento lateral da curva circular em relação à tangente = 0,2m;

R: raio da curva circular (m).

Segundo o DER/SP, (2006), entre os dois valores mínimos calculados, deve ser adotado aquele que tiver maior valor entre ambos. Em seguida, os valores calculados ainda devem ser comparados com a Tabela 5 de comprimento de transição desejados.

Tabela 6 - Comprimento mínimo desejado para a espiral de transição.

| V (km/h)                   | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 |
|----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Comprimento da espiral (m) | 11 | 17 | 22 | 28 | 33 | 39 | 44 | 50 | 56  | 61  | 67  | 72  |

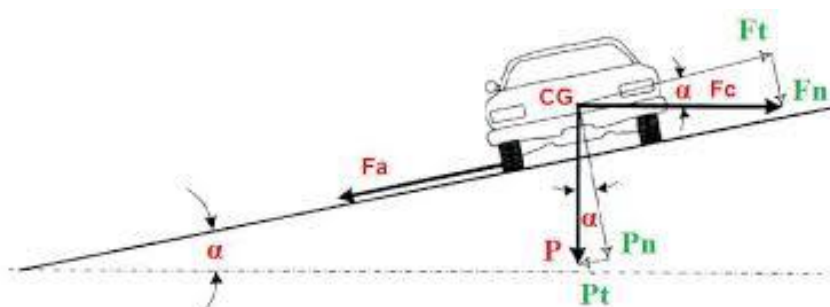
Fonte: Manual 'Nota técnica de projeto geométrico', DER/SP (2006) *apud* AASHTO (2004).

Caso o comprimento desejável da espiral de transição seja menor que os valores mínimos calculados, deve ser adotado o maior comprimento mínimo determinado pela Eq. (19) e Eq. (20). E, em caso contrário, adota-se o comprimento mínimo desejado.

### 2.5.3 Superelevação

A superelevação consiste na declividade transversal da pista nos trechos de curvas horizontais, sendo introduzida com a finalidade de reduzir os esforços laterais sobre os usuários e cargas dos veículos (LEE, 2008). A Figura 3 apresenta a inclinação transversal da pista em relação ao plano horizontal.

Figura 3 - Veículos em trajetória circular representada em planta.



Fonte: Shu Han Lee, (2008).

Com base na Figura 3, acima, o veículo em movimento descreve uma trajetória circular com velocidade longitudinal (tangencial) em uma pista inclinada transversalmente. Seja a pista inclinada com um ângulo ( $\alpha$ ), a superelevação ( $e$ ) pode ser expressa conforme a Eq. (21) (LEE, 2008).

$$e = tg(\alpha)(m/m)$$

Ou

$$e = 100.tg(\%)$$
(21)

Para as rodovias do estado de São Paulo, são admitidos os seguintes valores de taxa máxima de superelevação em cada situação (DER/SP, 2005):

1.  $e_{\text{máx}} = 8\%$  para rodovias de padrão intermediário ou elevado;

2.  $e_{\text{máx}} = 6\%$  para projetos que possuam urbanização adjacentes e frequentes interseções;
3.  $e_{\text{máx}} = 4\%$  em situações extremas com intensa ocupação de solo adjacente;
4.  $e_{\text{máx}} = 10$  e  $12\%$  para casos excepcionais, não sendo recomendados valores superiores a esses.

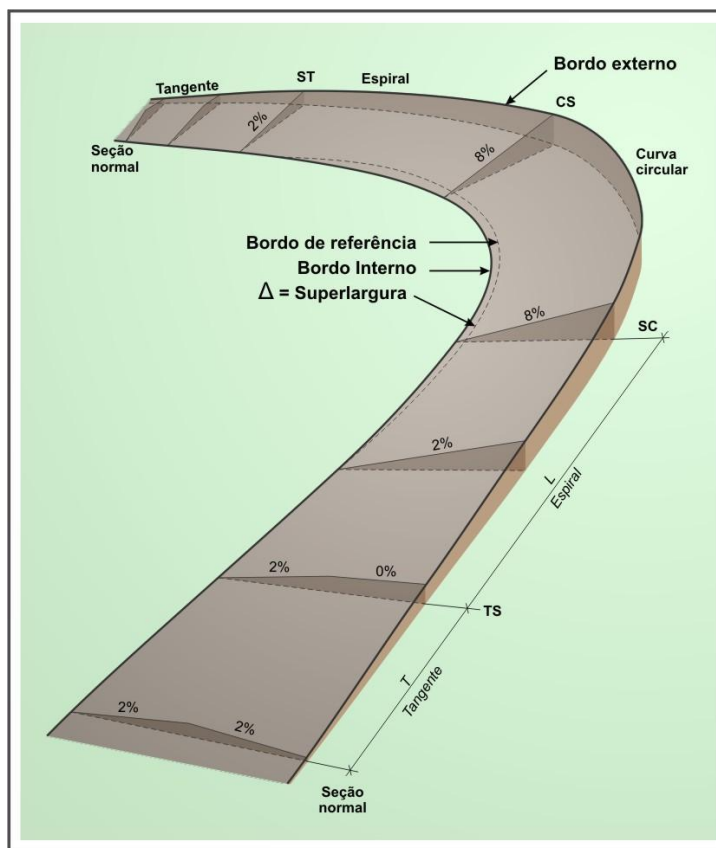
Uma vez estabelecida a taxa de superelevação máxima, esta servirá de referência para determinação de outras superelevações para diferentes raios de curvas horizontais, pois, ao se admitir a taxa máxima, obrigatoriamente o raio mínimo deve ser adotado. No entanto, esse só deve ser adotado em casos específicos nos quais não há a possibilidade de se trabalhar com raios maiores. (LEE, 2008).

Para realizar a transição da superelevação adotada, o DER/SP (2006a) segue o manual DNER (1999), que estabelece que a variação da seção em trecho de tangente deve corresponder ao abaulamento (2 a 3%), ou seja, as duas faixas de trânsito são inclinadas em torno do eixo para os bordos. Essa inclinação é realizada para fins de escoamento das águas pluviais.

Nos trechos em curva, a seção transversal da via apresenta-se com a declividade constante, tendo a borda interna da curva inclinado no valor da superelevação. Ao efetuar o giro da seção em tangente para a seção curva com o intuito de atingir a superelevação adotada, são estabelecidos dois comprimentos de transição, os quais correspondem ao comprimento mínimo da curva de transição descrita na seção anterior (DNER, 1999).

A Figura 4 apresenta a variação da superelevação na transição do trecho de tangente para o curvo, utilizando a curva de transição, onde TS – *Tangent to Spiral* – corresponde ao início da concordância entre a tangente e a curva de transição; L é o comprimento de transição; SC – *Spiral to Curve* – corresponde ao ponto de passagem da transição para a curva circular; CS – *Curve to Spiral* –, passagem da curva circular para a espiral; e por fim ST – *Spiral to Tangent* – corresponde ao final da concordância horizontal, na passagem da espiral para a tangente (LEE, 2008).

Figura 4 - Variação da seção transversal da pista do trecho em tangente para o curvo.



Fonte: Projeto de infraestrutura de vias<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Disponível em: <https://docplayer.com.br/56019756-Ptr-2378-projeto-de-infra-estrutura-de-vias-de-transportes-terrestres.html>

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão descritos a área de estudo, os materiais utilizados para realização desta pesquisa e a metodologia aplicada na realização dos experimentos (Subseção 3.2).

#### 3.1 Área de Estudo

A área de estudo selecionada para realização de um mapeamento aéreo com VARP com o intuito de obter ortomosaico e MDS da via, trata-se da Rodovia Estadual Júlio Budisk - SP-501 no trecho km 26 dentro do perímetro urbano da cidade de Alfredo Marcondes-SP.

De acordo com o site do DER/SP<sup>3</sup>, o trecho da rodovia em estudo atendeu, no ano de 2019, um volume diário médio (VDM) de 2047 veículos, sendo classificada com uma via de classe I-B. A justificativa para a utilização do VDM do ano de 2019, é em decorrência que anos seguintes foram pandêmicos e de isolamento sociais, dessa forma, o VDM é menor.

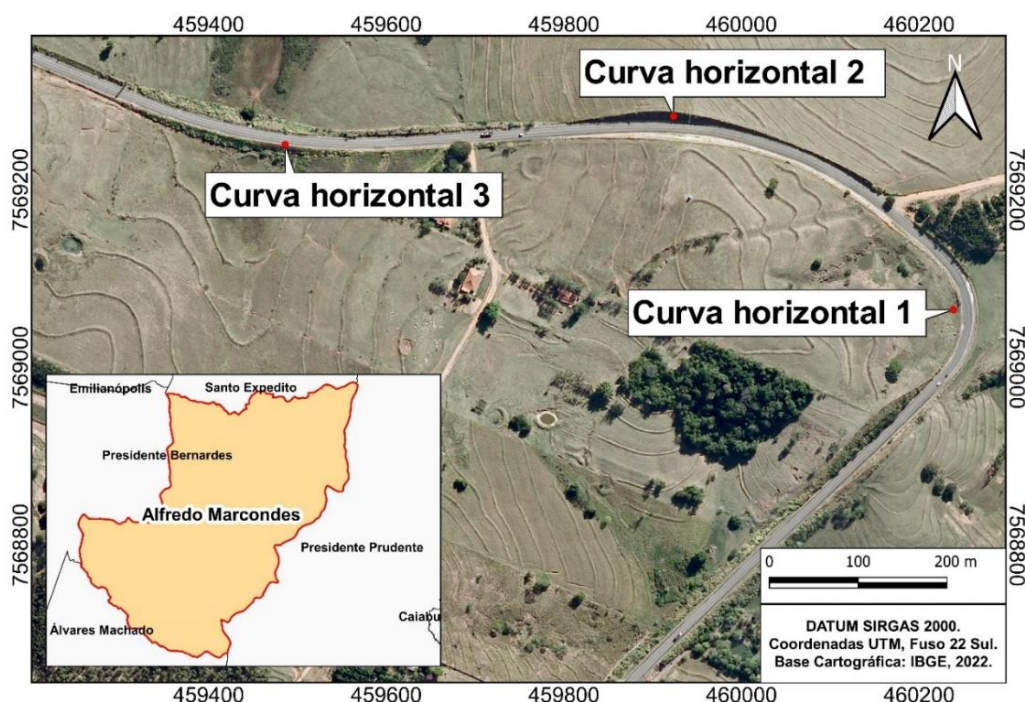
A princípio a pré-seleção dessa área foi feita por ser um trecho onde a ocorrência de acidentes é frequente, e no qual algumas medidas restritivas foram feitas para tentar conter esses acidentes como a presença de radares.

Uma análise visual foi feita no produto ortomosaico com GSD 50 cm disponibilizado pelo Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) do acervo da Emplasa. O produto está ilustrado na Figura 5. A princípio é de fácil percepção que o trecho possui três curvas consecutivas, sendo duas delas (curva 1 e curva 2) de mesma direção, e a terceira (curva 3) de direção oposta, além de que a curva 1 em estudo possui característica de raio menor do que o raio de curvatura.

---

<sup>3</sup> Disponível em: <http://www.der.sp.gov.br/WebSite/MalhaRodoviaria/VolumeDiario.aspx>

Figura 5 - Trecho rodoviário em estudo Rodovia Estadual Júlio Budisk – SP -501, km 26.



Fonte: O autor, 2022.

Do ponto de vista técnico e de acordo com as recomendações gerais do manual (DER/SP, 2005), os seguintes pontos podem ser destacados como contestável às normas:

- os trechos de curvas horizontais possuem a presença de curvas sucessivas na mesma direção, o que deve ser evitado, dando preferências a curvas reversas. A recomendação em casos de curvas sucessivas é avaliar a possibilidade de substituí-las por uma curva única de maior desenvolvimento;
- o raio mínimo de curvatura deve ser evitado para uma dada velocidade, sendo o uso restrito apenas em casos de limitação que impeçam a adoção de raios maiores. Nos casos em que a utilização de raios menores seja inevitável, raios sucessivamente menores devem ser introduzidos, de maneira que a curvatura não se apresente ao condutor de maneira abrupta;
- além de ser recomendável que as curvas circulares sejam dotadas de curvas de transição, a fim de facilitar a dirigibilidade e, portanto, permitir condições operacionais mais favoráveis.

O mapeamento será feito com VARP e abrangerá todo o trecho que possui extensão de 2,2km, característica de relevo ondulado, tendo altitude entre 417 metros e 459 metros de acordo com carta topográfica 1:50.000 disponibilizada pelo IGC<sup>4</sup>. Esses valores foram utilizados como referência para o planejamento de voo.

### **3.2 Metodologia**

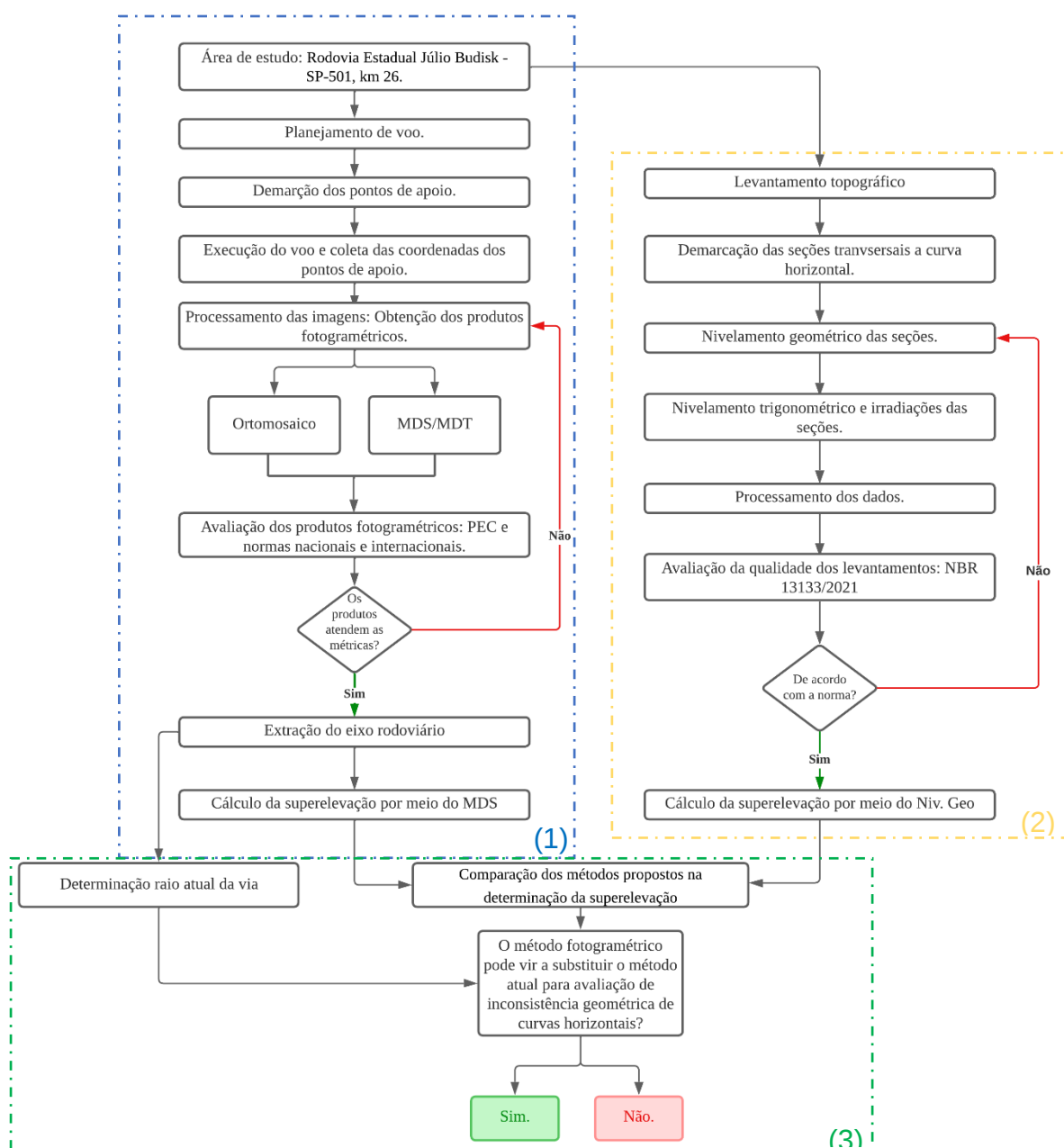
Para atingir os objetivos da dissertação, uma sequência de procedimentos foi definida, de maneira a otimizar o desenvolvimento do trabalho. Esses procedimentos serão mais bem descritos nas subseções seguintes.

A Figura 6 apresenta o fluxograma de execução desta pesquisa para o desenvolvimento do método proposto. Para uma melhor compreensão, a sua explicação será dividida em três etapas: seleção da área de estudo e o planejamento do voo fotogramétrico para a geração dos produtos ortomosaico e MDS, com o objetivo de extrair o eixo e determinar a superelevação da curva (Figura 6-1); realização de um levantamento topográfico para as seções transversais à curva, com o intuito de determinar a superelevação (Figura 6-2); e por fim, um estudo comparativo entre ambos os métodos de determinação da superelevação e o raio extraído da curva, será feito para avaliar se os produtos fotogramétricos podem vir a substituir as técnicas clássicas para a extração, determinação e avaliação de inconsistência geométrica em trechos concordados por curvas horizontais (Figura 6-3).

---

<sup>4</sup> Disponível em: <https://colecoes.igc.usp.br/mapas/ZM657.JPG>

Figura 6 - Fluxograma de execução da pesquisa.



Fonte: O autor, 2023.

### 3.2.1 Planejamento de voo

A etapa de planejamento de voo foi realizada no software eMotion 3, que fornece aos usuários a opção de mapeamentos para feições de características lineares, por isso todo planejamento de voo foi desenvolvido com a opção de ‘*Corridor mapping*’.

A câmera utilizada foi a S110 NIR de 12.1 Mpix, com distância focal de 5,32 mm, selecionada com objetivo de diferenciar espectralmente as feições, uma vez que a rodovia é constituída de material asfáltico e está localizada em um trecho de zona

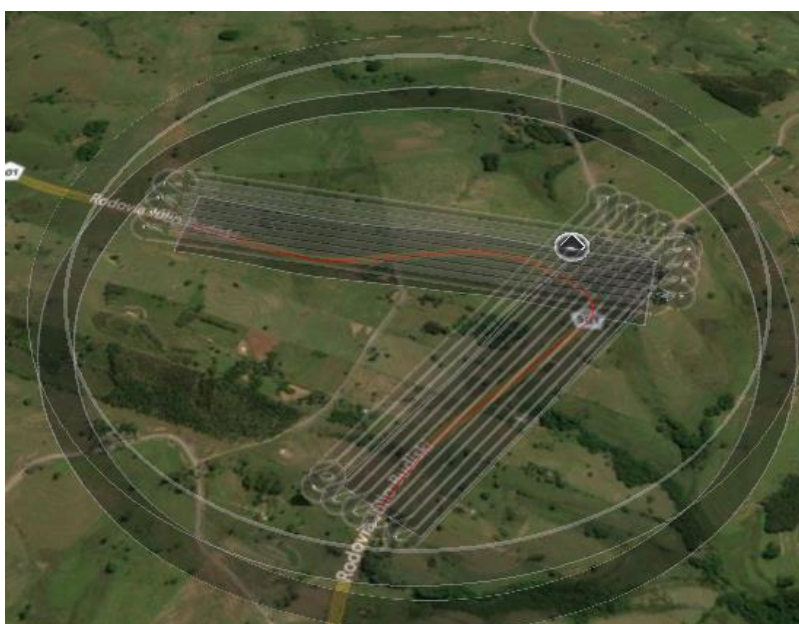
rural do município. Dessa forma, a S110 NIR possui um filtro personalizado que captura imagem nas bandas verde (550 nm), vermelho (625 nm) e infravermelho próximo (850 nm).

O GSD de projeto foi de 2,7 cm/pixel, para a altura de voo de 77,3 metros. A justificativa para seleção desse GSD se dá por conta da variação de altitude do terreno, para que, assim, fosse possível trabalhar com certo limiar até atingir o GSD desejado de 3 cm/pixel, menor que o GSD recomendado por normas brasileiras e internacionais.

De acordo com a Sensfly (2014), o VARP eBee de asa fixa possui autonomia de voo de até 50 minutos, sistema inercial e GNSS que captam satélites da constelação GLONASS e GPS. As acurácias absolutas horizontal e vertical sem pontos de controle são, respectivamente, 1 a 5 m e 2 a 5 m. Por se tratar de um mapeamento de grande extensão, optou-se por um VARP de asa fixa para maior estabilidade e autonomia nos voos.

Visando a segurança do trabalho e dos usuários da via, optou-se por fazer no planejamento dois voos retangulares abrangendo todo o eixo desejado. Os voos foram dispostos de maneira que se interceptassem na curva 1, para que, assim, houvesse maior sobreposição de imagens nesse local. A Figura 7 demonstra a disposição dos voos.

Figura 7 - Disposição dos voos feita por mapeamento linear. O voo um direção N-S e o voo dois direção O-L.



Fonte: Autor, 2021.

Os dois blocos de voo foram criados a partir do eixo e possuem os mesmos parâmetros e *buffer* de 250 m. A superposição dos voos ficou definida como 80% para superposição longitudinal e 70% para superposição lateral. Em ambos, o modelo de altitude de voo foi ATO (*Above the Take-off Altitude*). O número de faixas de voo para ambos os voos foi de nove.

### **3.2.2 Demarcação dos pontos de apoio**

Para alcançar a acurácia desejada com esse mapeamento, fez-se necessária a utilização de pontos de apoio. Para isso, a distribuição deles por toda a área de amostragem foi realizada com o auxílio do aplicativo Google Earth, seguindo as metodologias descritas na seção 2.3.1 e Ferrer-González et al. (2020) como referências principais.

Os pontos de apoio são classificados em pontos de controle horizontal e vertical (HV) e pontos de verificação (CH). Esses foram distribuídos ao longo do acostamento da via e na área de vegetação abrangida pelo *buffer* de 250 metros a partir da rodovia.

A distribuição feita segue o modelo de distribuição 4 apresentado por Ferrer-González et al. (2020) . Já os pontos na área de vegetação seguem literaturas como Wolf; Dewitt; Wilkinson (2014); Graham; Koh (2003); Kraus (2004), além de terem sido feitos no início, meio e cantos do bloco fotogramétrico.

Ao longo do acostamento da rodovia, foram demarcados 15 pontos HV e 9 pontos CH, distribuídos com cerca de 250 metros de distante um do outro, conforme a Figura 8. A nomenclatura para esses pontos leva a letra 'R' como referência à via, acrescida da respectiva numeração.

Figura 8 - Distribuição dos pontos de apoio ao longo do acostamento da rodovia.



Fonte: O autor, 2022.

Na área de vegetação que abrange ambos os voos, foram planejados 15 pontos HV e 14 pontos CH, distribuídos conforme a Figura 9. A nomenclatura para esses apenas recebe as siglas de acordo com o tipo, HV ou CH e a numeração.

Figura 9 - Distribuição dos pontos de apoio ao longo da área de vegetação.



Fonte: O autor, 2022.

Ao todo, 53 pontos de apoio foram planejados, sendo 30 pontos HV e 23 pontos CH. No entanto, como o objetivo do estudo é de analisar tecnicamente uma possível inconsistência geométrica na curva horizontal 1, ambos os voos foram planejados de forma que houvesse o cruzamento entre deles sobre a curva. Assim, são compartilhados pontos de apoio que estão distribuídos ao longo do acostamento da via, ao longo do voo um e dois, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Pontos de apoio compartilhados pela sobreposição dos voos um e dois na curva horizontal 1.



Fonte: O autor, 2022.

Para a representação dos alvos fotogramétricos ao longo do acostamento da via, foi utilizada a interseção entre quadrados de tamanho de 35 cm x 35 cm, pintados com tinta branca látex conforme Figura 11.

Figura 11 - Alvo fotogramétrico pintado ao longo do acostamento da rodovia.



Fonte: Autor, 2021.

Para realizar a demarcação dos pontos nas áreas de vegetação, utilizou-se alvo de formato circular feito com um molde vazado com diâmetro de aproximadamente 35 cm e a pintura feita com cal em pó, conforme a Figura 12.

Figura 12 - Demarcação dos alvos nas áreas de vegetação. A estaca era utilizada para que não houvesse perda do ponto caso a pintura com cal apagasse.



Fonte: Autor, 2021.

Após a finalização da demarcação dos pontos e antes de iniciar a execução dos voos, fez-se a fiscalização para garantir que estes mantiveram-se intactos, sendo constatada a inutilização de três pontos.

### 3.2.3 Determinação das coordenadas dos pontos de apoio

No dia 26 de agosto de 2021, os pontos de apoio foram coletados utilizando o aparelho geodésico Hiper Lite ++ em modo RTK, selecionado para esse projeto devido à quantidade de pontos a serem coletados e ao tempo de coleta ser menor, atingindo uma acurácia centimétrica.

O receptor fixo do RTK foi nivelado em um ponto mais alto da região para que fosse possível coletar todos os pontos sem precisar mudar a base de lugar, conforme apresenta a Figura 13. Antes de iniciar o levantamento, fez-se o aguardo de pelo menos 20 minutos de coleta da base. Os parâmetros de precisão inseridos na coletora foram de 0,5 cm na horizontal e 1,5 cm na vertical, e a condição de armazenar apenas pontos *'fixed only'*.

Figura 13 - Receptor fixo do aparelho geodésico Hiper Lite ++, nivelado em um dos pontos mais alto da área mapeada.



Fonte: O autor, 2022.

Durante a obtenção das coordenadas dos pontos da rodovia, alguns pontos sobre a sinalização refletiva ‘olho de gato’ foram coletados, a fim de que, assim, fosse possível determinar as coordenadas de alguns pontos no eixo da rodovia.

Todo o trabalho de coleta dos pontos levou cerca de 7 horas, um bom tempo de coleta de informações também para base.

Após a finalização do serviço em campo, os dados coletados foram processados no *software* MAGNET tools. Para o processamento da base, foram utilizadas três estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) em um raio de até 200 km do local do levantamento, a saber: estação de SPTU localizada em cidade de Tupã, cerca de 155 km da cidade de Alfredo Marcondes, estação SPDR da cidade de Dracena, distante 76 km, e, por fim, a estação PPTE de Presidente Prudente, que dista cerca de 30 km do local.

Com as coordenadas da base corrigidas, os pontos de apoio foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), e um arquivo *txt* foi gerado com as coordenadas de cada ponto para inserção no Pix4D mapper 3.2.

As coordenadas dos pontos de apoio utilizados neste trabalho estão no sistema de projeção Universal Transversal de Mercator (UTM), no fuso 22 e no *datum* de referência SIRGAS2000.

### 3.3 Execução dos voos

A execução de ambos os voos aconteceu no dia 24 de agosto de 2021 por volta das 11 horas da manhã com a presença de rajadas de ventos intensas, sendo registrado pelo *software eMotion* vento de até 9 m/s. A Figura 14 apresenta o lançamento da aeronave.

Figura 14 - Lançamento do VARP eBee.



Fonte: O autor, 2022.

Em decorrência das rajadas, a aeronave teve dificuldade de se manter estável na faixa de mapeamento. Diante disso, após a execução, uma rápida análise nas imagens ainda em campo constatou a presença de arrastamento, porém era necessário processá-las para avaliar a qualidade do voo.

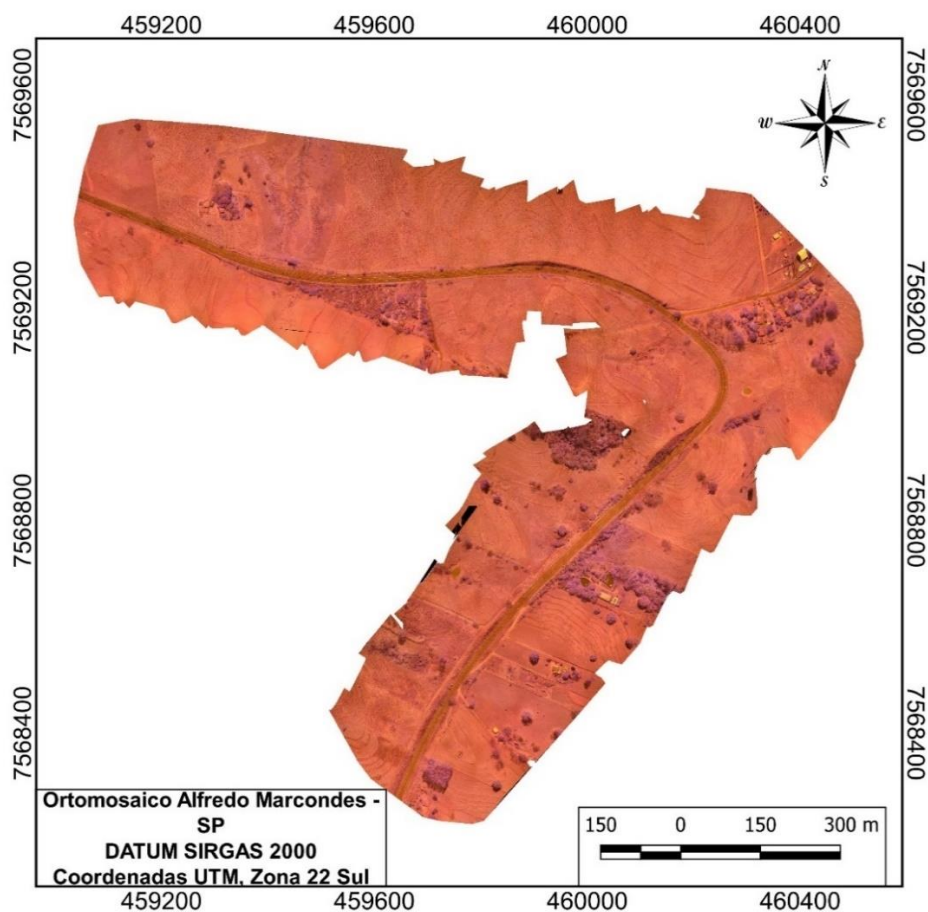
### 3.4 Produção do Ortomosaico e do MDS/MDT

#### 3.4.1 Processamento das imagens

As imagens aéreas foram processadas no *software* comercial Pix4D Mapper 3.2; que é baseado no algoritmo Structure from Motion – SfM – em conjunto com o algoritmo de Multi view stereo matching – MVS.

Como foram realizados dois voos, esses foram processados separadamente primeiro, e depois realizado a sua junção, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Área mapeada com VARP eBee utilizando a câmera S110 NIR com altura de voo de 77,3 m.



Fonte: O autor, 2022.

Ao iniciar o processamento de cada voo, as imagens são importadas juntamente as suas coordenadas e altitudes salvas nos metadados de cada uma. A calibração da câmera feita de maneira automática no *software* com valores pré-estabelecidos, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de calibração da câmera SNIR.

| Parâmetros do modelo da câmera     |         |                          |       |
|------------------------------------|---------|--------------------------|-------|
| Largura da Imagem (pixel):         | 4000    | Largura do sensor (mm):  | 7,44  |
| Altura da imagem (pixel):          | 3000    | Altura do sensor (mm):   | 5,58  |
| Dist. Focal (pixel)                | 2860,48 | Tamanho do pixel (μm):   | 1,86  |
| Ponto x principal (pixel):         | 2047,51 | Dist. Focal (mm):        | 5,32  |
| Ponto y principal (pixel):         | 1494,39 | Ponto x principal (mm):  | 3,80  |
|                                    |         | Ponto y principal(mm):   | 2,78  |
| Modelo da câmera com as distorções |         |                          |       |
| Distorção Radial R1:               | -0,04   | Distorção Tangencial T1: | 0     |
| Distorção Radial R2:               | -0,012  | Distorção Tangencial T2: | 0,004 |
| Distorção Radial R3:               | 0,007   |                          |       |

Fonte: Pix4D Mapper, 2022.

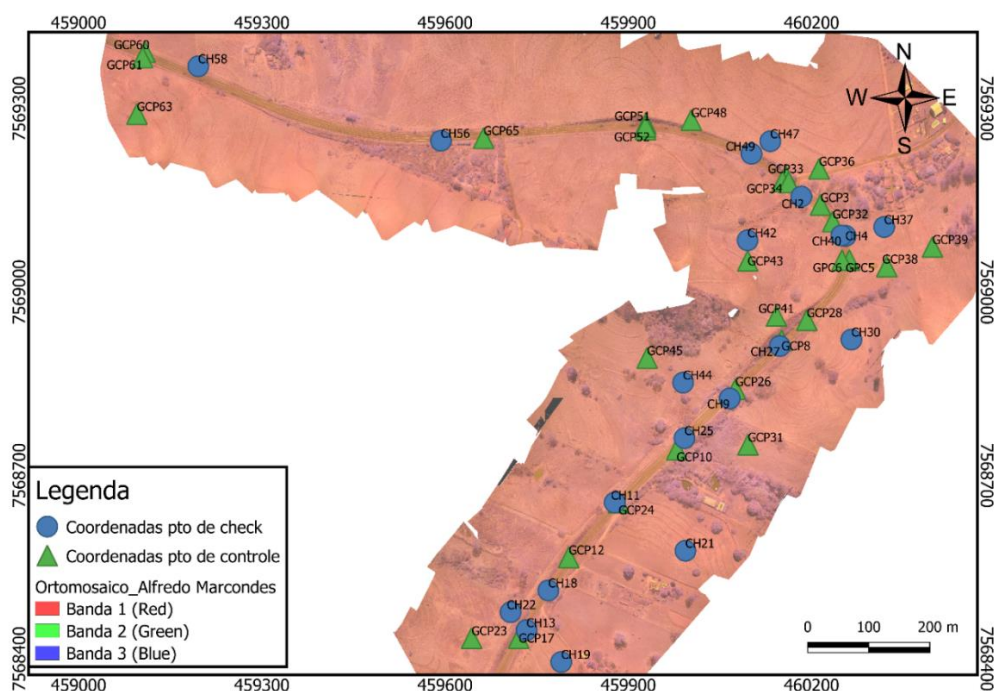
Em seguida, o processamento da orientação relativa e o ajustamento de bloco de forma parcial a partir dos parâmetros de calibração da câmera foi feito. O *software* ainda fornece um ajustamento preliminar com base nas coordenadas informadas pelo sistema IMU/GNSS do VARP.

No entanto, a acurácia posicional do VARP eBee sem pontos de controle é cerca de 1 a 5 m, sendo uma acurácia baixa para a finalidade de aplicação dos produtos. Dessa forma, torna-se necessária a utilização de pontos de controle de terreno (HVs) e os pontos de verificação (CH) para ajustar o bloco aos GCP e, posteriormente, realizar a avaliação do ajustamento com os checkpoints.

Ambos os pontos são importados para o processamento e torna-se importante informar ao *software* em cada imagem a localização exata, para que, assim, seja possível recalcular a posição do bloco fotogramétrico. A Figura 16 apresenta a distribuição dos pontos de apoio utilizados no processamento, pois, durante o processo, observou-se que alguns degradavam a qualidade dos produtos.

A justificativa para retirada desses pontos, é que esses se encontravam em posições longínquas da base e em locais de baixa altitude (em relação a base), fazendo com que o tempo e as condições de armazenagem (condição de ponto flutuante) fossem comprometidos, dessa forma, constatou-se que a utilização desses deteriorava a qualidade dos produtos e por isso optou-se pela retirada desses.

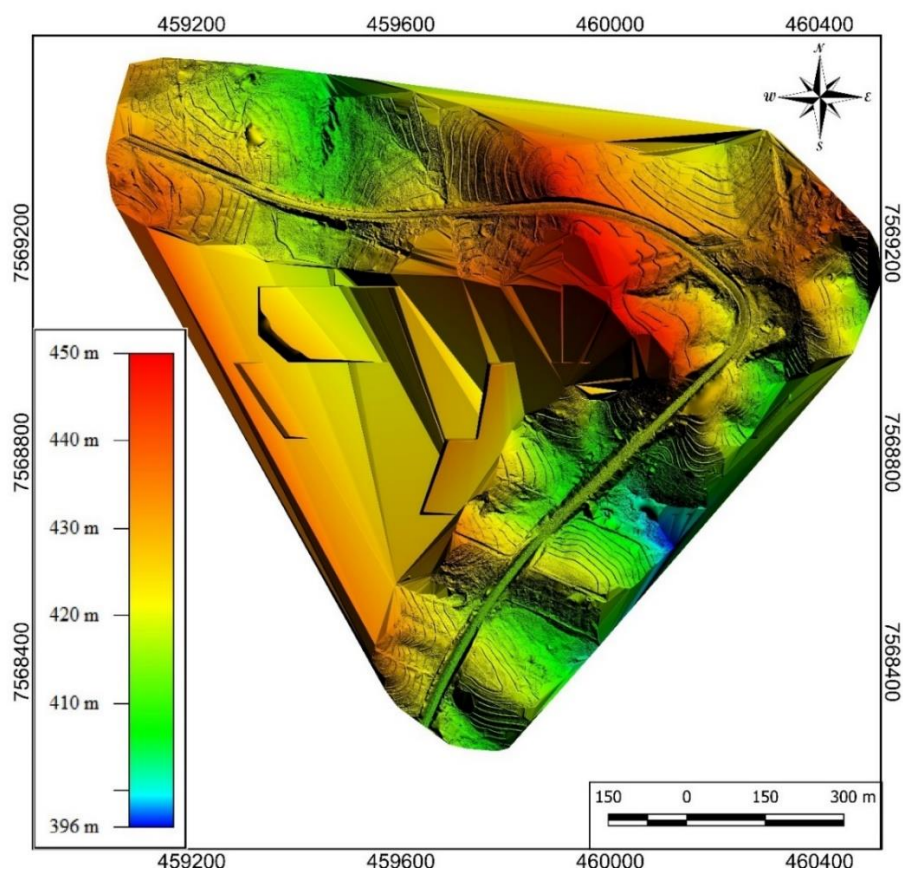
Figura 16 - Distribuição dos pontos de apoio utilizados efetivamente no processamento das imagens.



Fonte: O autor, 2022.

Finalizada toda etapa com os pontos de controle, são recalculados o bloco fotogramétrico e os parâmetros relativos ao modelo da câmera. E, desse modo, a nuvem de pontos é reposicionada conferindo acurácia ao bloco de ajustamento aerofotogramétrico. Logo em seguida, a densificação da nuvem de pontos é feita para obtenção do MDS – e a ortoimagem, segundo apresenta a Figura 17.

Figura 17 - Modelo Digital de Superfície obtido pelo merge dos voos fotogramétricos.



Fonte: O autor, 2022.

No Apêndice A encontra-se o relatório gerado no processamento das imagens pelo software Pix4D Mapper.

### 3.5 Levantamento topográfico

Para atingir o objetivo específico de realizar um estudo comparativo entre os valores de superelevação cálculos por meio MDS e por levantamento altimétrico, um levantamento topográfico foi executado seguindo as recomendações da NBR13133 de 2021.

Para o desenvolvimento desse estudo, o nivelamento geométrico e as irradiações feitas seguem a precisão estabelecidas na norma e são adotados como valores de referência.

Ao longo da elaboração dessa dissertação não foi possível ter acesso ao projeto original de implantação da via, para se ter o conhecimento da superelevação implantada no projeto, e assim, adotar essa como valor verdadeiro.

No entanto, o levantamento topográfico é o método mais apropriado para gerar um 'As Built' da via, uma vez que não existe uma verdade absoluta pois sempre terá distinção entre o projeto e a implantação.

Diante disso, para o levantamento topográfico realizado foram demarcadas 50 seções transversais ao longo do desenvolvimento da curva 1, totalizando 250 pontos.

A realização dessa etapa foi feita em duas partes após a execução dos voos fotogramétricos. A primeira parte realizada foi o nivelamento geométrico para cada ponto demarcado ao longo das seções transversais, e a segunda, um nivelamento trigonométrico com estação total para fim de irradiação das coordenadas dos pontos.

Dessa forma, após a coleta dos dados foi possível avaliar se esses atendem as tolerâncias de execução de levantamento topográfico para obras de engenharia, e por fim, calcular o parâmetro intrínseco ao traçado do eixo rodoviário em seção transversal.

### **3.5.1 Nivelamento Geométrico das Seções Transversais**

Para a realização do nivelamento geométrico o equipamento utilizado em campo foi o nível digital Leica DNA 03 com miras codificadas, conforme a Figura 18. O aparelho foi selecionado em decorrência da grande quantidade de pontos a serem lidos, e também por questões de segurança e precisão. De acordo com a NBR13133/2021, o nível é classificado como classe 2, ou seja, desvio-padrão  $\leq 2$  mm/km.

Figura 18 - Nível Digital Leica DNA03 com mira codificada.



Fonte: O autor, 2023.

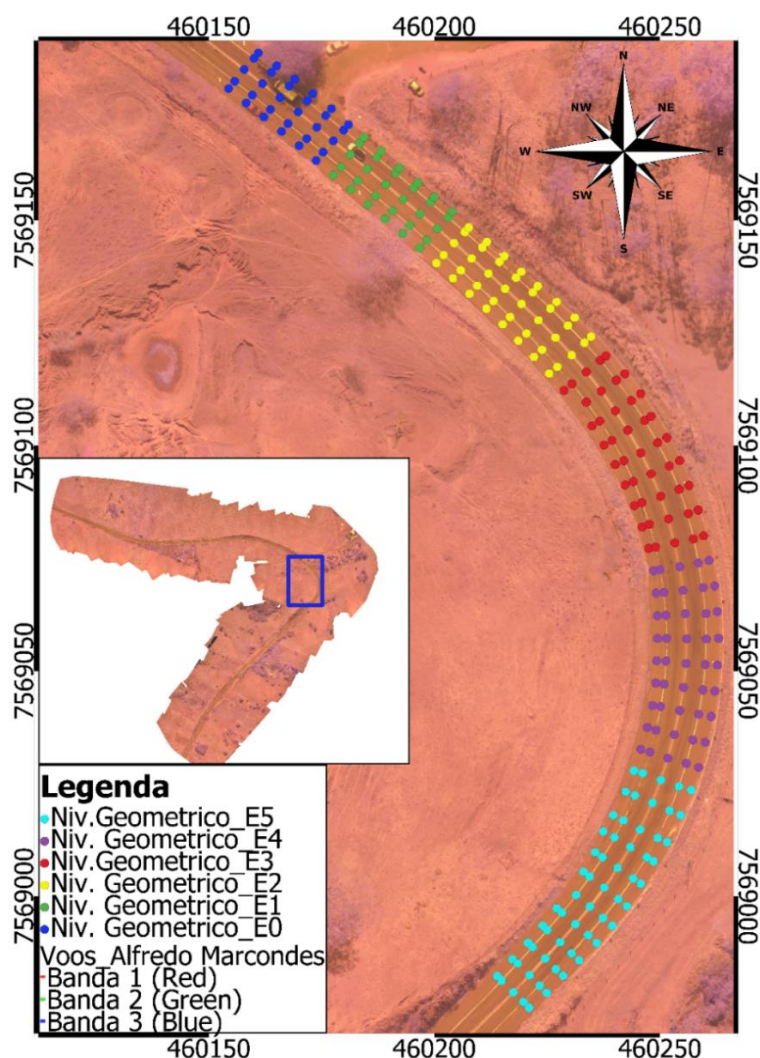
Como o objetivo do levantamento é utilizar os desníveis para determinar a superelevação, foram demarcadas seções transversais a cada cinco metros a partir do trecho entre curva 2 e 1, até o trecho de tangente da curva 1, conforme ilustra a

Figura 19. O sentido do caminhamento é da estação E<sub>0</sub> (azul escuro) para a estação E<sub>5</sub> (ciano).

Em cada seção, cinco pontos foram demarcados sendo respectivamente: acostamento direito (AD), borda direita (BD), eixo da via (EX), borda esquerda (BE) e acostamento esquerdo (AE).

Cabe ressaltar que para facilitar a compreensão com os resultados que serão gerados a partir dos dados coletados, para cada estação foi atribuído uma cor. Dessa forma, será possível identificar as seções transversais pertencentes a cada estação. A disposição das cores é apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Disposição das seções transversais ao longo da curva 1.



