

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PALULISTA – UNESP
CÂMPUS JABOTICABAL**

**RAIOS DE CURVATURA, LARGURAS DE BITOLA E
COMPRIMENTOS DO CABEÇALHO INFLUENCIAM NA
QUALIDADE DO PARALELISMO?**

Francisca Edcarla de Araujo Nicolau
Engenheira Agrônoma

2020

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PALULISTA – UNESP
CÂMPUS JABOTICABAL**

**RAIOS DE CURVATURA, LARGURAS DE BITOLA E
COMPRIMENTOS DO CABEÇALHO INFLUENCIAM NA
QUALIDADE DO PARALELISMO?**

Discente: Francisca Edcarla de Araujo Nicolau
Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani
Coorientador: Prof. Dr. Cristiano Zerbato
Coorientador: Prof. Dr. Walter Maldonado Junior

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo).

N639r	Nicolau, Francisca Edcarla de Araujo Raios de curvatura, larguras de bitola e comprimentos do cabeçalho influenciam na qualidade do paralelismo? / Francisca Edcarla de Araujo Nicolau. -- Jaboticabal, 2020 65 p. : il., tabs., fotos Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani Coorientador: Cristiano Zerbato 1. Agricultura de precisão. 2. Máquinas agrícolas. 3. Máquinas automáticas. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: RAIOS DE CURVATURA, LARGURAS DE BITOLA E COMPRIMENTOS DO CABEÇALHO INFLUENCIAM NA QUALIDADE DO PARALELISMO?

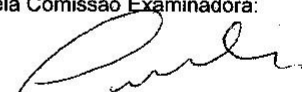
AUTORA: FRANCISCA EDCARLA DE ARAUJO NICOLAU

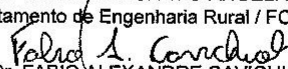
ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI

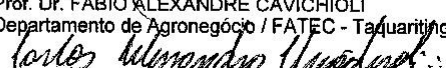
COORDENADOR: CRISTIANO ZERBATO

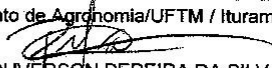
COORDENADOR: WALTER MALDONADO JUNIOR

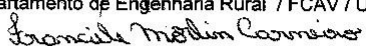
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. FÁBIO ALEXANDRE CAVICHIOLI
Departamento de Agronegócio / FATEC - Taquaritinga/SP


Prof. Dr. CARLOS ALESSANDRO CHIODEROLI
Departamento de Agronomia/UFTM / Iturama/MG


Prof. Dr. ROVERSON PEREIRA DA SILVA
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Pós-doutoranda FRANCIELE MORLIN CARNEIRO
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 28 de fevereiro de 2020

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

FRANCISCA EDCARLA DE ARAUJO NICOLAU – nascida em 21 de maio de 1990, no município do Crato, Ceará, filha de Ariamilton Bento Nicolau e Francisca Francineide de Araujo. Possui curso Técnico em Agropecuária (2008) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Câmpus de Crato. Em março de 2010, ingressou no curso de Agronomia pela Universidade Federal do Ceará – Câmpus do Cariri e foi bolsista durante todo o curso. De 2010 a 2011 foi bolsista FUNCAP – Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico; de 2011 a 2013, bolsista CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e, no meio do ano de 2013, ingressou no PET – Programa de Educação Tutorial, permanecendo até julho de 2014, quando defendeu a monografia intitulada “Desenvolvimento e produtividade de milho-verde, em sucessão ao feijão-caupi, em função da adubação foliar e do manejo do solo”, para receber o diploma de graduação em Engenharia Agrônômica. Logo em seguida, ingressou no mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Ceará – Câmpus do Pici, na área de concentração de Máquinas e Mecanização Agrícola, com dissertação intitulada “Desempenho energético e operacional do conjunto trator-semeadora em função de coberturas do solo e mecanismos sulcadores: Atributos físicos do solo e componentes de produtividade”, com recebimento do título em 2016. No ano de 2017, iniciou o doutorado em Agronomia (Ciência do solo) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Câmpus de Jaboticabal, na área de concentração de Engenharia de Água e Solo, com pesquisa realizada na área de Máquinas e Mecanização Agrícola.

Dedico esta tese aos meus pais Ariamilton Bento Nicolau e Francisca Francineide de Araujo; a minha tia Antonia Pereira de Araujo; ao meu noivo e futuro esposo Eddygledson Souza Gama. Aos meus irmãos Carlos Eduardo, Ari Araujo, Cícero Carlos e Ana Carolina; aos meus sobrinhos Nycolle, Ari Filho, Charlotte Cristina, Maria Eduarda, Maria Gabriela e José Eduardo; as minhas cunhadas Viviane e Dalvani e, ao meu cunhado Valdir; aos meu sogro José Maria e a minha sogra Simone. E por fim a todos os meus amigos e familiares.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por me dar muita força, coragem e sabedoria nos momentos difíceis.

Ao meu pai Ariamilton Bento Nicolau, que sempre esteve comigo nos momentos difíceis, dizendo-me para ficar calma, que tudo iria ficar bem. Pelo carinho e pela preocupação que ele tinha comigo, se eu estava bem, se tinha dormido direito. Todo esse amor e carinho fez toda a diferença para a realização desta conquista. Além das receitas de suco de maracujá e chá de camomila que ele dizia para tomar. Enfim, não existem palavras para explicar o quanto a presença de meu pai foi importante nesta fase da minha vida.

À minha mãe Francisca Francineide de Araujo e à minha tia Antônia Pereira de Araujo, pelo apoio e carinho, principalmente nos momentos mais difíceis, e por me encorajarem para a realização desta conquista.

Ao meu noivo e futuro esposo Eddygledson Souza Gama, que sempre esteve presente em todos os momentos, apoiando-me e cuidando de mim com todo o seu amor e carinho, além de contribuir para a realização deste trabalho, sou imensamente grata.

Aos meus irmãos Ari Araujo, Carlos Eduardo, Cícero Carlos e Anna Carolina; à minha sogra Simone e ao meu sogro José Maria; à minha cunhada Viviane; aos meus sobrinhos e sobrinhas, que proporcionaram momentos de alegria e descontração: Nycolle, Ari Filho, Charlotte Cristina, Maria Gabriela, José Eduardo e Maria Eduarda. Enfim, a todos os meus familiares que me apoiaram durante o doutorado.

Às minhas amigas Joana Gomes, Renata Queiroz, Aline Batista, Elizabeth Kazama, Clarissa Pereira, Francielle Morlin e ao meu amigo Jean Lucas, pelos conselhos e por me escutarem nos momentos em que eu estava aflita e precisando de um ombro amigo para me acalmar e assim poder refletir sobre as situações.

Ao meu orientador, professor e amigo Carlos Eduardo Angeli Furlani, por sua orientação na escrita e na instalação do experimento, pela atenção, paciência e pelos ensinamentos durante a realização deste trabalho e em todos os outros momentos em que estive ao seu lado, meu muito obrigada.

Aos meus coorientadores Cristiano Zerbato e Walter Maldonado Júnior, pelo apoio e orientação na instalação do experimento e na elaboração deste trabalho.

Aos professores do Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola – LAMMA, Carlos Eduardo Angeli Furlani, Rouverson Pereira da Silva e Cristiano Zerbato, por todo apoio, ensinamentos, orientação, dedicação e amizade.

A todos os integrantes do LAMMA, Alex Rangel, Armando Brito, Bruno Rocca, Jarlyson Souza, Letícia Santos, Marcelo Barbosa, Danilo Tedesco, Patrícia Menezes, Lucas Gírio, Mailson de Oliveira, Antônio Tassio, Maria Albertina, Luan de Oliveira, Leonardo Bernache, , Matheus Borba, Aycon Tinoco, Lígia Negri, Adão dos Santos, Rafael Noronha, Tiago Tavares, Marco Antônio Vrech, Olavo Betiol, Eduardo Macchione, José Ricardo, com os quais fiz amizade. Em especial Rafael De Graaf, Maranhão, Jean Lucas, Renata Queiroz, Francielle Morlin, Francielle Moreli, Samira Hatum, Elizabeth Kazama, João de Deus Godinho, Paulo Sérgio Cordeiro e Aline Spaggiari que participaram ativamente na elaboração e na execução deste trabalho.

À Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), aos professores que compõem o quadro do programa, pelos ensinamentos e pelo aprimoramento de meus conhecimentos.

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

A Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP – Câmpus de Jaboticabal, em nome de todos os seus funcionários, em especial ao Mistério e Nascimento que foram fundamentais na elaboração deste trabalho.

À Renata Queiroz, Jean Lucas, Maria Albertina e Sabrina Oliveira, por serem minha família aqui de Jaboticabal, pela amizade, carinho e companheirismo.

A todos aqueles que possam ter contribuído de alguma forma para a realização desta conquista em minha vida profissional.

SUMÁRIO

Página

RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) e correção diferencial.....	2
2.2 Direcionamento automático.....	5
2.3 Deslocamento lateral e erro de paralelismo nas atividades agrícolas.....	7
2.4 Controle estatístico de qualidade nos processos mecanizados.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Área experimental.....	14
3.2 Equipamentos agrícolas.....	14
3.3 Delineamento experimental.....	17
3.4 Avaliação do paralelismo.....	18
3.5 Análise estatística.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1 Gráficos de regressão.....	21
4.2 Cartas de controle.....	29
5. CONCLUSÕES.....	41
6. REFERÊNCIAS.....	42
APÊNDICE A - Análise de variância dos efeitos principais e interações os fatores para raios de curvatura, comprimentos do cabeçalho e larguras de bitola do protótipo.....	47
APÊNDICE B - Cartas de controle para erro de paralelismo.....	49

RAIOS DE CURVATURA, LARGURAS DE BITOLA E COMPRIMENTOS DO CABEÇALHO INFLUENCIAM NA QUALIDADE DO PARALELISMO?