Fonte: O autor, 2022.

O método utilizado foi o de visadas extremas, onde se determina o desnível entre a posição do nível e da mira por meio do conhecimento da altura do nível e da leitura efetuada sobre a mira. A principal vantagem é o rendimento de campo e a

desvantagem é a não eliminação dos erros como curvatura, refração e colimação, além da necessidade de medir a altura do instrumento o que pode introduzir um erro de 0,5 cm ou mais (VEIGA; ZANETTI; FAGGION, 2012).

No método de visadas extremas não é desenvolvido o contranivelamento, pois o erro cometido é determinado como a diferença entre RN's conhecidas. Nesse sentido, para a verificação e avaliação do procedimento em campo, as seções foram niveladas e contraniveladas, para que, assim, fosse possível ter a diferença dos desníveis e fazer a comparação com a tolerância.

Para as seis estações com o nível, calculou-se o erro cometido e comparou-se esse com a tolerância de fechamento dada pela NBR com instrumento de classe 2 e finalidade de Rede Urbana, conforme a Eq. (22).

$$T = 8mm \cdot \sqrt{K} \quad (22)$$

Onde:

K: distância nivelada e contranivelada expressa em km.

De todas estações realizadas, cinco delas tiveram erros menores que 4mm. Apenas a estação E<sub>2</sub> teve o erro cometido (cerca de 16mm) maior que a tolerância (cerca de 8,59 mm). Uma provável explicação é que durante a leitura nessa estação, por diversas vezes, foi necessário sair do ponto a ser lido em decorrência da intensa quantidade de veículos em alta velocidade. Diante disso, o procedimento seria refazer essa estação, no entanto, isso não foi feito pelo fato de a estação não estar no desenvolvimento da curva propriamente dito, não comprometendo a determinação da superelevação.

A Tabela 8 apresenta o desenvolvimento do cálculo da estação E<sub>0</sub>. Os mesmos cálculos foram desenvolvidos para as demais. Todas as tabelas podem ser consultadas no Apêndice B.

Tabela 8 - Caderneta de cálculo do nivelamento e contranivelamento da estação E<sub>0</sub>.

| Levantamento altimétrico - Visadas Extremas |              |                  |         |                 |         |               |                |
|---------------------------------------------|--------------|------------------|---------|-----------------|---------|---------------|----------------|
| Nivelamento estacionada – E <sub>0</sub>    |              |                  |         |                 |         |               |                |
| Est.                                        | Ponto Visado | Leituras da mira |         | Plano de visada | Cota    | Distância (m) | Cota corrigida |
|                                             |              | Ré               | Vante   |                 |         |               |                |
| E <sub>0</sub>                              | A0           | 0,23575          |         | 300,23575       | 300,000 | 29,29         | 300,00         |
|                                             | I01_AD       |                  | 0,46015 | 300,23575       | 299,776 | 26,98         | 299,78         |
|                                             | I02_BD       |                  | 0,30563 | 300,23575       | 299,930 | 26,05         | 299,93         |
|                                             | I03_EX       |                  | 0,10663 | 300,23575       | 300,129 | 25,03         | 300,13         |
|                                             | I04_BE       |                  | 0,08418 | 300,23575       | 300,152 | 24,27         | 300,15         |
|                                             | I05_AE       |                  | 0,16727 | 300,23575       | 300,068 | 24,12         | 300,07         |

|  |        |  |         |           |         |       |        |
|--|--------|--|---------|-----------|---------|-------|--------|
|  | I06_AD |  | 0,75774 | 300,23575 | 299,478 | 22,60 | 299,48 |
|  | I07_BD |  | 0,62271 | 300,23575 | 299,613 | 21,51 | 299,61 |
|  | I08_EX |  | 0,43200 | 300,23575 | 299,804 | 20,08 | 299,80 |
|  | I09_BE |  | 0,39713 | 300,23575 | 299,839 | 19,31 | 299,84 |
|  | I10_AE |  | 0,45363 | 300,23575 | 299,782 | 19,12 | 299,78 |
|  | I11_AD |  | 1,03967 | 300,23575 | 299,196 | 18,48 | 299,20 |
|  | I12_BD |  | 0,91115 | 300,23575 | 299,325 | 17,11 | 299,32 |
|  | I13_EX |  | 0,73700 | 300,23575 | 299,499 | 15,42 | 299,50 |
|  | I14_BE |  | 0,67529 | 300,23575 | 299,560 | 14,44 | 299,56 |
|  | I15_AE |  | 0,76228 | 300,23575 | 299,473 | 14,23 | 299,47 |
|  | I16_AD |  | 1,29464 | 300,23575 | 298,941 | 15,00 | 298,94 |
|  | I17_BD |  | 1,17825 | 300,23575 | 299,058 | 13,27 | 299,06 |
|  | I18_EX |  | 1,01001 | 300,23575 | 299,226 | 10,92 | 299,23 |
|  | I19_BE |  | 0,95570 | 300,23575 | 299,280 | 9,47  | 299,28 |
|  | I20_AE |  | 1,06884 | 300,23575 | 299,167 | 9,03  | 299,17 |
|  | I21_AD |  | 1,59656 | 300,23575 | 298,639 | 12,64 | 298,64 |
|  | I22_BD |  | 1,45741 | 300,23575 | 298,778 | 10,42 | 298,78 |
|  | I23_EX |  | 1,28830 | 300,23575 | 298,947 | 7,23  | 298,95 |
|  | I24_BE |  | 1,24247 | 300,23575 | 298,993 | 4,82  | 298,99 |
|  | I25_AE |  | 1,35396 | 300,23575 | 298,882 | 3,84  | 298,88 |
|  | I26_AD |  | 1,84282 | 300,23575 | 298,393 | 12,19 | 298,39 |
|  | I27_BD |  | 1,69176 | 300,23575 | 298,544 | 9,78  | 298,54 |
|  | I28_EX |  | 1,53106 | 300,23575 | 298,705 | 6,44  | 298,70 |
|  | I29_BE |  | 1,51483 | 300,23575 | 298,721 | 3,33  | 298,72 |
|  | I30_AE |  | 1,58372 | 300,23575 | 298,652 | 2,02  | 298,65 |

#### CONTRANIVELAMENTO

|    |        |         |         |           |         |       |        |
|----|--------|---------|---------|-----------|---------|-------|--------|
| E0 | I30_AE | 1,58416 |         | 300,23619 | 298,652 | 2,36  | 298,65 |
|    | I29_BE |         | 1,51496 | 300,23619 | 298,721 | 3,68  | 298,72 |
|    | I28_EX |         | 1,53295 | 300,23619 | 298,703 | 6,78  | 298,70 |
|    | I27_BD |         | 1,69077 | 300,23619 | 298,545 | 10,09 | 298,55 |
|    | I26_AD |         | 1,84267 | 300,23619 | 298,394 | 12,48 | 298,39 |
|    | I25_AE |         | 1,35381 | 300,23619 | 298,882 | 3,74  | 298,88 |
|    | I24_BE |         | 1,24301 | 300,23619 | 298,993 | 4,86  | 298,99 |
|    | I23_EX |         | 1,28777 | 300,23619 | 298,948 | 7,39  | 298,95 |
|    | I22_BD |         | 1,45679 | 300,23619 | 298,779 | 10,63 | 298,78 |
|    | I21_AD |         | 1,59410 | 300,23619 | 298,642 | 12,89 | 298,64 |
|    | I20_AE |         | 1,07059 | 300,23619 | 299,166 | 8,90  | 299,17 |
|    | I19_BE |         | 0,95566 | 300,23619 | 299,281 | 9,38  | 299,28 |
|    | I18_EX |         | 1,01156 | 300,23619 | 299,225 | 10,96 | 299,22 |
|    | I17_BD |         | 1,17775 | 300,23619 | 299,058 | 13,36 | 299,06 |
|    | I16_AD |         | 1,29520 | 300,23619 | 298,941 | 15,15 | 298,94 |
|    | I15_AE |         | 0,76235 | 300,23619 | 299,474 | 14,08 | 299,47 |
|    | I14_BE |         | 0,67616 | 300,23619 | 299,560 | 14,32 | 299,56 |
|    | I13_EX |         | 0,73416 | 300,23619 | 299,502 | 15,40 | 299,50 |
|    | I12_BD |         | 0,91096 | 300,23619 | 299,325 | 17,13 | 299,33 |

|        |  |         |           |          |        |        |
|--------|--|---------|-----------|----------|--------|--------|
| I11_AD |  | 1,04128 | 300,23619 | 299,195  | 18,54  | 299,19 |
| I10_AE |  | 0,45384 | 300,23619 | 299,782  | 18,95  | 299,78 |
| I09_BE |  | 0,39625 | 300,23619 | 299,840  | 19,20  | 299,84 |
| I08_EX |  | 0,43222 | 300,23619 | 299,804  | 20,00  | 299,80 |
| I07_BD |  | 0,62200 | 300,23619 | 299,614  | 21,50  | 299,61 |
| I06_AD |  | 0,75771 | 300,23619 | 299,478  | 22,57  | 299,48 |
| I05_AE |  | 0,16731 | 300,23619 | 300,069  | 23,96  | 300,07 |
| I04_BE |  | 0,08662 | 300,23619 | 300,150  | 24,09  | 300,15 |
| I03_EX |  | 0,10614 | 300,23619 | 300,130  | 24,93  | 300,13 |
| I02_BD |  | 0,30633 | 300,23619 | 299,930  | 25,98  | 299,93 |
| I01_AD |  | 0,45947 | 300,23619 | 299,777  | 26,95  | 299,78 |
| A0     |  | 0,23584 | 300,23619 | 300,000  | 29,27  | 300,00 |
|        |  |         |           | $\Sigma$ | 937,96 |        |

|                              |                                 |
|------------------------------|---------------------------------|
| Diferença de cota (mm)       | 0,35                            |
| Dist. Niv-contraniv - K (km) | 0,94                            |
| tolerância (mm):             | $8 \text{ mm} \times (K)^{1/2}$ |
| tolerância (mm):             | 7,75                            |
| EC < T – OK!                 |                                 |
| Erro cometido (m)            | 0,00035                         |

Fonte: O autor, 2023.

### 3.5.2 Nivelamento Trigonométrico e Irradiações

No cálculo da superelevação por meio da Eq. (18) torna-se necessário conhecer a distância entre os pontos de cada seção transversal. Para isso, irradiações a partir das coordenadas dos pontos de apoio foram feitas após o nivelamento geométrico.

O equipamento utilizado foi a Estação Total Cygnus 2LS que possui desvio-padrão da direção de 2" e desvio-padrão linear de 2 mm + 2 ppm, conforme apresenta a Figura 20. O aparelho é classificado como uma estação total de classe 2 pela NBR 13133/2021.

Figura 20 - Estação Total Cygnus 2LS.



Fonte: Catálogo Santiago e Cintra<sup>5</sup>

A metodologia adotada para fazer as irradiações e ter o controle da qualidade foi realizar uma poligonal apoiada em duas bases. Esse método consiste em ter o conhecimento das coordenadas dos vértices de partida ( $P_i$  e  $P_{(i+1)}$ ) e dos vértices de chegada ( $P_n$  e  $P_{(n+1)}$ ). Deste modo, é possível determinar o azimute e a distância entre os dois vértices tanto de partida, quanto de chegada (VEIGA; ZANETTI; FAGGION, 2012).

A poligonal desenvolvida possui classe PS, ou seja, poligonal secundária, em que o método de medição angular consiste em uma série de leituras horizontais conjugadas (PD e PI) e a medição linear em leituras recíprocas, conforme estabelecido na norma.

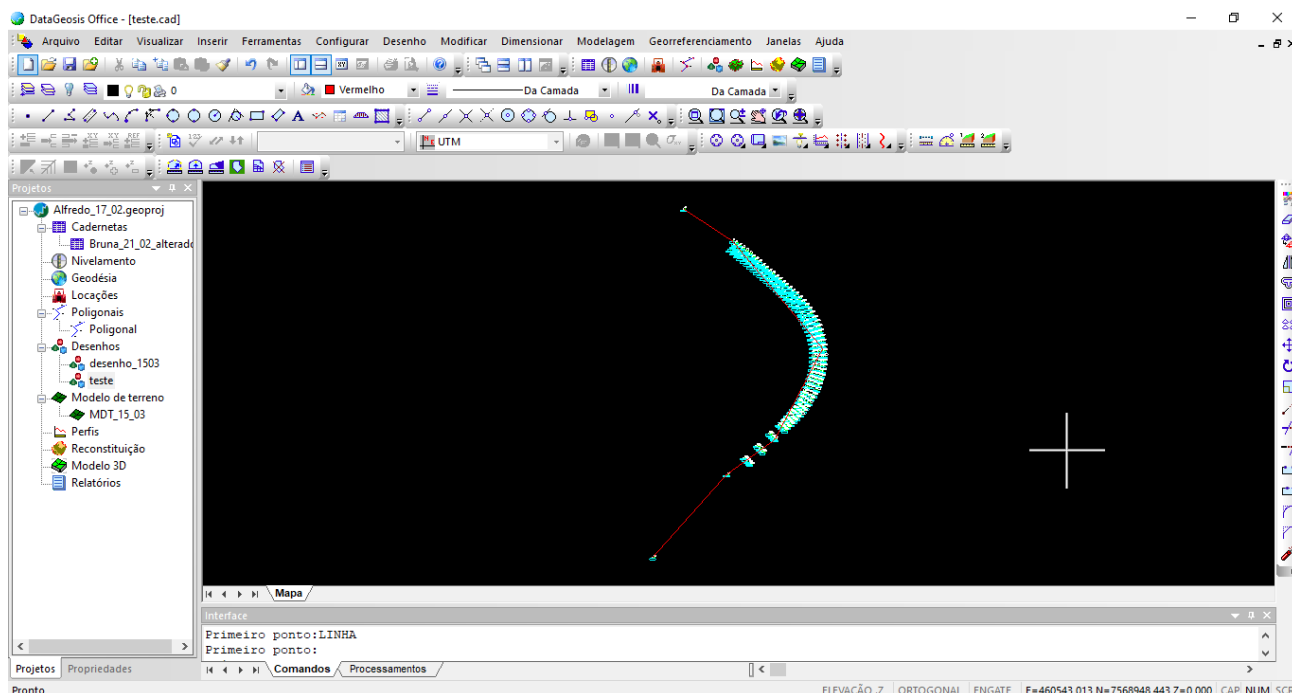
Para realizar a poligonal apoiada em duas bases, a estação partiu de dois vértices ( $P_0$  e  $P_1$ ) de coordenadas conhecidas, sendo respectivamente HV\_R9 e CH\_R7. E chegou em dois vértices ( $P_4$  e  $P_5$ ) de coordenadas conhecidas, HV\_R5 e CH\_R3.

Dessa forma, a poligonal ficou apoiada em duas bases, sendo possível determinar o seu erro de fechamento. A Figura 21 apresenta a disposição da poligonal e os pontos irradiados. O sentido de caminhar do levantamento seguiu o mesmo do nivelamento geométrico.

---

<sup>5</sup> Disponível em: <http://www.geoeduc.com/arquivos/materiais/catalogo-estacao-total-cygnus.pdf>.

Figura 21 - Representação da poligonal apoiada em duas bases e seus respectivos pontos irradiados.



Fonte: O Autor, 2022.

A determinação do erro de fechamento para o nivelamento trigonométrico segue a NBR 13133/2021 para a finalidade de poligonal secundária e irradiação com instrumento de classe 2.

Para o ajustamento em coordenadas das poligonais, a tolerância angular é estabelecida pela norma, conforme a Eq. (23). Já a tolerância linear mínima para todas as finalidades é de 1:12:000.

$$T_{\alpha} = (3 \times p \times \sqrt{n}) + 10'' \quad (23)$$

Onde:

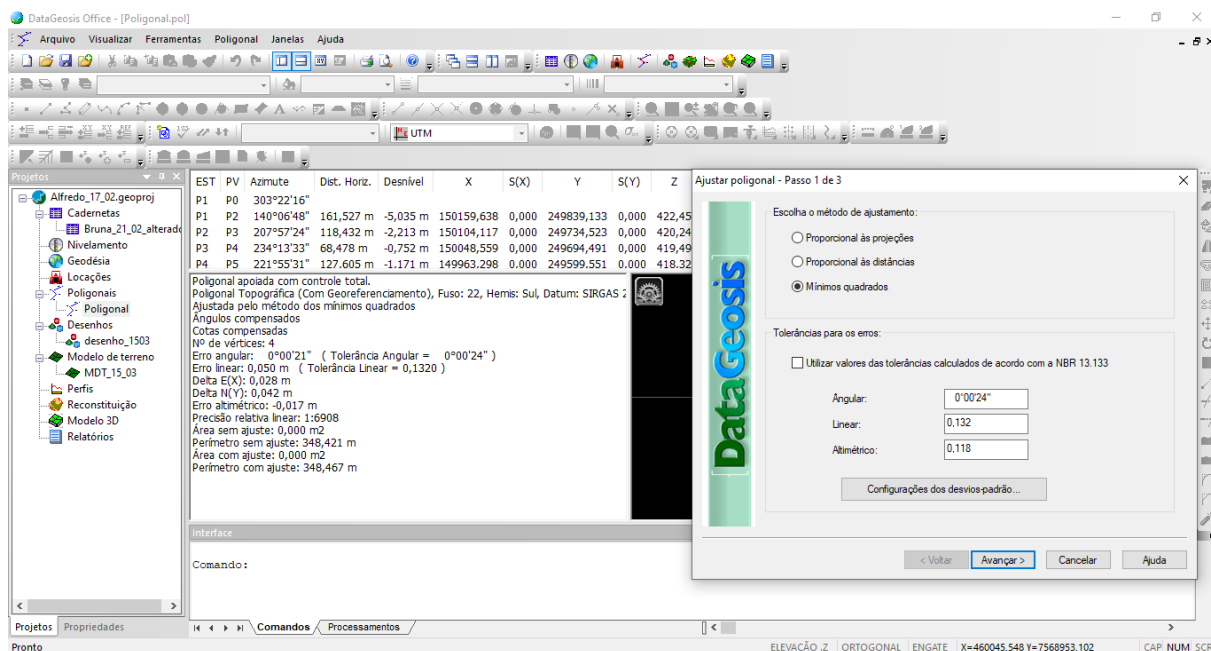
n: é o número de estações;

p: precisão nominal para a finalidade do trabalho, sendo para as poligonais principais  $PP \leq 5''$  e para poligonais secundárias  $PS \leq 10''$ ;

10'': constante adotada por medida de segurança.

Todo o processamento dos dados foi realizado no *software* DataGeosis. O cálculo da caderneta foi desenvolvido com a opção georreferencia em dois pontos de controle. O erro de fechamento obtido com a poligonal foi de 21 segundos, sendo a tolerância estabelecida pela Eq. (23) de 24 segundos. O erro linear 1:6.908, ou seja, menor que o estabelecido pela norma, conforme a Figura 22.

Figura 22 - Poligonal ajustada pelo Método dos Mínimos Quadrados dentro das tolerâncias da NBR 13133/2021.



Fonte: O autor, 2023.

Finalizado o levantamento topográfico e a aprovação desse perante a NBR, deu-se prosseguimento à determinação da superelevação.

### 3.6 Extração e reconstrução do eixo rodoviário

Um dos objetivos dessa pesquisa é de avaliar e analisar a qualidade de produtos fotogramétricos obtidos por VARP, para extrair dados que servirão de base para determinação dos parâmetros intrínsecos a curva horizontal como a superelevação e o raio de curvatura.

Dessa forma, para determinar o raio de curvatura, o eixo rodoviário se faz necessário. Para isso, a extração desse foi desenvolvida por meio do ortomosaico e MDT gerados no processamento dos voos fotogramétrico.

Como as análises serão geradas sobre a curva horizontal 1, dessa forma, a extração do eixo foi desenvolvida para os pontos ao longo da curva em conformidade com as seções transversais realizadas no levantamento topográfico.

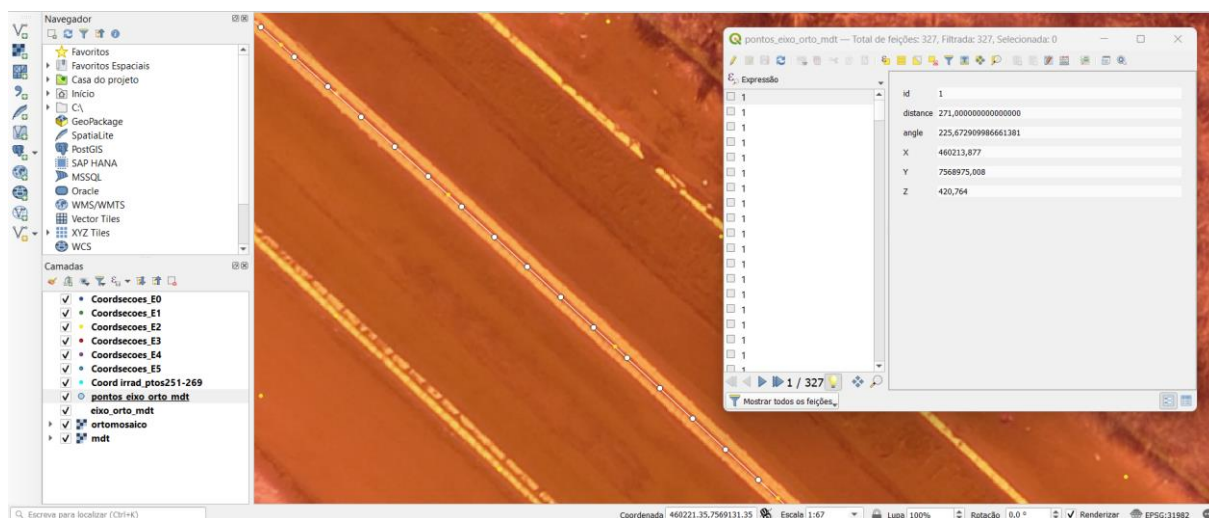
Para início da extração, ambos os produtos foram sobrepostos no *software* QGIS para que fosse possível visualizar melhor o eixo rodoviário e extrair suas respectivas coordenadas.

A extração foi desenvolvida de modo semiautomático, uma vez que, a qualidade do ortomosaico gerado permite a identificação do eixo rodoviário sobre a

imagem. Dessa forma, um *shapefile* de linha foi traçado ao longo do eixo com o auxílio dos pontos irradiados do nivelamento trigonométrico.

Em seguida, com a ferramenta de ‘pontos ao longo da geometria’ vários pontos foram interpolados a cada um metro sobre a linha do eixo, conforme apresenta a Figura 23. As coordenadas de cada ponto foram obtidas por meio da calculadora de campo, sendo as coordenadas X e Y advindas do ortomosaico e a coordenada Z do MDT.

Figura 23 - Extração dos pontos que compõe o eixo rodoviário no software QGIS.

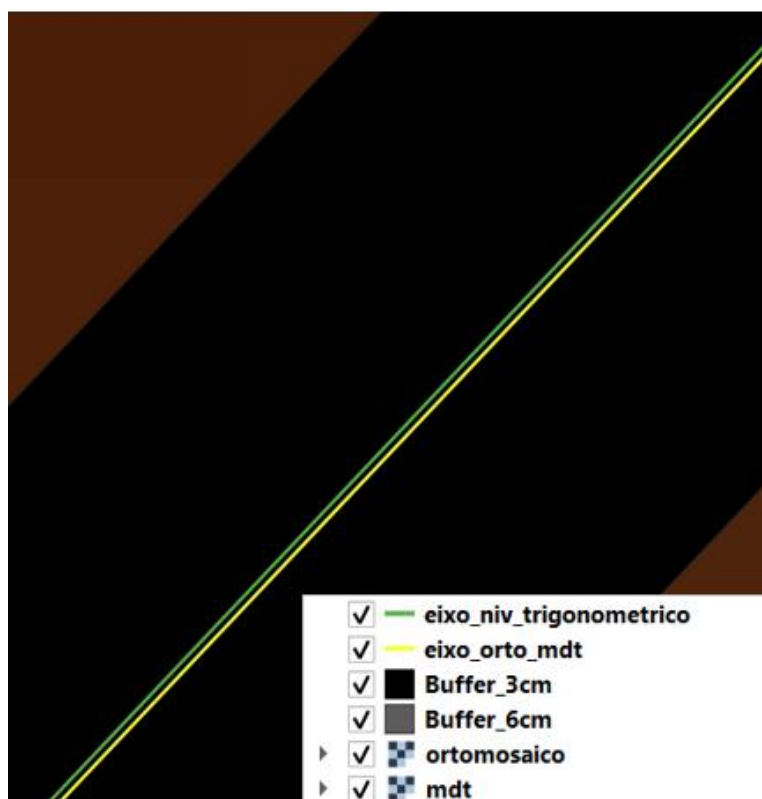


Fonte: O autor, 2022.

Finalizada essa etapa, uma inspeção visual com *buffers* foi gerada entre o eixo extraído e o eixo de referência obtido com as irradiações. Para analisar a extração, *buffers* de 3 e 6 cm foram criados a partir do eixo de referência no QGIS, dessa forma, tornou-se possível analisar a extração pelo método proposto.

A Figura 24 apresenta um trecho da análise dos *buffers*, onde nota-se que a discrepância entre o eixo extraído e o de referência é menor que 3 cm. Essa característica se mantém em todo o eixo extraído.

Figura 24 – Exemplo de um trecho na inspeção visual do eixo extraído (amarelo) com o eixo de referência (verde).



Fonte: O autor, 2023.

Em seguida, no AutoCad Civil 3D, para a importação do eixo extraído primeiramente fizeram-se as configurações do *layout* com base na classificação técnica da via e os seus respectivos parâmetros apresentados na Tabela 4 e descrito na Subseção 2.5. Dessa forma, caso durante a reconstrução do traçado algum parâmetro não atenda as condições mínimas é apresentado ao usuário a informação de inconsistência.

Como o eixo rodoviário extraído no QGIS contempla as concordâncias já feitas entre trechos de tangentes e curvas; para determinar o raio da curva 1 em estudo realizou-se o prolongamento dos trechos identificados como tangente entre a curva 1 e 2, estabelecendo o ponto de interseção da curva, conforme apresenta a Figura 25.

Esse método empírico consiste em uma aproximação do traçado da via, uma vez que não é possível determinar com precisão o ponto de interseção da curva; sendo necessário ter acesso ao projeto de implantação da via para extrair tal informação.

A partir disso, com a ferramenta '*Alignment*' o eixo rodoviário foi reconstruído para a curva 1, conforme a Figura 25.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos, após a realização da metodologia descrita anteriormente.

### 4.1 Avaliação dos produtos fotogramétricos

#### 4.1.1 Avaliação do PEC e normas nacionais para o uso de produtos fotogramétricos em projetos rodoviários

A avaliação da acurácia foi feita pelo RMSE e o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Na junção dos dois voos, a acurácia da fototriangulação foi estabelecida pelos pontos de check, sendo o RMSE para as componentes planimétricas respectivamente  $RMSE_x$ : 0,067 m e  $RMSE_y$ : 0,049 m, enquanto para a componente altimétrica  $RMSE_z$ : 0,075 m, valor um pouco mais elevado quando comparado com os valores em X e Y – isso é esperado para altimetria dentro da aerofotogrametria.

Com isso, foram determinados os valores dos PEC planimétrico e altimétrico e os seus respectivos erros padrão (EP) foram determinados por meio da Tabela 3 (IBGE, 2020). Fez a análise do PEC para o  $RMSE_{xy}$  e  $RMSE_z$ , conforme as Eq (6) e Eq. (7), no qual constatou que os produtos atendem às escalas de 1:500 e, consequentemente, à escala de 1:1000 do PEC.

As análises de tendência e precisão também foram desenvolvidas embora extintas do manual IBGE, (2020). A justificativa para realização dessas análises foi em decorrência que durante a execução do voo fortes rajadas de vento afetaram a aeronave, portanto, tais análises auxiliam na avaliação da existência de arrastamento ou não nas imagens.

Para a avaliação do PEC para ortomosaico e MDS na escala 1:500 foram utilizados os valores da Tabela 9, obtidos do processamento das imagens.

Tabela 9 - Relatório de qualidade dos produtos gerados.

|                                           | Componente X (m) | Componente Y (m) | Componente Z (m) |
|-------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Média do erro amostral ( $\Delta X$ ) (m) | 0,006            | 0,005            | -0,015           |
| Desv. Padrão (S) ou Erro padrão (EP) (m)  | 0,067            | 0,048            | 0,073            |
| Raiz do erro médio quadrático -RMSE (m)   | 0,068            | 0,049            | 0,075            |

Fonte: O autor, 2022.

Para a avaliação da análise de tendência e checagem da média ( $\Delta_{\bar{x}}$ ) igual a zero, ou seja, hipótese nula, foi determinado o valor da amostra para a distribuição t-

student ( $t_c$ ), conforme descrito na seção anterior. Com o valor determinado, foi efetuada a comparação aos valores críticos tabelados (superior e inferior), sendo aceita em todas as componentes, conforme no Tabela 10:

Tabela 10 - Teste de hipóteses para a média do voo.

|                                              | Componente X (m) | Componente Y (m) | Componente Z (m) |
|----------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Valor Tabelado Superior t (n-1, $\alpha/2$ ) | 2,861            | 2,861            | 2,861            |
| t-student calculado ( $t_c$ )                | 0,437            | 0,497            | -0,932           |
| Valor Tabelado Inferior t (n-1, $\alpha/2$ ) | -2,861           | -2,861           | -2,861           |
| Nível de significância ( $\alpha$ )          | 0,01             | 0,01             | 0,01             |
| Grau de liberdade (n-1)                      | 19               | 19               | 19               |
| Teste de Hipótese nula para a média          | <b>Aceita</b>    | <b>Aceita</b>    | <b>Aceita</b>    |

Fonte: O autor, 2022.

Para a análise de precisão, a hipótese nula da variância amostral ( $S^2_{\Delta X}$ ) deve ser igual a zero, ou seja, hipótese nula deve ser aceita, indicando, assim, que o produto tem precisão compatível para classe de variância descrita no PEC. Dessa forma, foi calculado o valor da amostra para a distribuição Qui-quadrado ( $\chi^2$ ), conforme a fundamentação descrita na seção 2.4.1. Então foi comparado com o valor crítico tabelado unilateral, de acordo com a Tabela 11.

Em todas as componentes, a hipótese nula foi aceita, para o EP da Classe A do PEC para a escala 1:500, calculado conforme a Tabela 3 (para as componentes planimétricas).

A avaliação do PEC altimétrico também foi desenvolvida para o MDS com equidistância de 0,5 m, o PEC e o EP são respectivamente para a classe A, 0,25 m e 0,17 m.

Tabela 11 - Teste de hipóteses para a variância do voo.

| Erro padrão (EP) do PEC-PCD (Esc. 1:500 – Classe A) | Componente X EP (0,15 m) | Componente Y EP (0,15) | Componente Z EP (0,17) |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| Valor Qui-quadrado Tabelado ( $\chi^2_a$ )          | 36,19                    | 36,19                  | 36,19                  |
| Valor Qui-quadrado Calculado ( $\chi^2_c$ )         | 3,849                    | 2,025                  | 0,935                  |
| Nível de significância ( $\alpha$ )                 | 0,01                     | 0,01                   | 0,01                   |
| Grau de liberdade (n-1)                             | 19                       | 19                     | 19                     |
| Teste de Hipótese nula para a variância             | <b>Aceita</b>            | <b>Aceita</b>          | <b>Aceita</b>          |

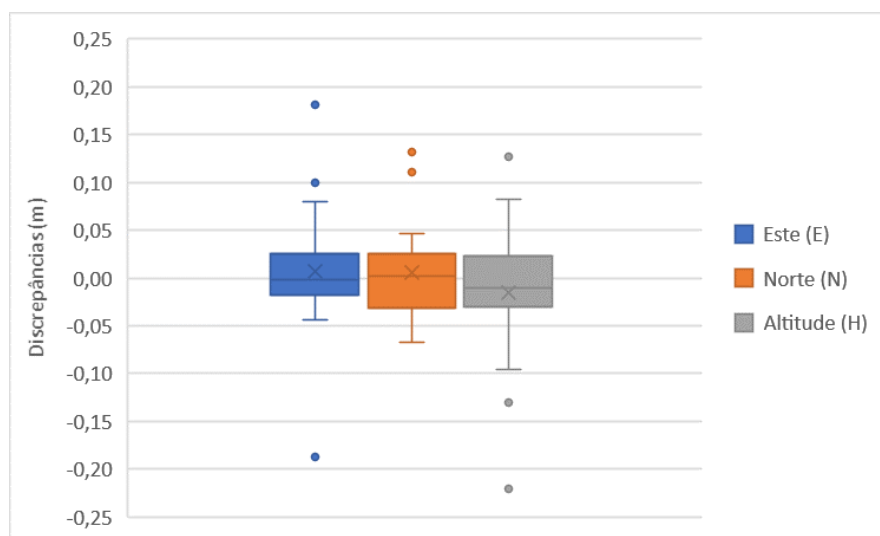
Fonte: O autor, 2022.

A Figura 26 apresenta as discrepâncias para coordenadas Este, Norte e Altitude em um diagrama de caixa, onde é possível observar que a coordenada Este

teve o menor intervalo interquartilico (IQR). No entanto, a mesma é a que possui os valores de outliers destoantes nos extremos positivos e negativos, o que pode ter influenciado a acurácia na componente, essa análise pode indicar a presença de arrastamento nessa componente. A coordenada Norte, que atingiu a melhor acurácia dentre as três, possui valores de outliers menos discrepantes e apenas no extremo positivo; além disso, a média do conjunto também se encontra bem próxima da mediana demonstrando, posto isto, um conjunto bastante uniforme.

Por fim, a componente Z atingiu a menor acurácia entre as componentes, e o IQR é o segundo maior. Dessa forma, as ramificações são um pouco mais longas quando comparadas com as demais, o que implica que a variação das discrepâncias dentro desse grupo é maior e pode ter influenciado na acurácia. Outro ponto que deve ser observado é que o maior *outlier* no extremo negativo se encontra nessa componente.

Figura 26 - Diagrama de caixa do voo realizado.



Fonte: O autor, 2022.

Com base nisso, os produtos fotogramétricos gerados pela metodologia proposta encontram-se dentro da qualidade requerida para utilização em projetos rodoviários dentro da esfera nacional, atingindo acurácia superior às descritas na seção 1.3.1.

O produto ortomosaico atende à qualidade requerida pelo DNIT para projetos executivos com padrão Classe A do PEC (DNIT, 2015b, 2015a). O produto obtido com a metodologia atingiu acurácia para escala de 1:500 e GSD de 2,91 centímetros, enquanto que o DNIT determina escala de 1:2000 e GSD de 15 centímetros, ou seja, supera a qualidade estabelecida.

Para as especificações do Departamento de Estrada de Rodagem – DER/SP, os produtos fotogramétricos, para serem utilizados em projetos executivos de rodovias, deveriam atender à escala de 1:2000 com equidistância de 1 metro, sendo que essa condição foi atendida nos produtos obtidos.

#### 4.1.2 Avaliação em relação às normas internacionais

Para as normas internacionais dos países apresentados na seção 1.3.2, os produtos obtidos também atendem a maioria das especificações para uso em projeto geométrico de rodovia, validando, ainda mais, a metodologia do estudo.

Somente para as especificações norte-americanas estabelecidas pelo DOT, a acurácia vertical ( $RMSE_z$ : 7,5cm) ficou superior em 1,5 cm, sendo determinado pelo DOT, o  $RMSE_z$ : 6,0 cm. Mesmo assim, ainda se encontra muito próxima do que é estabelecido pelo DOT podendo ser refeitas análises nos pontos de apoio para essa componente. A componente horizontal ( $RMSE_x$ : 6,7 cm e  $RMSE_y$ : 4,9 cm) atende a normas do DOT ( $RMSE_{xy}$ : 12,0 cm) ficando abaixo do valor estabelecido pelo órgão.

A norma espanhola estabelece que o GSD deve ser de 10cm/pixel e a restituição fotogramétrica deve atender à escala de 1:1000. Os produtos gerados atendem as especificações e possuem um GDS final de 2,91cm/pixel, abaixo do que é requerido. A restituição fotogramétrica atende à escala de 1:500, logo a escala de 1:1000 também é aceita.

Para as normas canadenses que são baseadas no manual da ASPRS (2014) e GeoBC (2017), a Tabela 12 apresenta para qual nível de qualidade os produtos obtidos atendem, tanto para componente vertical quanto para a horizontal.

Tabela 12 - Avaliação dos produtos fotogramétricos obtidos de acordo com as normas canadenses.

| AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA ABSOLUTA HORIZONTAL E VERTICAL                   |                  |                                                       |                  |
|------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------|------------------|
|                                                                        | Componente X (m) | Componente Y (m)                                      | Componente Z (m) |
| Média do erro amostral ( $\Delta X$ ) (m)                              | 0,006            | 0,005                                                 | -0,015           |
| Des. Padrão (S), ou Erro padrão (EP) (m)                               | 0,067            | 0,048                                                 | 0,073            |
| Raiz do erro médio quadrático RMSE (m)                                 | 0,067            | 0,049                                                 | 0,075            |
| Raiz do erro médio quadrático radial – $RMSE_r$ (m)                    | 0,083            | $RMSE_R = \sqrt{((RMSE_x)^2 + (RMSE_y)^2)}$           |                  |
| Acurácia horizontal absoluta para um nível de confiança de 95% (m)     | 0,145            | $\leq 2,448 \cdot \left(\frac{RMSE_r}{1,4142}\right)$ |                  |
| Acurácia vertical absoluta para um nível de confiança de 95% (m) – NVA | 0,148            | $NVA \leq 1,96 \cdot RMSE_z$                          |                  |

Fonte: O autor, 2022.

Seguindo o Tabela 13, a componente vertical Non-Vegetated Accuracy – NVA atende o requisito NVA do nível de qualidade QL2 do manual GEOBC, sendo menor que 19,6 cm, conforme a Tabela 12.

Tabela 13 - Requisitos por Nível de Qualidade para dados digitais de elevação.

| Nível de qualidade | Acurácia da classe (cm) | Requisito NVA (cm) | Requisito VVA (cm) | Tamanho do Grid DEM (m) | Densidade de TIN points (pts/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|
| QL1                | 5,0                     | ± 9,80             | ± 15,0             | ≤ 0,50                  | > 8                                           |
| QL2                | 10,0                    | ± 19,6             | ± 30,0             | 1,0                     | > 2                                           |

Fonte: Adaptado do manual do GEOBC (2017).

Dessa forma, a acurácia para a classe vertical é estabelecida em 10 cm, e, assim, o RMSE<sub>z</sub>: 7,55 cm dos produtos gerados estão dentro do que as especificações canadenses determinam.

Para a componente horizontal, obteve um RMSE<sub>R</sub>: 8,383 cm e uma acurácia horizontal absoluta para um nível de confiança de 95% de 14,51 cm, para um GSD de 2,91cm/pixel. Com isso, a acurácia para a classe horizontal está entre 5,0 e 7,5 cm, dessa forma, o RMSE<sub>x,y</sub> estão contidos dentro da acurácia para classe, atendendo as normativas da (ASPRS, 2014), descrita na Tabela 14.

Tabela 14 - Classes da acurácia horizontal para dados digitais planimétricos.

| Acurácia da classe horizontal RMSE <sub>x</sub> e RMSE <sub>y</sub> (cm) | RMSE <sub>R</sub> (cm) | Acurácia horizontal absoluta para um nível de confiança de 95% (cm) | GSD aproximado das imagens de origem (cm) | Equivalente à escala do mapa em ASPRS 1990 – classe 1 | Equivalente à escala do mapa em ASPRS 1990 – classe 2 |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 0,63                                                                     | 0,9                    | 1,5                                                                 | 0,31 a 0,63                               | 1:25                                                  | 1:12,5                                                |
| 1,25                                                                     | 1,8                    | 3,1                                                                 | 0,63 a 1,25                               | 1:50                                                  | 1:25                                                  |
| 2,5                                                                      | 3,5                    | 6,1                                                                 | 1,25 a 2,5                                | 1:100                                                 | 1:50                                                  |
| 5,0                                                                      | 7,1                    | 12,2                                                                | 2,5 a 5,0                                 | 1:200                                                 | 1:100                                                 |
| 7,5                                                                      | 10,6                   | 18,4                                                                | 3,8 a 7,5                                 | 1:300                                                 | 1:150                                                 |

Fonte: Adaptado da ASPRS (2014).

## 4.2 Determinação da Superelevação

### 4.2.1 Cálculo da superelevação por meio do nivelamento geométrico.

A partir das cotas corrigidas em cada ponto das seções transversais, a superelevação pode ser calculada conforme a Eq. (21) da seção 2.5.3.

Dessa maneira, utilizaram-se nos cálculos o desnível entre o eixo e cada uma das bordas, e a distância linear dos respectivos pontos em estudo, obtida a partir da coordenada (E) das irradiações.

O sentido do caminhamento da superelevação segue o nivelamento geométrico feito, da estação E<sub>0</sub> para E<sub>5</sub>. Dessa forma, a borda externa refere-se ao lado de “fora” da curva (esquerdo), e a borda interna ao lado de “dentro” (direito).

A Tabela 15 apresenta os cálculos da superelevação para estação E<sub>0</sub>. As tabelas das demais seções estão no Apêndice C.

Tabela 15 - Superelevação determinada nas seções transversais da estação E<sub>0</sub>.

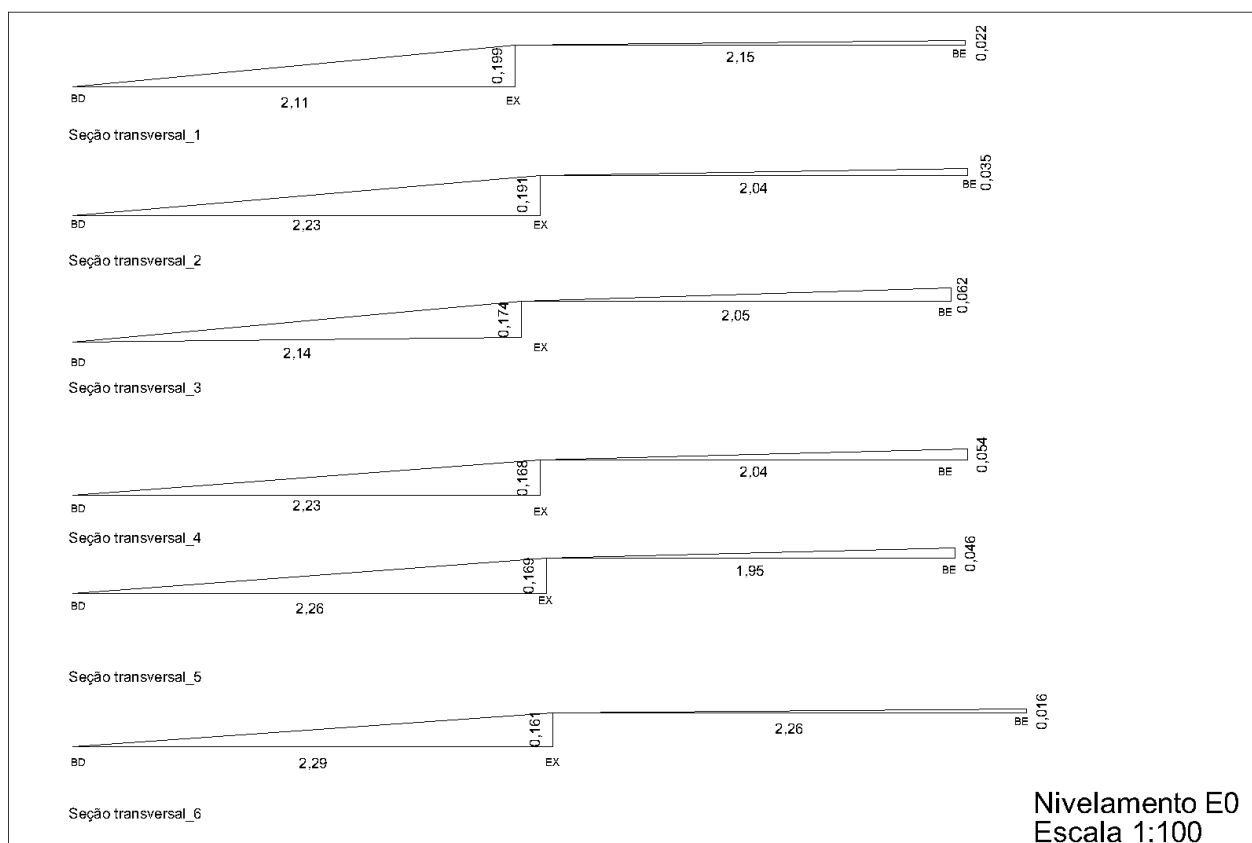
| Nº. seções | Pontos visados | E(m)       | Cota corrigida - Niv. Geo (m) | Dist. total AD - AC (m) | Dist. EX - BD (m) | Dist. EX - BE (m) | Desnível BD//BE (m) | Superelevação borda Dir. (Interno) (%) | Superelevação borda Esq. (Externo) (%) |
|------------|----------------|------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 1          | I01_AD         | 460154,370 | 299,78                        | 6,61                    | 2,11              | -2,15             |                     | 9,43%                                  | 1,04%                                  |
|            | I02_BD         | 460155,740 | 299,93                        |                         |                   |                   | 0,199               |                                        |                                        |
|            | I03_EX         | 460157,850 | 300,13                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I04_BE         | 460160,000 | 300,15                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I05_AE         | 460160,980 | 300,07                        |                         |                   |                   | -0,022              |                                        |                                        |
| 2          | I06_AD         | 460158,270 | 299,48                        | 6,82                    | 2,23              | -2,04             |                     | 8,55%                                  | 1,71%                                  |
|            | I07_BD         | 460159,650 | 299,61                        |                         |                   |                   | 0,191               |                                        |                                        |
|            | I08_EX         | 460161,880 | 299,80                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I09_BE         | 460163,920 | 299,84                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I10_AE         | 460165,090 | 299,78                        |                         |                   |                   | -0,035              |                                        |                                        |
| 3          | I11_AD         | 460162,220 | 299,20                        | 6,77                    | 2,14              | -2,05             |                     | 8,13%                                  | 3,01%                                  |
|            | I12_BD         | 460163,634 | 299,32                        |                         |                   |                   | 0,174               |                                        |                                        |
|            | I13_EX         | 460165,777 | 299,50                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I14_BE         | 460167,827 | 299,56                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I15_AE         | 460168,990 | 299,47                        |                         |                   |                   | -0,062              |                                        |                                        |
| 4          | I16_AD         | 460166,130 | 298,94                        | 6,95                    | 2,23              | -2,04             |                     | 7,55%                                  | 2,66%                                  |
|            | I17_BD         | 460167,569 | 299,06                        |                         |                   |                   | 0,168               |                                        |                                        |
|            | I18_EX         | 460169,796 | 299,23                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I19_BE         | 460171,838 | 299,28                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I20_AE         | 460173,080 | 299,17                        |                         |                   |                   | -0,054              |                                        |                                        |
| 5          | I21_AD         | 460169,998 | 298,64                        | 7,22                    | 2,26              | -1,95             |                     | 7,47%                                  | 2,35%                                  |
|            | I22_BD         | 460171,697 | 298,78                        |                         |                   |                   | 0,169               |                                        |                                        |
|            | I23_EX         | 460173,960 | 298,95                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I24_BE         | 460175,913 | 298,99                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I25_AE         | 460177,216 | 298,88                        |                         |                   |                   | -0,046              |                                        |                                        |
| 6          | I26_AD         | 460173,800 | 298,39                        | 7,14                    | 2,29              | -2,26             |                     | 7,02%                                  | 0,72%                                  |
|            | I27_BD         | 460175,340 | 298,54                        |                         |                   |                   | 0,161               |                                        |                                        |
|            | I28_EX         | 460177,630 | 298,70                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I29_BE         | 460179,890 | 298,72                        |                         |                   |                   |                     |                                        |                                        |
|            | I30_AE         | 460180,940 | 298,65                        |                         |                   |                   | -0,016              |                                        |                                        |

Fonte: O autor, 2023.

Ao longo da estação, observa-se que não há uma regularidade de diminuição ou aumento da superelevação. É possível notar que a borda interna diminui a sua superelevação, enquanto a borda externa varia a sua taxa de superelevação.

Para uma melhor visualização das seções, essas foram desenhadas no AutoCad Civil 3D, de acordo com a Figura 27. Nesse sentido, torna-se possível analisar o que está acontecendo com a superelevação em cada seção transversal. Os desenhos de todas as seções transversais desenhadas em planta no AutoCad Civil 3 encontram-se no Apêndice D

Figura 27 - Seções transversais em planta da estação E0.



Fonte: O autor, 2023.

Com a superelevação calculada a partir do eixo da via, é possível observar seu desenvolvimento ao longo de toda curva 1. As estações E<sub>3</sub> a E<sub>5</sub> estão localizadas no desenvolvimento da curva horizontal 1, portanto, o valor máximo de superelevação deveria estar tecnicamente contido dentro de suas respectivas seções.

A Tabela 16 apresenta os dados dessas três estações, onde se observa que as superelevações, tanto na borda interna quanto na externa, aumentam gradativamente.

Tabela 16 - Cálculo das superelevações ao longo das estações E<sub>3</sub> a E<sub>5</sub>, localizadas ao longo de todo desenvolvimento da curva 1.

| Nº. seções | Pontos visados | E(m)       | Cota corrigida - Niv. Geo (m) | Dist. Total BD -BE (m) | Dist. EX - BD (m) | Dist. EX - BE(m) | Desnível BD//BE (m) | Superelevação borda Dir. (Interno) (%) | Superelevação borda Esq. (Externo) (%) |
|------------|----------------|------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|------------------|---------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 21         | I102_AD        | 460228,742 | 297,33                        | 6,28                   | 3,17              | -3,11            |                     | 4,32%                                  | -1,51%                                 |
|            | I103_BD        | 460230,513 | 297,54                        |                        |                   |                  | 0,137               |                                        |                                        |
|            | I104_EX        | 460233,687 | 297,67                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I105_BE        | 460236,797 | 297,63                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I106_AE        | 460238,068 | 297,01                        |                        |                   |                  | 0,047               |                                        |                                        |
| 22         | I107_BD        | 460233,695 | 297,19                        | 6,65                   | 3,31              | -3,35            |                     | 6,65%                                  | 4,08%                                  |
|            | I108_EX        | 460237,003 | 297,41                        |                        |                   |                  | 0,220               |                                        |                                        |
|            | I109_BE        | 460240,349 | 297,54                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I110_AE        | 460242,246 | 297,54                        |                        |                   |                  | -0,136              |                                        |                                        |
| 23         | I111_AD        | 460234,911 | 296,86                        | 7,00                   | 3,46              | -3,54            |                     | 6,38%                                  | 4,75%                                  |
|            | I112_BD        | 460236,660 | 297,05                        |                        |                   |                  | 0,221               |                                        |                                        |
|            | I113_EX        | 460240,116 | 297,27                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I114_BE        | 460243,658 | 297,44                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I115_AE        | 460245,750 | 297,46                        |                        |                   |                  | -0,168              |                                        |                                        |
| 24         | I116_AD        | 460237,587 | 296,71                        | 7,18                   | 3,46              | -3,73            |                     | 6,84%                                  | 5,62%                                  |
|            | I117_BD        | 460239,414 | 296,92                        |                        |                   |                  | 0,237               |                                        |                                        |
|            | I118_EX        | 460242,871 | 297,16                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I119_BE        | 460246,598 | 297,37                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I120_AE        | 460248,047 | 297,35                        |                        |                   |                  | -0,209              |                                        |                                        |
| 25         | I121_AD        | 460240,060 | 296,60                        | 7,49                   | 3,76              | -3,73            |                     | 7,09%                                  | 6,36%                                  |
|            | I122_BD        | 460242,006 | 296,78                        |                        |                   |                  | 0,267               |                                        |                                        |
|            | I123_EX        | 460245,766 | 297,05                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I124_BE        | 460249,500 | 297,29                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I125_AE        | 460251,564 | 297,29                        |                        |                   |                  | -0,238              |                                        |                                        |
| 26         | I126_AD        | 460242,311 | 296,50                        | 7,97                   | 3,91              | -4,06            |                     | 7,74%                                  | 6,36%                                  |
|            | I127_BD        | 460244,125 | 296,65                        |                        |                   |                  | 0,303               |                                        |                                        |
|            | I128_EX        | 460248,036 | 296,95                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I129_BE        | 460252,100 | 297,21                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I130_AE        | 460254,385 | 297,21                        |                        |                   |                  | -0,258              |                                        |                                        |
| 27         | I131_AD        | 460244,365 | 296,42                        | 8,23                   | 4,14              | -4,10            |                     | 7,59%                                  | 6,14%                                  |
|            | I132_BD        | 460246,019 | 296,54                        |                        |                   |                  | 0,314               |                                        |                                        |
|            | I133_EX        | 460250,154 | 296,86                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I134_BE        | 460254,253 | 297,11                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I135_AE        | 460256,451 | 297,12                        |                        |                   |                  | -0,252              |                                        |                                        |
| 28         | I136_AD        | 460246,090 | 296,30                        | 8,65                   | 4,26              | -4,40            |                     | 7,56%                                  | 5,30%                                  |
|            | I137_BD        | 460247,668 | 296,45                        |                        |                   |                  | 0,322               |                                        |                                        |
|            | I138_EX        | 460251,924 | 296,77                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I139_BE        | 460256,320 | 297,01                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I140_AE        | 460258,519 | 297,03                        |                        |                   |                  | -0,233              |                                        |                                        |
| 29         | I141_AD        | 460247,525 | 296,23                        | 8,42                   | 4,27              | -4,15            |                     | 7,15%                                  | 5,98%                                  |
|            | I142_BD        | 460249,044 | 296,37                        |                        |                   |                  | 0,305               |                                        |                                        |
|            | I143_EX        | 460253,314 | 296,67                        |                        |                   |                  |                     |                                        |                                        |

|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
|----|---------|------------|--------|------|------|-------|--------|-------|-------|
|    | I144_BE | 460257,464 | 296,92 |      |      |       | -0,248 |       |       |
|    | I145_AE | 460259,710 | 296,93 |      |      |       |        |       |       |
| 30 | I146_AD | 460248,596 | 296,12 | 8,47 | 4,36 | -4,11 | 0,319  | 7,32% | 6,58% |
|    | I147_BD | 460250,062 | 296,26 |      |      |       |        |       |       |
|    | I148_EX | 460254,418 | 296,58 |      |      |       |        |       |       |
|    | I149_BE | 460258,532 | 296,85 |      |      |       |        |       |       |
|    | I150_AE | 460260,895 | 296,85 |      |      |       | -0,271 |       |       |
| 31 | I151_AD | 460249,131 | 296,03 | 8,72 | 4,26 | -4,46 | 0,333  | 7,83% | 6,08% |
|    | I152_BD | 460250,880 | 296,16 |      |      |       |        |       |       |
|    | I153_EX | 460255,138 | 296,49 |      |      |       |        |       |       |
|    | I154_BE | 460259,598 | 296,76 |      |      |       |        |       |       |
|    | I155_AE | 460262,162 | 296,78 |      |      |       | -0,271 |       |       |
| 32 | I156_AD | 460249,441 | 295,91 | 8,90 | 4,32 | -4,58 | 0,356  | 8,23% | 5,51% |
|    | I157_BD | 460251,346 | 296,05 |      |      |       |        |       |       |
|    | I158_EX | 460255,664 | 296,41 |      |      |       |        |       |       |
|    | I159_BE | 460260,243 | 296,66 |      |      |       |        |       |       |
|    | I160_AE | 460262,753 | 296,67 |      |      |       | -0,252 |       |       |
| 33 | I161_AD | 460249,510 | 295,83 | 8,80 | 4,44 | -4,36 | 0,346  | 7,80% | 5,91% |
|    | I162_BD | 460251,505 | 295,97 |      |      |       |        |       |       |
|    | I163_EX | 460255,944 | 296,32 |      |      |       |        |       |       |
|    | I164_BE | 460260,307 | 296,58 |      |      |       |        |       |       |
|    | I165_AE | 460263,025 | 296,58 |      |      |       | -0,258 |       |       |
| 34 | I166_AD | 460249,326 | 295,71 | 8,69 | 4,42 | -4,27 | 0,338  | 7,64% | 5,87% |
|    | I167_BD | 460251,385 | 295,89 |      |      |       |        |       |       |
|    | I168_EX | 460255,810 | 296,23 |      |      |       |        |       |       |
|    | I169_BE | 460260,076 | 296,48 |      |      |       |        |       |       |
|    | I170_AE | 460262,734 | 296,50 |      |      |       | -0,250 |       |       |
| 35 | I171_AD | 460249,082 | 295,65 | 8,63 | 4,35 | -4,28 | 0,329  | 7,56% | 5,83% |
|    | I172_BD | 460250,913 | 295,81 |      |      |       |        |       |       |
|    | I173_EX | 460255,265 | 296,14 |      |      |       |        |       |       |
|    | I174_BE | 460259,547 | 296,39 |      |      |       |        |       |       |
|    | I175_AE | 460262,218 | 296,43 |      |      |       | -0,249 |       |       |
| 36 | I176_AD | 460248,378 | 295,62 | 8,42 | 4,20 | -4,21 | 0,312  | 7,42% | 5,94% |
|    | I177_BD | 460250,191 | 295,74 |      |      |       |        |       |       |
|    | I178_EX | 460254,394 | 296,05 |      |      |       |        |       |       |
|    | I179_BE | 460258,608 | 296,30 |      |      |       |        |       |       |
|    | I180_AE | 460261,372 | 296,32 |      |      |       | -0,250 |       |       |
| 37 | I181_AD | 460247,183 | 295,52 | 8,17 | 4,06 | -4,11 | 0,292  | 7,18% | 6,24% |
|    | I182_BD | 460249,139 | 295,66 |      |      |       |        |       |       |
|    | I183_EX | 460253,199 | 295,95 |      |      |       |        |       |       |
|    | I184_BE | 460257,309 | 296,21 |      |      |       |        |       |       |
|    | I185_AE | 460260,050 | 296,24 |      |      |       | -0,256 |       |       |
| 38 | I186_AD | 460245,787 | 295,44 | 8,06 | 3,96 | -4,10 | 0,296  | 7,47% | 6,14% |
|    | I187_BD | 460247,792 | 295,58 |      |      |       |        |       |       |
|    | I188_EX | 460251,751 | 295,88 |      |      |       |        |       |       |
|    | I189_BE | 460255,855 | 296,13 |      |      |       | -0,252 |       |       |

|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
|----|---------|------------|--------|------|------|-------|--------|-------|-------|
|    | I190_AE | 460258,561 | 296,17 |      |      |       |        |       |       |
| 39 | I191_AD | 460244,263 | 295,34 | 8,04 | 4,03 | -4,01 |        | 8,12% | 6,58% |
|    | I192_BD | 460246,185 | 295,48 |      |      |       | 0,327  |       |       |
|    | I193_EX | 460250,212 | 295,80 |      |      |       |        |       |       |
|    | I194_BE | 460254,225 | 296,07 |      |      |       |        |       |       |
|    | I195_AE | 460256,944 | 296,08 |      |      |       | -0,264 |       |       |
| 40 | I196_AD | 460242,414 | 295,26 | 7,75 | 3,92 | -3,83 |        | 7,92% | 6,45% |
|    | I197_BD | 460244,443 | 295,42 |      |      |       | 0,310  |       |       |
|    | I198_EX | 460248,360 | 295,73 |      |      |       |        |       |       |
|    | I199_BE | 460252,193 | 295,98 |      |      |       |        |       |       |
|    | I200_AE | 460254,574 | 296,01 |      |      |       | -0,247 |       |       |
| 41 | I201_AD | 460239,684 | 295,19 | 7,62 | 3,72 | -3,90 |        | 8,28% | 6,40% |
|    | I202_BD | 460241,893 | 295,33 |      |      |       | 0,308  |       |       |
|    | I203_EX | 460245,611 | 295,64 |      |      |       |        |       |       |
|    | I204_BE | 460249,514 | 295,88 |      |      |       |        |       |       |
|    | I205_AE | 460251,596 | 295,91 |      |      |       | -0,250 |       |       |
| 42 | I206_AD | 460237,444 | 295,15 | 7,15 | 3,52 | -3,62 |        | 8,44% | 6,41% |
|    | I207_BD | 460239,951 | 295,27 |      |      |       | 0,297  |       |       |
|    | I208_EX | 460243,473 | 295,57 |      |      |       |        |       |       |
|    | I209_BE | 460247,097 | 295,80 |      |      |       |        |       |       |
|    | I210_AE | 460248,630 | 295,80 |      |      |       | -0,232 |       |       |
| 43 | I211_AD | 460235,660 | 295,13 | 6,79 | 3,35 | -3,44 |        | 7,73% | 6,20% |
|    | I212_BD | 460237,295 | 295,22 |      |      |       | 0,259  |       |       |
|    | I213_EX | 460240,645 | 295,48 |      |      |       |        |       |       |
|    | I214_BE | 460244,081 | 295,69 |      |      |       |        |       |       |
|    | I216_AE | 460245,807 | 295,68 |      |      |       | -0,213 |       |       |
| 44 | I217_AD | 460233,027 | 295,10 | 6,35 | 3,25 | -3,09 |        | 6,69% | 5,75% |
|    | I218_BD | 460234,422 | 295,18 |      |      |       | 0,218  |       |       |
|    | I219_EX | 460237,676 | 295,40 |      |      |       |        |       |       |
|    | I220_BE | 460240,770 | 295,58 |      |      |       |        |       |       |
|    | I221_AE | 460242,694 | 295,56 |      |      |       | -0,178 |       |       |
| 45 | I222_BD | 460231,443 | 295,14 | 5,93 | 3,06 | -2,87 | 0,183  | 5,96% | 5,74% |
|    | I223_EX | 460234,504 | 295,32 |      |      |       |        |       |       |
|    | I224_BE | 460237,372 | 295,49 |      |      |       |        |       |       |
|    | I225_AE | 460239,433 | 295,46 |      |      |       | -0,165 |       |       |
| 46 | I226_AD | 460227,125 | 295,00 | 5,78 | 2,98 | -2,81 |        | 5,50% | 4,19% |
|    | I227_BD | 460228,302 | 295,10 |      |      |       | 0,164  |       |       |
|    | I228_EX | 460231,278 | 295,26 |      |      |       |        |       |       |
|    | I229_BE | 460234,087 | 295,38 |      |      |       |        |       |       |
|    | I230_AE | 460235,978 | 295,35 |      |      |       | -0,118 |       |       |
| 47 | I231_AD | 460224,021 | 294,98 | 5,39 | 2,87 | -2,52 |        | 4,21% | 2,99% |
|    | I232_BD | 460225,025 | 295,08 |      |      |       | 0,121  |       |       |
|    | I233_EX | 460227,896 | 295,20 |      |      |       |        |       |       |
|    | I234_BE | 460230,413 | 295,27 |      |      |       |        |       |       |
|    | I235_AE | 460232,088 | 295,21 |      |      |       | -0,075 |       |       |
| 48 | I236_AD | 460220,740 | 294,95 | 5,16 | 2,83 | -2,33 | 0,083  | 2,93% | 0,84% |

|    |         |            |        |      |      |       |        |       |        |
|----|---------|------------|--------|------|------|-------|--------|-------|--------|
|    | I237_BD | 460221,770 | 295,05 |      |      |       |        |       |        |
|    | I238_EX | 460224,605 | 295,14 |      |      |       |        |       |        |
|    | I239_BE | 460226,931 | 295,16 |      |      |       |        |       |        |
|    | I240_AE | 460228,560 | 295,08 |      |      |       | -0,020 |       |        |
| 49 | I241_AD | 460217,322 | 294,90 | 4,87 | 2,65 | -2,22 |        | 2,45% | -1,21% |
|    | I242_BD | 460218,463 | 295,01 |      |      |       | 0,065  |       |        |
|    | I243_EX | 460221,110 | 295,07 |      |      |       |        |       |        |
|    | I244_BE | 460223,334 | 295,04 |      |      |       |        |       |        |
|    | I245_AE | 460224,893 | 294,93 |      |      |       | 0,027  |       |        |
| 50 | I246_AD | 460213,966 | 294,73 | 4,84 | 2,61 | -2,23 |        | 1,58% | -3,90% |
|    | I247_BD | 460214,924 | 294,83 |      |      |       | 0,041  |       |        |
|    | I248_EX | 460217,534 | 294,87 |      |      |       |        |       |        |
|    | I249_BE | 460219,761 | 294,78 |      |      |       |        |       |        |
|    | I250_AE | 460221,035 | 294,66 |      |      |       | 0,087  |       |        |

Fonte: O autor, 2023.

Contudo, o que se observa é que a borda interna da curva permanece com inclinação superior, enquanto a borda externa continua mais elevada que o eixo, aumentando a sua inclinação à medida que passam as seções. Mas a taxa de superelevação máxima, que deveria ser mantida durante todo o seu desenvolvimento, não acontece.

A taxa de superelevação varia ao longo da curva. Diante disso, não é possível estabelecer qual foi a taxa máxima de superelevação adotada no projeto da via. Isso pode indicar uma possível inconsistência geométrica nesse trecho.

Além disso, a maior taxa de superelevação acontece na borda interna da seção transversal 42, ao atingir 8,44%. Porém, ao analisar as taxas de superelevação das seções anteriores, nota-se um aumento gradativo sem nenhuma regularidade. Nas seções subsequentes à seção 42, a taxa de superelevação volta a diminuir até atingir valores admissíveis para o abaulamento da via.

Outro ponto que cabe ressaltar é que na seção 21, a borda externa apresenta uma superelevação negativa, indicando que essa está mais baixo do eixo. No entanto, ao analisar as seções próximas a ela, essa condição acontece; isso pode indicar algum erro na leitura do nivelamento geométrico na borda externa.

A determinação do valor correto da superelevação é de suma importância, uma vez que o parâmetro é responsável pela segurança e o conforto dos usuários, além de ser informação importante para determinar o raio mínimo que a curva deve admitir.

#### 4.2.2 Cálculo da superelevação por meio do MDS/MDT

A partir das coordenadas dos pontos irradiados, foi obtida a elevação desses por meio do MDS no software QGIS utilizando a calculadora de campo. Dessa forma, calculou-se a superelevação da mesma maneira que a subseção anterior.

A Tabela 17 demonstra os cálculos desenvolvidos a partir das elevações obtidas pelo MDS, para a estação E<sub>0</sub>. As tabelas e os desenhos das demais estações podem ser acompanhados no Apêndice E.

Tabela 17 - Determinação da superelevação a partir dos valores de elevação do DSM para estação E<sub>0</sub>.

| Nº. seções | Pontos visados | E(m)       | Altitude MDS (m) | Dist. Total AD - AC (m) | Dist. EX - BD (m) | Dist. EX - BE(m) | Desnível BD//BE (m) | Superelevação borda Dir. (Interno) (%) | Superelevação borda Esq. (Externo) (%) |
|------------|----------------|------------|------------------|-------------------------|-------------------|------------------|---------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 1          | I01_AD         | 460154,370 | 427,007          | 6,61                    | 2,11              | -2,15            |                     | 8,98%                                  | 1,60%                                  |
|            | I02_BD         | 460155,740 | 427,143          |                         |                   |                  | 0,190               |                                        |                                        |
|            | I03_EX         | 460157,850 | 427,332          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I04_BE         | 460160,000 | 427,367          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I05_AE         | 460160,980 | 427,361          |                         |                   |                  | -0,034              |                                        |                                        |
| 2          | I06_AD         | 460158,270 | 426,710          | 6,82                    | 2,23              | -2,04            |                     | 8,28%                                  | 2,75%                                  |
|            | I07_BD         | 460159,650 | 426,834          |                         |                   |                  | 0,185               |                                        |                                        |
|            | I08_EX         | 460161,880 | 427,019          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I09_BE         | 460163,920 | 427,075          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I10_AE         | 460165,090 | 426,974          |                         |                   |                  | -0,056              |                                        |                                        |
| 3          | I11_AD         | 460162,220 | 426,437          | 6,77                    | 2,14              | -2,05            |                     | 8,22%                                  | 2,24%                                  |
|            | I12_BD         | 460163,634 | 426,556          |                         |                   |                  | 0,176               |                                        |                                        |
|            | I13_EX         | 460165,777 | 426,732          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I14_BE         | 460167,827 | 426,778          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I15_AE         | 460168,990 | 426,354          |                         |                   |                  | -0,046              |                                        |                                        |
| 4          | I16_AD         | 460166,130 | 426,182          | 6,95                    | 2,23              | -2,04            |                     | 8,73%                                  | 0,47%                                  |
|            | I17_BD         | 460167,569 | 426,276          |                         |                   |                  | 0,194               |                                        |                                        |
|            | I18_EX         | 460169,796 | 426,470          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I19_BE         | 460171,838 | 426,480          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I20_AE         | 460173,080 | 426,388          |                         |                   |                  | -0,010              |                                        |                                        |
| 5          | I21_AD         | 460169,998 | 425,852          | 7,22                    | 2,26              | -1,95            |                     | 7,88%                                  | 1,69%                                  |
|            | I22_BD         | 460171,697 | 425,998          |                         |                   |                  | 0,178               |                                        |                                        |
|            | I23_EX         | 460173,960 | 426,177          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I24_BE         | 460175,913 | 426,210          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I25_AE         | 460177,216 | 426,087          |                         |                   |                  | -0,033              |                                        |                                        |
| 6          | I26_AD         | 460173,800 | 425,630          | 7,14                    | 2,29              | -2,26            |                     | 7,04%                                  | -0,59%                                 |
|            | I27_BD         | 460175,340 | 425,773          |                         |                   |                  | 0,161               |                                        |                                        |
|            | I28_EX         | 460177,630 | 425,935          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I29_BE         | 460179,890 | 425,921          |                         |                   |                  |                     |                                        |                                        |
|            | I30_AE         | 460180,940 | 425,925          |                         |                   |                  | 0,013               |                                        |                                        |

Fonte: O autor, 2023.

Em análises prévias, comparando as duas superelevações obtidas com os dois métodos (Tabela 15 e 17), é possível observar que houve variações percentuais, de 0 a 1% nas seções. Entretanto, as características de cada seção se mantiveram como a borda interna mais baixa que o eixo e a borda externa mais elevada. Apenas a seção 6 apresenta a mesma condição analisada na seção transversal 21 da seção anterior.

A Tabela 18 apresenta as superelevações para as estações E<sub>3</sub> a E<sub>5</sub> para fins de comparação com o método da seção anterior.

Tabela 18 - Cálculo das superelevações ao longo das estações E<sub>3</sub> a E<sub>5</sub>, localizadas ao longo de todo desenvolvimento da curva 1.

| Nº. seções | Pontos visados | E(m)       | Altitude MDS (m) | Dist.Total BE-BD (m) | Dist. EX - BD (m) | Dist. EX - BE(m) | Desnível BD//BE (m) | Superelevação borda Dir. (Interno)(%) | Superelevação borda Esq. (Externo)(%) |
|------------|----------------|------------|------------------|----------------------|-------------------|------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 21         | I102_AD        | 460228,742 | 422,944          | 6,28                 | 3,17              | -3,11            | 0,228               | 7,18%                                 | 3,92%                                 |
|            | I103_BD        | 460230,513 | 423,136          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
|            | I104_EX        | 460233,687 | 423,364          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
|            | I105_BE        | 460236,797 | 423,486          |                      |                   |                  | -0,122              |                                       |                                       |
|            | I106_AE        | 460238,068 | 423,456          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
| 22         | I107_BD        | 460233,695 | 422,993          | 6,65                 | 3,31              | -3,35            | 0,230               | 6,95%                                 | 3,68%                                 |
|            | I108_EX        | 460237,003 | 423,223          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
|            | I109_BE        | 460240,349 | 423,346          |                      |                   |                  | -0,123              |                                       |                                       |
|            | I110_AE        | 460242,246 | 423,361          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
| 23         | I111_AD        | 460234,911 | 422,689          | 7,00                 | 3,46              | -3,54            | 0,227               | 6,57%                                 | 4,86%                                 |
|            | I112_BD        | 460236,660 | 422,854          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
|            | I113_EX        | 460240,116 | 423,081          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
|            | I114_BE        | 460243,658 | 423,253          |                      |                   |                  | -0,172              |                                       |                                       |
|            | I115_AE        | 460245,750 | 423,295          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
| 24         | I116_AD        | 460237,587 | 422,538          | 7,18                 | 3,46              | -3,73            | 0,250               | 7,23%                                 | 6,55%                                 |
|            | I117_BD        | 460239,414 | 422,713          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
|            | I118_EX        | 460242,871 | 422,963          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
|            | I119_BE        | 460246,598 | 423,207          |                      |                   |                  | -0,244              |                                       |                                       |
|            | I120_AE        | 460248,047 | 423,193          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
| 25         | I121_AD        | 460240,060 | 422,463          | 7,49                 | 3,76              | -3,73            | 0,280               | 7,45%                                 | 6,80%                                 |
|            | I122_BD        | 460242,006 | 422,574          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
|            | I123_EX        | 460245,766 | 422,854          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
|            | I124_BE        | 460249,500 | 423,108          |                      |                   |                  | -0,254              |                                       |                                       |
|            | I125_AE        | 460251,564 | 423,091          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
| 26         | I126_AD        | 460242,311 | 422,327          | 7,97                 | 3,91              | -4,06            | 0,313               | 8,00%                                 | 6,32%                                 |
|            | I127_BD        | 460244,125 | 422,451          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
|            | I128_EX        | 460248,036 | 422,764          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |
|            | I129_BE        | 460252,100 | 423,021          |                      |                   |                  | -0,257              |                                       |                                       |
|            | I130_AE        | 460254,385 | 423,018          |                      |                   |                  |                     |                                       |                                       |

|    |         |            |         |      |      |       |        |       |       |
|----|---------|------------|---------|------|------|-------|--------|-------|-------|
| 27 | I131_AD | 460244,365 | 422,228 | 8,23 | 4,14 | -4,10 | 0,330  | 7,98% | 5,46% |
|    | I132_BD | 460246,019 | 422,350 |      |      |       |        |       |       |
|    | I133_EX | 460250,154 | 422,680 |      |      |       |        |       |       |
|    | I134_BE | 460254,253 | 422,904 |      |      |       | -0,224 |       |       |
|    | I135_AE | 460256,451 | 422,993 |      |      |       |        |       |       |
| 28 | I136_AD | 460246,090 | 422,126 | 8,65 | 4,26 | -4,40 | 0,318  | 7,47% | 5,14% |
|    | I137_BD | 460247,668 | 422,262 |      |      |       |        |       |       |
|    | I138_EX | 460251,924 | 422,580 |      |      |       |        |       |       |
|    | I139_BE | 460256,320 | 422,806 |      |      |       | -0,226 |       |       |
|    | I140_AE | 460258,519 | 422,846 |      |      |       |        |       |       |
| 29 | I141_AD | 460247,525 | 422,063 | 8,42 | 4,27 | -4,15 | 0,302  | 7,07% | 6,10% |
|    | I142_BD | 460249,044 | 422,178 |      |      |       |        |       |       |
|    | I143_EX | 460253,314 | 422,480 |      |      |       |        |       |       |
|    | I144_BE | 460257,464 | 422,733 |      |      |       | -0,253 |       |       |
|    | I145_AE | 460259,710 | 422,771 |      |      |       |        |       |       |
| 30 | I146_AD | 460248,596 | 421,958 | 8,47 | 4,36 | -4,11 | 0,318  | 7,30% | 6,27% |
|    | I147_BD | 460250,062 | 422,078 |      |      |       |        |       |       |
|    | I148_EX | 460254,418 | 422,396 |      |      |       |        |       |       |
|    | I149_BE | 460258,532 | 422,654 |      |      |       | -0,258 |       |       |
|    | I150_AE | 460260,895 | 422,685 |      |      |       |        |       |       |
| 31 | I151_AD | 460249,131 | 421,839 | 8,72 | 4,26 | -4,46 | 0,336  | 7,89% | 6,08% |
|    | I152_BD | 460250,880 | 421,961 |      |      |       |        |       |       |
|    | I153_EX | 460255,138 | 422,297 |      |      |       |        |       |       |
|    | I154_BE | 460259,598 | 422,568 |      |      |       | -0,271 |       |       |
|    | I155_AE | 460262,162 | 422,628 |      |      |       |        |       |       |
| 32 | I156_AD | 460249,441 | 421,717 | 8,90 | 4,32 | -4,58 | 0,366  | 8,48% | 5,35% |
|    | I157_BD | 460251,346 | 421,850 |      |      |       |        |       |       |
|    | I158_EX | 460255,664 | 422,216 |      |      |       |        |       |       |
|    | I159_BE | 460260,243 | 422,461 |      |      |       | -0,245 |       |       |
|    | I160_AE | 460262,753 | 422,501 |      |      |       |        |       |       |
| 33 | I161_AD | 460249,510 | 421,686 | 8,80 | 4,44 | -4,36 | 0,345  | 7,77% | 6,05% |
|    | I162_BD | 460251,505 | 421,775 |      |      |       |        |       |       |
|    | I163_EX | 460255,944 | 422,120 |      |      |       |        |       |       |
|    | I164_BE | 460260,307 | 422,384 |      |      |       | -0,264 |       |       |
|    | I165_AE | 460263,025 | 422,377 |      |      |       |        |       |       |
| 34 | I166_AD | 460249,326 | 421,561 | 8,69 | 4,42 | -4,27 | 0,341  | 7,71% | 5,98% |
|    | I167_BD | 460251,385 | 421,683 |      |      |       |        |       |       |
|    | I168_EX | 460255,810 | 422,024 |      |      |       |        |       |       |
|    | I169_BE | 460260,076 | 422,279 |      |      |       | -0,255 |       |       |
|    | I170_AE | 460262,734 | 422,355 |      |      |       |        |       |       |
| 35 | I171_AD | 460249,082 | 421,440 | 8,63 | 4,35 | -4,28 | 0,352  | 8,09% | 5,39% |
|    | I172_BD | 460250,913 | 421,592 |      |      |       |        |       |       |
|    | I173_EX | 460255,265 | 421,944 |      |      |       |        |       |       |
|    | I174_BE | 460259,547 | 422,175 |      |      |       | -0,231 |       |       |
|    | I175_AE | 460262,218 | 422,315 |      |      |       |        |       |       |
| 36 | I176_AD | 460248,378 | 421,440 | 8,42 | 4,20 | -4,21 | 0,318  | 7,57% | 5,29% |

|    |         |            |         |      |      |       |        |       |       |
|----|---------|------------|---------|------|------|-------|--------|-------|-------|
|    | I177_BD | 460250,191 | 421,548 |      |      |       |        |       |       |
|    | I178_EX | 460254,394 | 421,866 |      |      |       |        |       |       |
|    | I179_BE | 460258,608 | 422,089 |      |      |       |        |       |       |
|    | I180_AE | 460261,372 | 422,132 |      |      |       | -0,223 |       |       |
| 37 | I181_AD | 460247,183 | 421,353 | 8,17 | 4,06 | -4,11 | 0,295  | 7,27% | 5,89% |
|    | I182_BD | 460249,139 | 421,466 |      |      |       |        |       |       |
|    | I183_EX | 460253,199 | 421,761 |      |      |       |        |       |       |
|    | I184_BE | 460257,309 | 422,003 |      |      |       | -0,242 |       |       |
|    | I185_AE | 460260,050 | 422,131 |      |      |       |        |       |       |
| 38 | I186_AD | 460245,787 | 421,256 | 8,06 | 3,96 | -4,10 | 0,279  | 7,05% | 5,85% |
|    | I187_BD | 460247,792 | 421,401 |      |      |       |        |       |       |
|    | I188_EX | 460251,751 | 421,680 |      |      |       |        |       |       |
|    | I189_BE | 460255,855 | 421,920 |      |      |       | -0,240 |       |       |
|    | I190_AE | 460258,561 | 421,955 |      |      |       |        |       |       |
| 39 | I191_AD | 460244,263 | 421,199 | 8,04 | 4,03 | -4,01 | 0,314  | 7,80% | 6,03% |
|    | I192_BD | 460246,185 | 421,305 |      |      |       |        |       |       |
|    | I193_EX | 460250,212 | 421,619 |      |      |       |        |       |       |
|    | I194_BE | 460254,225 | 421,861 |      |      |       |        |       |       |
|    | I195_AE | 460256,944 | 421,887 |      |      |       | -0,242 |       |       |
| 40 | I196_AD | 460242,414 | 421,103 | 7,75 | 3,92 | -3,83 | 0,304  | 7,76% | 6,84% |
|    | I197_BD | 460244,443 | 421,247 |      |      |       |        |       |       |
|    | I198_EX | 460248,360 | 421,551 |      |      |       |        |       |       |
|    | I199_BE | 460252,193 | 421,813 |      |      |       |        |       |       |
|    | I200_AE | 460254,574 | 421,841 |      |      |       | -0,262 |       |       |
| 41 | I201_AD | 460239,684 | 421,047 | 7,62 | 3,72 | -3,90 | 0,320  | 8,61% | 6,20% |
|    | I202_BD | 460241,893 | 421,131 |      |      |       |        |       |       |
|    | I203_EX | 460245,611 | 421,451 |      |      |       |        |       |       |
|    | I204_BE | 460249,514 | 421,693 |      |      |       |        |       |       |
|    | I205_AE | 460251,596 | 421,986 |      |      |       | -0,242 |       |       |
| 42 | I206_AD | 460237,444 | 421,005 | 7,15 | 3,52 | -3,62 | 0,307  | 8,72% | 6,76% |
|    | I207_BD | 460239,951 | 421,091 |      |      |       |        |       |       |
|    | I208_EX | 460243,473 | 421,398 |      |      |       |        |       |       |
|    | I209_BE | 460247,097 | 421,643 |      |      |       |        |       |       |
|    | I210_AE | 460248,630 | 421,647 |      |      |       | -0,245 |       |       |
| 43 | I211_AD | 460235,660 | 420,979 | 6,79 | 3,35 | -3,44 | 0,259  | 7,73% | 6,61% |
|    | I212_BD | 460237,295 | 421,050 |      |      |       |        |       |       |
|    | I213_EX | 460240,645 | 421,309 |      |      |       |        |       |       |
|    | I214_BE | 460244,081 | 421,536 |      |      |       |        |       |       |
|    | I216_AE | 460245,807 | 421,549 |      |      |       | -0,227 |       |       |
| 44 | I217_AD | 460233,027 | 420,958 | 6,35 | 3,25 | -3,09 | 0,225  | 6,91% | 5,53% |
|    | I218_BD | 460234,422 | 421,019 |      |      |       |        |       |       |
|    | I219_EX | 460237,676 | 421,244 |      |      |       |        |       |       |
|    | I220_BE | 460240,770 | 421,415 |      |      |       |        |       |       |
|    | I221_AE | 460242,694 | 421,444 |      |      |       | -0,171 |       |       |
| 45 | I222_BD | 460231,443 | 420,963 | 5,93 | 3,06 | -2,87 | 0,193  | 6,31% | 5,47% |
|    | I223_EX | 460234,504 | 421,156 |      |      |       |        |       |       |

|    |         |            |         |      |      |       |        |       |        |
|----|---------|------------|---------|------|------|-------|--------|-------|--------|
|    | I224_BE | 460237,372 | 421,313 |      |      |       | -0,157 |       |        |
|    | I225_AE | 460239,433 | 421,378 |      |      |       |        |       |        |
| 46 | I226_AD | 460227,125 | 420,855 | 5,78 | 2,98 | -2,81 | 0,170  | 5,71% | 3,74%  |
|    | I227_BD | 460228,302 | 420,927 |      |      |       |        |       |        |
|    | I228_EX | 460231,278 | 421,097 |      |      |       |        |       |        |
|    | I229_BE | 460234,087 | 421,202 |      |      |       |        |       |        |
|    | I230_AE | 460235,978 | 421,197 |      |      |       |        |       |        |
| 47 | I231_AD | 460224,021 | 420,825 | 5,39 | 2,87 | -2,52 | 0,138  | 4,81% | 2,58%  |
|    | I232_BD | 460225,025 | 420,900 |      |      |       |        |       |        |
|    | I233_EX | 460227,896 | 421,038 |      |      |       |        |       |        |
|    | I234_BE | 460230,413 | 421,103 |      |      |       |        |       |        |
|    | I235_AE | 460232,088 | 421,102 |      |      |       |        |       |        |
| 48 | I236_AD | 460220,740 | 420,773 | 5,16 | 2,83 | -2,33 | 0,092  | 3,25% | 0,64%  |
|    | I237_BD | 460221,770 | 420,885 |      |      |       |        |       |        |
|    | I238_EX | 460224,605 | 420,977 |      |      |       |        |       |        |
|    | I239_BE | 460226,931 | 420,992 |      |      |       |        |       |        |
|    | I240_AE | 460228,560 | 420,912 |      |      |       |        |       |        |
| 49 | I241_AD | 460217,322 | 420,752 | 4,87 | 2,65 | -2,22 | 0,060  | 2,27% | -1,98% |
|    | I242_BD | 460218,463 | 420,850 |      |      |       |        |       |        |
|    | I243_EX | 460221,110 | 420,910 |      |      |       |        |       |        |
|    | I244_BE | 460223,334 | 420,866 |      |      |       |        |       |        |
|    | I245_AE | 460224,893 | 420,849 |      |      |       |        |       |        |
| 50 | I246_AD | 460213,966 | 420,698 | 4,84 | 2,61 | -2,23 | 0,050  | 1,92% | -2,65% |
|    | I247_BD | 460214,924 | 420,786 |      |      |       |        |       |        |
|    | I248_EX | 460217,534 | 420,836 |      |      |       |        |       |        |
|    | I249_BE | 460219,761 | 420,777 |      |      |       |        |       |        |
|    | I250_AE | 460221,035 | 420,677 |      |      |       |        |       |        |

Fonte: O autor, 2023.

Ao comparar as taxas de superelevação determinadas pelo método do MDS com o nivelamento geométrico para as mesmas seções transversais, torna-se possível observar que a mesma situação em ambos os métodos ocorre. As bordas interna e externa aumentam gradativamente a cada seção, no entanto, não existe uma taxa de superelevação máxima a ser mantida no desenvolvimento da curva.

Novamente, a maior taxa de superelevação é atingida na seção 42 com valor de 8,72%, sendo uma diferença de 0,28% a mais do que em relação ao método de nivelamento geométrico.

O Apêndice F apresenta os desenhos das seções transversais em planta com a inclinação da superelevação para melhor compreensão e visualização da mesma.

### 4.2.3 Estudo comparativo entre o método proposto e o levantamento topográfico para determinação da superelevação

Em seguida aos cálculos de determinação da superelevação por ambos os métodos, desenvolveu-se uma análise estatística para apresentar a confiabilidade que o produto MDS possui na determinação da superelevação para a análises de trechos de curvas horizontais em rodovias.

As métricas estatísticas utilizadas para apresentar a qualidade da metodologia proposta nessa pesquisa, referem-se ao erro absoluto e relativo, a média e o desvio-padrão das discrepâncias, além do RMSE.

Para cada estação, geraram-se duas tabelas com os respectivos indicadores, de maneira que fosse possível realizar comparações entre as bordas em cada estação separadamente. No Apêndice G, encontra-se a tabela completa com o desenvolvimento dos cálculos para cada estação com as suas respectivas seções transversais.

A Tabela 19 apresenta os indicadores quantitativos para as superelevações na estação E<sub>0</sub>, na borda interna (Tabela 19-a) e externa (Tabela 19-b), para os quais são apresentados o máximo e mínimo erro absoluto e relativo, média, o desvio-padrão, e o RMSE.