RESUMO – As propriedades que atuam no deslizamento lateral de um equipamento de arrasto em áreas agrícolas, variam amplamente, indo desde as relacionadas ao solo até aos parâmetros envolvidos no sistema trator-equipamento que podem afetar o deslocamento lateral. O objetivo com o estudo foi mensurar o erro de paralelismo do conjunto trator-protótipo em função de diferentes raios de curvatura, larguras de bitola e comprimentos do cabeçalho de um protótipo de arrasto, além de avaliar a variabilidade do processo por meio do Controle Estatístico do Processo. Os testes foram realizados em área experimental da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal. Foi adaptado o chassi de uma semeadora-adubadora, que possibilitasse mudança no comprimento do cabeçalho e variação na largura da bitola do equipamento, o qual denominamos protótipo de arrasto. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5x4x15, com cinco comprimentos do cabeçalho e quatro larguras de bitola do protótipo em quinze raios de curvatura médio. A medição do paralelismo entre as passadas do conjunto trator-protótipo foi obtida por meio de um instrumento desenvolvido que denominamos “pirulito” e com o auxílio de uma trena. Nos raios de 16,4 m e de 20 m os erros de paralelismo são maiores, em todas as bitolas e vão diminuindo à medida que se aumenta a circunferência do raio. O comprimento do cabeçalho de 2,40 m, quando comparado com os demais obteve menor erro de paralelismo nos três primeiros raios. Nos dois primeiros raios quase todos os erros de paralelismo ficaram fora dos limites específicos de controle para todas as larguras de bitola e comprimentos do cabeçalho. A menor bitola do protótipo, e o menor cabeçalho proporcionaram menores erros de paralelismo entre as passadas do conjunto trator-protótipo. Nos trajetos com maiores raios de curvatura e menores comprimentos do cabeçalho, associados com a menor bitola do protótipo, proporcionam melhor qualidade nos processos mecanizados, sem causar sobreposição ou falha.

Palavras-chave: Controle Estatístico de Qualidade, Controle Estatístico do Processo, deslocamento lateral, equipamento de arrasto, GNSS, RTK

DO CURVATURE RADIUS, WIDTHS OF GAUGE AND LENGTHS OF HEADER INFLUENCE THE QUALITY OF PARALLELISM?

ABSTRACT – The properties that act on the lateral sliding of a trailed equipment in agricultural areas, change widely, ranging from those related to the soil to the parameters involved in the tractor-equipment system that can affect lateral displacement. The objective of the study was to measure the parallelism error of the tractor-prototype set as a function of different curvature radius, the widths of the gauge and the lengths of the header of a drag prototype, in addition, the evaluating process of the variability through the Statistical Process Control. The tests were carried out in an experimental area at the São Paulo State University (Unesp), School of Agricultural and Veterinary Sciences, Campus of Jaboticabal. The chassis of a seeder-fertilizer was adopted, so that it would allow a change in the length of the header and a variation in the width of the gauge of the equipment, which we call the trailed prototype. The experimental design was entirely randomized, in a 5x4x15 factorial scheme, with five header lengths and four widths of gauge of the prototype in fifteen average curvature radius. The measurement of the parallelism between the steps of the tractor-prototype set was obtained by using an instrument that we call “lollipop” and with the help of a measuring tape. In the 16.4 m and 20 m radius the parallelism errors were greater than the other gauges, and it decreased as the radius circumference increased. The header length of 2.40 m, when compared to the others, obtained the smallest error of parallelism in the first three radius. In the first two radius almost all parallelism errors were outside the specific limit control for all widths of the gauge and the lengths of the header. The smallest gauge of the prototype, and the smallest header that provided smallest errors of parallelism between the steps of the tractor-prototype set. On paths with greater radius of curvature and shorter lengths of the header, associated with the smaller gauge of prototype, provide better quality in mechanized processes, without causing overlap neither failure.

Keywords: Statistical Quality Control, Statistical Process Control, lateral displacement, trailed equipment, GNSS, RTK

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
1. Componentes do sistema de piloto automático hidráulico.....	6
2. Comportamento de um implemento rebocado passivo em curva (A) e inclinação (B).....	7
3. Exemplo de cartas de controle. A: processo está sob controle estatístico. B: processo está fora de controle estatístico.....	11
4. Local da área experimental e disposição dos raios de curvatura na área.....	14
5. A: Mudança no comprimento do cabeçalho; B: Comprimento mínimo do ponto de acoplamento ao órgão ativo (disco); C: Largura da bitola.....	16
6. Raio de curvatura médio.....	18
7. Instrumento pirulito usado para auxiliar na medição do paralelismo.....	18
8. Interseção de dois círculos em um único ponto.....	19
9. Semirreta r	19
10. Segmento s ligando os pontos B e C.....	20
11. Ponto de interseção da semirreta do pirulito com o semicírculo (A e B).....	20
12. Medição do paralelismo entre dois semicírculos (A e B).....	21
13. Regressão do módulo do erro do paralelismo dos raios de curvatura médio dentro de larguras de bitola do protótipo.....	22
14. Regressão do módulo do erro do paralelismo das larguras de bitola dentro de raios de curvatura médio.....	23
15. Regressão do módulo do erro do paralelismo dos raios de curvatura médio dentro dos comprimentos do cabeçalho.....	25
16. Regressão do módulo do erro do paralelismo dos comprimentos do cabeçalho dentro dos raios de curvatura médio.....	26
17. Regressão do módulo do erro do paralelismo das larguras de bitola dentro dos comprimentos do cabeçalho.....	27
18. Regressão do módulo do erro do paralelismo dos comprimentos do cabeçalho dentro das larguras de bitola.....	28

19. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 16,4 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	29
20. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 20 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	32
21. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 23,6 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	35
22. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 38 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	38
23. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 41,6 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	49
24. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 45,2 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	50
25. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 59,6 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5=2,80 m).....	52
26. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 63,2 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	53

27. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 66,8 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	55
28. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 81,2 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	56
29. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 84,8 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	58
30. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 88,4 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	59
31. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 102,8 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	61
32. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 106,4 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	62
33. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 110 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1= 2,40 m, C2= 2,50 m, C3= 2,60 m, C4= 2,70 m e C5= 2,80 m).....	64

LISTA DE TABELAS

Tabelas	Página
1. Descrição dos tratamentos avaliados.....	17
2. Modelo matemático dos raios de curvatura médio dentro de larguras de bitola do protótipo.....	22
3. Modelo matemático das larguras de bitola dentro de raios de curvatura.....	24
4. Modelo matemático dos raios de curvatura médio dentro dos comprimentos do cabeçalho.....	25
5. Modelo matemático dos comprimentos do cabeçalho dentro dos raios de curvatura médio.....	27
6. Modelo matemático das larguras de bitola dentro dos comprimentos do cabeçalho.....	28
7. Modelo matemático dos comprimentos do cabeçalho dentro das larguras de bitola.....	28
8. Análise de variância para efeitos principais e interações para o módulo do erro do paralelismo.....	47
9. Síntese de análise de variância e do teste de médias do desdobramento de interação entre os raios de curvatura e larguras de bitola para o módulo do erro do paralelismo (m).....	47
10. Síntese de análise de variância e do teste de médias do desdobramento de interação entre os raios de curvatura e comprimentos do cabeçalho para o módulo do erro do paralelismo (m).....	48
11. Síntese de análise de variância e do teste de médias do desdobramento de interação entre larguras de bitola e comprimentos do cabeçalho para o módulo do erro do paralelismo (m).....	48

1. INTRODUÇÃO

O erro de paralelismo entre as passadas do conjunto trator-equipamento é ocasionado devido ao deslocamento lateral entre eles, principalmente pode ser causado quando são submetidos a trajetórias curvas e/ou pela declividade do terreno. Esse deslocamento lateral pode ser maior em equipamentos de arrasto.

As operações mecanizadas, quando realizadas com equipamentos de arrasto, podem favorecer maiores erros de paralelismo, devido à maior distância entre o conjunto trator-equipamento e associadas com a declividade do terreno e/ou percursos curvos, esses erros tornam-se mais acentuados. Além desses fatores as regulagens do equipamento também podem proporcionar maior deslocamento lateral do conjunto.

Backman et al. (2010), observaram que não é possível medir todas as variáveis juntas que estão associadas ao deslocamento lateral de uma semeadora de arrasto, pois as propriedades variam amplamente, indo desde as relacionadas ao solo (tipo e umidade do solo e declividade) até aos parâmetros envolvidos no sistema trator-equipamento como, por exemplo, alteração de distribuição de peso, pressão dos pneus e estado ativo / inativo do equipamento.

Todos esses fatores sozinhos ou associados podem interferir na qualidade das operações mecanizadas, em função do desvio lateral que ocorre entre o trator e o equipamento, o que resulta na distância irregular entre as passadas do conjunto mecanizado. Se as passadas do conjunto foram próximas ou afastadas, causando sobreposição ou falha respectivamente, isso pode influenciar diretamente na produtividade das culturas.

Logo, saber identificar quais são esses fatores que se relacionam com a produtividade das culturas, além de monitorar a variabilidade dos processos mecanizados são pontos chave para se obter qualidade e produtividade das culturas.

Os raios de curvatura mais fechados, associados a maiores comprimentos do cabeçalho e a diferentes larguras de bitola, podem ocasionar maior deslocamento lateral e, conseqüentemente, maior erro de paralelismo entre as passadas.

Portanto, medir esses erros de paralelismo em diferentes configurações do equipamento e em intensidades de curvatura, pode ser um dos primeiros passos para

propor melhorias nos processos mecanizados. O objetivo com o estudo foi mensurar o erro de paralelismo do conjunto trator-protótipo em função de diferentes raios de curvatura, larguras de bitola e comprimentos do cabeçalho de um protótipo de arrasto, além de avaliar a variabilidade do processo por meio do Controle Estatístico do Processo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) e correção diferencial

O primeiro invento da humanidade de métodos de localização e de navegação foi a bússola, que proporcionou grandes avanços principalmente nas navegações marítimas. Após muitos anos de pesquisas e estudos, surgiram os Sistemas de Navegação Global por Satélites (GNSS), os quais foram desenvolvidos para fins bélicos e revolucionaram os métodos de localização terrestre (Molin et al., 2015).

Segundo Alves et al. (2013), os principais sistemas globais que compõem o GNSS são: GPS (Global Positioning System), GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), Galileo e, mais recentemente, o Beidou/Compass. O GPS, desenvolvido pelos Estados Unidos, encontra-se em plena operação e em fase de modernização. Esse sistema é capaz de fornecer ao usuário a localização com certa rapidez e exatidão, em qualquer local da superfície terrestre, tornando-se, por isso, o mais utilizado e popular de todos os sistemas de posicionamento. O GLONASS, parecido com o GPS, foi desenvolvido na antiga URSS, hoje de responsabilidade da República da Rússia. Já Galileo é um sistema europeu e espera-se que ele esteja com a constelação completa em 2020. Beidou/Compass foi desenvolvido recentemente pela China, com um serviço regional a princípio, e mais tarde expandiu-se para nível global.