Tabela 19 - Indicadores de qualidade da superelevação para as bordas interna e externa da estação E<sub>0</sub>.

| Análise estatística da superelevação na borda interna da estação E <sub>0</sub> |                        |                        |                        |                        |                             |                                      |          |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|----------|
| Estação                                                                         | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio- Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| <b>E<sub>0</sub></b>                                                            | 0,000                  | 0,011                  | 0,38%                  | 15,58%                 | -0,002                      | 0,006                                | 0,002    |

(a)

| Análise estatística da superelevação na borda externa da estação E <sub>0</sub> |                        |                        |                        |                        |                             |                                      |          |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|----------|
| Estação                                                                         | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio- Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| <b>E<sub>0</sub></b>                                                            | 0,006                  | 0,022                  | 25,42%                 | 182,73%                | 0,006                       | 0,012                                | 0,005    |

(b)

Fonte: O autor, 2023.

Ao observar os indicadores para ambas as bordas, nota-se que o maior valor de erro absoluto e relativo acontece na borda externa da curva, cerca de 0,022% e 182,73%. Além disso, o RMSE de ambas as bordas admite valores que são menores do que 0,1%, indicando, assim, uma boa precisão.

A Tabela 20 apresenta os indicadores da estação E<sub>1</sub>, em que novamente é possível observar que a borda interna é mais precisa que a externa. No entanto, o RMSE e o erro absoluto máximo em ambas as bordas possuem valores abaixo de 0,01%.

Tabela 20 - Indicadores de qualidade da superelevação para os bordos interno e externo da estação E<sub>1</sub>.

| Análise estatística da superelevação na borda interna da estação E1 |                        |                        |                        |                        |                             |                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|
| Estação                                                             | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio-Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| <b>E1</b>                                                           | 0,000                  | 0,004                  | 1,41%                  | 5,52%                  | 0,001                       | 0,002                               | 0,001    |

(a)

| Análise estatística da superelevação na borda externa da estação E1 |                        |                        |                        |                        |                             |                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|
| Estação                                                             | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio-Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| <b>E1</b>                                                           | 0,000                  | 0,007                  | 0,05%                  | 60,98%                 | 0,004                       | 0,003                               | 0,002    |

(b)

Fonte: O autor, 2023.

Para a estação E<sub>2</sub>, o erro cometido no nivelamento geométrico ficou acima da tolerância estabelecida pela NBR. Em decorrência disso, observa-se que o erro absoluto máximo em ambas as bordas atingiu uma discrepância maior do que 0,01%. Porém, o RMSE da estação também ficou abaixo de 1% indicando uma boa precisão, segundo apresenta a Tabela 21.

Tabela 21 - Indicadores de qualidade da superelevação para os bordos interno e externo da estação E2.

| Análise estatística da superelevação na borda interna da estação E2 |                        |                        |                        |                        |                             |                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|
| Estação                                                             | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio-Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| <b>E2</b>                                                           | 0,000                  | 0,024                  | 0,51%                  | 58,12%                 | -0,006                      | 0,008                               | 0,009    |

(a)

| Análise estatística da superelevação na borda externa da estação E2 |                        |                        |                        |                        |                             |                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|
| Estação                                                             | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio-Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| <b>E2</b>                                                           | 0,0003                 | 0,058                  | 1,37%                  | 307,98%                | -0,0042                     | 0,0224                              | 0,008    |

(b)

Fonte: O autor, 2023.

As estações E<sub>3</sub>, E<sub>4</sub> e E<sub>5</sub> encontram-se ao longo do desenvolvimento da curva horizontal. Desse modo, os valores de superelevação determinados por essas estações serão utilizados para calcular o raio mínimo da curva. Sendo assim, as métricas de qualidade devem apontar uma boa precisão para validação da técnica de determinação da superelevação pelo produto fotogramétrico MDS.

As Tabelas 22, 23 e 24 apresentam os indicadores de qualidade para as estações E<sub>3</sub>, E<sub>4</sub> e E<sub>5</sub> respectivamente.

Tabela 22 - Indicadores de qualidade da superelevação para as bordas interna e externa da estação E3.

| Análise estatística da superelevação na borda interna da estação E3 |                        |                        |                        |                        |                             |                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|
| Estação                                                             | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio-Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| <b>E3</b>                                                           | 0,000                  | 0,029                  | 1,09%                  | 66,36%                 | -0,005                      | 0,009                               | 0,009    |

(a)

| Análise estatística da superelevação na borda externa da estação E3 |                        |                        |                        |                        |                             |                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|
| Estação                                                             | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio-Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| <b>E3</b>                                                           | 0,000                  | 0,054                  | 0,54%                  | 359,85%                | -0,006                      | 0,019                               | 0,018    |

(b)

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 23 - Indicadores de qualidade da superelevação para as bordas interna e externa da estação E4.

| Análise estatística da superelevação na borda interna da estação E4 |                        |                        |                        |                        |                             |                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|
| Estação                                                             | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio-Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| E4                                                                  | 0,000                  | 0,005                  | 0,25%                  | 7,05%                  | -0,000                      | 0,002                               | 0,002    |

(a)

| Análise estatística da superelevação na borda externa da estação E4 |                        |                        |                        |                        |                             |                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|
| Estação                                                             | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio-Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| E4                                                                  | 0,0000                 | 0,006                  | 0,05%                  | 10,96%                 | 0,002                       | 0,002                               | 0,003    |

(b)

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 24 - Indicadores de qualidade da superelevação para as bordas interna e externa da estação E5.

| Análise estatística da superelevação na borda interna da estação E5 |                        |                        |                        |                        |                             |                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|
| Estação                                                             | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio-Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| E5                                                                  | 0,000                  | 0,006                  | 0,00%                  | 21,06%                 | -0,002                      | 0,003                               | 0,003    |

(a)

| Análise estatística da superelevação na borda externa da estação E5 |                        |                        |                        |                        |                             |                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|
| Estação                                                             | Erro absoluto mín. (%) | Erro absoluto máx. (%) | Erro relativo mín. (%) | Erro relativo máx. (%) | Média das discrepâncias (%) | Desvio-Padrão das discrepâncias (%) | RMSE (%) |
| E5                                                                  | 0,002                  | 0,012                  | 3,06%                  | 63,40%                 | 0,000                       | 0,005                               | 0,005    |

(b)

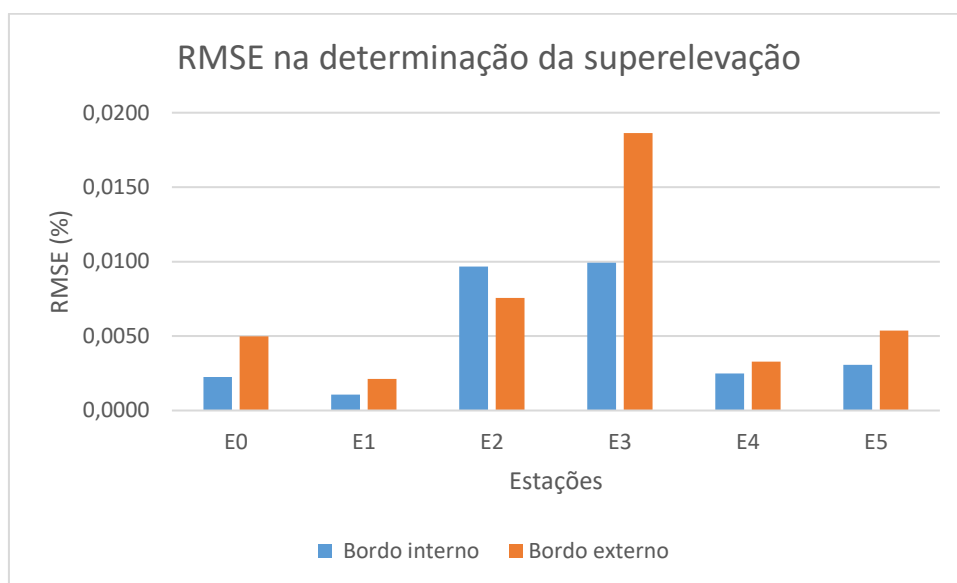
Fonte: O autor, 2023.

Ao analisar as três últimas estações, nota-se que a estação E<sub>3</sub> para a borda externa apresentou os piores resultados na avaliação, sendo a única borda tanto externa quanto interna, a ter um valor de RMSE superior a 0,1% (RMSE: 0,018). Para

as estações E<sub>4</sub> e E<sub>5</sub>, os valores de RMSE ficaram menores que 0,01%, mantendo o padrão das demais estações.

A Figura 28 apresenta o RMSE na determinação da superelevação por meio do produto MDS, para a borda interna e externa, na qual se observa, que para a borda interna, a estação E<sub>2</sub> foi a menos precisa, no entanto, para todas as estações o RMSE ficou abaixo de 0,01%. A borda externa para a maioria das estações foi a menos precisa com valor máximo na estação E<sub>3</sub> (aproximadamente 0,02%).

Figura 28 – Valor do RMSE na determinação da superelevação para cada uma das estações.



Fonte: O autor, 2023.

Na seção seguinte, será feita a determinação do raio atual da curva em estudo, bem como o cálculo de raio mínimo para a superelevação estabelecida por ambos os métodos.

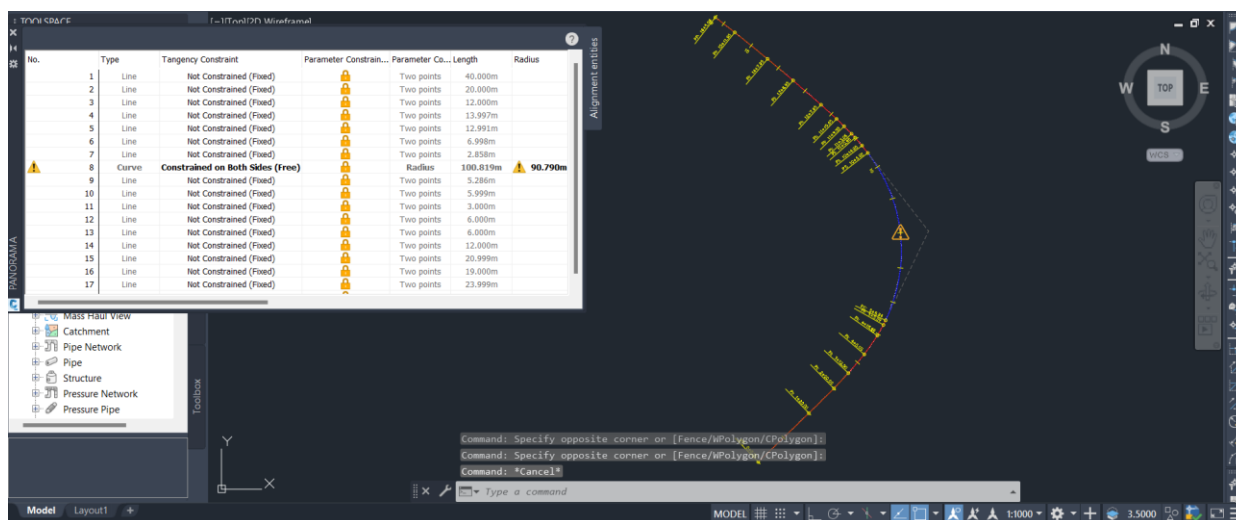
#### 4.3 Determinação do raio atual e mínimo da curva horizontal

Para realizar a determinação do raio atual da via, fez-se a aplicação da metodologia descrita na seção 3.6.

Os resultados observados para a curva horizontal 1 é a ausência da implantação da curva de transição, pois como o raio atual da curva o comprimento mínimo exigido pela norma (Tabela 4) não consegue ser implantado no traçado obtido por meio do 'As built' fotogramétrico.

Além disso, um alerta de inconsistência geométrica é apontado pelo *software* indicando que para os parâmetros referentes à classe da via inseridos na configuração do *layout*, a curva não atende as exigências mínimas, conforme apresenta a Figura 29.

Figura 29 - Traçado do eixo rodoviário reconstituído por meio de produtos fotogramétricos.



Fonte: O autor, 2023.

O alerta demonstrado é referente ao raio de curvatura que está abaixo do raio mínimo estabelecido para uma superelevação de 8% seguindo os manuais do DER/SP e da AASHTO.

O valor do raio determinado pela reconstrução do alinhamento foi de 90,79 metros, sendo que o raio mínimo para classe I-B é de 229 metros, em outros termos, o raio atual está abaixo cerca de 138,21 m do raio mínimo para a classe da via.

Dessa forma, a condição geométrica da via apresenta uma inconsistência em seu traçado, o que está influenciando nas causas de acidentes no trecho, pois acaba induzindo o motorista ao erro.

Ademais, ao analisar o raio obtido para outras velocidades de projeto e com as taxas de superelevação máximas adotadas pelo DER/SP, em nenhuma delas o raio atende à exigência do raio mínimo, conforme apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Valores de raio mínimo para diferentes velocidades de projetos e taxa de superelevação.

|                              |    | Valores de Raio Mínimo (m) |    |    |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------|----|----------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Velocidade de projeto (km/h) |    | 30                         | 40 | 50 | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 | 110 | 120 |
| Superelevação máxima (%)     | 4  | 22                         | 47 | 86 | 135 | 203 | 280 | 375 | 492 | -   | -   |
|                              | 6  | 21                         | 43 | 79 | 123 | 184 | 252 | 336 | 437 | 560 | 756 |
|                              | 8  | 20                         | 41 | 73 | 113 | 168 | 229 | 304 | 394 | 501 | 667 |
|                              | 10 | 19                         | 38 | 68 | 105 | 154 | 210 | 277 | 358 | 454 | 597 |
|                              | 12 | 18                         | 36 | 64 | 98  | 143 | 194 | 255 | 328 | 414 | 540 |

Fonte: Adaptado do manual 'Notas Técnicas de Projeto Geométrico', DER/SP (2006).

Outro fator relevante para condição de inconsistência desse trecho é a superelevação determinada por ambos os métodos nas subseções 4.2.1 e 4.2.2. O

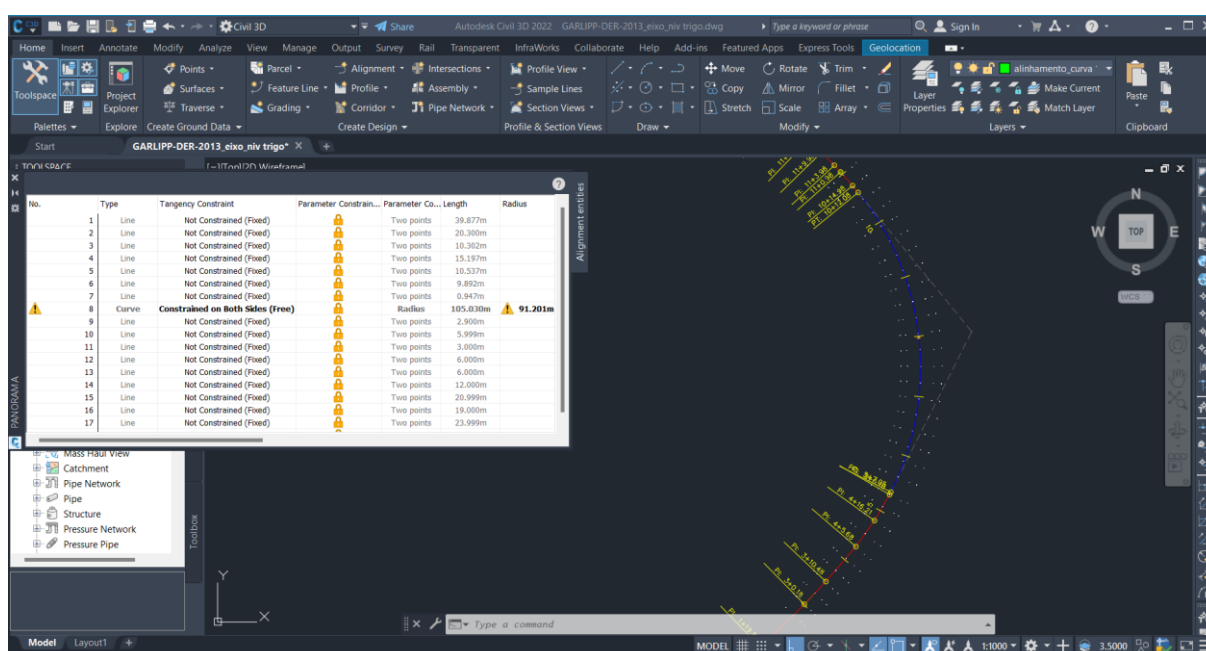
que foi possível observar é que para ambos os métodos não foi admitida uma taxa de superelevação máxima que fosse fixa durante todo o desenvolvimento da curva. Essa condição contrapõe-se com o que é estabelecido em DER/SP, (2006), que estabelece que a transição da superelevação entre a tangente e a curva deve ser feita ao longo do comprimento de transição, de modo que atinja a superelevação máxima no início da curva horizontal e se mantém durante todo o desenvolvimento.

Outro aspecto importante observado, foi a não inserção da curva de transição para o valor de raio reconstruído, indicando assim, a ausência dessa no trecho ou que essa também possui inconsistência em relação ao seu comprimento mínimo e máximo.

Para avaliar o raio atual, esse será comparado com o raio de referência determinado a partir das coordenadas irradiadas. Contudo, o método para determinação do raio de referência segue o mesmo método do atual, ou seja, uma aproximação do traçado da via, uma vez que não foi possível ter acesso aos projetos executivo e de implantação da via para estabelecer o raio verdadeiro.

A Figura 30 apresenta o resultado gerado para raio de referência, onde observa-se que para a reconstrução feita esse atingiu um raio de 91,201 m. Dessa forma, o raio reconstruído a partir da extração do ortomosaico e MDT ficou abaixo 41,1 cm. No entanto, ambos os raios ficam abaixo do raio mínimo estabelecido para classe de projeto indicando que há uma inconsistência geométrica na curva analisada.

Figura 30 - Raio de referência determinado a partir das coordenadas irradiadas.



Fonte: O autor, 2023.

Como os parâmetros de superelevação e raio estão diretamente relacionados por meio da Eq. (14), é possível determinar qual seria a superelevação a ser implantada na via para atender o raio de 90,79m. A Eq. (21) apresenta os cálculos desenvolvidos para as velocidades de 80 e 60km/h, e com fator de atrito lateral máximo adotado de 0,14 e 0,17 respectivamente, conforme a Figura 2.

$$\begin{aligned} e &= \frac{80^2}{127 \cdot 90,79} - 0,14 = 41,50\% \\ e &= \frac{60^2}{127 \cdot 90,79} - 0,17 = 14,22\% \end{aligned} \quad (21)$$

Nota-se que para o raio atual da via determinado a partir dos produtos fotogramétricos, o valor de superelevação a ser implantado atinge valores que estão fora das taxas máxima de superelevação no estado.

Diante disso, é possível concluir que mesmo para as superelevações determinadas nas Subseções 4.2.1 e 4.2.2, não é possível fazer uma readequação no trecho sem mudar o raio da curva. Uma vez que esse raio se encontra abaixo do raio mínimo de norma e a taxa de superelevação para satisfazer o raio atual foge dos valores máximos admitidos.

Ainda é possível ressaltar outras inconsistências no trecho, como a implantação conflitante da superelevação em relação a norma, e a ausência ou inconsistência na curva de transição que atenuaria os esforços laterais sobre os usuários e impedindo a invasão a pista contrária.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta, constatou-se o potencial que os produtos de fotogrametria obtido por VARP possuem para na determinação de parâmetros de curva horizontal como a superelevação e raio de curvatura. Conforme esperado, os parâmetros determinados demonstram o potencial positivo para serem empregados na avaliação de inconsistência geométrica em curva horizontais.

Dessa forma, os produtos fotogramétricos gerados podem vir a substituir as técnicas clássicas em fase de fiscalização da implantação da via e projetos de manutenção para a extração de informações sobre o terreno com maior agilidade e redução de custo.

O '*As Built*' obtidos por meio dos produtos fotogramétricos atenderam o PEC para escala de 1:500 na classe A. Sendo assim, o uso desses também atendem às especificações de precisões nacional e internacional para utilização em projeto geométrico de rodovias.

Em termos de exatidão geométrica, a acurácia na superelevação determinada pelo MDS teve RMSE:  $< 0,01\%$  para a borda interna, e RMSE:  $< 0,02\%$  para a borda externa. Enquanto a discrepância entre raio obtido por meio do uso integrado de produtos de fotogrametria e o raio de referência foi menor do que meio metro.

O trecho em estudo apresenta inconsistências geométricas na superelevação e raio de curvatura, sendo necessário a readequação de acordo com as recomendações gerais do manual DER/SP, (2005) descritas na seção 3.1.

Além disso, a falta da curva de transição contribui para a tendência que os veículos têm de invadir as faixas adjacentes, colocando o usuário em situação de insegurança.

Sabe-se que o projeto da via é da década de 70, e projetos geométricos desenvolvidos nessa época faziam uso de estradas rurais preexistentes para desenvolvimento de rodovia. Ao longo do desenvolvimento dessa dissertação, tentativas de comunicação com o DER/SP foram feitas para ter acesso ao projeto original da via e a classe de projeto para a qual ela foi projetada, porém sem sucesso.

Ao analisar os fatores que podem ter levado a via a uma condição de insegurança, alterações no volume ou na característica do tráfego estão diretamente relacionadas. Uma vez que, após décadas do desenvolvimento da via, a classificação técnica pode ter se alterado e consequentemente os parâmetros intrínsecos a ela também.

Dessa forma, a alteração no volume e/ou na característica do tráfego pode ter levado a via a uma obsolescência, sendo necessário um projeto de manutenção para garantir a segurança. Outra hipótese para as inconsistências apontadas no estudo são possíveis erros na implantação da via.

Em virtude das considerações abordadas, os produtos de fotogrametria auxiliam na extração de informações sobre o terreno de forma rápida e sem interferir no tráfego. Além de que, essas informações podem ser utilizadas em análises temporais de áreas adjacentes à via, avaliação do revestimento asfáltico, análises de parâmetros geométricos, projetos orçamentários, entre outros.

As recomendações para trabalhos futuros é estudar explorar a utilização dos produtos gerados para o desenvolvimento de projeto de readequação da curva com base na segurança viária, recriando a via em ambiente virtual para análises, utilizando o conceito de *Digital Twins*.

Outro aspecto que também pode ser estudo é a integração de dados fotogramétricos e LiDAR para aprimorar a acurácia altimétrica, e assim, fazer uso desses, em projetos como: projeto de drenagem, pavimentação, terraplanagem, projeto de obras de arte, entre outros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÜERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. **Journal of Surveying Engineering**, v. 143, n. 2, p. 1–10, 2017.
- ASPRS. Guidelines for procurement of professional aerial imagery, photogrammetry, lidar and related remote sensor-based geospatial mapping services. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 75, n. 12, p. 1346–1365, 2009.
- ASPRS. ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 81, n. 3, p. 1–26, 2014.
- BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro/RJ: Editora da UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2007.
- CICCO, M. **Análise de área de invasão de faixa de domínio de ferrovias utilizando tecnologia RPAS**. Universidade Federal Do Paraná, 2017.
- CNT, C. N. DO T. **Pesquisa CNT de Rodovias - 2021**. SEST SENAT, 2021.
- DA SILVA, J.; DAL POZ, A. Fotogrametria I. In: **Parte 1**. 1. ed. Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista - “Júlio de Mesquita Filho”, 2004. p. 17.
- DAER, D. A. DE E. DE R. **Instruções de serviço para projetos finais de engenharia**. first ed. Rio Grande do Sul: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2022.
- DECEA. **Tráfego aéreo**. [s.l.] Ministério da Defesa Comando da Aeronáutica, 2020.
- DER/SP, D. DE E. DE R. **IP-DE-F00/001**. São Paulo: Secretaria dos Transportes, 2005.
- DER/SP, D. DE E. DE R. **Notas técnicas de projeto geométrico**. São Paulo: Secretária dos Transportes, 2006a.
- DER/SP, D. DE E. DE R. **LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAFICO PARA PROJETO DE RODOVIAS**. São Paulo: Secretaria dos Transportes, 2006b.
- DNER. **Manual\_Projeto**. [s.l.: s.n.].
- DNIT, D. N. DE I. E T. **ISF - 201: Levantamento Aerofotogramétrico e perfilamento a laser para projetos básicos de ferrovias**. Rio de Janeiro/RJ: [s.n.].
- DNIT, D. N. DE I. E T. **ISF-202: LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO E PERFILAMENTO A LASER PARA PROJETOS EXECUTIVOS DE FERROVIAS**. Rio de Janeiro/RJ: [s.n.].
- DOT, D. OF T. Specifications for Digital Photogrammetric Services. In: [s.l.: s.n.]. p. 1–3.
- FELIPE-GARCÍA, B.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D.; LERMA, J. L. Analysis of the ground sample distance on large photogrammetric surveys. **Applied Geomatics**, v. 4, n. 4, p. 231–244, 2012.
- FERRER-GONZÁLEZ, E. et al. UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. **Remote Sensing**, v. 12, n. 15, 1 ago. 2020.
- GALO, M.; CAMARGO, P. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. **Congresso Brasileiro De Cadastro ...**, n. 1, p. 41–48, 1994.
- GAMA, L.; CARNEIRO, A.; SEIXAS, A. **NORMATIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DO POSICIONAMENTO GPS EM**. p. 24–27, 2007.
- GEOBC, M. OF F. L. AND N. R. O. **Specifications for the Production of**

**Digital Elevation Models for the Province of British Columbia Ministry of Forest, Lands and May.** [s.l: s.n.].

GRAHAM, R.; KOH, A. **Digital Aerial Survey: Theory and Practice.** Scotland, UK: Whittles Publishing, 2003. v. 37

GUIMARÃES, G. H. **REGULARIZAÇÃO DE UMA AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA DE PEQUENO PORTE PARA FINS DE PESQUISA CIENTÍFICA: CUSTOS, FACILIDADES E ENTRAVES.** Dissertação de Mestrado Univerisade de Araraquara - UNIARA, 2017.

GUPTA, A. et al. Advances of UAVs toward Future Transportation: The State-of-the-Art, Challenges, and Opportunities. **Future Transportation**, v. 1, n. 2, p. 326–350, 2021.

IBGE. **Procedimentos de inspeção de qualidade de bases cartográficas contínuas.** p. 188, 2020.

IGLESIAS, L. et al. Using small unmanned aerial vehicle in 3D modeling of highways with tree-covered roadsides to estimate sight distance. **Remote Sensing**, v. 11, n. 22, 2019.

IGLHAUT, J. et al. Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. **Current Forestry Reports**, v. 5, n. 3, p. 155–168, 2019.

KNYAZ, V. A.; CHIBUNICHEV, A. G. Photogrammetric techniques for road surface analysis. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 41, n. July, p. 515–520, 2016.

KRAUS, K. **Photogrammetry - Geometry from Images and Laser Scans.** second edi ed. Berlin · New York: Walter de Gruyter, 2004. v. 2

LEE, S. H.; AO, I. Apostila da Disciplina ECV 5115: Professor: Shu Han Lee Semestre: 2000/1. 2000.

LIMA, S. **AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO POSICIONAMENTO E FOTOGRAMETRIA E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.** Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2018a.

MINISTERIO DEL FOMENTO. Nota De Servicio 2/2010 De La Subdirección De Proyectos Sobre La Cartografía a Incluir En Los Proyectos De La Dirección General De Carreteras. v. 4, n. 182, p. 61, 2010.

MORI, A. M. **O Uso de Sistema Inercial para Apoiar a Navegação Autônoma.** Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

NEUMANN, K. J. Trends for Digital Aerial Mapping Cameras. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVII, p. 551–554, 2008.

NYSDOT. **Photogrammetric Stereocompilation.** 2005. ed. [s.l.] New York Department of Transportation, 2005.

PARENTE, D. FELIX, N. PICANÇO, A. Revista ALCONPAT. **Alconpat**, v. 2, n. Maio-Agosto, p. 186–199, 2017.

SANZ-ABLANEDO, E. et al. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, 2018.

SCHAFER, A. G.; VIEIRA, H.; LOCH, R. E. N. Utilização do sensoriamento remoto em projetos rodoviários no Brasil: um histórico. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 9, p. 45–54, 2006.

SECRETARÍA GENERAL DE INFRAESTRUTURAS, G. DE E. **Recomendaciones para la redacción de los proyectos de construcción de**

**carreteras.** [s.l: s.n.].

SENSFLY. User Manual eBee and eBee Ag. n. September, 2014.

SILVA, G. G. DA et al. Veículos Aéreos não Tripulados com Visão Computacional na Agricultura: Aplicações, Desafios e Perspectivas. **Anais do Encontro Científico de Administração, Economia e Contabilidade**, v. 1, n. 1, 2014.

SOUZA, C. B. DE. Limites e possibilidades de aplicações de modelos digitais de elevação gerados a partir de produtos obtidos por sensores remotos nos cálculos de volumes de terraplenagem. **Revista do Tribunal de Contas da União**, p. 132–165, 2019.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. Presidente Prudente. Universidade Estadual Paulista - “Júlio de Mesquita Filho”, 2009.

TOTH, C.; JÓŽKÓW, G. Remote sensing platforms and sensors: A survey. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 22–36, 2016.

VEIGA, L. A. K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L. **Fundamentos de Topografia**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012.

VICENTINI, D. et al. **PROJETO GEOMÉTRICO DE RODOVIAS**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2019.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of Photogrammetry with Applications in Geographic Information Systems**. fourth ed. [s.l: s.n.].

ZULKIPLI, M. A.; TAHAR, K. N. Multirotor UAV-Based Photogrammetric Mapping for Road Design. **International Journal of Optics**, v. 2018, 2018.

## APÊNDICE A – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO DOS VOOS FOTOGRAMÉTICO GERADO PELO SOFTWARE PIX4D



Generated with Pix4Dmapper Pro version 3.1.22

**Important:** Click on the different icons for:

-  Help to analyze the results in the Quality Report
-  Additional information about the sections

 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

### Summary

|                                        |                                                                                       |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Project                                | processamento_voos_analise                                                            |
| Processed                              | 2021-10-16 14:27:52                                                                   |
| Camera Model Name(s)                   | CanonPowerShotS110_5.2_4000x3000 (RGB)(1), CanonPowerShotS110_5.2_4000x3000 (RGB) (2) |
| Average Ground Sampling Distance (GSD) | 2.91 cm / 1.14 in                                                                     |
| Area Covered                           | 0.8708 km <sup>2</sup> / 87.0839 ha / 0.3364 sq. mi. / 215.3 acres                    |

### Quality Check

|                                                                                                                |                                                                                   |                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  <b>Images</b>              | median of 31691 keypoints per image                                               |  |
|  <b>Dataset</b>             | 446 out of 462 images calibrated (96%), all images enabled                        |  |
|  <b>Camera Optimization</b> | 1.2% relative difference between initial and optimized internal camera parameters |  |
|  <b>Matching</b>            | median of 5640.65 matches per calibrated image                                    |  |
|  <b>Georeferencing</b>      | yes, 35 GCPs (35 3D), mean RMS error = 0.014 m                                    |  |

### Preview

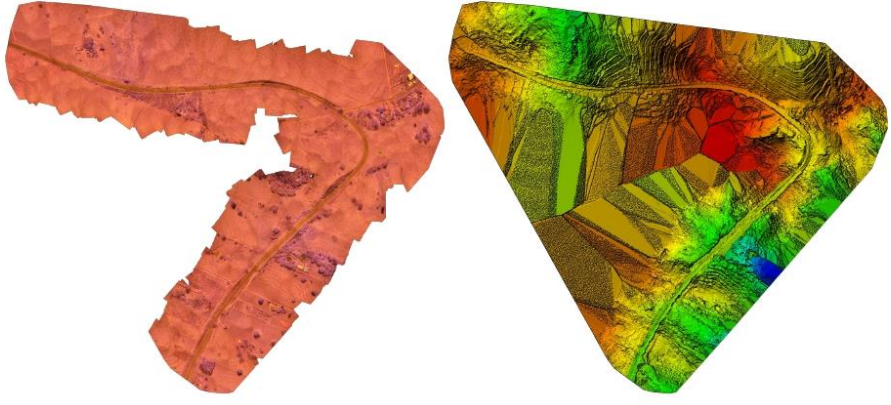


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

### Calibration Details

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| Number of Calibrated Images | 446 out of 462 |
| Number of Geolocated Images | 462 out of 462 |

### ? Initial Image Positions

1

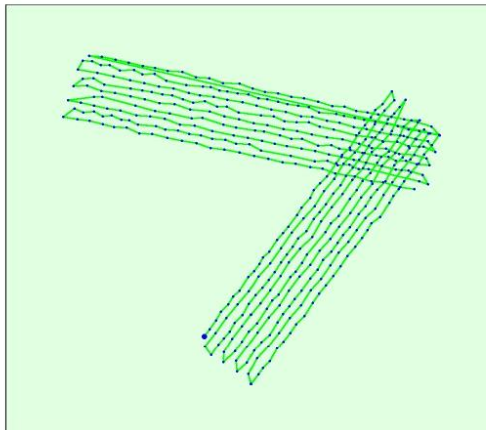
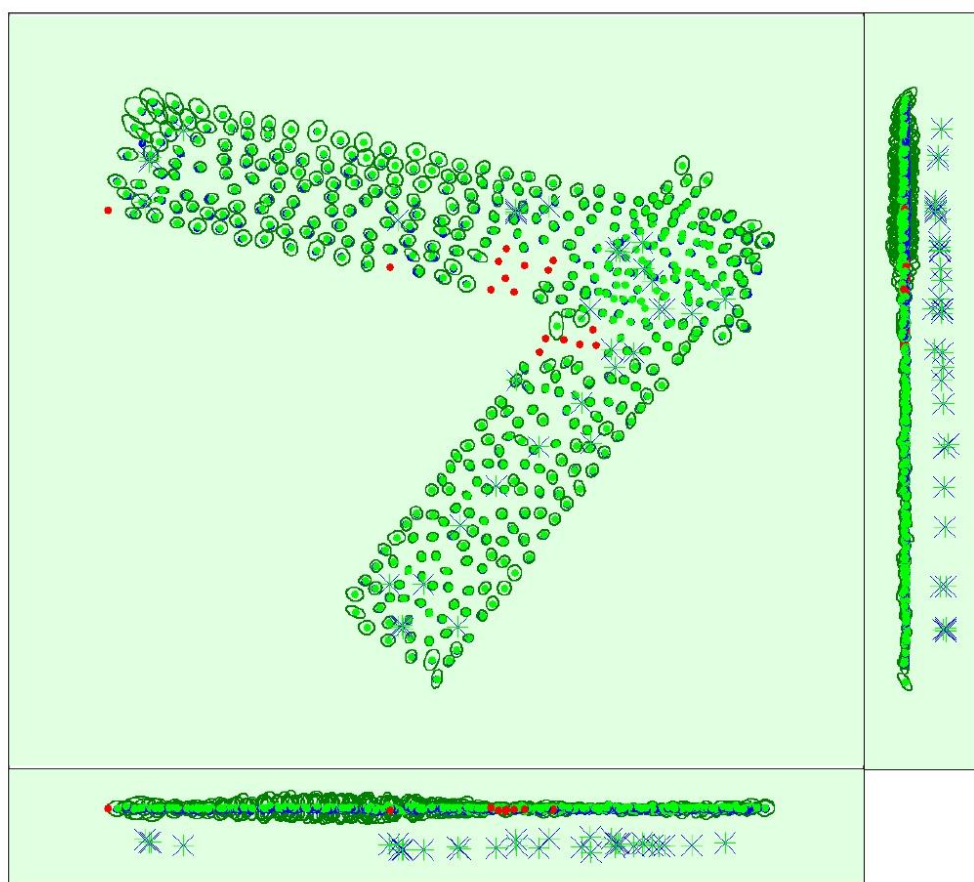


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

### ? Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

1



Uncertainty ellipses 100x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Red dots indicate disabled or uncalibrated images. Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

### ? Absolute camera position and orientation uncertainties

|       | X [m] | Y [m] | Z [m] | Omega [degree] | Phi [degree] | Kappa [degree] |
|-------|-------|-------|-------|----------------|--------------|----------------|
| Mean  | 0.130 | 0.127 | 0.132 | 0.083          | 0.084        | 0.034          |
| Sigma | 0.042 | 0.042 | 0.083 | 0.028          | 0.029        | 0.016          |

### ? Overlap

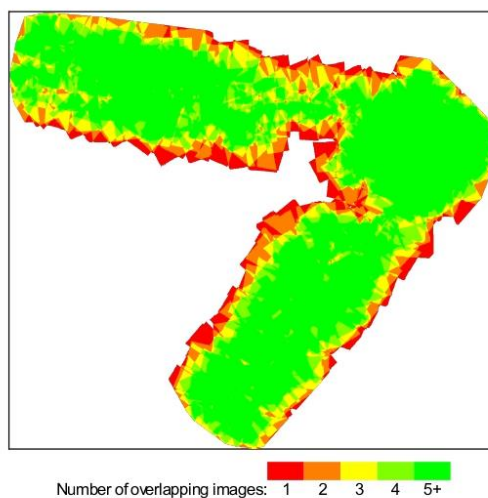


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

## Bundle Block Adjustment Details

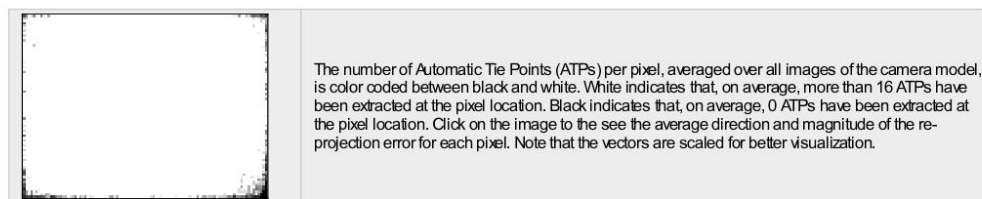
|                                                                |         |
|----------------------------------------------------------------|---------|
| Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment | 2845298 |
| Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment                | 1231860 |
| Mean Reprojection Error [pixels]                               | 0.168   |

### ? Internal Camera Parameters

CanonPowerShotS110\_5.2\_4000x3000 (RGB)(1). Sensor Dimensions: 7.440 [mm] x 5.580 [mm]

EXIF ID: CanonPowerShotS110\_5.2\_4000x3000

|                       | Focal Length                   | Principal Point x              | Principal Point y              | R1     | R2     | R3    | T1     | T2     |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Initial Values        | 2860.478 [pixel]<br>5.320 [mm] | 2047.508 [pixel]<br>3.808 [mm] | 1494.393 [pixel]<br>2.780 [mm] | -0.040 | -0.012 | 0.007 | 0.000  | 0.004  |
| Optimized Values      | 2891.480 [pixel]<br>5.378 [mm] | 1940.032 [pixel]<br>3.608 [mm] | 1400.794 [pixel]<br>2.605 [mm] | -0.029 | -0.018 | 0.011 | -0.008 | -0.004 |
| Uncertainties (Sigma) | 1.690 [pixel]<br>0.003 [mm]    | 0.768 [pixel]<br>0.001 [mm]    | 0.739 [pixel]<br>0.001 [mm]    | 0.001  | 0.004  | 0.003 | 0.000  | 0.000  |

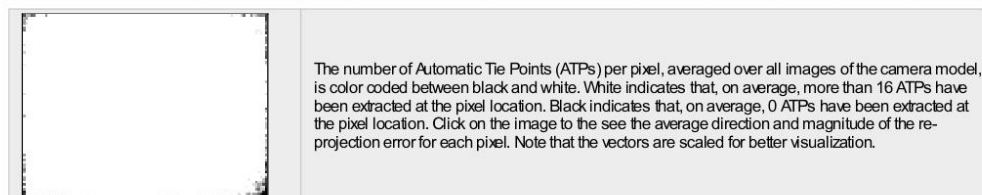


### Internal Camera Parameters

#### CanonPowerShotS110\_5.2\_4000x3000 (RGB)(2). Sensor Dimensions: 7.440 [mm] x 5.580 [mm]

EXIF ID: CanonPowerShotS110\_5.2\_4000x3000

|                       | Focal Length                   | Principal Point x              | Principal Point y              | R1     | R2     | R3    | T1     | T2     |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Initial Values        | 2860.478 [pixel]<br>5.320 [mm] | 2047.508 [pixel]<br>3.808 [mm] | 1494.393 [pixel]<br>2.780 [mm] | -0.040 | -0.012 | 0.007 | 0.000  | 0.004  |
| Optimized Values      | 2898.274 [pixel]<br>5.391 [mm] | 1940.805 [pixel]<br>3.610 [mm] | 1399.154 [pixel]<br>2.602 [mm] | -0.029 | -0.019 | 0.012 | -0.008 | -0.004 |
| Uncertainties (Sigma) | 1.756 [pixel]<br>0.003 [mm]    | 0.758 [pixel]<br>0.001 [mm]    | 0.742 [pixel]<br>0.001 [mm]    | 0.001  | 0.004  | 0.003 | 0.000  | 0.000  |



### 2D Keypoints Table

|        | Number of 2D Keypoints per Image | Number of Matched 2D Keypoints per Image |
|--------|----------------------------------|------------------------------------------|
| Median | 31691                            | 5641                                     |
| Mn     | 20104                            | 223                                      |
| Max    | 68937                            | 23794                                    |
| Mean   | 33161                            | 6380                                     |

#### 2D Keypoints Table for Camera CanonPowerShotS110\_5.2\_4000x3000 (RGB)(1)

|        | Number of 2D Keypoints per Image | Number of Matched 2D Keypoints per Image |
|--------|----------------------------------|------------------------------------------|
| Median | 29544                            | 5288                                     |
| Mn     | 20273                            | 534                                      |
| Max    | 56289                            | 22713                                    |
| Mean   | 30655                            | 5559                                     |

#### 2D Keypoints Table for Camera CanonPowerShotS110\_5.2\_4000x3000 (RGB)(2)

|        | Number of 2D Keypoints per Image | Number of Matched 2D Keypoints per Image |
|--------|----------------------------------|------------------------------------------|
| Median | 33854                            | 6430                                     |
| Mn     | 20104                            | 223                                      |
| Max    | 68937                            | 23794                                    |
| Mean   | 35431                            | 7123                                     |

#### Median / 75% / Maximal Number of Matches Between Camera Models

|                                           | CanonPowerSh...(RGB)(1) | CanonPowerSh...(RGB)(2) |
|-------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| CanonPowerShotS110_5.2_4000x3000 (RGB)(1) | 86 / 423 / 5717         | 99 / 480 / 9857         |
| CanonPowerShotS110_5.2_4000x3000 (RGB)(2) |                         | 101 / 486 / 15427       |

### 3D Points from 2D Keypoint Matches

|              | Number of 3D Points Observed |
|--------------|------------------------------|
| In 2 Images  | 983802                       |
| In 3 Images  | 169388                       |
| In 4 Images  | 47964                        |
| In 5 Images  | 17403                        |
| In 6 Images  | 7314                         |
| In 7 Images  | 3222                         |
| In 8 Images  | 1545                         |
| In 9 Images  | 698                          |
| In 10 Images | 298                          |
| In 11 Images | 134                          |
| In 12 Images | 73                           |
| In 13 Images | 17                           |
| In 14 Images | 2                            |

### 2D Keypoint Matches

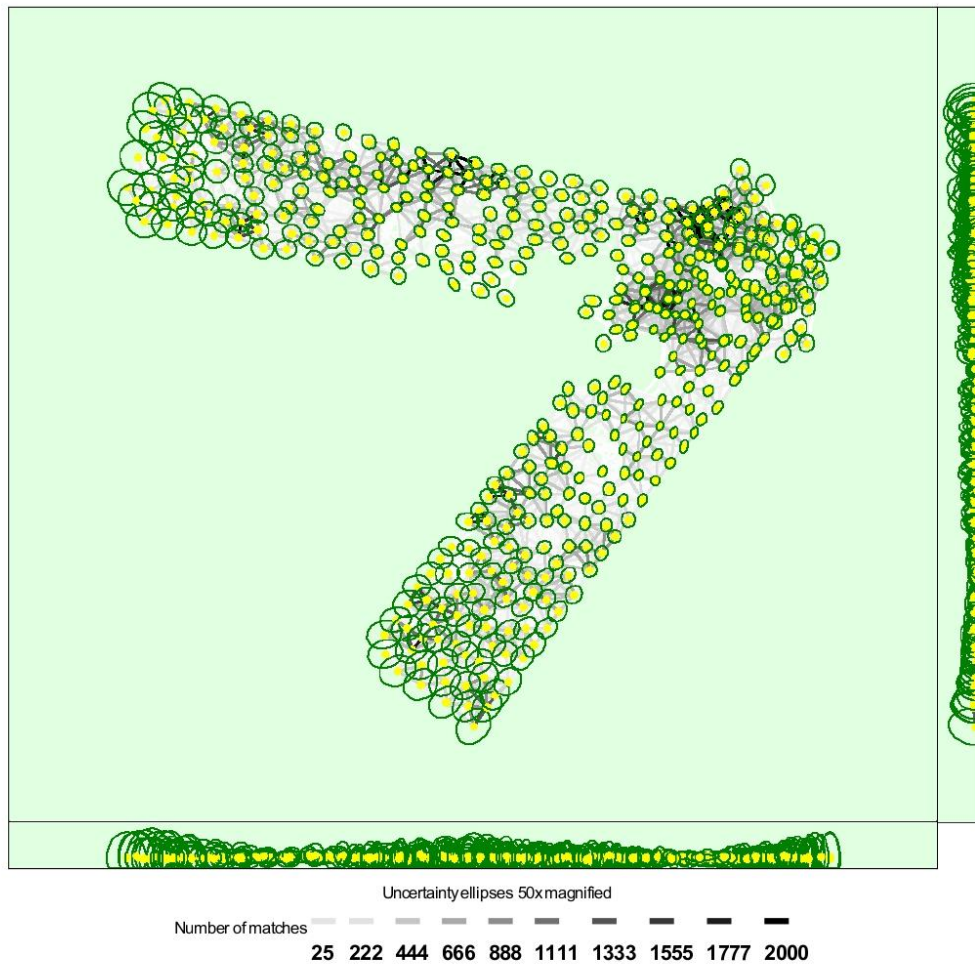


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

### Relative camera position and orientation uncertainties

|       | X[m]  | Y[m]  | Z[m]  | Omega [degree] | Phi [degree] | Kappa [degree] |
|-------|-------|-------|-------|----------------|--------------|----------------|
| Mean  | 0.344 | 0.338 | 0.457 | 0.158          | 0.159        | 0.075          |
| Sigma | 0.145 | 0.124 | 0.217 | 0.044          | 0.046        | 0.020          |

## Geolocation Details

### Ground Control Points

| GCP Name      | Accuracy XYZ [m] | Error X[m] | Error Y[m] | Error Z[m] | Projection Error [pixel] | Verified/Marked |
|---------------|------------------|------------|------------|------------|--------------------------|-----------------|
| GCP3 (3D)     | 0.020/ 0.020     | -0.014     | -0.006     | -0.014     | 0.539                    | 13 / 13         |
| GCP5 (3D)     | 0.020/ 0.020     | 0.004      | 0.006      | 0.006      | 0.169                    | 6 / 6           |
| GCP6 (3D)     | 0.020/ 0.020     | -0.015     | -0.019     | 0.010      | 0.824                    | 10 / 10         |
| GCP8 (3D)     | 0.020/ 0.020     | -0.007     | -0.006     | -0.003     | 0.299                    | 6 / 6           |
| GCP10 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.009     | -0.012     | 0.003      | 0.669                    | 5 / 5           |
| GCP12 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.005      | -0.009     | -0.006     | 0.421                    | 9 / 9           |
| GCP14 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.028      | -0.013     | 0.011      | 0.424                    | 7 / 7           |
| GCP15 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.003      | 0.022      | -0.002     | 0.445                    | 6 / 6           |
| GCP16 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.047     | -0.013     | -0.013     | 0.367                    | 6 / 6           |
| GCP17 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.005      | -0.000     | 0.003      | 0.314                    | 6 / 6           |
| GCP20 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.007      | 0.015      | -0.007     | 0.175                    | 4 / 4           |
| GCP23 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.006     | -0.004     | 0.002      | 0.331                    | 8 / 8           |
| GCP24 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.004      | 0.013      | -0.001     | 0.457                    | 6 / 6           |
| GCP26 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.007      | -0.009     | 0.012      | 0.265                    | 4 / 4           |
| GCP28 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.013      | -0.001     | -0.032     | 0.321                    | 4 / 4           |
| GCP31 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.006      | 0.013      | 0.001      | 0.660                    | 7 / 7           |
| GCP32 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.009      | -0.010     | 0.025      | 0.161                    | 4 / 4           |
| GCP33 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.002      | 0.007      | -0.009     | 0.637                    | 9 / 9           |
| GCP34 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.003     | -0.020     | 0.010      | 0.554                    | 12 / 12         |
| GCP35 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.022     | -0.025     | 0.028      | 0.147                    | 2 / 2           |
| GCP36 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.002     | 0.017      | -0.011     | 0.507                    | 8 / 8           |
| GCP38 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.011      | -0.004     | -0.003     | 0.702                    | 8 / 8           |
| GCP39 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.004      | -0.007     | -0.001     | 0.274                    | 7 / 7           |
| GCP41 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.025      | 0.026      | 0.021      | 0.299                    | 3 / 3           |
| GCP43 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.002     | 0.025      | -0.007     | 0.213                    | 4 / 4           |
| GCP45 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.012     | -0.007     | -0.019     | 0.561                    | 4 / 4           |
| GCP48 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.002     | 0.014      | 0.000      | 0.338                    | 5 / 5           |
| GCP51 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.011      | 0.037      | 0.021      | 0.325                    | 6 / 6           |
| GCP52 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.013     | -0.017     | -0.026     | 0.345                    | 6 / 6           |
| GCP53 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.003     | -0.028     | -0.007     | 0.283                    | 2 / 2           |
| GCP59 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.020      | -0.000     | -0.014     | 1.097                    | 5 / 5           |
| GCP60 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.033     | 0.005      | 0.024      | 0.028                    | 2 / 2           |
| GCP61 (3D)    | 0.020/ 0.020     | -0.003     | -0.018     | -0.026     | 0.464                    | 5 / 5           |
| GCP63 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.013      | 0.012      | -0.000     | 0.351                    | 4 / 4           |
| GCP65 (3D)    | 0.020/ 0.020     | 0.010      | 0.003      | 0.005      | 1.092                    | 6 / 6           |
| Mean [m]      |                  | -0.000182  | -0.000301  | -0.000487  |                          |                 |
| Sigma [m]     |                  | 0.014646   | 0.015213   | 0.014211   |                          |                 |
| RMS Error [m] |                  | 0.014647   | 0.015216   | 0.014219   |                          |                 |

0 out of 20 check points have been labeled as inaccurate.

| Check Point Name | Accuracy XYZ [m] | Error X[m] | Error Y[m] | Error Z[m] | Projection Error [pixel] | Verified/Marked |
|------------------|------------------|------------|------------|------------|--------------------------|-----------------|
| GCP2             | 0.0200/0.0200    | -0.0169    | -0.0124    | -0.0267    | 0.4569                   | 12 / 12         |
| GCP4             | 0.0200/0.0200    | -0.0056    | 0.0036     | 0.0009     | 0.5467                   | 12 / 12         |

|               |               |          |          |           |        |         |
|---------------|---------------|----------|----------|-----------|--------|---------|
| GCP9          | 0.0200/0.0200 | 0.0258   | 0.0147   | 0.0419    | 0.4189 | 4 / 4   |
| GCP11         | 0.0200/0.0200 | -0.0179  | 0.0285   | -0.0029   | 0.3843 | 7 / 7   |
| GCP13         | 0.0200/0.0200 | 0.0232   | -0.0336  | 0.0265    | 0.3592 | 9 / 9   |
| GCP18         | 0.0200/0.0200 | -0.0204  | -0.0629  | -0.0065   | 0.3944 | 9 / 9   |
| GCP19         | 0.0200/0.0200 | 0.0798   | 0.0189   | -0.0165   | 0.5563 | 6 / 6   |
| GCP21         | 0.0200/0.0200 | 0.1807   | 0.1103   | 0.0828    | 0.5543 | 6 / 6   |
| GCP22         | 0.0200/0.0200 | 0.0186   | -0.0284  | -0.0255   | 0.4362 | 7 / 7   |
| GCP25         | 0.0200/0.0200 | -0.0439  | 0.0198   | 0.0695    | 0.5481 | 4 / 4   |
| GCP27         | 0.0200/0.0200 | 0.0128   | 0.0008   | 0.0024    | 0.5247 | 5 / 5   |
| GCP30         | 0.0200/0.0200 | 0.0993   | 0.1314   | -0.0279   | 0.3875 | 4 / 4   |
| GCP37         | 0.0200/0.0200 | 0.0198   | -0.0459  | -0.0955   | 1.3888 | 11 / 11 |
| GCP40         | 0.0200/0.0200 | 0.0015   | -0.0016  | 0.0105    | 0.7482 | 13 / 13 |
| GCP42         | 0.0200/0.0200 | 0.0348   | -0.0204  | -0.0720   | 0.3444 | 8 / 8   |
| GCP44         | 0.0200/0.0200 | -0.0164  | -0.0330  | 0.1271    | 0.4624 | 7 / 7   |
| GCP47         | 0.0200/0.0200 | -0.0084  | 0.0140   | -0.0137   | 0.7037 | 6 / 6   |
| GCP49         | 0.0200/0.0200 | -0.0328  | 0.0266   | -0.0314   | 0.3908 | 6 / 6   |
| GCP56         | 0.0200/0.0200 | -0.1877  | 0.0463   | -0.1304   | 0.5367 | 4 / 4   |
| GCP58         | 0.0200/0.0200 | -0.0142  | -0.0678  | -0.2208   | 0.4439 | 5 / 5   |
| Mean [m]      |               | 0.006600 | 0.005441 | -0.015417 |        |         |
| Sigma [m]     |               | 0.067515 | 0.048965 | 0.073944  |        |         |
| RMS Error [m] |               | 0.067836 | 0.049266 | 0.075534  |        |         |

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified v.s. manually marked.

### ? Absolute Geolocation Variance



| Min Error [m] | Max Error [m] | Geolocation Error X [%] | Geolocation Error Y [%] | Geolocation Error Z [%] |
|---------------|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| -             | -9.47         | 0.00                    | 0.22                    | 0.00                    |
| -9.47         | -7.57         | 0.00                    | 0.00                    | 0.00                    |
| -7.57         | -5.68         | 0.45                    | 0.22                    | 0.00                    |
| -5.68         | -3.79         | 0.22                    | 1.12                    | 0.00                    |
| -3.79         | -1.89         | 13.90                   | 6.28                    | 4.26                    |
| -1.89         | 0.00          | 40.58                   | 33.63                   | 50.22                   |
| 0.00          | 1.89          | 32.29                   | 56.50                   | 39.46                   |
| 1.89          | 3.79          | 8.07                    | 2.02                    | 6.05                    |
| 3.79          | 5.68          | 4.48                    | 0.00                    | 0.00                    |
| 5.68          | 7.57          | 0.00                    | 0.00                    | 0.00                    |
| 7.57          | 9.47          | 0.00                    | 0.00                    | 0.00                    |
| 9.47          | -             | 0.00                    | 0.00                    | 0.00                    |
| Mean [m]      |               | -0.188476               | -1.329378               | -2.020496               |
| Sigma [m]     |               | 1.800918                | 1.434519                | 1.253930                |
| RMS Error [m] |               | 1.810754                | 1.955784                | 2.377971                |

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

| Geolocation Bias | X         | Y         | Z         |
|------------------|-----------|-----------|-----------|
| Translation [m]  | -0.211552 | -1.210032 | -1.992731 |

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

### ? Relative Geolocation Variance



| Relative Geolocation Error | Images X [%] | Images Y [%] | Images Z [%] |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| [-1.00, 1.00]              | 99.55        | 99.55        | 100.00       |

|                                   |          |          |          |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| [-2.00, 2.00]                     | 100.00   | 99.78    | 100.00   |
| [-3.00, 3.00]                     | 100.00   | 99.78    | 100.00   |
| Mean of Geolocation Accuracy [m]  | 5.278179 | 5.278179 | 4.797480 |
| Sigma of Geolocation Accuracy [m] | 0.532982 | 0.532982 | 0.325309 |

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| Geolocation Orientational Variance | RMS [degree] |
| Omega                              | 5.901        |
| Phi                                | 4.841        |
| Kappa                              | 9.184        |

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

## Initial Processing Details

### System Information

|                  |                                                                                                                       |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hardware         | CPU: Intel(R) Core(TM) i9-9900K CPU @ 3.60GHz<br>RAM: 32GB<br>GPU: NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti (Driver: 27.21.14.5671) |
| Operating System | Windows 10 Pro, 64-bit                                                                                                |

### Coordinate Systems

|                                              |                           |
|----------------------------------------------|---------------------------|
| Image Coordinate System                      | WGS84                     |
| Ground Control Point (GCP) Coordinate System | SIRGAS 2000 / UTMzone 22S |
| Output Coordinate System                     | SIRGAS 2000 / UTMzone 22S |

### Processing Options

|                                |                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Detected Template              | No Template Available                                                                                                                                              |
| Keypoints Image Scale          | Full, Image Scale: 1                                                                                                                                               |
| Advanced: Matching Image Pairs | Aerial Grid or Corridor                                                                                                                                            |
| Advanced: Matching Strategy    | Use Geometrically Verified Matching: no                                                                                                                            |
| Advanced: Keypoint Extraction  | Targeted Number of Keypoints: Automatic                                                                                                                            |
| Advanced: Calibration          | Calibration Method: Standard<br>Internal Parameters Optimization: All<br>External Parameters Optimization: All<br>Rematch: Auto, yes<br>Bundle Adjustment: Classic |

## Point Cloud Densification details

### Processing Options

|                                     |                                                    |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Image Scale                         | multiscale, 1/2 (Half image size, Default)         |
| Point Density                       | Optimal                                            |
| Minimum Number of Matches           | 3                                                  |
| 3D Textured Mesh Generation         | yes                                                |
| 3D Textured Mesh Settings:          | Resolution: High Resolution<br>Color Balancing: no |
| Advanced: 3D Textured Mesh Settings | Sample Density Divider: 1                          |
| Advanced: Matching Window Size      | 7x7 pixels                                         |
| Advanced: Image Groups              | group1                                             |
| Advanced: Use Processing Area       | yes                                                |

|                                            |         |
|--------------------------------------------|---------|
| Advanced: Use Annotations                  | yes     |
| Advanced: Limit Camera Depth Automatically | no      |
| Time for Point Cloud Densification         | 21m:09s |
| Time for 3D Textured Mesh Generation       | 22m:42s |

## Results



|                                       |          |
|---------------------------------------|----------|
| Number of Generated Tiles             | 3        |
| Number of 3D Densified Points         | 43708308 |
| Average Density (per m <sup>3</sup> ) | 80.41    |

## DSM, Orthomosaic and Index Details



### Processing Options



|                                   |                                                                                                                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DSM and Orthomosaic Resolution    | 1 x GSD (2.91 [cm/pixel])                                                                                                       |
| DSM Filters                       | Noise Filtering: yes<br>Surface Smoothing: yes, Type: Sharp                                                                     |
| Raster DSM                        | Generated: yes<br>Method: Triangulation<br>Merge Tiles: yes                                                                     |
| Grid DSM                          | Generated: yes, Spacing [cm]: 100                                                                                               |
| Raster DTM                        | Generated: yes<br>Merge Tiles: yes                                                                                              |
| DTM Resolution                    | 5 x GSD (2.91 [cm/pixel])                                                                                                       |
| Contour Lines Generation          | Generated: yes<br>Contour Base [m]: 0<br>Elevation Interval [m]: 10<br>Resolution [cm]: 100<br>Minimum Line Size [vertices]: 20 |
| Time for DSM Generation           | 40m:36s                                                                                                                         |
| Time for DTM Generation           | 35m:34s                                                                                                                         |
| Time for Contour Lines Generation | 10s                                                                                                                             |

## APÊNDICE B – CADERNETAS DE CÁLCULO DO NIVELAMENTO E CONTRANIVELAMENTO PARA CADA ESTAÇÃO.

Tabela B-1– Caderneta de cálculo do nivelamento e contranivelamento da estação E1.

| Levantamento altimétrico - visadas extremas |              |                  |         |                 |           |               |                |
|---------------------------------------------|--------------|------------------|---------|-----------------|-----------|---------------|----------------|
| Nivelamento estacionada - 2                 |              |                  |         |                 |           |               |                |
| Estação                                     | Ponto Visado | Leituras da mira |         | Plano de visada | Cota      | Distância (m) | Cota corrigida |
|                                             |              | Ré               | Vante   |                 |           |               |                |
| E1                                          | 30 AD        | 0,25055          |         | 298,90258       | 298,65203 | 31,42         | 298,65         |
|                                             | I31_AD       |                  | 0,74804 | 298,90258       | 298,15454 | 28,69         | 298,15         |
|                                             | I32_BD       |                  | 0,61643 | 298,90258       | 298,28615 | 27,69         | 298,29         |
|                                             | I33_EX       |                  | 0,44851 | 298,90258       | 298,45407 | 27,15         | 298,45         |
|                                             | I34_BE       |                  | 0,41477 | 298,90258       | 298,48781 | 26,87         | 298,49         |
|                                             | I35_AE       |                  | 0,45268 | 298,90258       | 298,44990 | 26,95         | 298,45         |
|                                             | I36_AD       |                  | 0,97008 | 298,90258       | 297,93250 | 24,04         | 297,93         |
|                                             | I37_BD       |                  | 0,83413 | 298,90258       | 298,06845 | 23,22         | 298,07         |
|                                             | I38_EX       |                  | 0,70159 | 298,90258       | 298,20099 | 22,32         | 298,20         |
|                                             | I39_BE       |                  | 0,65569 | 298,90258       | 298,24689 | 21,87         | 298,25         |
|                                             | I40_AE       |                  | 0,67074 | 298,90258       | 298,23184 | 22,03         | 298,23         |
|                                             | I41_AD       |                  | 1,20631 | 298,90258       | 297,69627 | 19,70         | 297,70         |
|                                             | I42_BD       |                  | 1,05579 | 298,90258       | 297,84679 | 18,42         | 297,85         |
|                                             | I43_EX       |                  | 0,94207 | 298,90258       | 297,96051 | 17,12         | 297,96         |
|                                             | I44_BE       |                  | 0,91388 | 298,90258       | 297,98870 | 16,55         | 297,99         |
|                                             | I45_AE       |                  | 0,94137 | 298,90258       | 297,96121 | 16,57         | 297,96         |
|                                             | I46_AD       |                  | 1,41186 | 298,90258       | 297,49072 | 15,65         | 297,49         |
|                                             | I47_BD       |                  | 1,26866 | 298,90258       | 297,63392 | 14,06         | 297,63         |
|                                             | I48_EX       |                  | 1,15138 | 298,90258       | 297,75120 | 12,33         | 297,75         |
|                                             | I49_BE       |                  | 1,11399 | 298,90258       | 297,78859 | 11,30         | 297,79         |
|                                             | I50_AE       |                  | 1,14742 | 298,90258       | 297,75516 | 11,33         | 297,76         |
|                                             | I51_AD       |                  | 1,60808 | 298,90258       | 297,29450 | 12,42         | 297,29         |
|                                             | I52_BD       |                  | 1,45508 | 298,90258       | 297,44750 | 10,47         | 297,45         |
|                                             | I53_EX       |                  | 1,33438 | 298,90258       | 297,56820 | 7,96          | 297,57         |
|                                             | I54_BE       |                  | 1,27235 | 298,90258       | 297,63023 | 6,54          | 297,63         |
|                                             | I55_AE       |                  | 1,32069 | 298,90258       | 297,58189 | 6,47          | 297,58         |
|                                             | I56_AD       |                  | 1,79243 | 298,90258       | 297,11015 | 10,63         | 297,11         |
|                                             | I57_BD       |                  | 1,64281 | 298,90258       | 297,25977 | 8,35          | 297,26         |
|                                             | I58_EX       |                  | 1,51766 | 298,90258       | 297,38492 | 4,94          | 297,38         |
|                                             | I59_BE       |                  | 1,44200 | 298,90258       | 297,46058 | 1,79          | 297,46         |
|                                             | I60_AE       |                  | 1,47536 | 298,90258       | 297,42722 | 1,82          | 297,43         |
| CONTRANIVELAMENTO                           |              |                  |         |                 |           |               |                |
| E1                                          | I60_AE       | 1,44807          |         | 298,87529       | 297,42722 | 1,95          | 297,43         |
|                                             | I59_BE       |                  | 1,41444 | 298,87529       | 297,46085 | 1,81          | 297,46         |
|                                             | I58_EX       |                  | 1,49071 | 298,87529       | 297,38458 | 4,89          | 297,38         |
|                                             | I57_BD       |                  | 1,61587 | 298,87529       | 297,25942 | 8,31          | 297,26         |
|                                             | I56_AD       |                  | 1,76552 | 298,87529       | 297,10977 | 10,59         | 297,11         |
|                                             | I55_AE       |                  | 1,29246 | 298,87529       | 297,58283 | 6,60          | 297,58         |
|                                             | I54_BE       |                  | 1,24482 | 298,87529       | 297,63047 | 6,63          | 297,63         |
|                                             | I53_EX       |                  | 1,30717 | 298,87529       | 297,44745 | 8,03          | 297,45         |
|                                             | I52_BD       |                  | 1,42784 | 298,87529       | 297,29404 | 10,47         | 297,29         |

|          |  |         |           |           |         |        |
|----------|--|---------|-----------|-----------|---------|--------|
| I51_AD   |  | 1,58125 | 298,87529 | 297,75514 | 12,42   | 297,76 |
| I50_AE   |  | 1,12015 | 298,87529 | 297,78931 | 11,43   | 297,79 |
| I49_BE   |  | 1,08598 | 298,87529 | 297,75409 | 11,42   | 297,75 |
| I48_EX   |  | 1,12120 | 298,87529 | 297,63390 | 12,39   | 297,63 |
| I47_BD   |  | 1,24139 | 298,87529 | 297,49049 | 14,10   | 297,49 |
| I46_AD   |  | 1,38480 | 298,87529 | 297,96208 | 15,69   | 297,96 |
| I45_AE   |  | 0,91321 | 298,87529 | 297,98890 | 16,68   | 297,99 |
| I44_BE   |  | 0,88639 | 298,87529 | 297,96266 | 16,65   | 297,96 |
| I43_EX   |  | 0,91263 | 298,87529 | 297,84641 | 17,22   | 297,85 |
| I42_BD   |  | 1,02888 | 298,87529 | 297,69899 | 18,48   | 297,70 |
| I41_AD   |  | 1,17630 | 298,87529 | 298,23103 | 19,77   | 298,23 |
| I40_AE   |  | 0,64426 | 298,87529 | 298,24814 | 22,12   | 298,25 |
| I39_BE   |  | 0,62715 | 298,87529 | 298,20274 | 22,00   | 298,20 |
| I38_EX   |  | 0,67255 | 298,87529 | 298,06913 | 22,42   | 298,07 |
| I37_BD   |  | 0,80616 | 298,87529 | 297,93424 | 23,29   | 297,93 |
| I36_AD   |  | 0,94105 | 298,87529 | 298,44935 | 24,14   | 298,45 |
| I35_AE   |  | 0,42594 | 298,87529 | 298,48879 | 27,02   | 298,49 |
| I34_BE   |  | 0,38650 | 298,87529 | 298,45549 | 26,97   | 298,46 |
| I33_EX   |  | 0,41980 | 298,87529 | 298,28489 | 27,27   | 298,28 |
| I32_BD   |  | 0,59040 | 298,87529 | 298,28489 | 27,77   | 298,28 |
| I31_AD   |  | 0,72119 | 298,87529 | 298,15410 | 28,76   | 298,15 |
| 30 AD    |  | 0,22328 | 298,87529 | 298,65201 | 31,53   | 298,65 |
| $\Sigma$ |  |         |           |           | 1015,49 |        |

|                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| Diferença de cota (mm):  | -0,02000                  |
| Dist. Niv-contraniv (km) | 1,02                      |
| tolerância (mm):         | 8 mm x (K) <sup>1/2</sup> |
| tolerância (mm):         | 8,0617219                 |
| EC < T - OK!             |                           |
| Erro cometido (m)        | -0,00002                  |

Tabela B-2– Caderneta de cálculo do nivelamento e contranivelamento da estação E2.

| Levantamento altimétrico - visadas extremas |              |                  |         |                 |           |               |                |
|---------------------------------------------|--------------|------------------|---------|-----------------|-----------|---------------|----------------|
| Nivelamento estacionada - 3                 |              |                  |         |                 |           |               |                |
| Estação                                     | Ponto Visado | Leituras da mira |         | Plano de visada | Cota      | Distância (m) | Cota corrigida |
|                                             |              | Ré               | Vante   |                 |           |               |                |
| E2                                          | I60_AE       | 0,30905          |         | 297,73627       | 297,42722 | 30,95         | 297,43         |
|                                             | I61_AD       |                  | 0,78878 | 297,73627       | 296,94749 | 23,19         | 296,95         |
|                                             | I62_BD       |                  | 0,65478 | 297,73627       | 297,08149 | 23,39         | 297,08         |
|                                             | I63_EX       |                  | 0,52306 | 297,73627       | 297,21321 | 24,19         | 297,21         |
|                                             | I64_BE       |                  | 0,43084 | 297,73627       | 297,30543 | 25,27         | 297,31         |

|        |  |         |           |           |       |        |
|--------|--|---------|-----------|-----------|-------|--------|
| I65_AE |  | 0,48664 | 297,73627 | 297,24963 | 25,89 | 297,25 |
| I66_AD |  | 0,95176 | 297,73627 | 296,78451 | 18,15 | 296,78 |
| I67_BD |  | 0,81503 | 297,73627 | 296,92124 | 18,39 | 296,92 |
| I68_EX |  | 0,67731 | 297,73627 | 297,05896 | 19,34 | 297,06 |
| I69_BE |  | 0,58884 | 297,73627 | 297,14743 | 20,72 | 297,15 |
| I70_AE |  | 0,60974 | 297,73627 | 297,12653 | 21,58 | 297,13 |
| I71_AD |  | 1,10460 | 297,73627 | 296,63167 | 13,18 | 296,63 |
| I72_BD |  | 0,95849 | 297,73627 | 296,77778 | 13,49 | 296,78 |
| I73_EX |  | 0,81860 | 297,73627 | 296,91767 | 14,74 | 296,92 |
| I74_BE |  | 0,73514 | 297,73627 | 297,00113 | 16,64 | 297,00 |
| I76_AE |  | 0,72791 | 297,73627 | 297,00836 | 17,80 | 297,01 |
| I77_AD |  | 1,25948 | 297,73627 | 296,47679 | 8,19  | 296,48 |
| I78_BD |  | 1,09386 | 297,73627 | 296,64241 | 8,69  | 296,64 |
| I79_EX |  | 0,95417 | 297,73627 | 296,78210 | 10,53 | 296,78 |
| I80_BE |  | 0,90893 | 297,73627 | 296,82734 | 12,95 | 296,83 |
| I81_AE |  | 0,93716 | 297,73627 | 296,79911 | 14,41 | 296,80 |
| I82_AD |  | 1,41906 | 297,73627 | 296,31721 | 3,23  | 296,32 |
| I83_BD |  | 1,23418 | 297,73627 | 296,50209 | 4,20  | 296,50 |
| I84_EX |  | 1,08094 | 297,73627 | 296,65533 | 7,41  | 296,66 |
| I85_BE |  | 1,04866 | 297,73627 | 296,68761 | 10,76 | 296,69 |
| I86_AE |  | 1,07169 | 297,73627 | 296,66458 | 12,49 | 296,66 |
| I87_AD |  | 1,56946 | 297,73627 | 296,16681 | 1,80  | 296,17 |
| I88_BD |  | 1,38783 | 297,73627 | 296,34844 | 3,35  | 296,35 |
| I89_EX |  | 1,22495 | 297,73627 | 296,51132 | 6,91  | 296,51 |
| I90_BE |  | 1,16275 | 297,73627 | 296,57352 | 10,54 | 296,57 |
| I91_AE |  | 1,18748 | 297,73627 | 296,54879 | 12,52 | 296,55 |
| I92_AD |  | 1,70430 | 297,73627 | 296,03197 | 6,78  | 296,03 |
| I93_BD |  | 1,53554 | 297,73627 | 296,20073 | 7,39  | 296,20 |
| I94_EX |  | 1,37103 | 297,73627 | 296,36524 | 9,75  | 296,37 |
| I95_BE |  | 1,25936 | 297,73627 | 296,47691 | 12,65 | 296,48 |
| I96_AE |  | 1,30584 | 297,73627 | 296,43043 | 14,61 | 296,43 |
| I97_AD |  | 1,84322 | 297,73627 | 296,04683 | 11,78 | 296,05 |
| I98_BD |  | 1,68944 | 297,73627 | 296,23968 | 12,23 | 296,24 |
| I99_EX |  | 1,49659 | 297,73627 | 296,37125 | 13,98 | 296,37 |

|                          |         |         |         |           |           |       |        |
|--------------------------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-------|--------|
|                          | I100_BE |         | 1,36502 | 297,73627 | 296,31743 | 16,19 | 296,32 |
|                          | I101_AE |         | 1,41884 | 297,73627 | 297,73627 | 17,56 | 297,74 |
| <b>CONTRANIVELAMENTO</b> |         |         |         |           |           |       |        |
| <b>E2</b>                | I101_AE | 1,42582 |         | 297,74325 | 296,31743 | 17,47 | 296,32 |
|                          | I100_BE |         | 1,37247 | 297,74325 | 296,37078 | 16,14 | 296,37 |
|                          | I99_EX  |         | 1,50326 | 297,74325 | 296,23999 | 13,93 | 296,24 |
|                          | I98_BD  |         | 1,69610 | 297,74325 | 296,04715 | 12,22 | 296,05 |
|                          | I97_AD  |         | 1,84982 | 297,74325 | 295,89343 | 11,81 | 295,89 |
|                          | I96_AE  |         | 1,31238 | 297,74325 | 296,43087 | 14,5  | 296,43 |
|                          | I95_BE  |         | 1,26674 | 297,74325 | 296,47651 | 12,59 | 296,48 |
|                          | I94_EX  |         | 1,37658 | 297,74325 | 296,36667 | 9,66  | 296,37 |
|                          | I93_BD  |         | 1,54214 | 297,74325 | 296,20111 | 7,36  | 296,20 |
|                          | I92_AD  |         | 1,71218 | 297,74325 | 296,03107 | 6,79  | 296,03 |
|                          | I91_AE  |         | 1,19353 | 297,74325 | 296,54972 | 12,42 | 296,55 |
|                          | I90_BE  |         | 1,16934 | 297,74325 | 296,57391 | 10,41 | 296,57 |
|                          | I89_EX  |         | 1,23122 | 297,74325 | 296,51203 | 6,8   | 296,51 |
|                          | I88_BD  |         | 1,39390 | 297,74325 | 296,34935 | 3,25  | 296,35 |
|                          | I87_AD  |         | 1,57610 | 297,74325 | 296,16715 | 1,8   | 296,17 |
|                          | I86_AE  |         | 1,07788 | 297,74325 | 296,66537 | 12,38 | 296,67 |
|                          | I85_BE  |         | 1,05515 | 297,74325 | 296,68810 | 10,65 | 296,69 |
|                          | I84_EX  |         | 1,08797 | 297,74325 | 296,65528 | 7,31  | 296,66 |
|                          | I83_BD  |         | 1,24035 | 297,74325 | 296,50290 | 4,12  | 296,50 |
|                          | I82_AD  |         | 1,42564 | 297,74325 | 296,31761 | 3,23  | 296,32 |
|                          | I81_AE  |         | 0,94328 | 297,74325 | 296,79997 | 14,32 | 296,80 |
|                          | I80_BE  |         | 0,91535 | 297,74325 | 296,82790 | 12,86 | 296,83 |
|                          | I79_EX  |         | 0,96017 | 297,74325 | 296,78308 | 10,47 | 296,78 |
|                          | I78_BD  |         | 1,09971 | 297,74325 | 296,64354 | 8,66  | 296,64 |
|                          | I77_AD  |         | 1,26541 | 297,74325 | 296,47784 | 8,21  | 296,48 |
|                          | I76_AE  |         | 0,73338 | 297,74325 | 297,00987 | 17,75 | 297,01 |
|                          | I74_BE  |         | 0,74083 | 297,74325 | 297,00242 | 16,6  | 297,00 |
|                          | I73_EX  |         | 0,82467 | 297,74325 | 296,91858 | 14,68 | 296,92 |
|                          | I72_BD  |         | 0,96529 | 297,74325 | 296,77796 | 13,47 | 296,78 |
|                          | I71_AD  |         | 1,11039 | 297,74325 | 296,63286 | 13,17 | 296,63 |
|                          | I70_AE  |         | 0,61560 | 297,74325 | 297,12765 | 21,53 | 297,13 |

|          |        |  |         |           |           |         |        |
|----------|--------|--|---------|-----------|-----------|---------|--------|
|          | I69_BE |  | 0,59630 | 297,74325 | 297,14695 | 20,62   | 297,15 |
|          | I68_EX |  | 0,68449 | 297,74325 | 297,05876 | 19,29   | 297,06 |
|          | I67_BD |  | 0,82086 | 297,74325 | 296,92239 | 18,37   | 296,92 |
|          | I66_AD |  | 0,95722 | 297,74325 | 296,78603 | 18,18   | 296,79 |
|          | I65_AE |  | 0,49335 | 297,74325 | 297,24990 | 25,86   | 297,25 |
|          | I64_BE |  | 0,43667 | 297,74325 | 297,30658 | 25,24   | 297,31 |
|          | I63_EX |  | 0,52858 | 297,74325 | 297,21467 | 24,15   | 297,21 |
|          | I62_BD |  | 0,65995 | 297,74325 | 297,08330 | 23,37   | 297,08 |
|          | I61_AD |  | 0,79438 | 297,74325 | 296,94887 | 23,18   | 296,95 |
|          | I60_AE |  | 0,33213 | 297,74325 | 297,41112 | 30,47   | 297,41 |
| $\Sigma$ |        |  |         |           |           | 1153,10 |        |

|                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| Diferença de cota (mm) : | -16,10000                 |
| Dist. Niv-contraniv (km) | 1,15                      |
| tolerância (mm):         | 8 mm x (K) <sup>1/2</sup> |
| tolerância (mm):         | 8,5905995<br>13           |
| EC > T NÃO OK!           |                           |
| Erro cometido (m)        | -0,01610                  |

Tabela B-3– Caderneta de cálculo do nivelamento e contranivelamento da estação E3.

| Levantamento altimétrico - visadas extremas |              |                  |         |                 |           |               |                |
|---------------------------------------------|--------------|------------------|---------|-----------------|-----------|---------------|----------------|
| Nivelamento estacionada - 4                 |              |                  |         |                 |           |               |                |
| Estação                                     | Ponto Visado | Leituras da mira |         | Plano de visada | Cota      | Distância (m) | Cota corrigida |
|                                             |              | Ré               | Vante   |                 |           |               |                |
| E3                                          | I101_AE      | 0,36325          |         | 298,09952       | 297,73627 | 31,61         | 297,74         |
|                                             | I102_AD      |                  | 0,76955 | 298,09952       | 297,32997 | 23,05         | 297,33         |
|                                             | I103_BD      |                  | 0,56382 | 298,09952       | 297,53570 | 24,28         | 297,54         |
|                                             | I104_EX      |                  | 0,42677 | 298,09952       | 297,67275 | 26,05         | 297,67         |
|                                             | I105_BE      |                  | 0,47372 | 298,09952       | 297,62580 | 26,85         | 297,63         |
|                                             | I106_AE      |                  | 1,08467 | 298,09952       | 297,01485 | 17,76         | 297,01         |
|                                             | I107_BD      |                  | 0,91149 | 298,09952       | 297,18803 | 18,03         | 297,19         |
|                                             | I108_EX      |                  | 0,69141 | 298,09952       | 297,40811 | 19,30         | 297,41         |
|                                             | I109_BE      |                  | 0,55503 | 298,09952       | 297,54449 | 21,28         | 297,54         |
|                                             | I110_AE      |                  | 0,56279 | 298,09952       | 297,53673 | 22,68         | 297,54         |
|                                             | I111_AD      |                  | 1,23940 | 298,09952       | 296,86012 | 12,78         | 296,86         |
|                                             | I112_BD      |                  | 1,04672 | 298,09952       | 297,05280 | 12,98         | 297,05         |
|                                             | I113_EX      |                  | 0,82620 | 298,09952       | 297,27332 | 14,46         | 297,27         |

|                   |         |         |         |           |           |       |        |
|-------------------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-------|--------|
|                   | I114_BE |         | 0,65780 | 298,09952 | 297,44172 | 16,89 | 297,44 |
|                   | I115_AE |         | 0,64445 | 298,09952 | 297,45507 | 18,74 | 297,46 |
|                   | I116_AD |         | 1,39058 | 298,09952 | 296,70894 | 7,78  | 296,71 |
|                   | I117_BD |         | 1,17635 | 298,09952 | 296,92317 | 8,08  | 296,92 |
|                   | I118_EX |         | 0,93981 | 298,09952 | 297,15971 | 10,25 | 297,16 |
|                   | I119_BE |         | 0,73050 | 298,09952 | 297,36902 | 13,37 | 297,37 |
|                   | I120_AE |         | 0,74815 | 298,09952 | 297,35137 | 14,84 | 297,35 |
|                   | I121_AD |         | 1,49459 | 298,09952 | 296,60493 | 2,76  | 296,60 |
|                   | I122_BD |         | 1,31836 | 298,09952 | 296,78116 | 3,40  | 296,78 |
|                   | I123_EX |         | 1,05169 | 298,09952 | 297,04783 | 6,77  | 297,05 |
|                   | I124_BE |         | 0,81405 | 298,09952 | 297,28547 | 10,97 | 297,29 |
|                   | I125_AE |         | 0,80638 | 298,09952 | 297,29314 | 13,29 | 297,29 |
|                   | I126_AD |         | 1,59547 | 298,09952 | 296,50405 | 2,22  | 296,50 |
|                   | I127_BD |         | 1,44809 | 298,09952 | 296,65143 | 3,07  | 296,65 |
|                   | I128_EX |         | 1,14547 | 298,09952 | 296,95405 | 6,75  | 296,95 |
|                   | I129_BE |         | 0,88706 | 298,09952 | 297,21246 | 10,98 | 297,21 |
|                   | I130_AE |         | 0,88981 | 298,09952 | 297,20971 | 13,45 | 297,21 |
|                   | I131_AD |         | 1,68451 | 298,09952 | 296,41501 | 7,23  | 296,42 |
|                   | I132_BD |         | 1,55550 | 298,09952 | 296,54402 | 7,57  | 296,54 |
|                   | I133_EX |         | 1,24156 | 298,09952 | 296,85796 | 9,90  | 296,86 |
|                   | I134_BE |         | 0,99001 | 298,09952 | 297,10951 | 13,23 | 297,11 |
|                   | I135_AE |         | 0,98443 | 298,09952 | 297,11509 | 15,24 | 297,12 |
|                   | I136_AD |         | 1,79779 | 298,09952 | 296,30173 | 12,25 | 296,30 |
|                   | I137_BD |         | 1,64756 | 298,09952 | 296,45196 | 12,39 | 296,45 |
|                   | I138_EX |         | 1,32573 | 298,09952 | 296,77379 | 14,19 | 296,77 |
|                   | I139_BE |         | 1,09283 | 298,09952 | 297,00669 | 16,95 | 297,01 |
|                   | I140_AE |         | 1,07238 | 298,09952 | 297,02714 | 18,75 | 297,03 |
|                   | I141_AD |         | 1,87392 | 298,09952 | 296,2256  | 17,22 | 296,23 |
|                   | I142_BD |         | 1,73261 | 298,09952 | 296,36691 | 17,56 | 296,37 |
|                   | I143_EX |         | 1,42728 | 298,09952 | 296,67224 | 19,01 | 296,67 |
|                   | I144_BE |         | 1,17918 | 298,09952 | 296,92034 | 21,31 | 296,92 |
|                   | I145_AE |         | 1,17277 | 298,09952 | 296,92675 | 22,67 | 296,93 |
| CONTRANIVELAMENTO |         |         |         |           |           |       |        |
| E3                | I145_AE | 1,18013 |         | 298,10688 | 296,92675 | 22,41 | 296,93 |
|                   | I144_BE |         | 1,18629 | 298,10688 | 296,92059 | 21,09 | 296,92 |
|                   | I143_EX |         | 1,43358 | 298,10688 | 296,67330 | 18,84 | 296,67 |
|                   | I142_BD |         | 1,74021 | 298,10688 | 296,36667 | 17,40 | 296,37 |
|                   | I141_AD |         | 1,88196 | 298,10688 | 296,22492 | 17,11 | 296,22 |
|                   | I140_AE |         | 1,08353 | 298,10688 | 297,02335 | 18,43 | 297,02 |
|                   | I139_BE |         | 1,10085 | 298,10688 | 297,00603 | 16,65 | 297,01 |
|                   | I138_EX |         | 1,33141 | 298,10688 | 296,77547 | 13,96 | 296,78 |
|                   | I137_BD |         | 1,65413 | 298,10688 | 296,45275 | 12,24 | 296,45 |
|                   | I136_AD |         | 1,80539 | 298,10688 | 296,30149 | 12,10 | 296,30 |
|                   | I135_AE |         | 0,99179 | 298,10688 | 297,11509 | 14,94 | 297,12 |
|                   | I134_BE |         | 0,99830 | 298,10688 | 297,10858 | 12,92 | 297,11 |
|                   | I133_EX |         | 1,24727 | 298,10688 | 296,85961 | 9,65  | 296,86 |
|                   | I132_BD |         | 1,56259 | 298,10688 | 296,54429 | 7,36  | 296,54 |
|                   | I131_AD |         | 1,69204 | 298,10688 | 296,41484 | 7,12  | 296,41 |

|          |         |           |           |         |        |
|----------|---------|-----------|-----------|---------|--------|
| I130_AE  | 0,89684 | 298,10688 | 297,21004 | 13,12   | 297,21 |
| I129_BE  | 0,89460 | 298,10688 | 297,21228 | 10,64   | 297,21 |
| I128_EX  | 1,15329 | 298,10688 | 296,95359 | 6,45    | 296,95 |
| I127_BD  | 1,45534 | 298,10688 | 296,65154 | 2,80    | 296,65 |
| I126_AD  | 1,60124 | 298,10688 | 296,50564 | 2,07    | 296,51 |
| I125_AE  | 0,81931 | 298,10688 | 297,28757 | 13,03   | 297,29 |
| I124_BE  | 0,82086 | 298,10688 | 297,28602 | 10,75   | 297,29 |
| I123_EX  | 1,05719 | 298,10688 | 297,04969 | 6,59    | 297,05 |
| I122_BD  | 1,32512 | 298,10688 | 296,78176 | 3,38    | 296,78 |
| I121_AD  | 1,50007 | 298,10688 | 296,60681 | 2,94    | 296,61 |
| I120_AE  | 0,75548 | 298,10688 | 297,35140 | 14,68   | 297,35 |
| I119_BE  | 0,73981 | 298,10688 | 297,36707 | 13,34   | 297,37 |
| I118_EX  | 0,94809 | 298,10688 | 297,15879 | 10,18   | 297,16 |
| I117_BD  | 1,18392 | 298,10688 | 296,92296 | 8,17    | 296,92 |
| I116_AD  | 1,39845 | 298,10688 | 296,70843 | 7,94    | 296,71 |
| I115_AE  | 0,65117 | 298,10688 | 297,45571 | 18,69   | 297,46 |
| I114_BE  | 0,66501 | 298,10688 | 297,44187 | 16,82   | 297,44 |
| I113_EX  | 0,83216 | 298,10688 | 297,27472 | 14,52   | 297,27 |
| I112_BD  | 1,05464 | 298,10688 | 297,05224 | 13,09   | 297,05 |
| I111_AD  | 1,24609 | 298,10688 | 296,86079 | 12,98   | 296,86 |
| I110_AE  | 0,56966 | 298,10688 | 297,53722 | 22,66   | 297,54 |
| I109_BE  | 0,56128 | 298,10688 | 297,54560 | 21,31   | 297,55 |
| I108_EX  | 0,69843 | 298,10688 | 297,40845 | 19,41   | 297,41 |
| I107_BD  | 0,91896 | 298,10688 | 297,18792 | 18,14   | 297,19 |
| I106_AE  | 1,09171 | 298,10688 | 297,01517 | 17,97   | 297,02 |
| I105_BE  | 0,43431 | 298,10688 | 297,67257 | 26,11   | 297,67 |
| I104_EX  | 0,43352 | 298,10688 | 297,67336 | 26,12   | 297,67 |
| I103_BD  | 0,56868 | 298,10688 | 297,53820 | 24,40   | 297,54 |
| I102_AD  | 0,77587 | 298,10688 | 297,33101 | 23,22   | 297,33 |
| I101_AE  | 0,36959 | 298,10688 | 297,73729 | 31,71   | 297,74 |
| $\Sigma$ |         |           |           | 1315,64 |        |

|                          |                                 |
|--------------------------|---------------------------------|
| Diferença de cota (mm) : | 1,02000                         |
| Dist. Niv-contraniv (km) | 1,11                            |
| tolerância (mm):         | $8 \text{ mm} \times (K)^{1/2}$ |
| tolerância (mm):         | $\frac{8,41876000}{4}$          |
| EC < T - OK!             |                                 |
| Erro cometido (m)        | 0,00102                         |