No sistema GPS, estão envolvidos os seguintes sinais: as portadoras (L1 e L2) e os códigos (C/A e P). Cada satélite transmite simultaneamente de duas ondas portadoras, a primeira, L1, com frequência de 1.575,42 MHz, comprimento de onda $\lambda \cong 19$ cm; já a L2 tem frequência de 1.227,60 MHz e comprimento de onda $\lambda \cong 24$ cm.

Os códigos C/A e P são modulados nas portadoras. A portadora L1 modula os códigos C/A (Clear/Access) e P (Precise), e a portadora L2 modula somente o código P. O sinal de código C/A é utilizado pelo Standard Positioning Service (SPS), é um serviço de posicionamento e tempo padrão, sem nenhum tipo de cobrança por uso, e está disponível para todos os usuários. Já o sinal do código P, apresenta Precise Positioning Service (PPS), é de uso restrito de militares norte-americanos e usuários autorizados (Monico, 2008).

Carvalho e Araújo (2009) relatam que o posicionamento do receptor GNSS fundamenta-se na trilateração dos satélites. Cada satélite emite um sinal codificado que o identifica, o receptor recebe e interpreta o sinal enviado pelos satélites e calcula a distância entre eles. O cálculo da distância é realizado em função do tempo que o sinal demora até chegar ao receptor, sabendo-se, assim a distância que separa o receptor dos três satélites e podendo-se determinar a posição relativa do receptor por meio da intersecção de três circunferências, cujos raios são as distâncias medidas entre o receptor e os satélites. O cálculo de cada posição é obtido com a intersecção das medições realizadas pelos satélites; logo, com a intersecção de apenas três destes satélites, é possível calcular uma posição em duas dimensões (latitude e longitude). Porém, com a intersecção de mais um satélite, obtém-se o posicionamento do receptor no espaço (latitude, longitude e altitude).

Para Mantovani e Magdalena (2014), na correção diferencial do sinal GNSS, é necessário usar, no mínimo, dois receptores. Um receptor conhecido como receptor de referência, instalado em um ponto com coordenadas geográficas conhecidas, enquanto o outro é usado como receptor móvel, que realiza o posicionamento do usuário. O princípio da correção diferencial considera que, como os mesmos satélites estão sendo rastreados pelos dois receptores, o erro obtido na base é o mesmo obtido no móvel, o que permite que esse erro corrija as coordenadas obtidas pelo receptor móvel usado pelo usuário.

Conforme Pérez-Ruiz et al. (2011), os sistemas de correção diferencial apresentam precisão diferente no posicionamento das máquinas agrícolas no campo. Com isso, os autores fazem recomendações de sinal de correção de GPS para os agricultores, em função da precisão exigida para cada operação: a) o monitoramento da produtividade e a amostragem do solo (< 1 m) são possíveis com todos os sinais

de correção GPS acessados em qualquer intervalo de tempo; b) a semeadura a lanço e a aplicação de fertilizantes e herbicidas ($< 0,5$ m) são possíveis por 80% do tempo com OmniSTAR VBS, 40% do tempo com RASANT e EUREF-IP e 100% do tempo com a base RTK; c) plantio e semeadura ($< 0,04$ m) são possíveis apenas com sistemas baseados em orientação automática RTK-GPS.

Os mesmos autores verificaram que o sinal da estação-base (RTK) apresentou variância cinco vezes menor para o erro do receptor GPS quando comparado com os demais sistemas, comprovando que, dentre os sistemas de correção utilizando o RTK, apresenta maior precisão na correção do sinal.

O Real Time Kinematic (RTK) é o mais utilizado na agricultura de precisão, em razão de proporcionar melhor exatidão entre as passadas. Estudos realizados por Carballido et al. (2014) verificaram que a média para a variância foi de 2,5 cm para o receptor GNSS com sinal RTK, o que indica melhor paralelismo entre as passadas do trator autônomo; para o sinal Real Time Extended (RTX), o erro médio foi de 9,8 cm, o que pode limitar o uso do trator autônomo com RTX para algumas culturas hortícolas e em operações agrícolas que exigem uma precisão muito alta.

O sistema de correção diferencial RTK é composto por dois receptores GNSS com suas antenas e um link de rádio para enviar e receber correções e/ou observações da estação de referência (base fixa). A estação de referência, ao receber o posicionamento dos satélites, calcula o erro por meio de algoritmos e envia as informações via rádio para o receptor móvel, corrigindo o posicionamento do receptor (Molin et al., 2015).

Porém, a principal limitação desse sinal de correção é a utilização do sistema de link de rádio VHF (Very High Frequency) ou UHF (Ultra High Frequency) para a transmissão dos dados, que exige ser utilizado numa taxa de, pelo menos 2.400 bps (bits por segundo), limitando seu uso em distância na ordem de 5 a 15 km, de visada direta entre a estação de referência e o usuário (Molin et al., 2015).

De acordo com Guo et al. (2018), a precisão do sinal RTK depende da distância entre o receptor GNSS (rover) e a estação de referência, e os melhores resultados de posicionamento são obtidos com a menor distância entre as estações. Para o uso desta tecnologia, torna-se necessária uma densa rede de estações de referência para

garantir sua precisão e confiabilidade durante a utilização do sinal nas atividades mecanizadas.

2.2 Direcionamento automático

O uso de receptores de navegação popularizou-se a partir de 2000, quando o governo norte-americano eliminou a degradação do sinal do GPS, que causava erro exagerado nos posicionamentos. Nessa época, tornava-se evidente, no mínimo, duas grandes frentes na Agricultura de Precisão. A primeira delas voltada à gestão da variabilidade espacial das lavouras, fazendo uso de aplicação de insumos em taxas variáveis. A outra consolidou-se não obrigatoriamente para a variabilidade de lavoura, mas para a automação das máquinas agrícolas (Molin, 2017).

Foi com o uso da agricultura de precisão que as indústrias de máquinas perceberam a oportunidade de introduzir eletrônica e informática embarcada nas máquinas agrícolas, visando a contribuir nos processos mecanizados (Bernardi et al., 2014).

O direcionamento automático das máquinas agrícolas é uma das tecnologias mais usadas na agricultura de precisão, sendo estas projetadas para realizar trajetos automaticamente sobre uma linha de referência, sem a necessidade da interferência do operador (Cirani e Moraes, 2010; Soares Filho e Cunha, 2015).

A linha projetada, ou de referência, pode ser criada pelo operador por meio da interface do monitor ou por programas. Nos dois casos, serão criadas linhas à direita e à esquerda da linha de referência, distanciadas entre si de acordo com o espaçamento definido entre as passadas da máquina.

As tecnologias inseridas nas máquinas agrícolas visam a melhorar as operações mecanizadas, como, por exemplo, proporcionar maior desempenho operacional, aumentar a eficiência e reduzir o uso de insumos; além disso, proporciona maior conforto para os operadores e, conseqüentemente, maior controle e qualidade para os processos. Devido a estas vantagens, o uso de sistemas automáticos de orientação foi rapidamente adotado pelos agricultores nos últimos anos, apesar do custo de aquisição (Gan-Mor et al., 2007).

O autodirecionamento das máquinas agrícolas aumenta a eficiência e a qualidade das operações agrícolas mecanizadas, por proporcionar otimização da frota agrícola e do tempo, diminuição dos desperdícios com os insumos agrícolas e controle de tráfego nas lavouras, apresentando benefícios para o agricultor, para o solo e para o meio ambiente (Bernardi et al., 2014).

Conforme Raupp (2012), existem dois tipos de sistemas de piloto automático que podem ser usados nas máquinas agrícolas, que basicamente diferem pelo modo de atuação no sistema e no sensor responsável pela leitura do ângulo das rodas do veículo. O primeiro sistema é chamado de piloto automático elétrico, e nele o modo de atuação é feita por meio de um motor elétrico acoplado ao volante ou diretamente na coluna de direção, e a posição das rodas é obtida por meio da leitura do “encoder” do motor. O segundo tipo é o piloto automático hidráulico, sendo a atuação do sistema feita por uma válvula hidráulica conectada diretamente ao cilindro de direção do trator, e o sensor de esterçamento é instalado em uma das rodas do veículo para a obtenção do ângulo delas.

Os componentes básicos do sistema de piloto automático hidráulico (Figura 1) são: receptor GNSS, antena, monitor, sensor de angulação de esterçamento, sensor inercial, que notifica as oscilações e também faz a compensação a vertical, e o atuador elétrico-hidráulico na direção. Já no piloto automático elétrico, o que muda nos componentes do sistema é apenas o atuador, que vai ficar no volante ou diretamente na coluna da direção (Molin et al., 2015).



Fonte: GeoAgri.

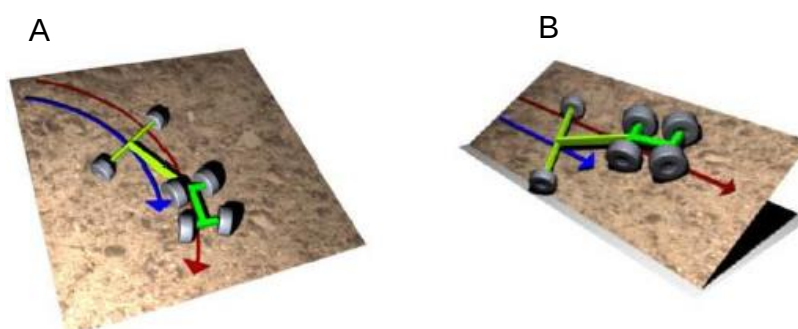
Figura 1. Componentes do sistema de piloto automático hidráulico.

De acordo com Baio e Moratelli (2011), o erro médio entre as passadas para o piloto automático foi de 0,033 m, enquanto para o direcionamento manual, o erro médio foi de 0,170 m. Eles observaram que o piloto automático proporcionou maior acurácia no plantio mecanizado da cana-de-açúcar, possibilitando maior quantidade de linhas por área.