Tabela B-4– Caderneta de cálculo do nivelamento e contranivelamento da estação E4.

| Levantamento altimétrico - visadas extremas |  |                  |  |      |               |  |
|---------------------------------------------|--|------------------|--|------|---------------|--|
| Nivelamento estacionada - 5                 |  |                  |  |      |               |  |
| Estação                                     |  | Leituras da mira |  | Cota | Distância (m) |  |

|    | Ponto Visado | Ré      | Vante   | Plano de visada |           |       | Cota corrigida |
|----|--------------|---------|---------|-----------------|-----------|-------|----------------|
| E4 | I145_AE      | 0,30574 |         | 297,23249       | 296,92675 | 27,47 | 296,93         |
|    | I146_AD      |         | 1,11173 | 297,23249       | 296,12076 | 17,60 | 296,12         |
|    | I147_BD      |         | 0,97171 | 297,23249       | 296,26078 | 17,90 | 296,26         |
|    | I148_EX      |         | 0,65292 | 297,23249       | 296,57957 | 19,27 | 296,58         |
|    | I149_BE      |         | 0,38216 | 297,23249       | 296,85033 | 21,49 | 296,85         |
|    | I150_AE      |         | 0,37960 | 297,23249       | 296,85289 | 23,12 | 296,85         |
|    | I151_AD      |         | 1,20354 | 297,23249       | 296,02895 | 12,60 | 296,03         |
|    | I152_BD      |         | 1,07713 | 297,23249       | 296,15536 | 12,91 | 296,16         |
|    | I153_EX      |         | 0,74392 | 297,23249       | 296,48857 | 14,57 | 296,49         |
|    | I154_BE      |         | 0,47278 | 297,23249       | 296,75971 | 17,18 | 296,76         |
|    | I155_AE      |         | 0,45336 | 297,23249       | 296,77913 | 19,35 | 296,78         |
|    | I156_AD      |         | 1,32489 | 297,23249       | 295,90760 | 7,58  | 295,91         |
|    | I157_BD      |         | 1,17870 | 297,23249       | 296,05379 | 8,04  | 296,05         |
|    | I158_EX      |         | 0,82316 | 297,23249       | 296,40933 | 10,41 | 296,41         |
|    | I159_BE      |         | 0,57083 | 297,23249       | 296,66166 | 13,82 | 296,66         |
|    | I160_AE      |         | 0,55994 | 297,23249       | 296,67255 | 16,12 | 296,67         |
|    | I161_AD      |         | 1,40508 | 297,23249       | 295,82741 | 2,57  | 295,83         |
|    | I162_BD      |         | 1,25776 | 297,23249       | 295,97473 | 3,55  | 295,97         |
|    | I163_EX      |         | 0,91164 | 297,23249       | 296,32085 | 7,35  | 296,32         |
|    | I164_BE      |         | 0,65391 | 297,23249       | 296,57858 | 11,50 | 296,58         |
|    | I165_AE      |         | 0,65412 | 297,23249       | 296,57837 | 14,19 | 296,58         |
|    | I166_AD      |         | 1,52459 | 297,23249       | 295,70790 | 2,40  | 295,71         |
|    | I167_BD      |         | 1,34055 | 297,23249       | 295,89194 | 3,41  | 295,89         |
|    | I168_EX      |         | 1,00259 | 297,23249       | 296,22990 | 7,40  | 296,23         |
|    | I169_BE      |         | 0,75210 | 297,23249       | 296,48039 | 11,46 | 296,48         |
|    | I170_AE      |         | 0,73395 | 297,23249       | 296,49854 | 14,06 | 296,50         |
|    | I171_AD      |         | 1,58372 | 297,23249       | 295,64877 | 7,35  | 295,65         |
|    | I172_BD      |         | 1,42237 | 297,23249       | 295,81012 | 7,82  | 295,81         |
|    | I173_EX      |         | 1,09354 | 297,23249       | 296,13895 | 10,33 | 296,14         |
|    | I174_BE      |         | 0,84405 | 297,23249       | 296,38844 | 13,68 | 296,39         |
|    | I175_AE      |         | 0,80587 | 297,23249       | 296,42662 | 15,96 | 296,43         |
|    | I176_AD      |         | 1,60859 | 297,23249       | 295,62390 | 12,31 | 295,62         |
|    | I177_BD      |         | 1,49365 | 297,23249       | 295,73884 | 12,56 | 295,74         |
|    | I178_EX      |         | 1,18164 | 297,23249       | 296,05085 | 14,44 | 296,05         |
|    | I179_BE      |         | 0,93119 | 297,23249       | 296,30130 | 17,13 | 296,30         |
|    | I180_AE      |         | 0,91038 | 297,23249       | 296,32211 | 19,16 | 296,32         |
|    | I181_AD      |         | 1,71330 | 297,23249       | 295,51919 | 17,28 | 295,52         |
|    | I182_BD      |         | 1,57093 | 297,23249       | 295,66156 | 17,75 | 295,66         |
|    | I183_EX      |         | 1,27931 | 297,23249       | 295,95318 | 19,23 | 295,95         |
|    | I184_BE      |         | 1,02283 | 297,23249       | 296,20966 | 21,52 | 296,21         |
|    | I185_AE      |         | 0,99488 | 297,23249       | 296,23761 | 23,20 | 296,24         |
|    | I186_AD      |         | 1,79041 | 297,23249       | 295,44208 | 22,22 | 295,44         |
|    | I187_BD      |         | 1,64783 | 297,23249       | 295,58466 | 22,68 | 295,58         |
|    | I188_EX      |         | 1,35197 | 297,23249       | 295,88052 | 24,15 | 295,88         |
|    | I189_BE      |         | 1,09992 | 297,23249       | 296,13257 | 25,98 | 296,13         |
|    | I190_AE      |         | 1,05838 | 297,23249       | 296,17411 | 27,67 | 296,17         |

| CONTRANIVELAMENTO |         |         |         |           |           |         |        |
|-------------------|---------|---------|---------|-----------|-----------|---------|--------|
| E4                | I190_AE | 1,06031 |         | 297,23442 | 296,17411 | 27,56   | 296,17 |
|                   | I189_BE |         | 1,10249 | 297,23442 | 296,13193 | 25,90   | 296,13 |
|                   | I188_EX |         | 1,35925 | 297,23442 | 295,87517 | 24,14   | 295,88 |
|                   | I187_BD |         | 1,65230 | 297,23442 | 295,58212 | 22,67   | 295,58 |
|                   | I186_AD |         | 1,79287 | 297,23442 | 295,44155 | 22,26   | 295,44 |
|                   | I185_AE |         | 0,99821 | 297,23442 | 296,23621 | 23,06   | 296,24 |
|                   | I184_BE |         | 1,02493 | 297,23442 | 296,20949 | 21,40   | 296,21 |
|                   | I183_EX |         | 1,28123 | 297,23442 | 295,95319 | 19,15   | 295,95 |
|                   | I182_BD |         | 1,57352 | 297,23442 | 295,66090 | 17,72   | 295,66 |
|                   | I181_AD |         | 1,71585 | 297,23442 | 295,51857 | 17,30   | 295,52 |
|                   | I180_AE |         | 0,91233 | 297,23442 | 296,32209 | 18,97   | 296,32 |
|                   | I179_BE |         | 0,93472 | 297,23442 | 296,29970 | 16,95   | 296,30 |
|                   | I178_EX |         | 1,18387 | 297,23442 | 296,05055 | 14,34   | 296,05 |
|                   | I177_BD |         | 1,50081 | 297,23442 | 295,73361 | 12,54   | 295,73 |
|                   | I176_AD |         | 1,60908 | 297,23442 | 295,62534 | 12,30   | 295,63 |
|                   | I175_AE |         | 0,80828 | 297,23442 | 296,42614 | 15,72   | 296,43 |
|                   | I174_BE |         | 0,84640 | 297,23442 | 296,38802 | 13,46   | 296,39 |
|                   | I173_EX |         | 1,09537 | 297,23442 | 296,13905 | 10,21   | 296,14 |
|                   | I172_BD |         | 1,42464 | 297,23442 | 295,80978 | 7,75    | 295,81 |
|                   | I171_AD |         | 1,58705 | 297,23442 | 295,64737 | 7,34    | 295,65 |
|                   | I170_AE |         | 0,73656 | 297,23442 | 296,49786 | 13,80   | 296,50 |
|                   | I169_BE |         | 0,75524 | 297,23442 | 296,47918 | 11,21   | 296,48 |
|                   | I168_EX |         | 1,00556 | 297,23442 | 296,22886 | 7,17    | 296,23 |
|                   | I167_BD |         | 1,34276 | 297,23442 | 295,89166 | 3,22    | 295,89 |
|                   | I166_AD |         | 1,52829 | 297,23442 | 295,70613 | 2,37    | 295,71 |
|                   | I165_AE |         | 0,65714 | 297,23442 | 296,57728 | 13,91   | 296,58 |
|                   | I164_BE |         | 0,65909 | 297,23442 | 296,57533 | 11,25   | 296,58 |
|                   | I163_EX |         | 0,91710 | 297,23442 | 296,31732 | 7,06    | 296,32 |
|                   | I162_BD |         | 1,26271 | 297,23442 | 295,97171 | 3,35    | 295,97 |
|                   | I161_AD |         | 1,40605 | 297,23442 | 295,82837 | 2,58    | 295,83 |
|                   | I160_AE |         | 0,56214 | 297,23442 | 296,67228 | 15,90   | 296,67 |
|                   | I159_BE |         | 0,57232 | 297,23442 | 296,66210 | 13,49   | 296,66 |
|                   | I158_EX |         | 0,82588 | 297,23442 | 296,40854 | 10,23   | 296,41 |
|                   | I157_BD |         | 1,18184 | 297,23442 | 296,05258 | 7,97    | 296,05 |
|                   | I156_AD |         | 1,32705 | 297,23442 | 295,90737 | 7,56    | 295,91 |
|                   | I155_AE |         | 0,45528 | 297,23442 | 296,77914 | 19,18   | 296,78 |
|                   | I154_BE |         | 0,47442 | 297,23442 | 296,76000 | 17,05   | 296,76 |
|                   | I153_EX |         | 0,74492 | 297,23442 | 296,48950 | 14,50   | 296,49 |
|                   | I152_BD |         | 1,07875 | 297,23442 | 296,15567 | 12,88   | 296,16 |
|                   | I151_AD |         | 1,20593 | 297,23442 | 296,02849 | 12,61   | 296,03 |
|                   | I150_AE |         | 0,38118 | 297,23442 | 296,85324 | 23,01   | 296,85 |
|                   | I149_BE |         | 0,38381 | 297,23442 | 296,85061 | 21,40   | 296,85 |
|                   | I148_EX |         | 0,65156 | 297,23442 | 296,58286 | 19,20   | 296,58 |
|                   | I147_BD |         | 0,97327 | 297,23442 | 296,26115 | 17,91   | 296,26 |
|                   | I146_AD |         | 1,11071 | 297,23442 | 296,12371 | 17,64   | 296,12 |
|                   | I145_AE |         | 0,30693 | 297,23442 | 296,92749 | 27,37   | 296,93 |
|                   |         |         |         |           | Σ         | 1374,30 |        |

|                          |                              |
|--------------------------|------------------------------|
| Diferença de cota (mm)   |                              |
| :                        | 0,74000                      |
| Dist. Niv-contraniv (km) | 1,19                         |
| tolerância (mm):         | 8 mm x<br>(K) <sup>1/2</sup> |
| tolerância (mm):         | 8,727666355                  |
| EC < T - OK!             |                              |
| Erro cometido (m)        | 0,00074                      |

Tabela B-5– Caderneta de cálculo do nivelamento e contranivelamento da estação E<sub>5</sub>.

| Levantamento altimétrico - visadas extremas |              |                  |         |                 |           |               |                |
|---------------------------------------------|--------------|------------------|---------|-----------------|-----------|---------------|----------------|
| Nivelamento estacionada - 6                 |              |                  |         |                 |           |               |                |
| Estação                                     | Ponto Visado | Leituras da mira |         | Plano de visada | Cota      | Distância (m) | Cota corrigida |
|                                             |              | Ré               | Vante   |                 |           |               |                |
| E5                                          | I190_AE      | 0,47318          |         | 296,64729       | 296,17411 | 52,57         | 296,17         |
|                                             | I191_AD      |                  | 1,30979 | 296,64729       | 295,33750 | 45,91         | 295,34         |
|                                             | I192_BD      |                  | 1,17043 | 296,64729       | 295,47686 | 46,04         | 295,48         |
|                                             | I193_EX      |                  | 0,84355 | 296,64729       | 295,80374 | 46,25         | 295,80         |
|                                             | I194_BE      |                  | 0,57940 | 296,64729       | 296,06789 | 46,85         | 296,07         |
|                                             | I195_AE      |                  | 0,56566 | 296,64729       | 296,08163 | 47,65         | 296,08         |
|                                             | I196_AD      |                  | 1,38377 | 296,64729       | 295,26352 | 40,91         | 295,26         |
|                                             | I197_BD      |                  | 1,22326 | 296,64729       | 295,42403 | 40,78         | 295,42         |
|                                             | I198_EX      |                  | 0,91315 | 296,64729       | 295,73414 | 40,88         | 295,73         |
|                                             | I199_BE      |                  | 0,66588 | 296,64729       | 295,98141 | 41,19         | 295,98         |
|                                             | I200_AE      |                  | 0,63581 | 296,64729       | 296,01148 | 41,72         | 296,01         |
|                                             | I201_AD      |                  | 1,45450 | 296,64729       | 295,19279 | 35,12         | 295,19         |
|                                             | I202_BD      |                  | 1,31996 | 296,64729       | 295,32733 | 34,74         | 295,33         |
|                                             | I203_EX      |                  | 1,01201 | 296,64729       | 295,63528 | 34,38         | 295,64         |
|                                             | I204_BE      |                  | 0,76237 | 296,64729       | 295,88492 | 34,65         | 295,88         |
|                                             | I205_AE      |                  | 0,73892 | 296,64729       | 295,90837 | 35,13         | 295,91         |
|                                             | I206_AD      |                  | 1,49331 | 296,64729       | 295,15398 | 31,11         | 295,15         |
|                                             | I207_BD      |                  | 1,37657 | 296,64729       | 295,27072 | 30,58         | 295,27         |
|                                             | I208_EX      |                  | 1,07938 | 296,64729       | 295,56791 | 29,90         | 295,57         |
|                                             | I209_BE      |                  | 0,84704 | 296,64729       | 295,80025 | 29,77         | 295,80         |
|                                             | I210_AE      |                  | 0,84866 | 296,64729       | 295,79863 | 29,97         | 295,80         |
|                                             | I211_AD      |                  | 1,52095 | 296,64729       | 295,12634 | 26,16         | 295,13         |
|                                             | I212_BD      |                  | 1,42661 | 296,64729       | 295,22068 | 25,51         | 295,22         |
|                                             | I213_EX      |                  | 1,16761 | 296,64729       | 295,47968 | 24,49         | 295,48         |
|                                             | I214_BE      |                  | 0,95443 | 296,64729       | 295,69286 | 24,19         | 295,69         |
|                                             | I216_AE      |                  | 0,96455 | 296,64729       | 295,68274 | 24,34         | 295,68         |
|                                             | I217_AD      |                  | 1,54282 | 296,64729       | 295,10447 | 21,51         | 295,10         |
|                                             | I218_BD      |                  | 1,46333 | 296,64729       | 295,18396 | 20,63         | 295,18         |
|                                             | I219_EX      |                  | 1,24554 | 296,64729       | 295,40175 | 19,31         | 295,40         |
|                                             | I220_BE      |                  | 1,06775 | 296,64729       | 295,57954 | 18,57         | 295,58         |
|                                             | I221_AE      |                  | 1,09183 | 296,64729       | 295,55546 | 18,51         | 295,56         |
|                                             | I222_BD      |                  | 1,50683 | 296,64729       | 295,14046 | 16,15         | 295,14         |
|                                             | I223_EX      |                  | 1,32432 | 296,64729       | 295,32297 | 14,24         | 295,32         |

|                          |         |         |         |           |           |       |        |
|--------------------------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-------|--------|
|                          | I224_BE |         | 1,15974 | 296,64729 | 295,48755 | 13,22 | 295,49 |
|                          | I225_AE |         | 1,18855 | 296,64729 | 295,45874 | 13,12 | 295,46 |
|                          | I226_AD |         | 1,64286 | 296,64729 | 295,00443 | 13,57 | 295,00 |
|                          | I227_BD |         | 1,54663 | 296,64729 | 295,10066 | 12,38 | 295,10 |
|                          | I228_EX |         | 1,38288 | 296,64729 | 295,26441 | 9,76  | 295,26 |
|                          | I229_BE |         | 1,26515 | 296,64729 | 295,38214 | 8,24  | 295,38 |
|                          | I230_AE |         | 1,29944 | 296,64729 | 295,34785 | 7,99  | 295,35 |
|                          | I231_AD |         | 1,66497 | 296,64729 | 294,98232 | 11,12 | 294,98 |
|                          | I232_BD |         | 1,56971 | 296,64729 | 295,07758 | 9,88  | 295,08 |
|                          | I233_EX |         | 1,44885 | 296,64729 | 295,19844 | 6,21  | 295,20 |
|                          | I234_BE |         | 1,3736  | 296,64729 | 295,27369 | 3,29  | 295,27 |
|                          | I235_AE |         | 1,44054 | 296,64729 | 295,20675 | 2,50  | 295,21 |
|                          | I236_AD |         | 1,69842 | 296,64729 | 294,94887 | 11,04 | 294,95 |
|                          | I237_BD |         | 1,59237 | 296,64729 | 295,05492 | 9,68  | 295,05 |
|                          | I238_EX |         | 1,50942 | 296,64729 | 295,13787 | 5,99  | 295,14 |
|                          | I239_BE |         | 1,48990 | 296,64729 | 295,15739 | 3,31  | 295,16 |
|                          | I240_AE |         | 1,57165 | 296,64729 | 295,07564 | 2,38  | 295,08 |
|                          | I241_AD |         | 1,74705 | 296,64729 | 294,90024 | 13,01 | 294,90 |
|                          | I242_BD |         | 1,64096 | 296,64729 | 295,00633 | 11,84 | 295,01 |
|                          | I243_EX |         | 1,57613 | 296,64729 | 295,07116 | 9,25  | 295,07 |
|                          | I244_BE |         | 1,60306 | 296,64729 | 295,04423 | 7,92  | 295,04 |
|                          | I245_AE |         | 1,71249 | 296,64729 | 294,93480 | 7,64  | 294,93 |
|                          | I246_AD |         | 1,91432 | 296,64729 | 294,73297 | 24,98 | 294,73 |
|                          | I247_BD |         | 1,82070 | 296,64729 | 294,82659 | 24,47 | 294,83 |
|                          | I248_EX |         | 1,7794  | 296,64729 | 294,86789 | 23,49 | 294,87 |
|                          | I249_BE |         | 1,8662  | 296,64729 | 294,78109 | 23,11 | 294,78 |
|                          | I250_AE |         | 1,98366 | 296,64729 | 294,66363 | 23,00 | 294,66 |
| <b>CONTRANIVELAMENTO</b> |         |         |         |           |           |       |        |
| <b>E5</b>                | I250_AE | 1,95777 |         | 296,62140 | 294,66363 | 23,27 | 294,66 |
|                          | I249_BE |         | 1,84018 | 296,62140 | 294,78122 | 23,43 | 294,78 |
|                          | I248_EX |         | 1,75260 | 296,62140 | 294,86880 | 23,82 | 294,87 |
|                          | I247_BD |         | 1,79378 | 296,62140 | 294,82762 | 24,79 | 294,83 |
|                          | I246_AD |         | 1,88804 | 296,62140 | 294,73336 | 25,31 | 294,73 |
|                          | I245_AE |         | 1,68584 | 296,62140 | 294,93556 | 7,91  | 294,94 |
|                          | I244_BE |         | 1,57613 | 296,62140 | 295,04527 | 8,28  | 295,05 |
|                          | I243_EX |         | 1,54928 | 296,62140 | 295,07212 | 9,59  | 295,07 |
|                          | I242_BD |         | 1,61438 | 296,62140 | 295,00702 | 12,20 | 295,01 |
|                          | I241_AD |         | 1,72036 | 296,62140 | 294,90104 | 13,39 | 294,90 |
|                          | I240_AE |         | 1,54316 | 296,62140 | 295,07824 | 2,66  | 295,08 |
|                          | I239_BE |         | 1,46336 | 296,62140 | 295,15804 | 3,68  | 295,16 |
|                          | I238_EX |         | 1,48236 | 296,62140 | 295,13904 | 6,32  | 295,14 |
|                          | I237_BD |         | 1,56535 | 296,62140 | 295,05605 | 9,97  | 295,06 |
|                          | I236_AD |         | 1,67027 | 296,62140 | 294,95113 | 11,29 | 294,95 |
|                          | I235_AE |         | 1,41466 | 296,62140 | 295,20674 | 2,22  | 295,21 |
|                          | I234_BE |         | 1,34717 | 296,62140 | 295,27423 | 3,25  | 295,27 |
|                          | I233_EX |         | 1,42203 | 296,62140 | 295,19937 | 6,33  | 295,20 |
|                          | I232_BD |         | 1,54279 | 296,62140 | 295,07861 | 10,04 | 295,08 |

|         |  |         |           |           |         |        |
|---------|--|---------|-----------|-----------|---------|--------|
| I231_AD |  | 1,64157 | 296,62140 | 294,97983 | 11,36   | 294,98 |
| I230_AE |  | 1,27299 | 296,62140 | 295,34841 | 7,70    | 295,35 |
| I229_BE |  | 1,23814 | 296,62140 | 295,38326 | 8,06    | 295,38 |
| I228_EX |  | 1,35670 | 296,62140 | 295,26470 | 9,69    | 295,26 |
| I227_BD |  | 1,51929 | 296,62140 | 295,10211 | 12,39   | 295,10 |
| I226_AD |  | 1,61560 | 296,62140 | 295,00580 | 13,63   | 295,01 |
| I225_AE |  | 1,16163 | 296,62140 | 295,45977 | 12,84   | 295,46 |
| I224_BE |  | 1,13253 | 296,62140 | 295,48887 | 12,99   | 295,49 |
| I223_EX |  | 1,29711 | 296,62140 | 295,32429 | 14,11   | 295,32 |
| I222_BD |  | 1,47831 | 296,62140 | 295,14309 | 16,11   | 295,14 |
| I221_AE |  | 1,06481 | 296,62140 | 295,55659 | 18,25   | 295,56 |
| I220_BE |  | 1,04103 | 296,62140 | 295,58037 | 18,33   | 295,58 |
| I219_EX |  | 1,21773 | 296,62140 | 295,40367 | 19,13   | 295,40 |
| I218_BD |  | 1,43661 | 296,62140 | 295,18479 | 20,54   | 295,18 |
| I217_AD |  | 1,51479 | 296,62140 | 295,10661 | 21,41   | 295,11 |
| I216_AE |  | 0,93664 | 296,62140 | 295,68476 | 24,10   | 295,68 |
| I214_BE |  | 0,92665 | 296,62140 | 295,69475 | 23,96   | 295,69 |
| I213_EX |  | 1,14033 | 296,62140 | 295,48107 | 24,31   | 295,48 |
| I212_BD |  | 1,39887 | 296,62140 | 295,22253 | 25,40   | 295,22 |
| I211_AD |  | 1,49337 | 296,62140 | 295,12803 | 26,07   | 295,13 |
| I210_AE |  | 0,82135 | 296,62140 | 295,80005 | 29,75   | 295,80 |
| I209_BE |  | 0,81945 | 296,62140 | 295,80195 | 29,56   | 295,80 |
| I208_EX |  | 1,05264 | 296,62140 | 295,56876 | 29,68   | 295,57 |
| I207_BD |  | 1,34947 | 296,62140 | 295,27193 | 30,43   | 295,27 |
| I206_AD |  | 1,46559 | 296,62140 | 295,15581 | 30,97   | 295,16 |
| I205_AE |  | 0,71119 | 296,62140 | 295,91021 | 34,87   | 295,91 |
| I204_BE |  | 0,73303 | 296,62140 | 295,88837 | 34,47   | 295,89 |
| I203_EX |  | 0,98304 | 296,62140 | 295,63836 | 34,13   | 295,64 |
| I202_BD |  | 1,29260 | 296,62140 | 295,32880 | 34,57   | 295,33 |
| I201_AD |  | 1,42741 | 296,62140 | 295,19399 | 35,00   | 295,19 |
| I200_AE |  | 0,60865 | 296,62140 | 296,01275 | 41,52   | 296,01 |
| I199_BE |  | 0,63692 | 296,62140 | 295,98448 | 41,00   | 295,98 |
| I198_EX |  | 0,88789 | 296,62140 | 295,73351 | 40,66   | 295,73 |
| I197_BD |  | 1,19548 | 296,62140 | 295,42592 | 40,63   | 295,43 |
| I196_AD |  | 1,35577 | 296,62140 | 295,26563 | 40,76   | 295,27 |
| I195_AE |  | 0,53776 | 296,62140 | 296,08364 | 47,41   | 296,08 |
| I194_BE |  | 0,55107 | 296,62140 | 296,07033 | 46,65   | 296,07 |
| I193_EX |  | 0,81450 | 296,62140 | 295,80690 | 46,00   | 295,81 |
| I192_BD |  | 1,14243 | 296,62140 | 295,47897 | 45,87   | 295,48 |
| I191_AD |  | 1,28248 | 296,62140 | 295,33892 | 45,79   | 295,34 |
| I190_AE |  | 0,44405 | 296,62140 | 296,17735 | 52,56   | 296,18 |
|         |  |         |           | Σ         | 2762,51 |        |

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| Diferença de cota (mm):  | 3,24000 |
| Dist. Niv-contraniv (km) | 2,76    |

|                   |                              |
|-------------------|------------------------------|
| tolerância (mm):  | 8 mm x<br>(K) <sup>1/2</sup> |
| tolerância (mm):  | 13,29664018                  |
| EC < T - OK!      |                              |
| Erro cometido (m) | 0,00324                      |

**APÊNDICE C – TABELA DE CÁLCULO DA SUPERELEVAÇÃO – NIVELAMENTO GEOMÉTRICO**

| Nº. seções | Pontos visados | E(m)       | Cota corrigida - Niv. Geo (m) | Dist. total BD-BE (m) | Dist. EX - BD (m) | Dist. EX - BE(m) | Desnível BD//BE (m) | Superelev. bordo Int. (%) | Superelev. bordo Ext. (%) |
|------------|----------------|------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------|------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>1</b>   | I01_AD         | 460154,370 | 299,78                        | 4,26                  | 2,11              | -2,15            |                     | 9,43%                     | 1,04%                     |
|            | I02_BD         | 460155,740 | 299,93                        |                       |                   |                  | 0,199               |                           |                           |
|            | I03_EX         | 460157,850 | 300,13                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I04_BE         | 460160,000 | 300,15                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I05_AE         | 460160,980 | 300,07                        |                       |                   |                  | -0,022              |                           |                           |
| <b>2</b>   | I06_AD         | 460158,270 | 299,48                        | 4,27                  | 2,23              | -2,04            |                     | 8,55%                     | 1,71%                     |
|            | I07_BD         | 460159,650 | 299,61                        |                       |                   |                  | 0,191               |                           |                           |
|            | I08_EX         | 460161,880 | 299,80                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I09_BE         | 460163,920 | 299,84                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I10_AE         | 460165,090 | 299,78                        |                       |                   |                  | -0,035              |                           |                           |
| <b>3</b>   | I11_AD         | 460162,220 | 299,20                        | 4,19                  | 2,14              | -2,05            |                     | 8,13%                     | 3,01%                     |
|            | I12_BD         | 460163,634 | 299,32                        |                       |                   |                  | 0,174               |                           |                           |
|            | I13_EX         | 460165,777 | 299,50                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I14_BE         | 460167,827 | 299,56                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I15_AE         | 460168,990 | 299,47                        |                       |                   |                  | -0,062              |                           |                           |
| <b>4</b>   | I16_AD         | 460166,130 | 298,94                        | 4,27                  | 2,23              | -2,04            |                     | 7,55%                     | 2,66%                     |
|            | I17_BD         | 460167,569 | 299,06                        |                       |                   |                  | 0,168               |                           |                           |
|            | I18_EX         | 460169,796 | 299,23                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I19_BE         | 460171,838 | 299,28                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I20_AE         | 460173,080 | 299,17                        |                       |                   |                  | -0,054              |                           |                           |
| <b>5</b>   | I21_AD         | 460169,998 | 298,64                        | 4,22                  | 2,26              | -1,95            |                     | 7,47%                     | 2,35%                     |
|            | I22_BD         | 460171,697 | 298,78                        |                       |                   |                  | 0,169               |                           |                           |
|            | I23_EX         | 460173,960 | 298,95                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I24_BE         | 460175,913 | 298,99                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I25_AE         | 460177,216 | 298,88                        |                       |                   |                  | -0,046              |                           |                           |
| <b>6</b>   | I26_AD         | 460173,800 | 298,39                        | 4,55                  | 2,29              | -2,26            |                     | 7,02%                     | 0,72%                     |
|            | I27_BD         | 460175,340 | 298,54                        |                       |                   |                  | 0,161               |                           |                           |
|            | I28_EX         | 460177,630 | 298,70                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I29_BE         | 460179,890 | 298,72                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I30_AE         | 460180,940 | 298,65                        |                       |                   |                  | -0,016              |                           |                           |
| <b>7</b>   | I31_AD         | 460177,608 | 298,15                        | 4,09                  | 1,98              | -2,11            |                     | 8,48%                     | 1,60%                     |
|            | I32_BD         | 460179,357 | 298,29                        |                       |                   |                  | 0,168               |                           |                           |
|            | I33_EX         | 460181,338 | 298,45                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I34_BE         | 460183,452 | 298,49                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |
|            | I35_AE         | 460184,415 | 298,45                        |                       |                   |                  | -0,034              |                           |                           |
| <b>8</b>   | I36_AD         | 460181,496 | 297,93                        | 4,31                  | 2,13              | -2,18            |                     | 6,21%                     | 2,11%                     |
|            | I37_BD         | 460182,976 | 298,07                        |                       |                   |                  | 0,133               |                           |                           |
|            | I38_EX         | 460185,109 | 298,20                        |                       |                   |                  |                     |                           |                           |

|    |        |            |        |      |      |       |        |       |       |
|----|--------|------------|--------|------|------|-------|--------|-------|-------|
|    | I39_BE | 460187,287 | 298,25 |      |      |       |        |       |       |
|    | I40_AE | 460188,271 | 298,23 |      |      |       |        |       |       |
| 9  | I41_AD | 460185,259 | 297,70 | 4,47 | 2,27 | -2,19 | -0,046 | 5,01% | 1,29% |
|    | I42_BD | 460186,932 | 297,85 |      |      |       | 0,114  |       |       |
|    | I43_EX | 460189,204 | 297,96 |      |      |       |        |       |       |
|    | I44_BE | 460191,397 | 297,99 |      |      |       |        |       |       |
|    | I45_AE | 460192,244 | 297,96 |      |      |       | -0,028 |       |       |
| 10 | I46_AD | 460189,140 | 297,49 | 4,65 | 2,28 | -2,37 | 0,117  | 5,15% | 1,58% |
|    | I47_BD | 460190,793 | 297,63 |      |      |       |        |       |       |
|    | I48_EX | 460193,070 | 297,75 |      |      |       |        |       |       |
|    | I49_BE | 460195,439 | 297,79 |      |      |       |        |       |       |
|    | I50_AE | 460196,324 | 297,76 |      |      |       | -0,037 |       |       |
| 11 | I51_AD | 460192,959 | 297,29 | 4,60 | 2,34 | -2,27 | 0,121  | 5,17% | 2,74% |
|    | I52_BD | 460194,523 | 297,45 |      |      |       |        |       |       |
|    | I53_EX | 460196,858 | 297,57 |      |      |       |        |       |       |
|    | I54_BE | 460199,124 | 297,63 |      |      |       |        |       |       |
|    | I55_AE | 460199,980 | 297,58 |      |      |       | -0,062 |       |       |
| 12 | I56_AD | 460196,764 | 297,11 | 4,74 | 2,36 | -2,38 | 0,125  | 5,30% | 3,18% |
|    | I57_BD | 460198,318 | 297,26 |      |      |       |        |       |       |
|    | I58_EX | 460200,678 | 297,38 |      |      |       |        |       |       |
|    | I59_BE | 460203,059 | 297,46 |      |      |       |        |       |       |
|    | I60_AE | 460203,950 | 297,43 |      |      |       | -0,076 |       |       |
| 13 | I61_AD | 460200,463 | 296,95 | 4,71 | 2,31 | -2,39 | 0,132  | 5,70% | 3,85% |
|    | I62_BD | 460202,063 | 297,08 |      |      |       |        |       |       |
|    | I63_EX | 460204,374 | 297,21 |      |      |       |        |       |       |
|    | I64_BE | 460206,769 | 297,31 |      |      |       |        |       |       |
|    | I65_AE | 460207,631 | 297,25 |      |      |       | -0,092 |       |       |
| 14 | I66_AD | 460204,143 | 296,78 | 4,77 | 2,38 | -2,40 | 0,138  | 5,79% | 3,69% |
|    | I67_BD | 460205,874 | 296,92 |      |      |       |        |       |       |
|    | I68_EX | 460208,252 | 297,06 |      |      |       |        |       |       |
|    | I69_BE | 460210,649 | 297,15 |      |      |       |        |       |       |
|    | I70_AE | 460211,645 | 297,13 |      |      |       | -0,088 |       |       |
| 15 | I71_AD | 460207,804 | 296,63 | 4,94 | 2,51 | -2,43 | 0,140  | 5,58% | 3,43% |
|    | I72_BD | 460209,482 | 296,78 |      |      |       |        |       |       |
|    | I73_EX | 460211,988 | 296,92 |      |      |       |        |       |       |
|    | I74_BE | 460214,418 | 297,00 |      |      |       |        |       |       |
|    | I76_AE | 460215,557 | 297,01 |      |      |       | -0,083 |       |       |
| 16 | I77_AD | 460211,520 | 296,48 | 4,95 | 2,57 | -2,38 | 0,140  | 5,43% | 1,90% |
|    | I78_BD | 460213,133 | 296,64 |      |      |       |        |       |       |
|    | I79_EX | 460215,705 | 296,78 |      |      |       |        |       |       |
|    | I80_BE | 460218,082 | 296,83 |      |      |       |        |       |       |
|    | I81_AE | 460219,266 | 296,80 |      |      |       | -0,045 |       |       |
| 17 | I82_AD | 460215,145 | 296,32 | 5,04 | 2,54 | -2,50 | 0,153  | 6,03% | 1,29% |
|    | I83_BD | 460216,798 | 296,50 |      |      |       |        |       |       |
|    | I84_EX | 460219,340 | 296,66 |      |      |       |        |       |       |
|    | I85_BE | 460221,838 | 296,69 |      |      |       |        |       |       |
|    | I86_AE | 460222,939 | 296,66 |      |      |       | -0,032 |       |       |

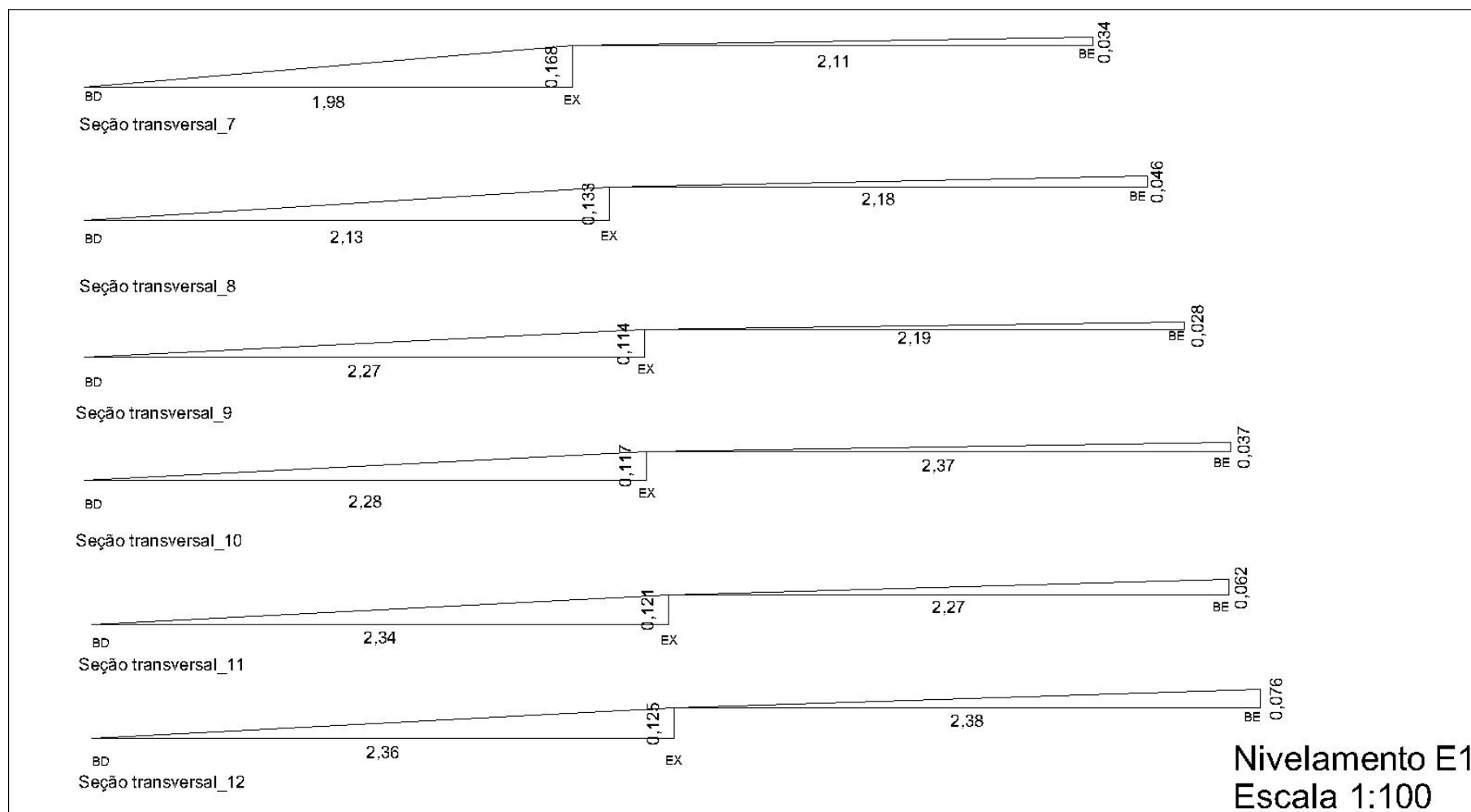
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |        |
|----|---------|------------|--------|------|------|-------|--------|-------|--------|
| 18 | I87_AD  | 460218,590 | 296,17 | 5,28 | 2,65 | -2,63 |        | 6,14% | 2,36%  |
|    | I88_BD  | 460220,426 | 296,35 |      |      |       | 0,163  |       |        |
|    | I89_EX  | 460223,077 | 296,51 |      |      |       |        |       |        |
|    | I90_BE  | 460225,708 | 296,57 |      |      |       |        |       |        |
|    | I91_AE  | 460227,112 | 296,55 |      |      |       | -0,062 |       |        |
| 19 | I92_AD  | 460222,096 | 296,03 | 5,73 | 2,98 | -2,75 |        | 5,52% | 4,06%  |
|    | I93_BD  | 460223,870 | 296,20 |      |      |       | 0,164  |       |        |
|    | I94_EX  | 460226,848 | 296,37 |      |      |       |        |       |        |
|    | I95_BE  | 460229,599 | 296,48 |      |      |       |        |       |        |
|    | I96_AE  | 460231,136 | 296,43 |      |      |       | -0,112 |       |        |
| 20 | I97_AD  | 460225,452 | 296,05 | 5,99 | 3,17 | -2,83 |        | 4,15% | -1,90% |
|    | I98_BD  | 460227,276 | 296,24 |      |      |       | 0,132  |       |        |
|    | I99_EX  | 460230,444 | 296,37 |      |      |       |        |       |        |
|    | I100_BE | 460233,271 | 296,32 |      |      |       |        |       |        |
|    | I101_AE | 460234,722 | 297,74 |      |      |       | 0,054  |       |        |
| 21 | I102_AD | 460228,742 | 297,33 | 6,28 | 3,17 | -3,11 |        | 4,32% | -1,51% |
|    | I103_BD | 460230,513 | 297,54 |      |      |       | 0,137  |       |        |
|    | I104_EX | 460233,687 | 297,67 |      |      |       |        |       |        |
|    | I105_BE | 460236,797 | 297,63 |      |      |       |        |       |        |
|    | I106_AE | 460238,068 | 297,01 |      |      |       | 0,047  |       |        |
| 22 | I107_BD | 460233,695 | 297,19 | 6,65 | 3,31 | -3,35 |        | 6,65% | 4,08%  |
|    | I108_EX | 460237,003 | 297,41 |      |      |       | 0,220  |       |        |
|    | I109_BE | 460240,349 | 297,54 |      |      |       |        |       |        |
|    | I110_AE | 460242,246 | 297,54 |      |      |       | -0,136 |       |        |
| 23 | I111_AD | 460234,911 | 296,86 | 7,00 | 3,46 | -3,54 |        | 6,38% | 4,75%  |
|    | I112_BD | 460236,660 | 297,05 |      |      |       | 0,221  |       |        |
|    | I113_EX | 460240,116 | 297,27 |      |      |       |        |       |        |
|    | I114_BE | 460243,658 | 297,44 |      |      |       |        |       |        |
|    | I115_AE | 460245,750 | 297,46 |      |      |       | -0,168 |       |        |
| 24 | I116_AD | 460237,587 | 296,71 | 7,18 | 3,46 | -3,73 |        | 6,84% | 5,62%  |
|    | I117_BD | 460239,414 | 296,92 |      |      |       | 0,237  |       |        |
|    | I118_EX | 460242,871 | 297,16 |      |      |       |        |       |        |
|    | I119_BE | 460246,598 | 297,37 |      |      |       |        |       |        |
|    | I120_AE | 460248,047 | 297,35 |      |      |       | -0,209 |       |        |
| 25 | I121_AD | 460240,060 | 296,60 | 7,49 | 3,76 | -3,73 |        | 7,09% | 6,36%  |
|    | I122_BD | 460242,006 | 296,78 |      |      |       | 0,267  |       |        |
|    | I123_EX | 460245,766 | 297,05 |      |      |       |        |       |        |
|    | I124_BE | 460249,500 | 297,29 |      |      |       |        |       |        |
|    | I125_AE | 460251,564 | 297,29 |      |      |       | -0,238 |       |        |
| 26 | I126_AD | 460242,311 | 296,50 | 7,97 | 3,91 | -4,06 |        | 7,74% | 6,36%  |
|    | I127_BD | 460244,125 | 296,65 |      |      |       | 0,303  |       |        |
|    | I128_EX | 460248,036 | 296,95 |      |      |       |        |       |        |
|    | I129_BE | 460252,100 | 297,21 |      |      |       |        |       |        |
|    | I130_AE | 460254,385 | 297,21 |      |      |       | -0,258 |       |        |
| 27 | I131_AD | 460244,365 | 296,42 | 8,23 | 4,14 | -4,10 |        | 7,59% | 6,14%  |
|    | I132_BD | 460246,019 | 296,54 |      |      |       | 0,314  |       |        |
|    | I133_EX | 460250,154 | 296,86 |      |      |       |        |       |        |