O uso do direcionamento automático com sinal de correção RTK na colheita mecanizada da cana-de-açúcar é uma ferramenta com grande aceitação entre as usinas, pois melhora a qualidade da colheita devido a proporcionar erros médios de paralelismo inferiores a 0,05 m; já com o direcionamento manual, esse erro fica em torno de 0,22 m (Salvi et al. 2014), causando pisoteamento da cana-planta como também na cana-soca.

2.3 Deslocamento lateral e erro de paralelismo nas atividades agrícolas

Os equipamentos de arrasto são acoplados à barra de tração do trator e fixados em um único ponto; logo, vários efeitos podem forçá-los a deslocar-se do trajeto realizado pelo trator, como condições de solo, carga irregular, curva e inclinação, o que gera trabalho agrícola sem precisão entre as passadas devido à posição insatisfatória do equipamento (Figura 2). Esse problema pode aumentar para implementos cada vez mais longos e pesados (Cariou et al., 2010).



Fonte: Cariou et al. (2010).

Figura 2. Comportamento de um implemento rebocado passivo em curva (A) e inclinação (B).

Para Oksanen e Backman (2016), quando os equipamentos de arrasto não seguem o percurso realizado pelo trator, ocorre o deslocamento lateral. Os autores definem o deslocamento lateral como sendo a distância horizontal do ponto de acoplamento ao eixo vertical.

Para Backman et al. (2010), realizar a modelagem do deslocamento de uma semeadora de arrasto em áreas agrícolas torna-se muito desafiador, pois as propriedades variam amplamente, indo desde as relacionadas ao solo (tipo e umidade do solo, declividade, etc.) até aos parâmetros envolvidos no sistema trator equipamento que podem afetar o deslocamento lateral, como alterações de distribuição de peso, pressão de pneus e estado ativo / inativo do equipamento, etc. Segundo os autores, na prática, não é possível medir todas essas variáveis juntas.

Huynh et al. (2012), estudando o trajeto do trator-reboque em caminho, em linha reta e em arco semicircular, observaram que próximo ao ponto de conexão ocorre uma pequena mudança no percurso do reboque causada pelo ângulo de acoplamento (ângulo formado pelo eixo longitudinal do reboque com o eixo longitudinal do trator). No momento em que o conjunto trator-reboque se desloca em percursos retos, o ângulo de acoplamento tende a ser zero (ângulo desejado), e as trajetórias do trator e do reboque são iguais. Quando o trator faz curva, ocorre uma rápida variação no percurso do reboque, e o ângulo de acoplamento desejado muda gradualmente. Com isso, o ângulo de acoplamento, quando o trator se desloca em linha reta, é diferente em semicírculo (Huynh et al., 2012).

O deslocamento lateral entre o conjunto trator-reboque pode causar erros de paralelismo entre as passadas dos conjuntos mecanizados, tornando assim a distância entre elas irregular, o que pode influir na má qualidade dos processos mecanizados, assim como na produtividade das culturas.

Nos processos mecanizados, o paralelismo entre as passadas do conjunto trator-equipamento é fundamental para garantir a qualidade e o sucesso das atividades agrícolas.

Matematicamente, define-se duas retas como sendo paralelas se forem coplanares distintas e uma transversal determinar ângulos alternos congruentes. Já dois círculos serão paralelos, se eles forem concêntricos (Dolce e Pompeo, 1993). Essa definição de círculos paralelos foi utilizada para realizar os trajetos curvos.

As diversas atividades mecanizadas requerem menor erro de paralelismo do conjunto mecanizado entre as passadas; na cultura do amendoim, o alinhamento na semeadura e na colheita reduz as perdas, aumenta a produtividade e, conseqüentemente, o produtor obtém maior lucro (Vellidis et al., 2013; Ortiz et al., 2013).

Bettio et al. (2016), analisando o coeficiente de variação e a classificação de espaçamentos entre linhas, como falhos, aceitáveis e duplos, considerando a distância entre as linhas da semeadora de trigo como espaçamento de referência, obtiveram que em curvas fechadas, houve menor porcentagem de espaçamentos aceitáveis se comparado com curvas abertas, e também ocorreu maior coeficiente de variação para os percursos de curvas fechadas. Nos percursos em curva, principalmente as mais fechadas, torna-se difícil manter o paralelismo desejado entre as passadas com o espaçamento estabelecido.

Mudando o uso da inclinação de subsolagem em relação à linha de plantio em terreno plano (a linha de subsolagem era mudada para atingir o ângulo de 15° em relação à linha anterior), Carreira et al. (2018) verificaram que, mesmo assim, a plantadora de cana-de-açúcar não atingiu o paralelismo adequado para a operação devido ser um equipamento de arrasto, o que possibilita os erros advindos devido ao arraste, demonstrando que a estrutura do equipamento, por si só, causa um deslocamento lateral.

Passalaqua (2018) observou que a declividade do terreno e o tipo de percurso (reto ou curvo) são causadores de desalinhamento do conjunto trator-transbordos, sendo que os maiores desvios ocorreram em terrenos inclinados e com maiores erros para percursos curvos devido à carreta apresentar uma tendência de reduzir o raio de curvatura. Com relação aos transbordos, principalmente o último, a autora verificou que o sistema de direcionamento automático não controla os desvios sofridos pelos mesmos.

Passalaqua et al. (2016) analisaram as partes do conjunto trator-transbordos, considerando a linha central de cada um dos transbordos em relação à linha central do eixo dianteiro do trator e às linhas projetadas. Os autores compararam os valores de erro do eixo dianteiro do trator com a linha projetada percurso reto e em percurso curvo, encontraram erros 0,083 m e 0,447 m, respectivamente, com 538% de erro

entre os dois percursos. Eles justificam essa grande diferença entre os erros devido ao tipo de rota a que o conjunto foi submetido; pois, em caminhos curvados, o conjunto move-se fechando o raio.

Os mesmos autores também verificaram que os erros entre o primeiro e o segundo transbordo foram menores em função da menor distância entre eles, quando comprados com a distância entre o trator e o primeiro transbordo.

2.4 Controle estatístico de qualidade nos processos mecanizados

Para Montgomery (2016), o Controle Estatístico de Qualidade (CEQ) utiliza-se de técnicas e de ferramentas com o objetivo de melhorar a qualidade dos processos, produtos e serviços. A melhoria da qualidade é obtida por meio da redução da variabilidade de características importantes de um produto, o que resulta em redução de desperdício devido à menor quantidade de produtos com defeitos.

Dentro de um processo, a variabilidade está correlacionada diretamente à qualidade, e conforme Silva e Voltarelli (2015), a qualidade de um processo é obtida pela redução de sua variabilidade, ou seja, quanto menor a variabilidade, maior será a qualidade, a confiabilidade e a aceitação do produto ou serviço. Neste caso, alta variabilidade está associada ao desperdício de dinheiro, de tempo e de esforço.

O monitoramento da variabilidade pode ser obtido pelo uso das ferramentas do Controle Estatístico do Processo (CEP), e elas são úteis para alcançar a estabilidade do processo e para melhorar a capacidade através da redução da variabilidade (Montgomery, 2009).

Existem sete ferramentas no CEQ que são utilizadas para fornecer informações sobre definir, mensurar, analisar e monitorar, a fim de auxiliar na tomada de decisões e de propor soluções para eventuais problemas encontrados. As ferramentas são: falha de verificação, histograma, fluxograma, diagrama de Pareto, diagrama de causa e efeito, diagrama de dispersão e cartas de controle (Silva e Voltarelli, 2015).

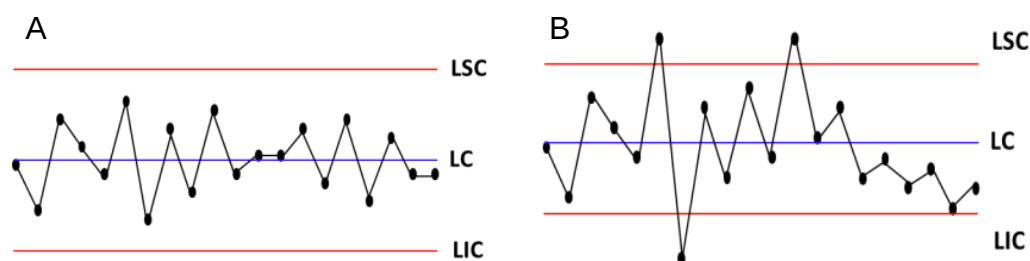
Das sete ferramentas do controle estatístico de qualidade, a carta de controle de Shewhart é a mais sofisticada tecnicamente. Foi desenvolvida na década de 1920 por Walter A. Shewhart, dos Laboratórios Bell Telephone. Os conceitos estatísticos

que formam a base do CEP são baseados na teoria da variabilidade de Shewhart (Montgomery, 2009).

Conforme Montgomery (2009), independentemente de quão bem projetado e cuidadosamente bem inspecionado o processo de produção, sempre ocorrerá uma variabilidade inerente ou natural, sendo chamada também de "ruído de fundo". Essa variabilidade é o efeito cumulativo de muitas causas pequenas, essencialmente inevitáveis e que são partes inerentes ao processo. Nesse caso, o processo está sob controle (Figura 3A), operando apenas com as causas de variação aleatória ou comum. O processo está sob controle quando todos os pontos apresentam um padrão essencialmente aleatório.

Como todo processo ou produto sofre causas aleatórias, logo o objetivo do controle estatístico do processo é identificar rapidamente a ocorrência de causas atribuíveis ou especiais por meio da investigação nas mudanças do processo e realizar ação corretiva antes que muitas unidades não conformes sejam fabricadas (Montgomery, 2016).

Segundo Samohyl (2009), causas especiais ou atribuíveis ocorrem uma vez ou ocasionalmente, porém em períodos irregulares, sendo previsível, quando isso acontece que o processo está fora de controle (Figura 3B). A variabilidade é muito grande quando comparada com as causas aleatórias, pois produz perturbações muito fortes no processo de produção, por isso devem ser eliminadas ou, se, por alguma razão, não forem eliminadas, sua influência pode ser reduzida.



Fonte: Oliveira et al. (2013).

Figura 3. Exemplo de cartas de controle. A: processo está sob controle estatístico. B: processo está fora de controle estatístico. LSC: Limite Superior de Controle. LC: Linha Central. LIC: Limite Inferior de Controle.

A alta variabilidade nas características-chave da qualidade do produto ou do processo pode ocorrer devido a fatores conhecidos como “6 Ms”: Mão de obra, Máquina, Matéria-prima, Método, Medição e Meio ambiente (Trindade et al. 2007).

A carta de controle é uma representação gráfica de uma característica da qualidade que foi medida, ou calculada, a partir de uma amostra versus o número da amostra ou do tempo. Nela existem três linhas: uma linha central que representa o valor médio da característica da qualidade e duas linhas horizontais chamadas de Limite Superior de Controle (LSC) e Limite Inferior de Controle (LIC) (Montgomery, 2016).

Para Montgomery (2009), as cartas de controle são um tipo de análise estatística baseada na variabilidade do processo. Logo, para considerar se o processo está ou não sob controle, são utilizadas três linhas: uma linha central, uma superior e uma inferior. A linha central é calculada em função da média amostral; os limites de controle (superior e inferior) usam a média e 3 vezes o desvio padrão, conforme as equações:

$$LIC = \bar{X} - 3\sigma \quad (1)$$

$$LSC = \bar{X} + 3\sigma \quad (2)$$

Em que:

LIC = Limite Inferior de Controle;

LSC = Limite Superior de Controle.

Esses limites de controle são calculados para determinar se o processo está sob controle, quando os pontos estão entre os limites de controle e não é necessária nenhuma ação, ou se o processo está fora de controle, com pelo menos um ponto fora dos limites de controle, sendo necessárias investigação e ação corretiva para encontrar e para eliminar, respectivamente, as coisas atribuíveis ou aleatórias responsáveis por esse comportamento (Montgomery, 2016).

Os limites específicos são definidos com base em pesquisas, estudos e reuniões de acordo com a necessidade de cada variável estudada.

Foi Walter Shewhart, em 1939, que colocou em prática os conceitos do controle estatístico de qualidade nas fábricas, tornando-se o pioneiro em utilizar conceitos básicos em estatística e Metodologia científica. Hoje em dia, não existe indústria no

mundo que não aplique, no mínimo, ferramentas básicas de Controle Estatístico de Qualidade (Samohyl, 2009).

O primeiro registro do uso do controle estatístico de qualidade na agricultura brasileira foi realizado por Lopes et al. (1995) na cana-de-açúcar (Silva e Voltarelli, 2015).

Logo após, muitos outros trabalhos foram desenvolvidos utilizando essa ferramenta estatísticas, como por exemplo:

Por meio do controle estatístico do processo, foi possível identificar que a colheita do algodão estava fora dos padrões de qualidade, pois as perdas de solo, na planta e totais, estavam fora dos limites de controle superior e/ou inferior. Os autores observaram a incidência de muitos pontos acima do limite superior de controle para perdas no solo, e isso fez com que a média das perdas de algodão no solo fosse maior (Silva et al., 2007).

Os indicadores de qualidade no processo de semeadura do milho foram avaliados com o uso das cartas de controle. O indicador espaçamento normal apresentou um ponto fora do limite de controle superior, com ocorrência de causas extrínsecas ao processo. Neste caso, a instabilidade do processo foi atribuída aos fatores máquina, mão de obra e ambiente (Arcoverde et al., 2016).

O uso do piloto automático na semeadura e no arranquio do amendoim diminuiu a variabilidade nas perdas totais e, como consequência, ocorreu melhor qualidade no processo. Os mesmos autores verificaram menor erro de paralelismo do conjunto mecanizado no arranquio (Santos et al., 2016).

Zerbato et al. (2019) também observaram melhoria na qualidade do processo de semeadura do amendoim devido a menor erro de paralelismo entre as passadas do conjunto trator-semeadora.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental

O estudo foi realizado em área experimental do departamento de Engenharia Rural da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal, localizada próximo às coordenadas geográficas 21°15' latitude S e 48°18' longitude W, com altitude média de 570 m (Figura 4).

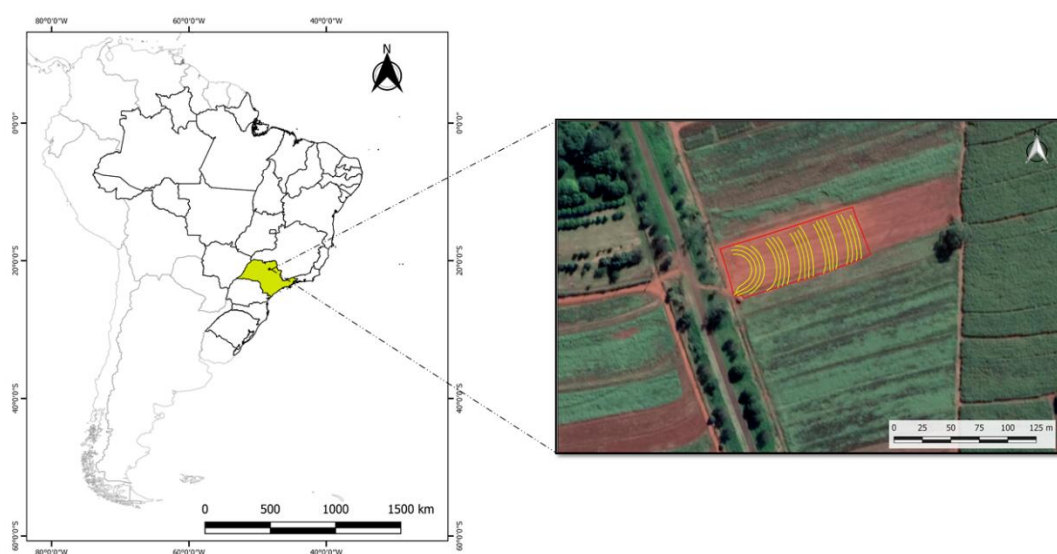


Figura 4. Local da área experimental e disposição dos raios de curvatura na área.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico típico, com relevo suave ondulado e declividade média de 3%, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013), classe textural argilosa com 51% de argila, 29% de silte e 20% de areia na camada de 0,0 – 0,20 cm.

3.2 Equipamentos agrícolas

O experimento foi desenvolvido por meio de testes realizados a campo, utilizando o trator New Holland TS 6020 4x2 TDA (Tração Dianteira Auxiliar), com

potência de 82 kW (111 cv), distância entre eixos de 2,65 m e bitola de 1,70 m, com pneus diagonais, eixo dianteiro com pneus 14.9-24 R1, com pressão de inflação de 131 kPa (19 psi) e traseiro 18.4-34 R1 com pressão de inflação de 159 kPa (23 psi) e rotação nominal no motor de 1.900 rpm. O trator estava equipado com piloto automático do tipo hidráulico e tecnologia GNSS embarcada, com monitor de bordo modelo AgGPS FMX e antena receptora GNSS, e com método de posicionamento relativo cinemático em tempo real (*Real Time Kinematic* - RTK) que tracionou o protótipo de arrasto com velocidade média de 5 km h⁻¹.

Foi adaptado o chassi de uma semeadora-adubadora de arrasto que possibilitasse mudança no comprimento do cabeçalho e na variação da largura da bitola do equipamento, o qual denominamos protótipo de arrasto.

O protótipo adaptado a partir do chassi da semeadora-adubadora arrasto, apresentava as dimensões: largura de 3,90 m, largura útil de trabalho de 3,60 m, altura de 1,52 m, com possibilidade de mudança no comprimento do cabeçalho (Figura 5A), proporcionando comprimento mínimo do ponto de acoplamento ao órgão ativo (disco) de 2,40 m (Figura 5B), comprimento máximo do ponto de acoplamento ao órgão ativo (disco) de 2,80 m. Era composto por duas rodas com pneus de transporte e pressão de inflação de 214 kPa (30 psi), com possibilidade de larguras de bitola (Figura 5C) entre 0,7 m (menor bitola) e 2,75 m (maior bitola).

Os semicírculos de referência realizados no solo para medir o paralelismo foram obtidos por meio de um disco de corte ondulado, com diâmetro de 0,4 m alocado no centro do protótipo. O protótipo foi regulado para fazer os semicírculos, com profundidade superficial de 1 cm, pois após cada teste os semicírculos eram desfeitos utilizando plaina niveladora da Marispan acoplada ao trator New Holland TS110.

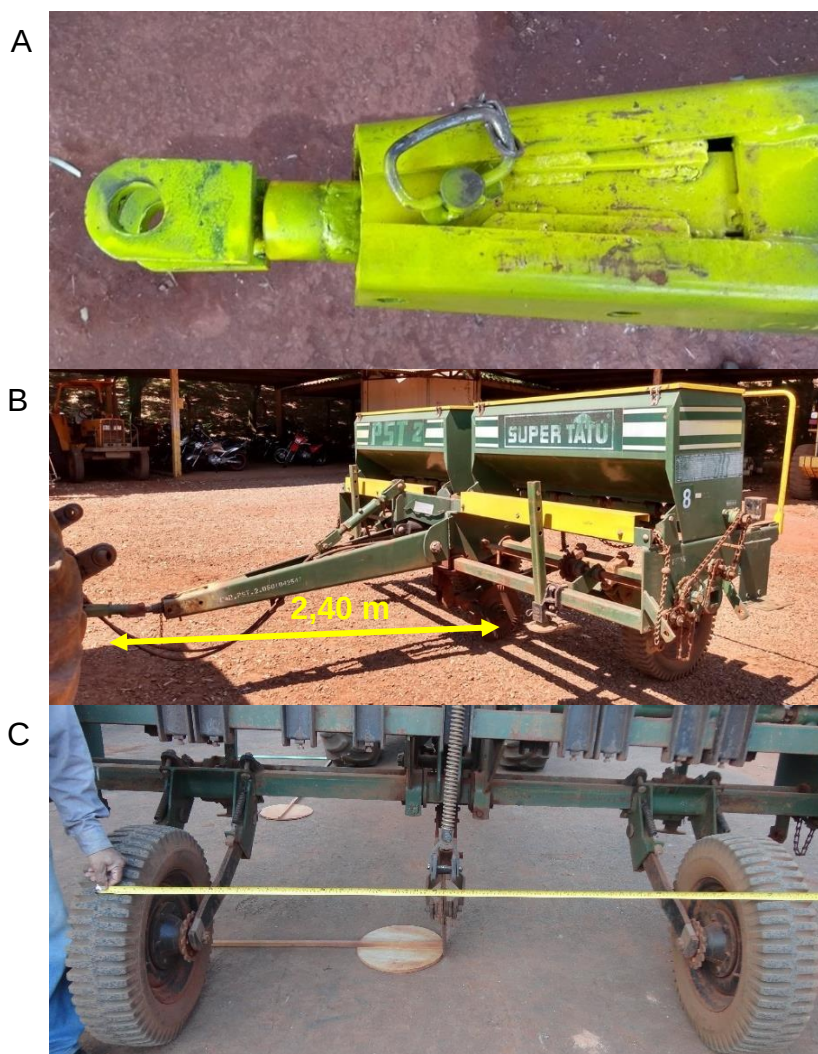


Figura 5. A: Mudança no comprimento do cabeçalho; B: Comprimento mínimo do ponto de acoplamento ao órgão ativo (disco); C: Largura da bitola.