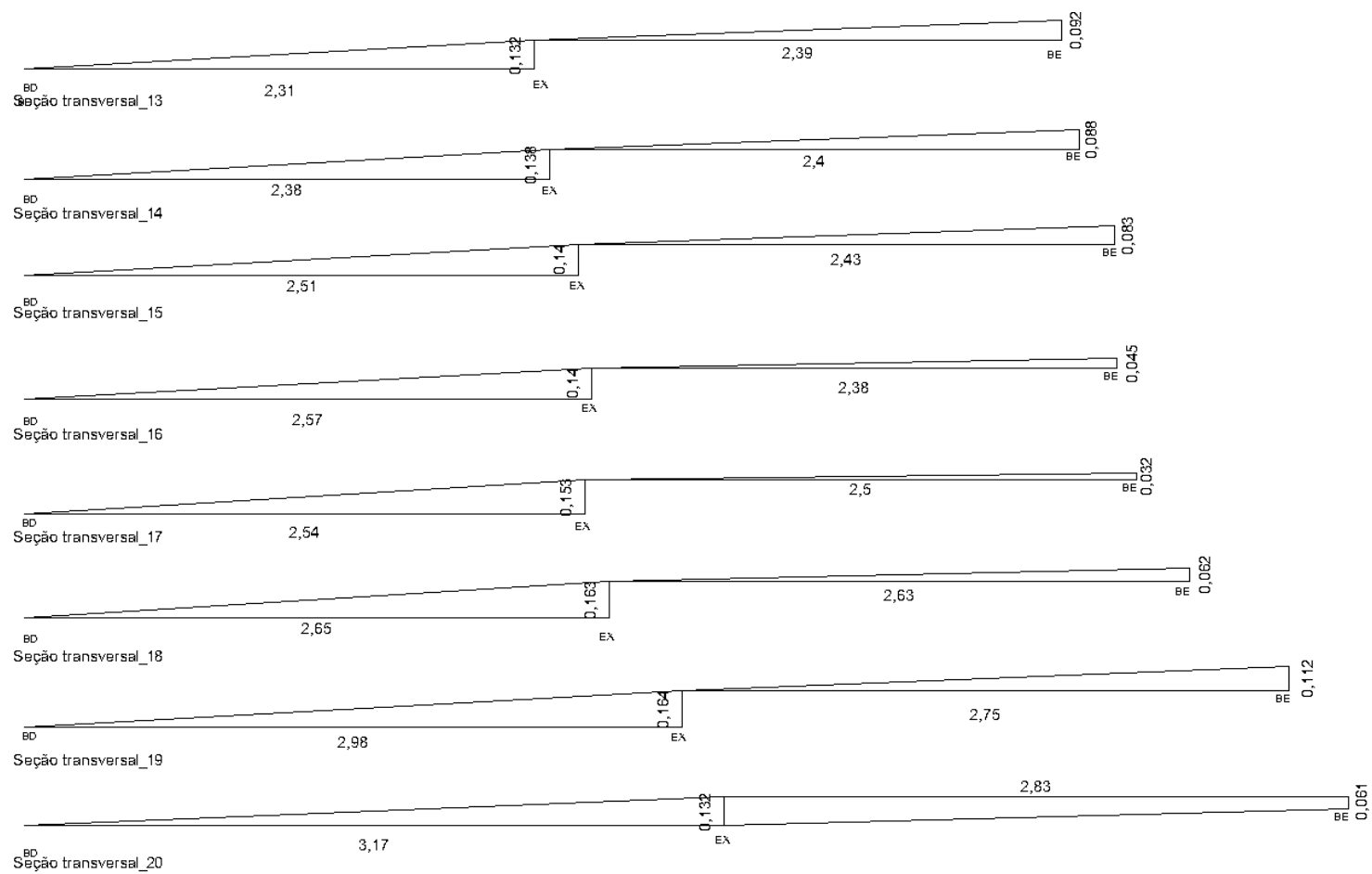
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
|----|---------|------------|--------|------|------|-------|--------|-------|-------|
|    | I134_BE | 460254,253 | 297,11 |      |      |       |        |       |       |
|    | I135_AE | 460256,451 | 297,12 |      |      |       |        |       |       |
| 28 | I136_AD | 460246,090 | 296,30 | 8,65 | 4,26 | -4,40 | -0,252 | 7,56% | 5,30% |
|    | I137_BD | 460247,668 | 296,45 |      |      |       | 0,322  |       |       |
|    | I138_EX | 460251,924 | 296,77 |      |      |       |        |       |       |
|    | I139_BE | 460256,320 | 297,01 |      |      |       |        |       |       |
|    | I140_AE | 460258,519 | 297,03 |      |      |       | -0,233 |       |       |
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
| 29 | I141_AD | 460247,525 | 296,23 | 8,42 | 4,27 | -4,15 | 0,305  | 7,15% | 5,98% |
|    | I142_BD | 460249,044 | 296,37 |      |      |       |        |       |       |
|    | I143_EX | 460253,314 | 296,67 |      |      |       |        |       |       |
|    | I144_BE | 460257,464 | 296,92 |      |      |       |        |       |       |
|    | I145_AE | 460259,710 | 296,93 |      |      |       | -0,248 |       |       |
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
| 30 | I146_AD | 460248,596 | 296,12 | 8,47 | 4,36 | -4,11 | 0,319  | 7,32% | 6,58% |
|    | I147_BD | 460250,062 | 296,26 |      |      |       |        |       |       |
|    | I148_EX | 460254,418 | 296,58 |      |      |       |        |       |       |
|    | I149_BE | 460258,532 | 296,85 |      |      |       |        |       |       |
|    | I150_AE | 460260,895 | 296,85 |      |      |       | -0,271 |       |       |
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
| 31 | I151_AD | 460249,131 | 296,03 | 8,72 | 4,26 | -4,46 | 0,333  | 7,83% | 6,08% |
|    | I152_BD | 460250,880 | 296,16 |      |      |       |        |       |       |
|    | I153_EX | 460255,138 | 296,49 |      |      |       |        |       |       |
|    | I154_BE | 460259,598 | 296,76 |      |      |       |        |       |       |
|    | I155_AE | 460262,162 | 296,78 |      |      |       | -0,271 |       |       |
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
| 32 | I156_AD | 460249,441 | 295,91 | 8,90 | 4,32 | -4,58 | 0,356  | 8,23% | 5,51% |
|    | I157_BD | 460251,346 | 296,05 |      |      |       |        |       |       |
|    | I158_EX | 460255,664 | 296,41 |      |      |       |        |       |       |
|    | I159_BE | 460260,243 | 296,66 |      |      |       |        |       |       |
|    | I160_AE | 460262,753 | 296,67 |      |      |       | -0,252 |       |       |
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
| 33 | I161_AD | 460249,510 | 295,83 | 8,80 | 4,44 | -4,36 | 0,346  | 7,80% | 5,91% |
|    | I162_BD | 460251,505 | 295,97 |      |      |       |        |       |       |
|    | I163_EX | 460255,944 | 296,32 |      |      |       |        |       |       |
|    | I164_BE | 460260,307 | 296,58 |      |      |       |        |       |       |
|    | I165_AE | 460263,025 | 296,58 |      |      |       | -0,258 |       |       |
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
| 34 | I166_AD | 460249,326 | 295,71 | 8,69 | 4,42 | -4,27 | 0,338  | 7,64% | 5,87% |
|    | I167_BD | 460251,385 | 295,89 |      |      |       |        |       |       |
|    | I168_EX | 460255,810 | 296,23 |      |      |       |        |       |       |
|    | I169_BE | 460260,076 | 296,48 |      |      |       |        |       |       |
|    | I170_AE | 460262,734 | 296,50 |      |      |       | -0,250 |       |       |
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
| 35 | I171_AD | 460249,082 | 295,65 | 8,63 | 4,35 | -4,28 | 0,329  | 7,56% | 5,83% |
|    | I172_BD | 460250,913 | 295,81 |      |      |       |        |       |       |
|    | I173_EX | 460255,265 | 296,14 |      |      |       |        |       |       |
|    | I174_BE | 460259,547 | 296,39 |      |      |       |        |       |       |
|    | I175_AE | 460262,218 | 296,43 |      |      |       | -0,249 |       |       |
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
| 36 | I176_AD | 460248,378 | 295,62 | 8,42 | 4,20 | -4,21 | 0,312  | 7,42% | 5,94% |
|    | I177_BD | 460250,191 | 295,74 |      |      |       |        |       |       |
|    | I178_EX | 460254,394 | 296,05 |      |      |       |        |       |       |
|    | I179_BE | 460258,608 | 296,30 |      |      |       |        |       |       |
|    | I180_AE | 460261,372 | 296,32 |      |      |       | -0,250 |       |       |
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |

|    |         |            |        |      |      |       |        |       |       |
|----|---------|------------|--------|------|------|-------|--------|-------|-------|
| 37 | I181_AD | 460247,183 | 295,52 | 8,17 | 4,06 | -4,11 |        | 7,18% | 6,24% |
|    | I182_BD | 460249,139 | 295,66 |      |      |       | 0,292  |       |       |
|    | I183_EX | 460253,199 | 295,95 |      |      |       |        |       |       |
|    | I184_BE | 460257,309 | 296,21 |      |      |       |        |       |       |
|    | I185_AE | 460260,050 | 296,24 |      |      |       | -0,256 |       |       |
| 38 | I186_AD | 460245,787 | 295,44 | 8,06 | 3,96 | -4,10 |        | 7,47% | 6,14% |
|    | I187_BD | 460247,792 | 295,58 |      |      |       | 0,296  |       |       |
|    | I188_EX | 460251,751 | 295,88 |      |      |       |        |       |       |
|    | I189_BE | 460255,855 | 296,13 |      |      |       |        |       |       |
|    | I190_AE | 460258,561 | 296,17 |      |      |       | -0,252 |       |       |
| 39 | I191_AD | 460244,263 | 295,34 | 8,04 | 4,03 | -4,01 |        | 8,12% | 6,58% |
|    | I192_BD | 460246,185 | 295,48 |      |      |       | 0,327  |       |       |
|    | I193_EX | 460250,212 | 295,80 |      |      |       |        |       |       |
|    | I194_BE | 460254,225 | 296,07 |      |      |       |        |       |       |
|    | I195_AE | 460256,944 | 296,08 |      |      |       | -0,264 |       |       |
| 40 | I196_AD | 460242,414 | 295,26 | 7,75 | 3,92 | -3,83 |        | 7,92% | 6,45% |
|    | I197_BD | 460244,443 | 295,42 |      |      |       | 0,310  |       |       |
|    | I198_EX | 460248,360 | 295,73 |      |      |       |        |       |       |
|    | I199_BE | 460252,193 | 295,98 |      |      |       |        |       |       |
|    | I200_AE | 460254,574 | 296,01 |      |      |       | -0,247 |       |       |
| 41 | I201_AD | 460239,684 | 295,19 | 7,62 | 3,72 | -3,90 |        | 8,28% | 6,40% |
|    | I202_BD | 460241,893 | 295,33 |      |      |       | 0,308  |       |       |
|    | I203_EX | 460245,611 | 295,64 |      |      |       |        |       |       |
|    | I204_BE | 460249,514 | 295,88 |      |      |       |        |       |       |
|    | I205_AE | 460251,596 | 295,91 |      |      |       | -0,250 |       |       |
| 42 | I206_AD | 460237,444 | 295,15 | 7,15 | 3,52 | -3,62 |        | 8,44% | 6,41% |
|    | I207_BD | 460239,951 | 295,27 |      |      |       | 0,297  |       |       |
|    | I208_EX | 460243,473 | 295,57 |      |      |       |        |       |       |
|    | I209_BE | 460247,097 | 295,80 |      |      |       |        |       |       |
|    | I210_AE | 460248,630 | 295,80 |      |      |       | -0,232 |       |       |
| 43 | I211_AD | 460235,660 | 295,13 | 6,79 | 3,35 | -3,44 |        | 7,73% | 6,20% |
|    | I212_BD | 460237,295 | 295,22 |      |      |       | 0,259  |       |       |
|    | I213_EX | 460240,645 | 295,48 |      |      |       |        |       |       |
|    | I214_BE | 460244,081 | 295,69 |      |      |       |        |       |       |
|    | I216_AE | 460245,807 | 295,68 |      |      |       | -0,213 |       |       |
| 44 | I217_AD | 460233,027 | 295,10 | 6,35 | 3,25 | -3,09 |        | 6,69% | 5,75% |
|    | I218_BD | 460234,422 | 295,18 |      |      |       | 0,218  |       |       |
|    | I219_EX | 460237,676 | 295,40 |      |      |       |        |       |       |
|    | I220_BE | 460240,770 | 295,58 |      |      |       |        |       |       |
|    | I221_AE | 460242,694 | 295,56 |      |      |       | -0,178 |       |       |
| 45 | I222_BD | 460231,443 | 295,14 | 5,93 | 3,06 | -2,87 | 0,183  | 5,96% | 5,74% |
|    | I223_EX | 460234,504 | 295,32 |      |      |       |        |       |       |
|    | I224_BE | 460237,372 | 295,49 |      |      |       |        |       |       |
|    | I225_AE | 460239,433 | 295,46 |      |      |       | -0,165 |       |       |
| 46 | I226_AD | 460227,125 | 295,00 | 5,78 | 2,98 | -2,81 |        | 5,50% | 4,19% |
|    | I227_BD | 460228,302 | 295,10 |      |      |       | 0,164  |       |       |
|    | I228_EX | 460231,278 | 295,26 |      |      |       |        |       |       |

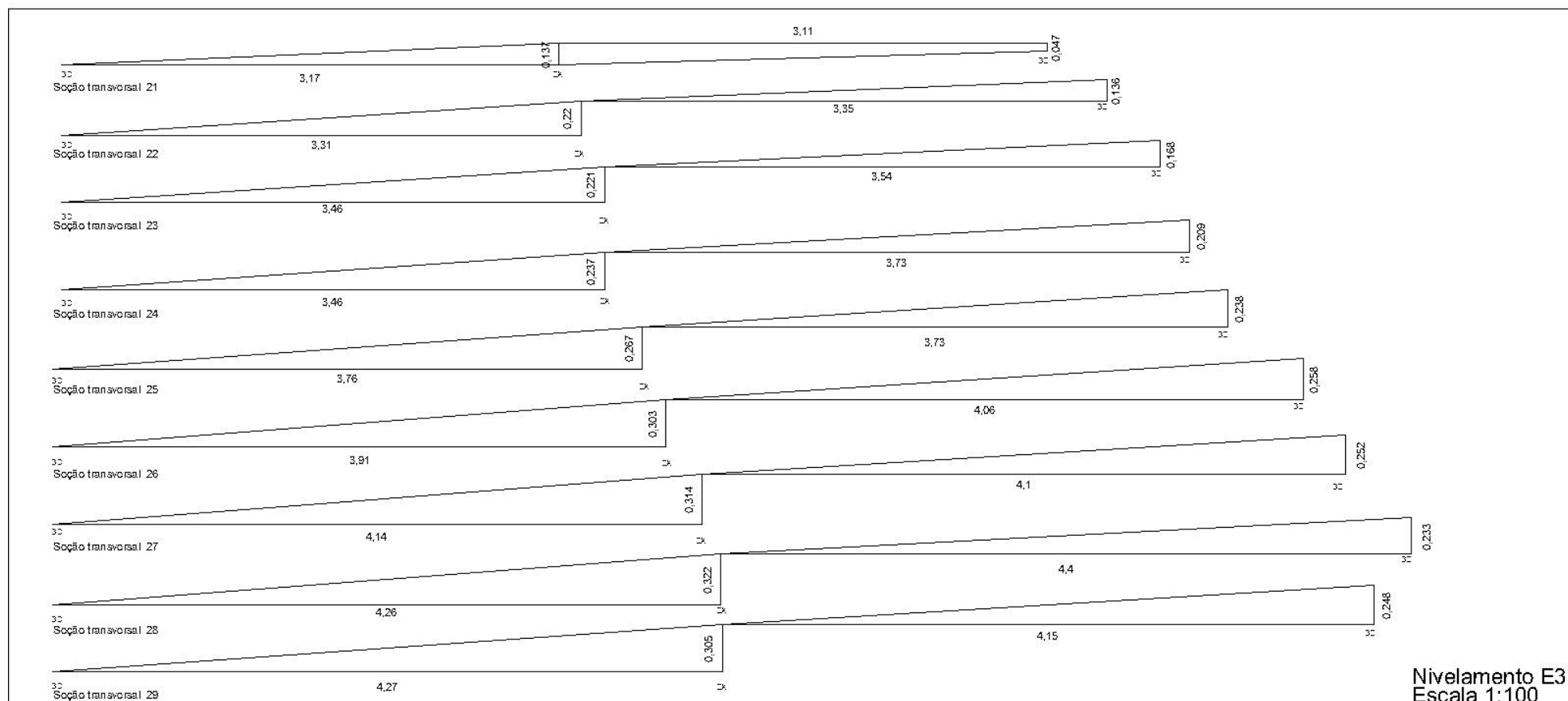
|    |         |            |        |      |      |       |        |       |        |
|----|---------|------------|--------|------|------|-------|--------|-------|--------|
|    | I229_BE | 460234,087 | 295,38 |      |      |       | -0,118 |       |        |
|    | I230_AE | 460235,978 | 295,35 |      |      |       |        |       |        |
| 47 | I231_AD | 460224,021 | 294,98 | 5,39 | 2,87 | -2,52 | 0,121  | 4,21% | 2,99%  |
|    | I232_BD | 460225,025 | 295,08 |      |      |       |        |       |        |
|    | I233_EX | 460227,896 | 295,20 |      |      |       |        |       |        |
|    | I234_BE | 460230,413 | 295,27 |      |      |       |        |       |        |
|    | I235_AE | 460232,088 | 295,21 |      |      |       | -0,075 |       |        |
| 48 | I236_AD | 460220,740 | 294,95 | 5,16 | 2,83 | -2,33 | 0,083  | 2,93% | 0,84%  |
|    | I237_BD | 460221,770 | 295,05 |      |      |       |        |       |        |
|    | I238_EX | 460224,605 | 295,14 |      |      |       |        |       |        |
|    | I239_BE | 460226,931 | 295,16 |      |      |       |        |       |        |
|    | I240_AE | 460228,560 | 295,08 |      |      |       | -0,020 |       |        |
| 49 | I241_AD | 460217,322 | 294,90 | 4,87 | 2,65 | -2,22 | 0,065  | 2,45% | -1,21% |
|    | I242_BD | 460218,463 | 295,01 |      |      |       |        |       |        |
|    | I243_EX | 460221,110 | 295,07 |      |      |       |        |       |        |
|    | I244_BE | 460223,334 | 295,04 |      |      |       |        |       |        |
|    | I245_AE | 460224,893 | 294,93 |      |      |       | 0,027  |       |        |
| 50 | I246_AD | 460213,966 | 294,73 | 4,84 | 2,61 | -2,23 | 0,041  | 1,58% | -3,90% |
|    | I247_BD | 460214,924 | 294,83 |      |      |       |        |       |        |
|    | I248_EX | 460217,534 | 294,87 |      |      |       |        |       |        |
|    | I249_BE | 460219,761 | 294,78 |      |      |       |        |       |        |
|    | I250_AE | 460221,035 | 294,66 |      |      |       | 0,087  |       |        |

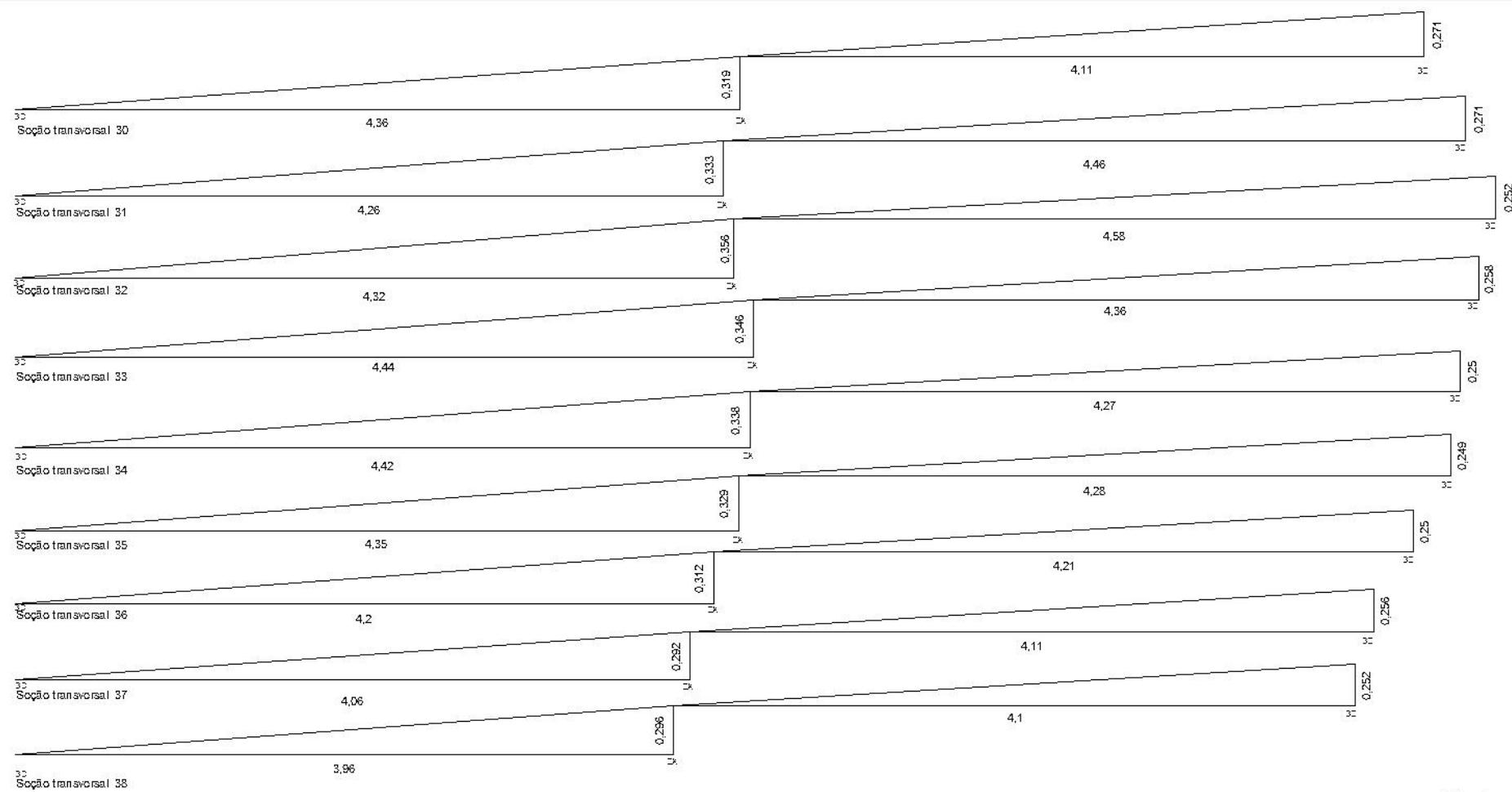
## APÊNDICE D – SEÇÕES TRANSVERSAIS EM PLANTA DA SUPERELEVAÇÃO NO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.



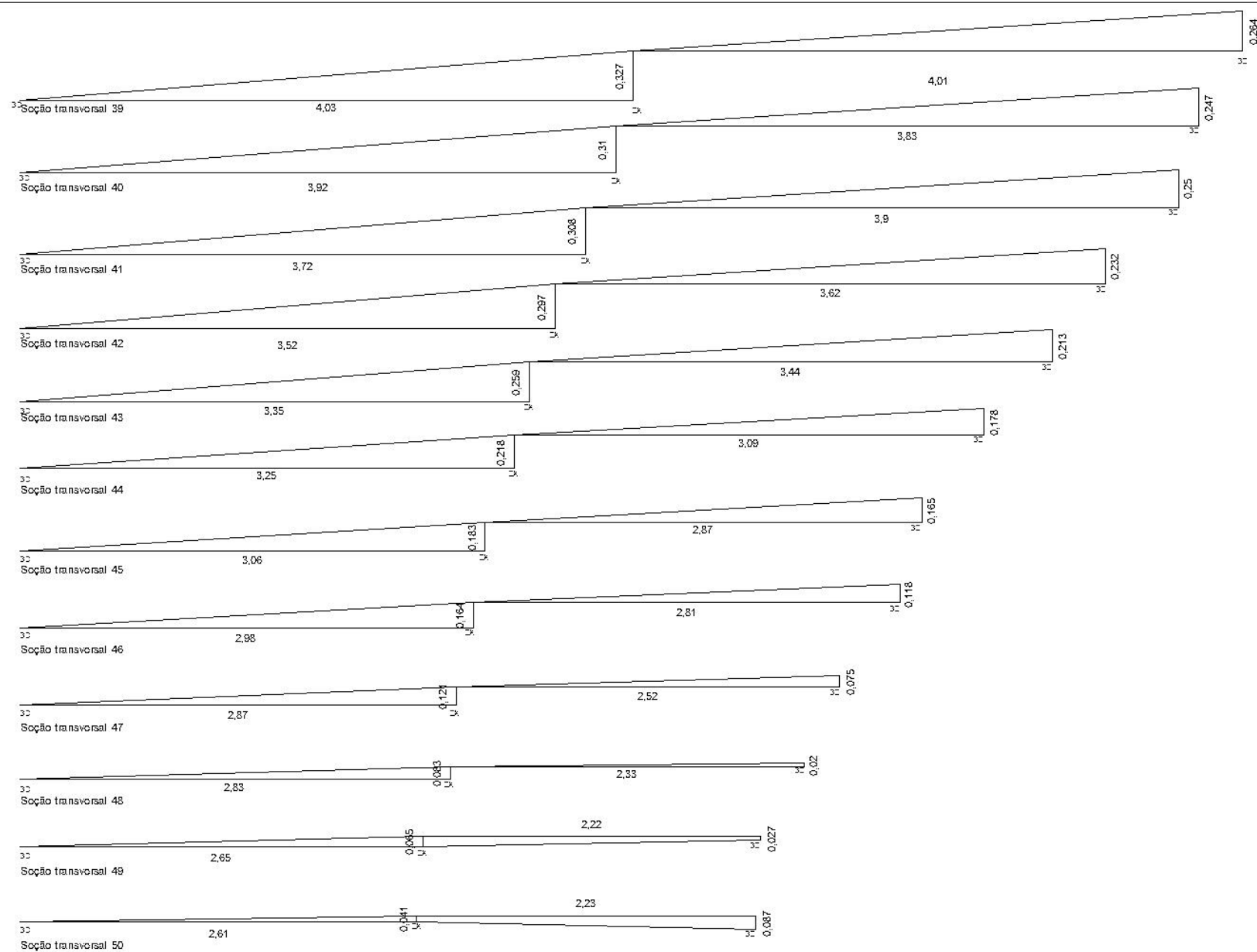


Nivelamento E2  
Escala 1:100





Nivelamento E4  
Escala 1:100



**APÊNDICE E – TABELA DE CÁLCULO DA SUPERELEVÇÃO – MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE.**

| Nº. seções | Pontos visados | E(m)       | Altitude DSM (m) | Dist. total AD -AC (m) | Dist. EX - BD (m) | Dist. EX - BE(m) | Desnível BD//BE (m) | Superele-vação bordo Int.(%) | Superele-vação bordo Ext. (%) |
|------------|----------------|------------|------------------|------------------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1          | I01_AD         | 460154,370 | 427,007          | 6,61                   | 2,11              | -2,15            |                     | 8,98%                        | 1,60%                         |
|            | I02_BD         | 460155,740 | 427,143          |                        |                   |                  | 0,190               |                              |                               |
|            | I03_EX         | 460157,850 | 427,332          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I04_BE         | 460160,000 | 427,367          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I05_AE         | 460160,980 | 427,361          |                        |                   |                  | -0,034              |                              |                               |
| 2          | I06_AD         | 460158,270 | 426,710          | 6,82                   | 2,23              | -2,04            |                     | 8,28%                        | 2,75%                         |
|            | I07_BD         | 460159,650 | 426,834          |                        |                   |                  | 0,185               |                              |                               |
|            | I08_EX         | 460161,880 | 427,019          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I09_BE         | 460163,920 | 427,075          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I10_AE         | 460165,090 | 426,974          |                        |                   |                  | -0,056              |                              |                               |
| 3          | I11_AD         | 460162,220 | 426,437          | 6,77                   | 2,14              | -2,05            |                     | 8,22%                        | 2,24%                         |
|            | I12_BD         | 460163,634 | 426,556          |                        |                   |                  | 0,176               |                              |                               |
|            | I13_EX         | 460165,777 | 426,732          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I14_BE         | 460167,827 | 426,778          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I15_AE         | 460168,990 | 426,354          |                        |                   |                  | -0,046              |                              |                               |
| 4          | I16_AD         | 460166,130 | 426,182          | 6,95                   | 2,23              | -2,04            |                     | 8,73%                        | 0,47%                         |
|            | I17_BD         | 460167,569 | 426,276          |                        |                   |                  | 0,194               |                              |                               |
|            | I18_EX         | 460169,796 | 426,470          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I19_BE         | 460171,838 | 426,480          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I20_AE         | 460173,080 | 426,388          |                        |                   |                  | -0,010              |                              |                               |
| 5          | I21_AD         | 460169,998 | 425,852          | 7,22                   | 2,26              | -1,95            |                     | 7,88%                        | 1,69%                         |
|            | I22_BD         | 460171,697 | 425,998          |                        |                   |                  | 0,178               |                              |                               |
|            | I23_EX         | 460173,960 | 426,177          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I24_BE         | 460175,913 | 426,210          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I25_AE         | 460177,216 | 426,087          |                        |                   |                  | -0,033              |                              |                               |
| 6          | I26_AD         | 460173,800 | 425,630          | 7,14                   | 2,29              | -2,26            |                     | 7,04%                        | -0,59%                        |
|            | I27_BD         | 460175,340 | 425,773          |                        |                   |                  | 0,161               |                              |                               |
|            | I28_EX         | 460177,630 | 425,935          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I29_BE         | 460179,890 | 425,921          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I30_AE         | 460180,940 | 425,925          |                        |                   |                  | 0,013               |                              |                               |
| 7          | I31_AD         | 460177,608 | 425,385          | 6,81                   | 1,98              | -2,11            |                     | 8,03%                        | 1,18%                         |
|            | I32_BD         | 460179,357 | 425,510          |                        |                   |                  | 0,159               |                              |                               |
|            | I33_EX         | 460181,338 | 425,669          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I34_BE         | 460183,452 | 425,694          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I35_AE         | 460184,415 | 425,744          |                        |                   |                  | -0,025              |                              |                               |
| 8          | I36_AD         | 460181,496 | 425,177          | 6,78                   | 2,13              | -2,18            |                     | 5,91%                        | 1,33%                         |
|            | I37_BD         | 460182,976 | 425,295          |                        |                   |                  | 0,126               |                              |                               |
|            | I38_EX         | 460185,109 | 425,421          |                        |                   |                  |                     |                              |                               |
|            | I39_BE         | 460187,287 | 425,450          |                        |                   |                  | -0,029              |                              |                               |

|    |        |            |         |      |      |       |        |       |       |
|----|--------|------------|---------|------|------|-------|--------|-------|-------|
|    | I40_AE | 460188,271 | 425,505 |      |      |       |        |       |       |
| 9  | I41_AD | 460185,259 | 424,973 | 6,98 | 2,27 | -2,19 |        | 5,28% | 0,50% |
|    | I42_BD | 460186,932 | 425,059 |      |      |       | 0,120  |       |       |
|    | I43_EX | 460189,204 | 425,179 |      |      |       |        |       |       |
|    | I44_BE | 460191,397 | 425,190 |      |      |       |        |       |       |
|    | I45_AE | 460192,244 | 425,174 |      |      |       | -0,011 |       |       |
| 10 | I46_AD | 460189,140 | 424,724 | 7,18 | 2,28 | -2,37 |        | 5,01% | 1,35% |
|    | I47_BD | 460190,793 | 424,857 |      |      |       | 0,114  |       |       |
|    | I48_EX | 460193,070 | 424,971 |      |      |       |        |       |       |
|    | I49_BE | 460195,439 | 425,003 |      |      |       |        |       |       |
|    | I50_AE | 460196,324 | 424,987 |      |      |       | -0,032 |       |       |
| 11 | I51_AD | 460192,959 | 424,540 | 7,02 | 2,34 | -2,27 |        | 5,10% | 2,74% |
|    | I52_BD | 460194,523 | 424,665 |      |      |       | 0,119  |       |       |
|    | I53_EX | 460196,858 | 424,784 |      |      |       |        |       |       |
|    | I54_BE | 460199,124 | 424,846 |      |      |       |        |       |       |
|    | I55_AE | 460199,980 | 424,815 |      |      |       | -0,062 |       |       |
| 12 | I56_AD | 460196,764 | 424,315 | 7,19 | 2,36 | -2,38 |        | 5,38% | 2,77% |
|    | I57_BD | 460198,318 | 424,479 |      |      |       | 0,127  |       |       |
|    | I58_EX | 460200,678 | 424,606 |      |      |       |        |       |       |
|    | I59_BE | 460203,059 | 424,672 |      |      |       |        |       |       |
|    | I60_AE | 460203,950 | 424,642 |      |      |       | -0,066 |       |       |
| 13 | I61_AD | 460200,463 | 424,183 | 7,17 | 2,31 | -2,39 |        | 5,88% | 3,34% |
|    | I62_BD | 460202,063 | 424,304 |      |      |       | 0,136  |       |       |
|    | I63_EX | 460204,374 | 424,440 |      |      |       |        |       |       |
|    | I64_BE | 460206,769 | 424,520 |      |      |       |        |       |       |
|    | I65_AE | 460207,631 | 424,483 |      |      |       | -0,080 |       |       |
| 14 | I66_AD | 460204,143 | 424,017 | 7,50 | 2,38 | -2,40 |        | 6,39% | 3,38% |
|    | I67_BD | 460205,874 | 424,145 |      |      |       | 0,152  |       |       |
|    | I68_EX | 460208,252 | 424,297 |      |      |       |        |       |       |
|    | I69_BE | 460210,649 | 424,378 |      |      |       |        |       |       |
|    | I70_AE | 460211,645 | 424,330 |      |      |       | -0,081 |       |       |
| 15 | I71_AD | 460207,804 | 423,911 | 7,75 | 2,51 | -2,43 |        | 6,23% | 2,14% |
|    | I72_BD | 460209,482 | 424,003 |      |      |       | 0,156  |       |       |
|    | I73_EX | 460211,988 | 424,159 |      |      |       |        |       |       |
|    | I74_BE | 460214,418 | 424,211 |      |      |       |        |       |       |
|    | I76_AE | 460215,557 | 424,253 |      |      |       | -0,052 |       |       |
| 16 | I77_AD | 460211,520 | 423,709 | 7,75 | 2,57 | -2,38 |        | 6,26% | 1,68% |
|    | I78_BD | 460213,133 | 423,863 |      |      |       | 0,161  |       |       |
|    | I79_EX | 460215,705 | 424,024 |      |      |       |        |       |       |
|    | I80_BE | 460218,082 | 424,064 |      |      |       |        |       |       |
|    | I81_AE | 460219,266 | 424,042 |      |      |       | -0,040 |       |       |
| 17 | I82_AD | 460215,145 | 423,558 | 7,79 | 2,54 | -2,50 |        | 6,41% | 1,24% |
|    | I83_BD | 460216,798 | 423,720 |      |      |       | 0,163  |       |       |
|    | I84_EX | 460219,340 | 423,883 |      |      |       |        |       |       |
|    | I85_BE | 460221,838 | 423,914 |      |      |       |        |       |       |
|    | I86_AE | 460222,939 | 423,892 |      |      |       | -0,031 |       |       |

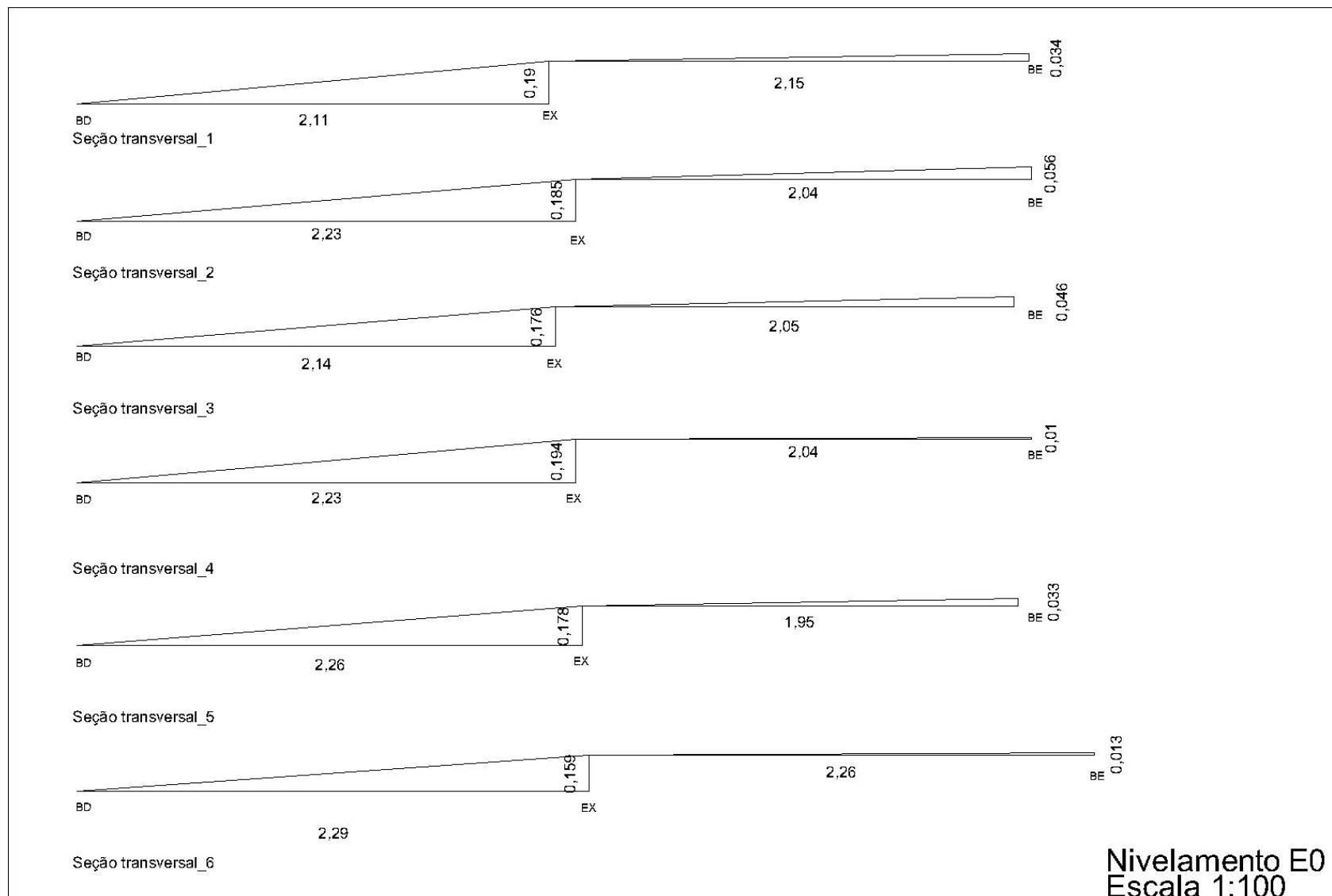
|    |         |            |         |       |      |       |        |       |       |
|----|---------|------------|---------|-------|------|-------|--------|-------|-------|
| 18 | I87_AD  | 460218,590 | 423,405 | 8,52  | 2,65 | -2,63 |        | 6,11% | 2,39% |
|    | I88_BD  | 460220,426 | 423,577 |       |      |       | 0,162  |       |       |
|    | I89_EX  | 460223,077 | 423,739 |       |      |       |        |       |       |
|    | I90_BE  | 460225,708 | 423,802 |       |      |       |        |       |       |
|    | I91_AE  | 460227,112 | 423,797 |       |      |       | -0,063 |       |       |
| 19 | I92_AD  | 460222,096 | 423,285 | 9,04  | 2,98 | -2,75 |        | 5,64% | 3,89% |
|    | I93_BD  | 460223,870 | 423,415 |       |      |       | 0,168  |       |       |
|    | I94_EX  | 460226,848 | 423,583 |       |      |       |        |       |       |
|    | I95_BE  | 460229,599 | 423,690 |       |      |       |        |       |       |
|    | I96_AE  | 460231,136 | 423,687 |       |      |       | -0,107 |       |       |
| 20 | I97_AD  | 460225,452 | 423,135 | 9,27  | 3,17 | -2,83 |        | 6,57% | 3,96% |
|    | I98_BD  | 460227,276 | 423,262 |       |      |       | 0,208  |       |       |
|    | I99_EX  | 460230,444 | 423,470 |       |      |       |        |       |       |
|    | I100_BE | 460233,271 | 423,582 |       |      |       |        |       |       |
|    | I101_AE | 460234,722 | 423,555 |       |      |       | -0,112 |       |       |
| 21 | I102_AD | 460228,742 | 422,944 | 9,33  | 3,17 | -3,11 |        | 7,18% | 3,92% |
|    | I103_BD | 460230,513 | 423,136 |       |      |       | 0,228  |       |       |
|    | I104_EX | 460233,687 | 423,364 |       |      |       |        |       |       |
|    | I105_BE | 460236,797 | 423,486 |       |      |       |        |       |       |
|    | I106_AE | 460238,068 | 423,456 |       |      |       | -0,122 |       |       |
| 22 | I107_BD | 460233,695 | 422,993 |       | 3,31 | -3,35 | 0,230  | 6,95% | 3,68% |
|    | I108_EX | 460237,003 | 423,223 |       |      |       |        |       |       |
|    | I109_BE | 460240,349 | 423,346 |       |      |       |        |       |       |
|    | I110_AE | 460242,246 | 423,361 |       |      |       | -0,123 |       |       |
| 23 | I111_AD | 460234,911 | 422,689 | 10,84 | 3,46 | -3,54 |        | 6,57% | 4,86% |
|    | I112_BD | 460236,660 | 422,854 |       |      |       | 0,227  |       |       |
|    | I113_EX | 460240,116 | 423,081 |       |      |       |        |       |       |
|    | I114_BE | 460243,658 | 423,253 |       |      |       |        |       |       |
|    | I115_AE | 460245,750 | 423,295 |       |      |       | -0,172 |       |       |
| 24 | I116_AD | 460237,587 | 422,538 | 10,46 | 3,46 | -3,73 |        | 7,23% | 6,55% |
|    | I117_BD | 460239,414 | 422,713 |       |      |       | 0,250  |       |       |
|    | I118_EX | 460242,871 | 422,963 |       |      |       |        |       |       |
|    | I119_BE | 460246,598 | 423,207 |       |      |       |        |       |       |
|    | I120_AE | 460248,047 | 423,193 |       |      |       | -0,244 |       |       |
| 25 | I121_AD | 460240,060 | 422,463 | 11,50 | 3,76 | -3,73 |        | 7,45% | 6,80% |
|    | I122_BD | 460242,006 | 422,574 |       |      |       | 0,280  |       |       |
|    | I123_EX | 460245,766 | 422,854 |       |      |       |        |       |       |
|    | I124_BE | 460249,500 | 423,108 |       |      |       |        |       |       |
|    | I125_AE | 460251,564 | 423,091 |       |      |       | -0,254 |       |       |
| 26 | I126_AD | 460242,311 | 422,327 | 12,07 | 3,91 | -4,06 |        | 8,00% | 6,32% |
|    | I127_BD | 460244,125 | 422,451 |       |      |       | 0,313  |       |       |
|    | I128_EX | 460248,036 | 422,764 |       |      |       |        |       |       |
|    | I129_BE | 460252,100 | 423,021 |       |      |       |        |       |       |
|    | I130_AE | 460254,385 | 423,018 |       |      |       | -0,257 |       |       |
| 27 | I131_AD | 460244,365 | 422,228 | 12,09 | 4,14 | -4,10 |        | 7,98% | 5,46% |
|    | I132_BD | 460246,019 | 422,350 |       |      |       | 0,330  |       |       |