O trajeto realizado pelo conjunto trator-protótipo nos testes foi criado por meio de projeto em software CAD, a partir das coordenadas geográficas da área experimental, e os semicírculos criados estavam distanciados entre si a cada 3,60 m, por causa da largura de trabalho do chassi da semeadora-adubadora utilizada. Antes de cada teste, realizava-se a configuração do monitor, no qual se inseriam a largura útil de trabalho e a distância do ponto de engate na barra de tração ao órgão ativo (disco).

3.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5x4x15, com 20 repetições. Os tratamentos avaliados estão na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos avaliados.

Tratamentos		
Raios de Curvatura médio (m)	Comprimentos do Cabeçalho (m)	Larguras de Bitola (m)
R1 16,4 m	C1 2,40 m	B1 2,75 m
R2 20 m	C2 2,50 m	B2 2,45 m
R3 23,6 m	C3 2,60 m	B3 2,15 m
R4 38 m	C4 2,70 m	B4 1,85 m
R5 41,6 m	C5 2,80 m	
R6 45,2 m		
R7 59,6 m		
R8 63,2 m		
R9 66,8 m		
R10 81,2 m		
R11 84,8 m		
R12 88,4 m		
R13 102,8 m		
R14 106,4 m		
R15 110 m		

Os raios de curvatura definidos acima (Tabela 1) foram baseados em valores próximos dos raios de 20, 40, 60, 80 e 100m. Eles foram obtidos por meio da média entre dois semicírculos, no qual foi medido o paralelismo, obtendo o raio de curvatura médio (Figura 6). Os semicírculos estavam distantes entre si a cada 3,60 m, em função da largura de trabalho do chassi da semeadora-adubadora que foi usada como protótipo para os testes.

As repetições foram realizadas ao longo dos semicírculos, espaçados entre si por aproximadamente 1 m, para garantir condições semelhantes nas medições. Os trajetos realizados pelo conjunto trator-protótipo sempre começaram do mesmo lado em todos os raios de curvatura. A primeira medição foi realizada à distância de aproximadamente 20 m do início do semicírculo desenhado no solo pelo disco de corte (marcador) colocado no protótipo. Este espaço foi reservado para a estabilização do conjunto trator-máquina, bem como do sinal de correção do GNSS e do piloto automático.

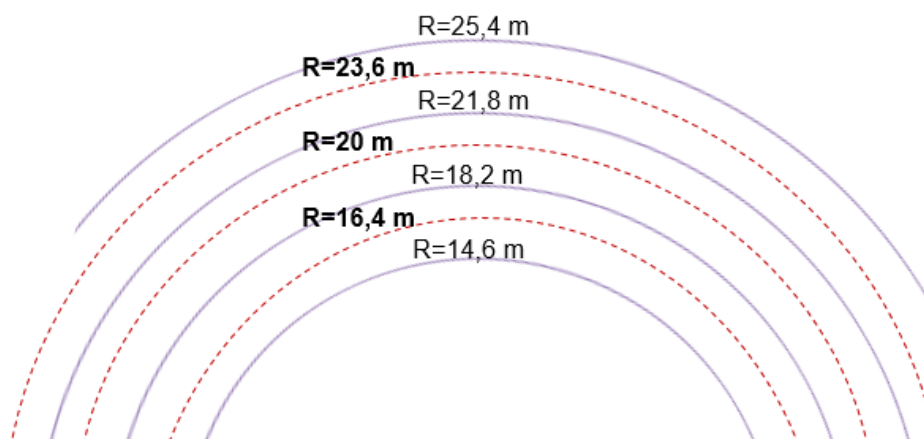


Figura 6. Raio de curvatura médio.

3.4 Avaliação do paralelismo

Foi desenvolvido uma metodologia para medir o paralelismo entre os dois semicírculos formados no solo, para garantir que os valores medidos estavam corretos. A medição do paralelismo entre as passadas do conjunto trator-protótipo foi obtida por meio do uso de trena com precisão milimétrica, utilizando um instrumento que foi desenvolvido para auxiliar na mensuração do paralelismo entre os semicírculos formados no solo, chamado de “pirulito”, essa denominação foi feita em função do instrumento apresentar formato parecido com o de um pirulito (Figura 7).



Figura 7. Instrumento “pirulito” usado para auxiliar na medição do paralelismo.

A metodologia do “pirulito” foi fundamentada no princípio de que quando dois círculos se interceptam em um único ponto, então esse ponto de intersecção entre eles pertence ao segmento de reta ligando os centros dos respectivos círculos (Figura 8). No instrumento, isso pode ser visualizado assim: a reta formada entre o centro do

“pirulito” e o centro do semicírculo C_1 passa pelo ponto de intersecção entre os dois. Como todos os semicírculo têm o mesmo centro A do semicírculo inicial, então a distância entre esses semicírculos é dada pelo comprimento do segmento s obtido da seguinte forma: a semirreta r que se inicia no ponto de intersecção do “pirulito” com o semicírculo C_1 , a qual é chamada de B, passa pelo centro do “pirulito” que intersecta outro semicírculo C_2 em algum ponto C (Figura 9). Logo, o segmento s é definido como sendo o segmento da semirreta r ligando os pontos B e C, conforme a Figura 10.

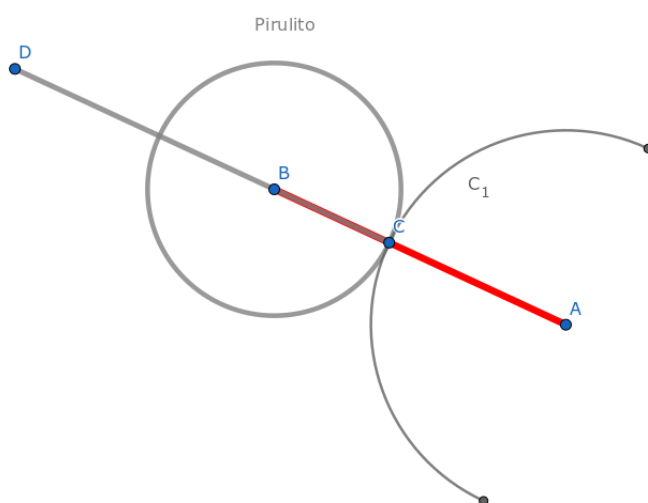


Figura 8. Intersecção de dois círculos em um único ponto.

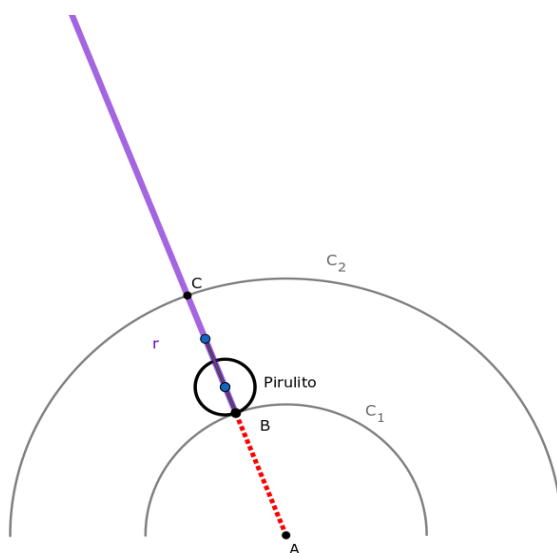


Figura 9. Semirreta r .

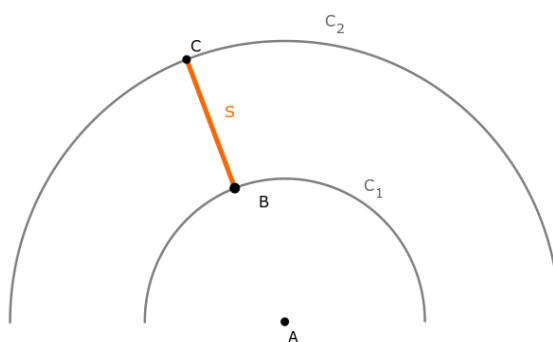


Figura 10. Segmento **s** ligando os pontos B e C.

A base da semirreta do “pirulito” ficou posicionada de modo que se intersecta o semicírculo em um único ponto (Figura 11 A e B), e a trena foi posicionada sobre o “pirulito” até tocar no outro semicírculo (Figura 12 A e B). Aqui a trena substituiu o papel do segmento **s** na Figura 10 acima. Dito isso, o “pirulito” serviu de referência para mensurar, em uma situação ideal, a menor distância entre os dois semicírculos, garantindo assim uma medição prática e confiável do paralelismo entre os percursos formados pelo conjunto trator-protótipo.



Figura 11. Ponto de interseção da semi-reta do pirulito com o semicírculo (A e B).



Figura 12. Medição do paralelismo entre dois semicírculos (A e B).

3.5 Análise estatística

Realizou-se a análise de variância pelo teste F e, quando significativo, empregou-se o teste de Tukey e a regressão a 5% de significância, por meio do programa estatístico AgroEstat. Quando houve interação entre os fatores, os gráficos de regressão foram gerados no Excel com base na análise estatística e utilizou-se o modelo de maior grau significativo.

A variabilidade dos erros de paralelismo foi monitorada por meio das ferramentas do controle estatístico do processo, utilizando o modelo de carta de controle individual, com o auxílio do programa Minitab®. Os limites de controle foram estabelecidos considerando a variabilidade dos dados, utilizando a média, mais ou menos três vezes o desvio padrão. Além desses limites, foram estabelecidos também os limites específicos de controle, com base na faixa de erro médio ($\pm 2,5$ cm) fornecido pelo sinal de correção RTK.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Gráficos de regressão

As tabelas de análise de variância (apêndice A) para efeitos principais e interação para os raios de curvatura, comprimentos de cabeçalho e larguras de bitola

do protótipo, na variável módulo do erro de paralelismo, foram utilizadas para confecção dos gráficos de regressão.

Observa-se, na Figura 13, maiores erros de paralelismo nos raios de 16,4 m, 20 m e 23,6 m e queda acentuada do erro de paralelismo a partir do raio de 38 m para todas as bitolas do protótipo, com o erro mantendo-se praticamente constante e abaixo de 0,05 m, valor de erro considerado aceitável quando se utiliza o sinal de correção RTK, pois o erro de paralelismo foi medido entre dois raios de curvatura realizado no solo, e o sinal de correção estabelece a faixa de erro médio de $\pm 2,5$ cm entre a linha projetada e a realizada, por isso erros menores que 0,05 m foram atribuídos ao sinal de correção RTK utilizado no estudo .

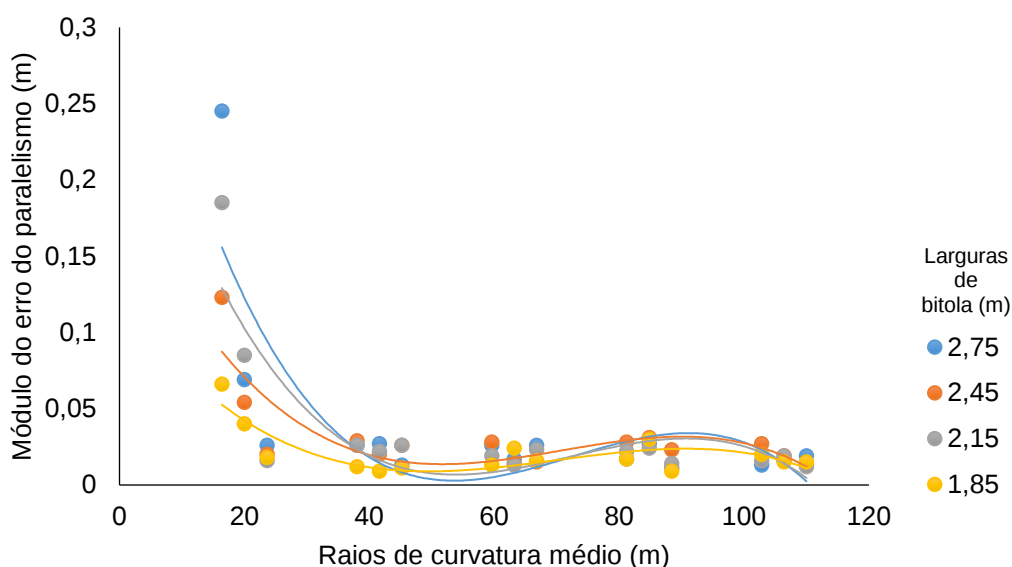


Figura 13. Regressão do módulo do erro do paralelismo dos raios de curvatura médio dentro de larguras de bitola do protótipo.

Tabela 2. Modelo matemático dos raios de curvatura dentro de larguras de bitola do protótipo.

Larguras de bitola (m)	Modelo matemático	R ²
2,75	$y = 0,376 - 0,0173x + 0,00025684x^2 - 0,00000118x^3$	0,64
2,45	$y = 0,199 - 0,00887x + 0,00013515x^2 - 0,00000064x^3$	0,67
2,15	$y = 0,304 - 0,0137x + 0,00020321x^2 - 0,00000094x^3$	0,70
1,85	$y = 0,124 - 0,0057x + 0,00008897x^2 - 0,00000042x^3$	0,73

Apesar de nos três primeiros raios os erros serem maiores, somente na bitola de 1,85 m o erro de paralelismo ficou próximo de 0,05 m, isso pode ser justificado em função de a menor bitola do protótipo estar bem próxima da bitola do trator (1,70 m), o que ajudou o protótipo a seguir uma trajetória próxima da realizada pelo trator.

Embora todas as bitolas do protótipo tenham apresentado comportamento polinomial cúbico, os erros não ultrapassam o valor considerado aceitável a partir do raio de 38 m.

Na Figura 14, nota-se que o raio de 23,6 m ao de 102,6 m apresentaram comportamento quadrático, com os erros de paralelismo abaixo de 0,05 m para todas as bitolas do protótipo testadas. Os raios com 16,4 m e 20 m foram os que obtiveram os maiores erros de paralelismo com comportamento polinomial cúbico. Os menores erros de paralelismo, nos dois raios, foram obtidos na bitola de 1,85 m e seguido pelo intervalo entre as bitolas de 2,45 m e 2,75 m.

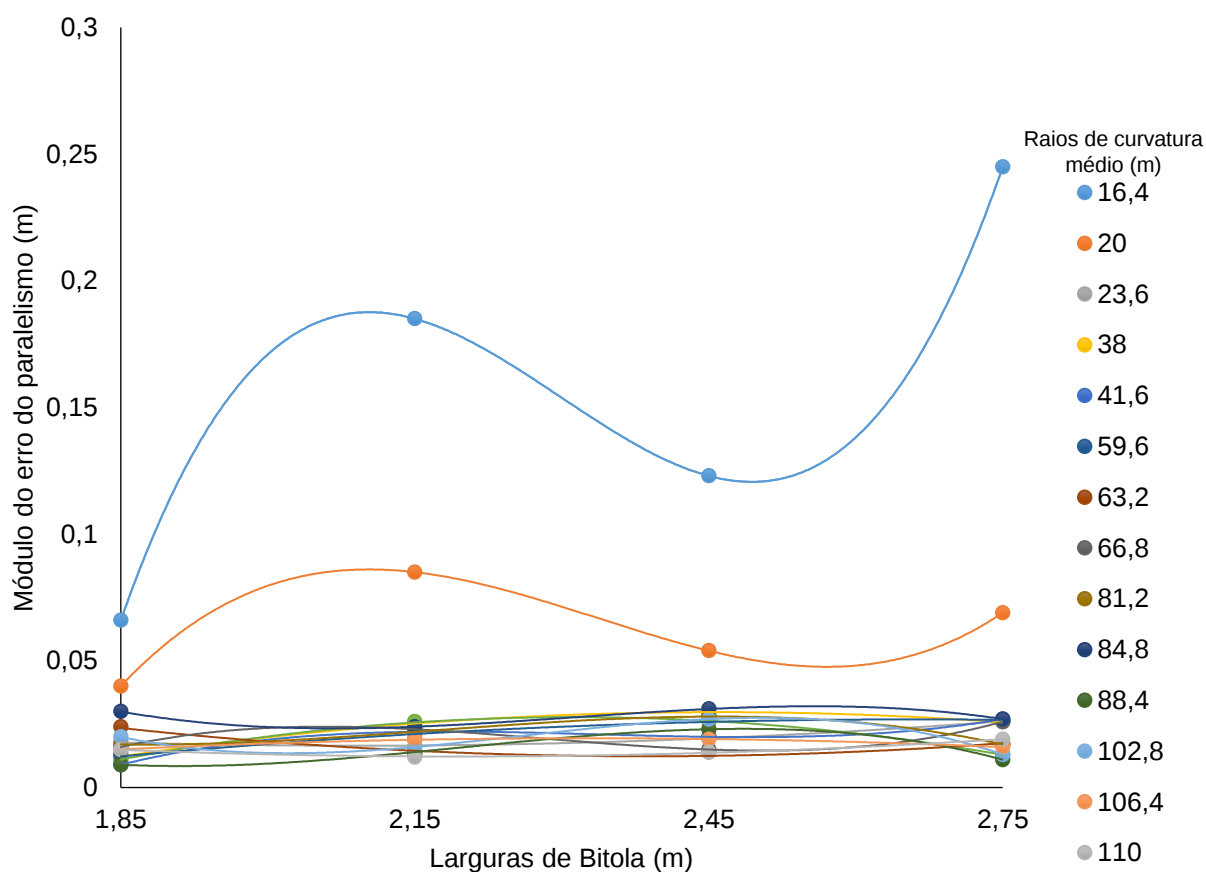


Figura 14. Regressão do módulo do erro do paralelismo das larguras de bitola dentro de raios de curvatura médio.

Tabela 3. Modelo matemático das larguras de bitola dentro de raios de curvatura médio.

Raios de curvatura médio (m)	Modelo matemático	R ²
16,4	$y = -26,526 + 35,331x - 15,481x^2 + 2,24503x^3$	1
20	$y = -9,414 + 12,430x - 5,376x^2 + 0,767x^3$	1
23,6	$y = 0,125 - 0,1025x + 0,0242x^2$	0,99
38	$y = -0,257 + 0,234x - 0,0478x^2$	0,99
41,6	$y = -1,771 + 2,312x - 0,990x^2 + 0,141x^3$	1
45,2	$y = -0,385 + 0,357x - 0,077x^2$	0,99
59,6	$y = -0,134 + 0,122x - 0,023x^2$	0,94
63,2	$y = 0,237 - 0,189x + 0,039x^2$	0,91
66,8	$y = -2,302 + 3,119x - 1,383x^2 + 0,202x^3$	1
81,2	$y = 1,146 - 1,61x + 0,756x^2 - 0,116x^3$	1
84,8	$y = 1,906 - 2,494x + 1,091x^2 - 0,157x^3$	1
88,4	$y = 1,560 - 2,182x + 1,009x^2 - 0,153x^3$	1
102,8	$y = 2,825 - 3,806x + 1,701x^2 - 0,250x^3$	1
106,4	-	-
110	-	-

Com isso, em percursos de raios mais fechados, aumenta o deslocamento lateral do protótipo e recomenda-se que a bitola do equipamento se aproxime da bitola utilizada no trator para promover estabilidade no conjunto trator-protótipo a fim de diminuir o desvio lateral e consequentemente menor erro de paralelismo.

Resultados parecidos foram obtidos por Cariou et al. (2010), que separaram claramente as trajetórias do reboque e do veículo, em alta curvatura, dos dois círculos sucessivos. O veículo seguiu satisfatoriamente o percurso de referência, porém o reboque ficou deslocado para o interior dos dois círculos sucessivos. O reboque foi deslocado aproximadamente 0,5 m durante o primeiro círculo e aproximadamente 0,35 m durante o segundo círculo.