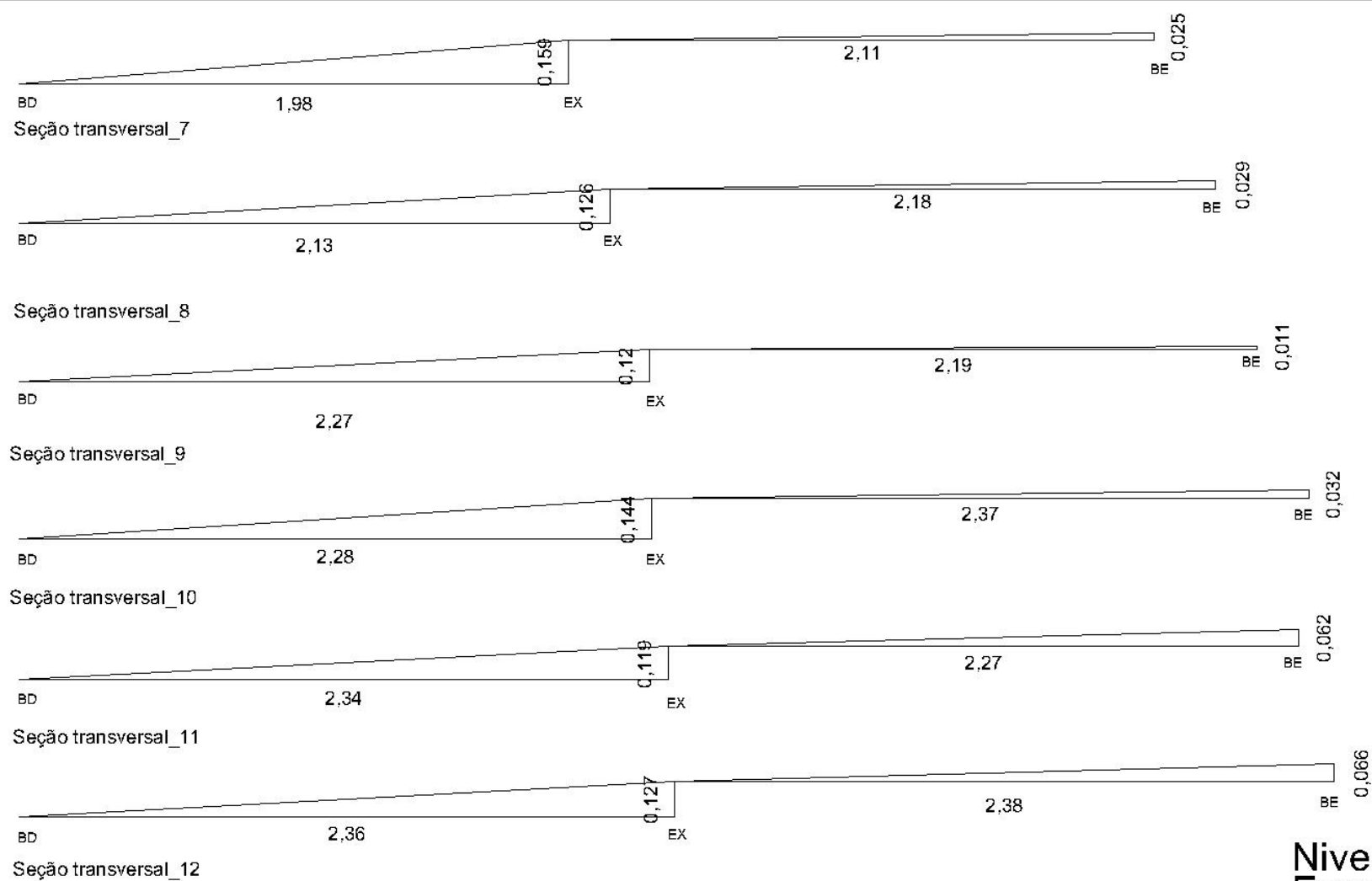
|    |         |            |         |       |      |       |        |       |       |
|----|---------|------------|---------|-------|------|-------|--------|-------|-------|
|    | I133_EX | 460250,154 | 422,680 |       |      |       |        |       |       |
|    | I134_BE | 460254,253 | 422,904 |       |      |       |        |       |       |
|    | I135_AE | 460256,451 | 422,993 |       |      |       | -0,224 |       |       |
| 28 | I136_AD | 460246,090 | 422,126 | 12,43 | 4,26 | -4,40 | 0,318  | 7,47% | 5,14% |
|    | I137_BD | 460247,668 | 422,262 |       |      |       |        |       |       |
|    | I138_EX | 460251,924 | 422,580 |       |      |       |        |       |       |
|    | I139_BE | 460256,320 | 422,806 |       |      |       |        |       |       |
|    | I140_AE | 460258,519 | 422,846 |       |      |       | -0,226 |       |       |
| 29 | I141_AD | 460247,525 | 422,063 | 12,18 | 4,27 | -4,15 | 0,302  | 7,07% | 6,10% |
|    | I142_BD | 460249,044 | 422,178 |       |      |       |        |       |       |
|    | I143_EX | 460253,314 | 422,480 |       |      |       |        |       |       |
|    | I144_BE | 460257,464 | 422,733 |       |      |       |        |       |       |
|    | I145_AE | 460259,710 | 422,771 |       |      |       | -0,253 |       |       |
| 30 | I146_AD | 460248,596 | 421,958 | 12,30 | 4,36 | -4,11 | 0,318  | 7,30% | 6,27% |
|    | I147_BD | 460250,062 | 422,078 |       |      |       |        |       |       |
|    | I148_EX | 460254,418 | 422,396 |       |      |       |        |       |       |
|    | I149_BE | 460258,532 | 422,654 |       |      |       |        |       |       |
|    | I150_AE | 460260,895 | 422,685 |       |      |       | -0,258 |       |       |
| 31 | I151_AD | 460249,131 | 421,839 | 13,03 | 4,26 | -4,46 | 0,336  | 7,89% | 6,08% |
|    | I152_BD | 460250,880 | 421,961 |       |      |       |        |       |       |
|    | I153_EX | 460255,138 | 422,297 |       |      |       |        |       |       |
|    | I154_BE | 460259,598 | 422,568 |       |      |       |        |       |       |
|    | I155_AE | 460262,162 | 422,628 |       |      |       | -0,271 |       |       |
| 32 | I156_AD | 460249,441 | 421,717 | 13,31 | 4,32 | -4,58 | 0,366  | 8,48% | 5,35% |
|    | I157_BD | 460251,346 | 421,850 |       |      |       |        |       |       |
|    | I158_EX | 460255,664 | 422,216 |       |      |       |        |       |       |
|    | I159_BE | 460260,243 | 422,461 |       |      |       |        |       |       |
|    | I160_AE | 460262,753 | 422,501 |       |      |       | -0,245 |       |       |
| 33 | I161_AD | 460249,510 | 421,686 | 13,52 | 4,44 | -4,36 | 0,345  | 7,77% | 6,05% |
|    | I162_BD | 460251,505 | 421,775 |       |      |       |        |       |       |
|    | I163_EX | 460255,944 | 422,120 |       |      |       |        |       |       |
|    | I164_BE | 460260,307 | 422,384 |       |      |       |        |       |       |
|    | I165_AE | 460263,025 | 422,377 |       |      |       | -0,264 |       |       |
| 34 | I166_AD | 460249,326 | 421,561 | 13,41 | 4,42 | -4,27 | 0,341  | 7,71% | 5,98% |
|    | I167_BD | 460251,385 | 421,683 |       |      |       |        |       |       |
|    | I168_EX | 460255,810 | 422,024 |       |      |       |        |       |       |
|    | I169_BE | 460260,076 | 422,279 |       |      |       |        |       |       |
|    | I170_AE | 460262,734 | 422,355 |       |      |       | -0,255 |       |       |
| 35 | I171_AD | 460249,082 | 421,440 | 13,14 | 4,35 | -4,28 | 0,352  | 8,09% | 5,39% |
|    | I172_BD | 460250,913 | 421,592 |       |      |       |        |       |       |
|    | I173_EX | 460255,265 | 421,944 |       |      |       |        |       |       |
|    | I174_BE | 460259,547 | 422,175 |       |      |       |        |       |       |
|    | I175_AE | 460262,218 | 422,315 |       |      |       | -0,231 |       |       |
| 36 | I176_AD | 460248,378 | 421,440 | 12,99 | 4,20 | -4,21 | 0,318  | 7,57% | 5,29% |
|    | I177_BD | 460250,191 | 421,548 |       |      |       |        |       |       |
|    | I178_EX | 460254,394 | 421,866 |       |      |       |        |       |       |

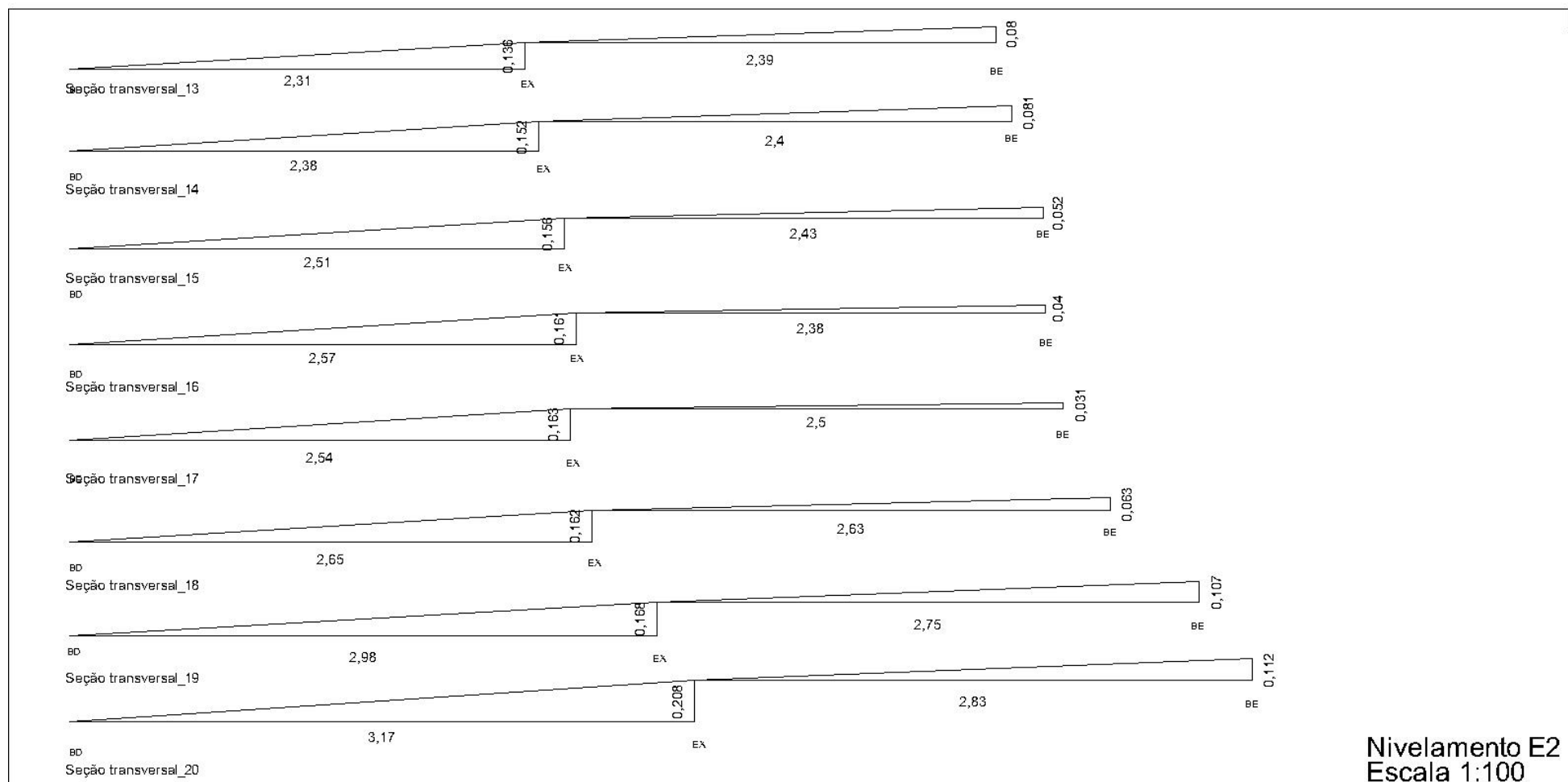
|    |         |            |         |       |      |       |        |       |       |
|----|---------|------------|---------|-------|------|-------|--------|-------|-------|
|    | I179_BE | 460258,608 | 422,089 |       |      |       |        |       |       |
|    | I180_AE | 460261,372 | 422,132 |       |      |       | -0,223 |       |       |
| 37 | I181_AD | 460247,183 | 421,353 | 12,87 | 4,06 | -4,11 |        | 7,27% | 5,89% |
|    | I182_BD | 460249,139 | 421,466 |       |      |       | 0,295  |       |       |
|    | I183_EX | 460253,199 | 421,761 |       |      |       |        |       |       |
|    | I184_BE | 460257,309 | 422,003 |       |      |       |        |       |       |
|    | I185_AE | 460260,050 | 422,131 |       |      |       | -0,242 |       |       |
| 38 | I186_AD | 460245,787 | 421,256 | 12,77 | 3,96 | -4,10 |        | 7,05% | 5,85% |
|    | I187_BD | 460247,792 | 421,401 |       |      |       | 0,279  |       |       |
|    | I188_EX | 460251,751 | 421,680 |       |      |       |        |       |       |
|    | I189_BE | 460255,855 | 421,920 |       |      |       |        |       |       |
|    | I190_AE | 460258,561 | 421,955 |       |      |       | -0,240 |       |       |
| 39 | I191_AD | 460244,263 | 421,199 | 12,68 | 4,03 | -4,01 |        | 7,80% | 6,03% |
|    | I192_BD | 460246,185 | 421,305 |       |      |       | 0,314  |       |       |
|    | I193_EX | 460250,212 | 421,619 |       |      |       |        |       |       |
|    | I194_BE | 460254,225 | 421,861 |       |      |       |        |       |       |
|    | I195_AE | 460256,944 | 421,887 |       |      |       | -0,242 |       |       |
| 40 | I196_AD | 460242,414 | 421,103 | 12,16 | 3,92 | -3,83 |        | 7,76% | 6,84% |
|    | I197_BD | 460244,443 | 421,247 |       |      |       | 0,304  |       |       |
|    | I198_EX | 460248,360 | 421,551 |       |      |       |        |       |       |
|    | I199_BE | 460252,193 | 421,813 |       |      |       |        |       |       |
|    | I200_AE | 460254,574 | 421,841 |       |      |       | -0,262 |       |       |
| 41 | I201_AD | 460239,684 | 421,047 | 11,91 | 3,72 | -3,90 |        | 8,61% | 6,20% |
|    | I202_BD | 460241,893 | 421,131 |       |      |       | 0,320  |       |       |
|    | I203_EX | 460245,611 | 421,451 |       |      |       |        |       |       |
|    | I204_BE | 460249,514 | 421,693 |       |      |       |        |       |       |
|    | I205_AE | 460251,596 | 421,986 |       |      |       | -0,242 |       |       |
| 42 | I206_AD | 460237,444 | 421,005 | 11,19 | 3,52 | -3,62 |        | 8,72% | 6,76% |
|    | I207_BD | 460239,951 | 421,091 |       |      |       | 0,307  |       |       |
|    | I208_EX | 460243,473 | 421,398 |       |      |       |        |       |       |
|    | I209_BE | 460247,097 | 421,643 |       |      |       |        |       |       |
|    | I210_AE | 460248,630 | 421,647 |       |      |       | -0,245 |       |       |
| 43 | I211_AD | 460235,660 | 420,979 | 10,15 | 3,35 | -3,44 |        | 7,73% | 6,61% |
|    | I212_BD | 460237,295 | 421,050 |       |      |       | 0,259  |       |       |
|    | I213_EX | 460240,645 | 421,309 |       |      |       |        |       |       |
|    | I214_BE | 460244,081 | 421,536 |       |      |       |        |       |       |
|    | I216_AE | 460245,807 | 421,549 |       |      |       | -0,227 |       |       |
| 44 | I217_AD | 460233,027 | 420,958 | 9,67  | 3,25 | -3,09 |        | 6,91% | 5,53% |
|    | I218_BD | 460234,422 | 421,019 |       |      |       | 0,225  |       |       |
|    | I219_EX | 460237,676 | 421,244 |       |      |       |        |       |       |
|    | I220_BE | 460240,770 | 421,415 |       |      |       |        |       |       |
|    | I221_AE | 460242,694 | 421,444 |       |      |       | -0,171 |       |       |
| 45 | I222_BD | 460231,443 | 420,963 |       | 3,06 | -2,87 | 0,193  | 6,31% | 5,47% |
|    | I223_EX | 460234,504 | 421,156 |       |      |       |        |       |       |
|    | I224_BE | 460237,372 | 421,313 |       |      |       |        |       |       |
|    | I225_AE | 460239,433 | 421,378 |       |      |       | -0,157 |       |       |

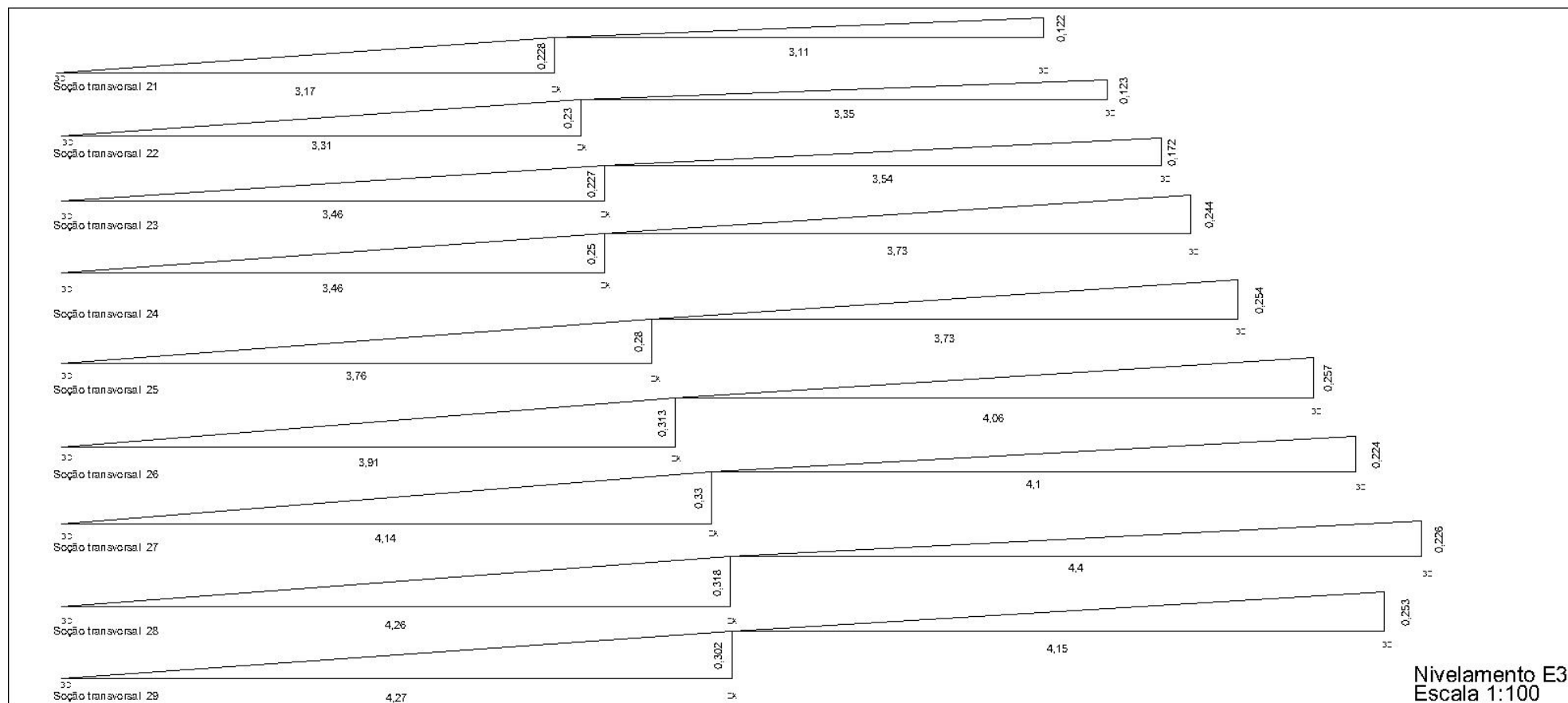
|    |         |            |         |      |      |       |        |       |        |
|----|---------|------------|---------|------|------|-------|--------|-------|--------|
| 46 | I226_AD | 460227,125 | 420,855 | 8,85 | 2,98 | -2,81 |        | 5,71% | 3,74%  |
|    | I227_BD | 460228,302 | 420,927 |      |      |       | 0,170  |       |        |
|    | I228_EX | 460231,278 | 421,097 |      |      |       |        |       |        |
|    | I229_BE | 460234,087 | 421,202 |      |      |       |        |       |        |
|    | I230_AE | 460235,978 | 421,197 |      |      |       | -0,105 |       |        |
| 47 | I231_AD | 460224,021 | 420,825 | 8,07 | 2,87 | -2,52 | 0,138  | 4,81% | 2,58%  |
|    | I232_BD | 460225,025 | 420,900 |      |      |       |        |       |        |
|    | I233_EX | 460227,896 | 421,038 |      |      |       |        |       |        |
|    | I234_BE | 460230,413 | 421,103 |      |      |       |        |       |        |
|    | I235_AE | 460232,088 | 421,102 |      |      |       | -0,065 |       |        |
| 48 | I236_AD | 460220,740 | 420,773 | 7,82 | 2,83 | -2,33 | 0,092  | 3,25% | 0,64%  |
|    | I237_BD | 460221,770 | 420,885 |      |      |       |        |       |        |
|    | I238_EX | 460224,605 | 420,977 |      |      |       |        |       |        |
|    | I239_BE | 460226,931 | 420,992 |      |      |       |        |       |        |
|    | I240_AE | 460228,560 | 420,912 |      |      |       | -0,015 |       |        |
| 49 | I241_AD | 460217,322 | 420,752 | 7,57 | 2,65 | -2,22 | 0,060  | 2,27% | -1,98% |
|    | I242_BD | 460218,463 | 420,850 |      |      |       |        |       |        |
|    | I243_EX | 460221,110 | 420,910 |      |      |       |        |       |        |
|    | I244_BE | 460223,334 | 420,866 |      |      |       |        |       |        |
|    | I245_AE | 460224,893 | 420,849 |      |      |       | 0,044  |       |        |
| 50 | I246_AD | 460213,966 | 420,698 | 7,07 | 2,61 | -2,23 | 0,050  | 1,92% | -2,65% |
|    | I247_BD | 460214,924 | 420,786 |      |      |       |        |       |        |
|    | I248_EX | 460217,534 | 420,836 |      |      |       |        |       |        |
|    | I249_BE | 460219,761 | 420,777 |      |      |       |        |       |        |
|    | I250_AE | 460221,035 | 420,677 |      |      |       | 0,059  |       |        |

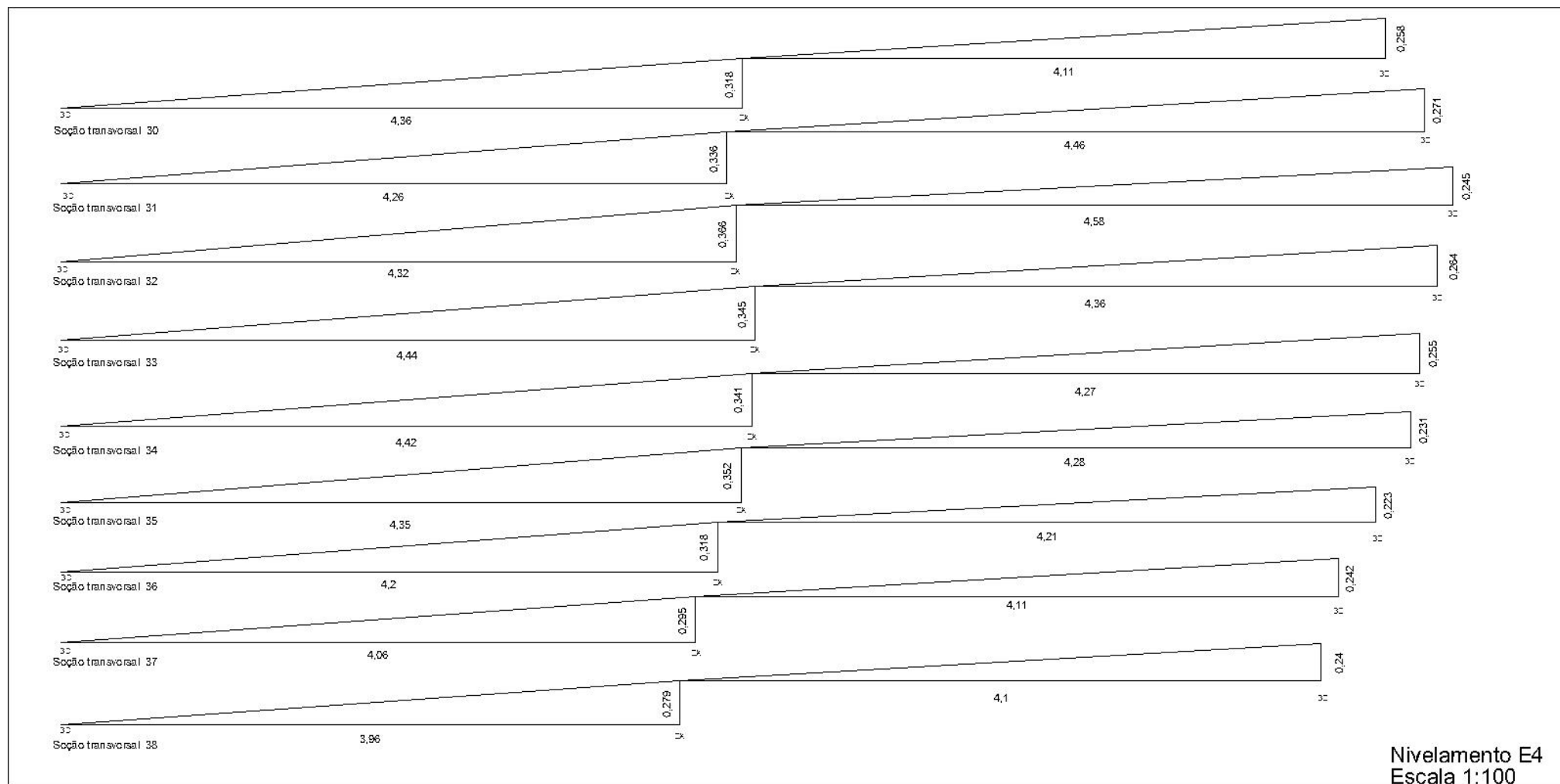
## APÊNDICE F - SEÇÕES TRANSVERSAIS EM PLANTA DA SUPERELEVÇÃO NO MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE.

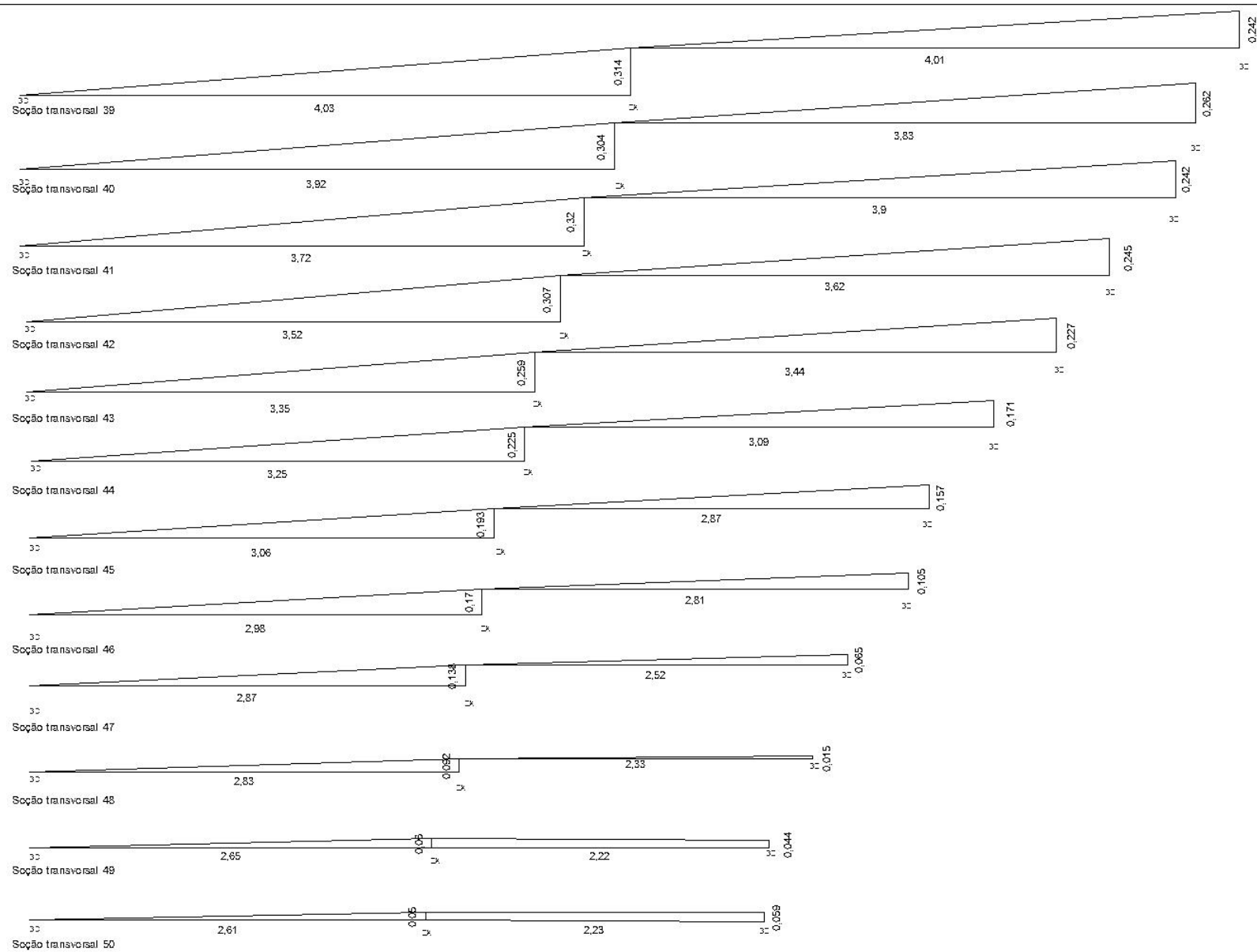












**APÊNDICE G – ANÁLISES ESTATÍSTICAS GERADAS NO ESTUDO COMPARATIVO DO PARÂMETRO DE SUPERELEVAÇÃO.**

| Nº de seções | Superelev. Bordo Int - Niv. Geo | Superelev. Bordo Ext. - Niv. Geo | Superelev. Bordo Int - MDS | Superelev. Bordo Ext. - MDS | Resíduo - Bordo int. | Resíduo - Bordo ext. | Resíduo² - Bordo int. | Resíduo² - Bordo ext. | Erro absoluto - Bordo Interno | Erro absoluto - Bordo Externa | Erro relativo - Bordo Interno | Erro relativo - Bordo Externo |
|--------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 9,43%                           | 1,04%                            | 8,98%                      | 1,60%                       | 0,0045               | -0,0056              | 0,0000200827          | 0,0000310148          | 0,0045                        | 0,0056                        | 4,75%                         | 53,33%                        |
| 2            | 8,55%                           | 1,71%                            | 8,28%                      | 2,75%                       | 0,0027               | -0,0104              | 0,0000072094          | 0,0001082112          | 0,0027                        | 0,0104                        | 3,14%                         | 60,86%                        |
| 3            | 8,13%                           | 3,01%                            | 8,22%                      | 2,24%                       | -0,0009              | 0,0077               | 0,0000008419          | 0,0000585774          | 0,0009                        | 0,0077                        | 1,13%                         | 25,42%                        |
| 4            | 7,55%                           | 2,66%                            | 8,73%                      | 0,47%                       | -0,0118              | 0,0219               | 0,0001385894          | 0,0004804413          | 0,0118                        | 0,0219                        | 15,58%                        | 82,41%                        |
| 5            | 7,47%                           | 2,35%                            | 7,88%                      | 1,69%                       | -0,0040              | 0,0066               | 0,0000163197          | 0,0000430282          | 0,0040                        | 0,0066                        | 5,41%                         | 27,95%                        |
| 6            | 7,02%                           | 0,72%                            | 7,04%                      | -0,59%                      | -0,0003              | 0,0131               | 0,0000000720          | 0,0001722238          | 0,0003                        | 0,0131                        | 0,38%                         | 182,73%                       |
| 7            | 8,48%                           | 1,60%                            | 8,03%                      | 1,18%                       | 0,0045               | 0,0041               | 0,0000202750          | 0,0000170928          | 0,0045                        | 0,0041                        | 5,31%                         | 25,90%                        |
| 8            | 6,21%                           | 2,11%                            | 5,91%                      | 1,33%                       | 0,0031               | 0,0078               | 0,0000094010          | 0,0000602085          | 0,0031                        | 0,0078                        | 4,93%                         | 36,82%                        |
| 9            | 5,01%                           | 1,29%                            | 5,28%                      | 0,50%                       | -0,0028              | 0,0078               | 0,0000076401          | 0,0000614434          | 0,0028                        | 0,0078                        | 5,52%                         | 60,98%                        |
| 10           | 5,15%                           | 1,58%                            | 5,01%                      | 1,35%                       | 0,0014               | 0,0023               | 0,0000020751          | 0,0000051767          | 0,0014                        | 0,0023                        | 2,80%                         | 14,42%                        |
| 11           | 5,17%                           | 2,74%                            | 5,10%                      | 2,74%                       | 0,0007               | 0,0000               | 0,0000005301          | 0,0000000002          | 0,0007                        | 0,0000                        | 1,41%                         | 0,05%                         |
| 12           | 5,30%                           | 3,18%                            | 5,38%                      | 2,77%                       | -0,0008              | 0,0041               | 0,0000006145          | 0,0000164604          | 0,0008                        | 0,0041                        | 1,48%                         | 12,77%                        |
| 13           | 5,70%                           | 3,85%                            | 5,88%                      | 3,34%                       | -0,0019              | 0,0051               | 0,0000034479          | 0,0000259692          | 0,0019                        | 0,0051                        | 3,26%                         | 13,24%                        |
| 14           | 5,79%                           | 3,69%                            | 6,39%                      | 3,38%                       | -0,0060              | 0,0031               | 0,0000361276          | 0,0000096619          | 0,0060                        | 0,0031                        | 10,38%                        | 8,42%                         |
| 15           | 5,58%                           | 3,43%                            | 6,23%                      | 2,14%                       | -0,0064              | 0,0129               | 0,0000414161          | 0,0001673294          | 0,0064                        | 0,0129                        | 11,53%                        | 37,67%                        |
| 16           | 5,43%                           | 1,90%                            | 6,26%                      | 1,68%                       | -0,0083              | 0,0022               | 0,0000688132          | 0,0000047972          | 0,0083                        | 0,0022                        | 15,28%                        | 11,52%                        |
| 17           | 6,03%                           | 1,29%                            | 6,41%                      | 1,24%                       | -0,0039              | 0,0005               | 0,0000148774          | 0,0000002437          | 0,0039                        | 0,0005                        | 6,40%                         | 3,83%                         |
| 18           | 6,14%                           | 2,36%                            | 6,11%                      | 2,39%                       | 0,0003               | -0,0003              | 0,0000000981          | 0,0000001045          | 0,0003                        | 0,0003                        | 0,51%                         | 1,37%                         |
| 19           | 5,52%                           | 4,06%                            | 5,64%                      | 3,89%                       | -0,0012              | 0,0017               | 0,0000013995          | 0,0000028320          | 0,0012                        | 0,0017                        | 2,14%                         | 4,15%                         |
| 20           | 4,15%                           | -1,90%                           | 6,57%                      | 3,96%                       | -0,0241              | -0,0587              | 0,0005824183          | 0,0034417857          | 0,0241                        | 0,0587                        | 58,12%                        | 307,98%                       |
| 21           | 4,32%                           | -1,51%                           | 7,18%                      | 3,92%                       | -0,0287              | -0,0543              | 0,0008211155          | 0,0029512004          | 0,0287                        | 0,0543                        | 66,36%                        | 359,85%                       |
| 22           | 6,65%                           | 4,08%                            | 6,95%                      | 3,68%                       | -0,0030              | 0,0040               | 0,0000089945          | 0,0000159869          | 0,0030                        | 0,0040                        | 4,51%                         | 9,81%                         |
| 23           | 6,38%                           | 4,75%                            | 6,57%                      | 4,86%                       | -0,0019              | -0,0010              | 0,0000035168          | 0,0000010341          | 0,0019                        | 0,0010                        | 2,94%                         | 2,14%                         |
| 24           | 6,84%                           | 5,62%                            | 7,23%                      | 6,55%                       | -0,0039              | -0,0093              | 0,0000151634          | 0,0000866460          | 0,0039                        | 0,0093                        | 5,69%                         | 16,57%                        |

|    |       |        |       |        |         |         |              |              |        |        |        |        |
|----|-------|--------|-------|--------|---------|---------|--------------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 25 | 7,09% | 6,36%  | 7,45% | 6,80%  | -0,0035 | -0,0044 | 0,0000125733 | 0,0000192037 | 0,0035 | 0,0044 | 5,00%  | 6,89%  |
| 26 | 7,74% | 6,36%  | 8,00% | 6,32%  | -0,0027 | 0,0003  | 0,0000070477 | 0,0000001198 | 0,0027 | 0,0003 | 3,43%  | 0,54%  |
| 27 | 7,59% | 6,14%  | 7,98% | 5,46%  | -0,0039 | 0,0067  | 0,0000150881 | 0,0000451657 | 0,0039 | 0,0067 | 5,12%  | 10,95% |
| 28 | 7,56% | 5,30%  | 7,47% | 5,14%  | 0,0009  | 0,0016  | 0,0000008093 | 0,0000024622 | 0,0009 | 0,0016 | 1,19%  | 2,96%  |
| 29 | 7,15% | 5,98%  | 7,07% | 6,10%  | 0,0008  | -0,0012 | 0,0000006078 | 0,0000013951 | 0,0008 | 0,0012 | 1,09%  | 1,98%  |
| 30 | 7,32% | 6,58%  | 7,30% | 6,27%  | 0,0002  | 0,0031  | 0,0000000328 | 0,0000096181 | 0,0002 | 0,0031 | 0,25%  | 4,71%  |
| 31 | 7,83% | 6,08%  | 7,89% | 6,08%  | -0,0007 | 0,0000  | 0,0000004296 | 0,0000000010 | 0,0007 | 0,0000 | 0,84%  | 0,05%  |
| 32 | 8,23% | 5,51%  | 8,48% | 5,35%  | -0,0024 | 0,0016  | 0,0000058695 | 0,0000025612 | 0,0024 | 0,0016 | 2,94%  | 2,90%  |
| 33 | 7,80% | 5,91%  | 7,77% | 6,05%  | 0,0003  | -0,0014 | 0,0000000634 | 0,0000020667 | 0,0003 | 0,0014 | 0,32%  | 2,43%  |
| 34 | 7,64% | 5,87%  | 7,71% | 5,98%  | -0,0007 | -0,0011 | 0,0000004726 | 0,0000011187 | 0,0007 | 0,0011 | 0,90%  | 1,80%  |
| 35 | 7,56% | 5,83%  | 8,09% | 5,39%  | -0,0053 | 0,0043  | 0,0000283482 | 0,0000186421 | 0,0053 | 0,0043 | 7,05%  | 7,41%  |
| 36 | 7,42% | 5,94%  | 7,57% | 5,29%  | -0,0014 | 0,0065  | 0,0000020318 | 0,0000424277 | 0,0014 | 0,0065 | 1,92%  | 10,96% |
| 37 | 7,18% | 6,24%  | 7,27% | 5,89%  | -0,0008 | 0,0035  | 0,0000006934 | 0,0000124102 | 0,0008 | 0,0035 | 1,16%  | 5,65%  |
| 38 | 7,47% | 6,14%  | 7,05% | 5,85%  | 0,0043  | 0,0029  | 0,0000181344 | 0,0000086196 | 0,0043 | 0,0029 | 5,70%  | 4,78%  |
| 39 | 8,12% | 6,58%  | 7,80% | 6,03%  | 0,0032  | 0,0055  | 0,0000102294 | 0,0000304636 | 0,0032 | 0,0055 | 3,94%  | 8,39%  |
| 40 | 7,92% | 6,45%  | 7,76% | 6,84%  | 0,0016  | -0,0038 | 0,0000024331 | 0,0000147689 | 0,0016 | 0,0038 | 1,97%  | 5,96%  |
| 41 | 8,28% | 6,40%  | 8,61% | 6,20%  | -0,0032 | 0,0020  | 0,0000105033 | 0,0000038314 | 0,0032 | 0,0020 | 3,91%  | 3,06%  |
| 42 | 8,44% | 6,41%  | 8,72% | 6,76%  | -0,0028 | -0,0035 | 0,0000077569 | 0,0000122034 | 0,0028 | 0,0035 | 3,30%  | 5,45%  |
| 43 | 7,73% | 6,20%  | 7,73% | 6,61%  | 0,0000  | -0,0040 | 0,0000000000 | 0,0000161766 | 0,0000 | 0,0040 | 0,00%  | 6,48%  |
| 44 | 6,69% | 5,75%  | 6,91% | 5,53%  | -0,0022 | 0,0022  | 0,0000049074 | 0,0000048174 | 0,0022 | 0,0022 | 3,31%  | 3,82%  |
| 45 | 5,96% | 5,74%  | 6,31% | 5,47%  | -0,0034 | 0,0026  | 0,0000117393 | 0,0000069874 | 0,0034 | 0,0026 | 5,75%  | 4,61%  |
| 46 | 5,50% | 4,19%  | 5,71% | 3,74%  | -0,0021 | 0,0045  | 0,0000044063 | 0,0000205435 | 0,0021 | 0,0045 | 3,81%  | 10,81% |
| 47 | 4,21% | 2,99%  | 4,81% | 2,58%  | -0,0060 | 0,0041  | 0,0000356238 | 0,0000165946 | 0,0060 | 0,0041 | 14,18% | 13,63% |
| 48 | 2,93% | 0,84%  | 3,25% | 0,64%  | -0,0032 | 0,0019  | 0,0000101808 | 0,0000037814 | 0,0032 | 0,0019 | 10,90% | 23,17% |
| 49 | 2,45% | -1,21% | 2,27% | -1,98% | 0,0018  | 0,0077  | 0,0000033337 | 0,0000589218 | 0,0018 | 0,0077 | 7,45%  | 63,40% |
| 50 | 1,58% | -3,90% | 1,92% | -2,65% | -0,0033 | -0,0125 | 0,0000111082 | 0,0001558244 | 0,0033 | 0,0125 | 21,06% | 32,03% |