O cabeçalho de 2,40 m, quando comparado com os demais, obteve menor erro de paralelismo nos três primeiros raios (16,4 m, 20 m e 23,6 m). Apesar do comportamento polinomial cúbico, nota-se que, do raio de 38 m ao de 110 m, os comprimentos do cabeçalho obtiveram comportamento semelhante para o erro de paralelismo entre as passadas, com valor abaixo de 0,05 m, evidenciando que os comprimentos do cabeçalho não interferem no paralelismo, no intervalo de raio de 38 m ao de 110 m (Figura 15).

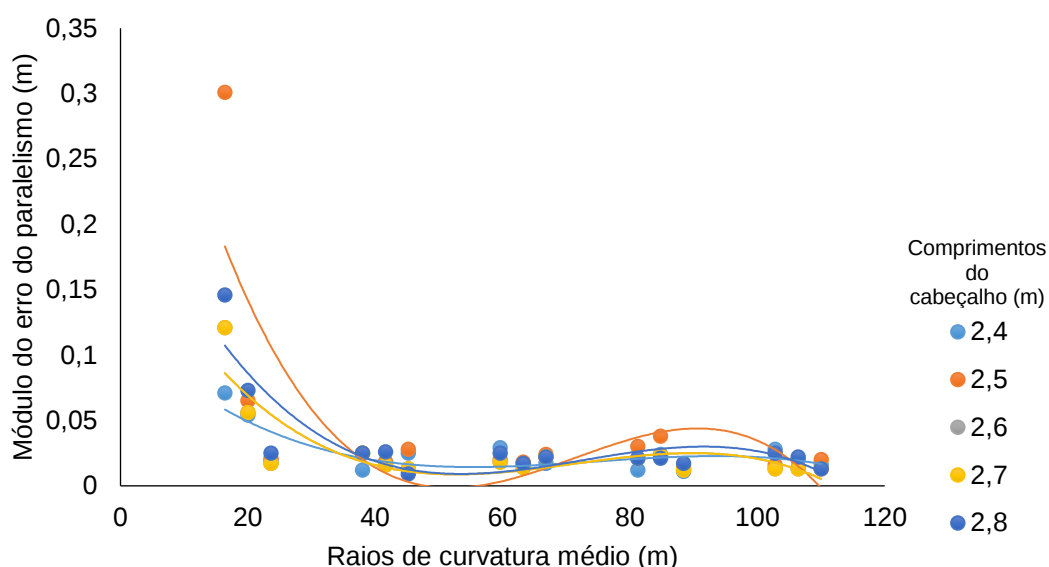


Figura 15. Regressão do módulo do erro do paralelismo dos raios de curvatura médio dentro dos comprimentos do cabeçalho.

Tabela 4. Modelo matemático dos raios de curvatura médio dentro dos comprimentos do cabeçalho.

Comprimentos do cabeçalho (m)	Modelo matemático	R ²
2,40	$y = 0,118 - 0,0046x + 0,00006700x^2 - 0,00000030x^3$	0,66
2,50	$y = 0,463 - 0,022x + 0,00033601x^2 - 0,00000157x^3$	0,59
2,60	$y = 0,201 - 0,00904x + 0,000136x^2 - 0,00000063x^3$	0,71
2,70	$y = 0,224 - 0,0101x + 0,000152x^2 - 0,00000071x^3$	0,71
2,80	$y = 0,249 - 0,011x + 0,000166x^2 - 0,00000076x^3$	0,75

Huynh et al. (2012), estudando o trajeto do trator-reboque em caminho, em linha reta e em arco semicircular, observaram que, próximo ao ponto de conexão, ocorre uma pequena mudança no percurso do reboque causada pelo ângulo de acoplamento (ângulo formado pelo eixo longitudinal do reboque com o eixo longitudinal do trator). Com isso, o ângulo de acoplamento, quando o trator se desloca em linha reta, é diferente em semicírculo. Em percursos retos, o ângulo de acoplamento tende a ser zero (ângulo desejado), e as trajetórias do trator e do reboque são iguais. Ao fazer curva, ocorre uma rápida variação no percurso do reboque, e o ângulo de acoplamento desejado muda gradualmente.

Passalaqua (2018) constatou maior desalinhamento do conjunto trator-transbordos na cana-de-açúcar para percursos curvos e, conseqüentemente, maiores erros de paralelismo devido à carreta apresentar uma tendência de reduzir o raio de curvatura.

Quando se analisa o comportamento dos cabeçalhos dentro dos raios (Figura 16), observa-se que, a partir do raio de 23,6 m, não houve influência dos comprimentos do cabeçalho estudado no erro de paralelismo com os valores de erros menores que 0,05 m.

Somente nos raios de 16,4 m e 20 m, os erros foram maiores dos considerados aceitáveis, com regressão cúbica que demonstrou menores erros para o cabeçalho de 2,40 m, com tendência de aumento do erro de paralelismo para comprimento do cabeçalho maior que 2,80 m. Logo, em trajetos mais curvos, a maior distância entre o ponto de engate no trator e o órgão ativo no equipamento favorece maior desalinhamento entre o conjunto trator-protótipo devido ao desvio lateral ocasionado por trajetos curvos.

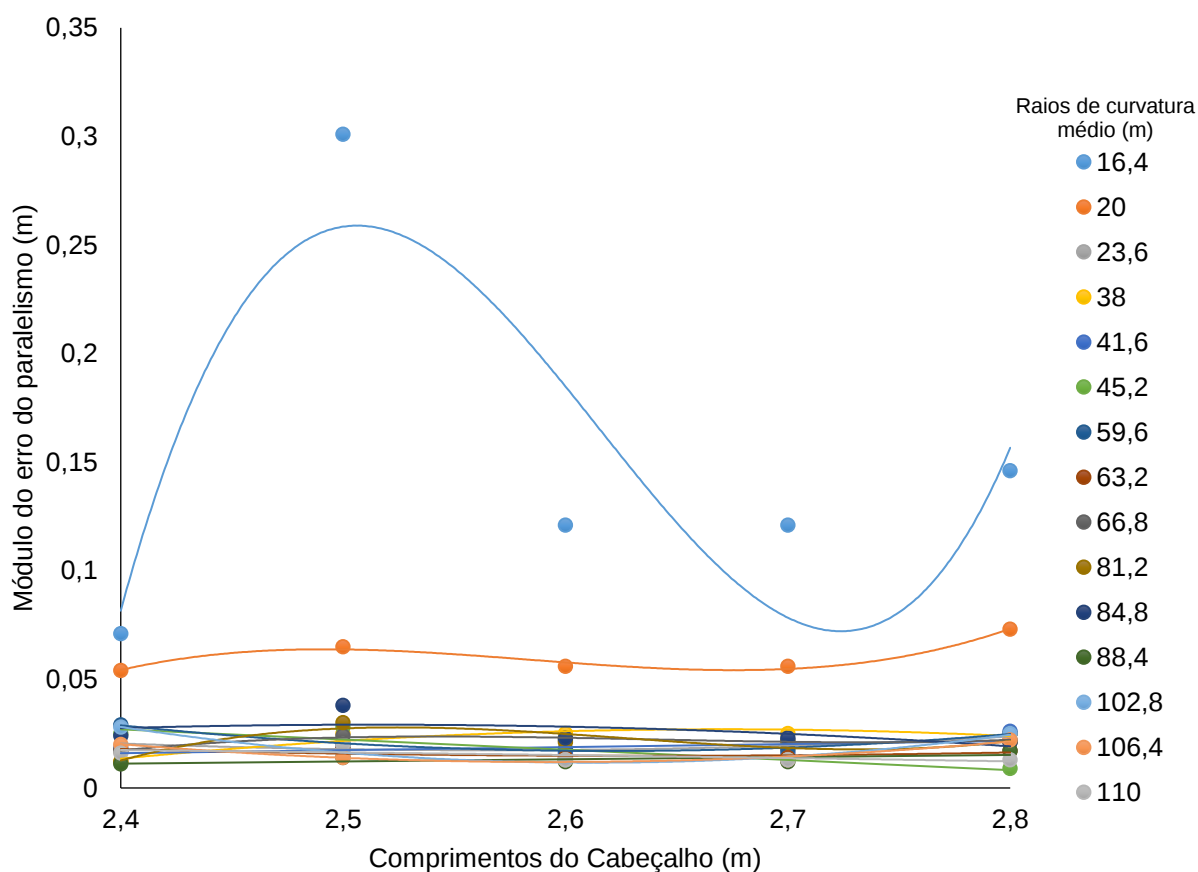


Figura 16. Regressão do módulo do erro do paralelismo dos comprimentos do cabeçalho dentro dos raios de curvatura médio.

Tabela 5. Modelo matemático dos comprimentos do cabeçalho dentro dos raios de curvatura médio.

Raios de curvatura médio (m)	Modelo matemático	R ²
16,4	$y = -606,713 + 698,074x - 267,193x^2 + 34,031x^3$	0,70
20	$y = -35,977 + 41,911x - 16,232x^2 + 2,094x^3$	0,86
23,6	-	-
38	$y = -1,462 + 1,114x - 0,208x^2$	0,90
41,6	$y = -0,0253 + 0,0172x$	0,57
45,2	$y = 0,124 - 0,0404x$	0,67
59,6	$y = 1,743 - 1,316x + 0,251x^2$	0,96
63,2	-	-
66,8	$y = -30,578 + 35,355x - 13,595x^2 + 1,739x^3$	0,94
81,2	$y = -41,560 + 47,619x - 18,149x^2 + 2,302x^3$	0,81
84,8	$y = -1,269 + 1,0112x - 0,1964x^2$	0,28
88,4	$y = -0,0249 + 0,0150x$	0,74
102,8	$y = 2,533 - 1,931x + 0,369x^2$	0,98
106,4	$y = 1,247 - 0,957x + 0,186x^2$	0,94
110	-	-

Passalacqua et al. (2016), analisando os erros de paralelismo na cana-de-açúcar, observaram menores erros entre o primeiro e o segundo transbordo devido a menor distância entre eles.

Observa-se, na Figura 17, que as bitolas estudadas não proporcionaram erro de paralelismo, com valores abaixo 0,05 m, e que apenas na bitola de 2,15 m com o cabeçalho de 2,50 m de comprimento se obteve maior erro, porém ficando próximo do valor de referência.

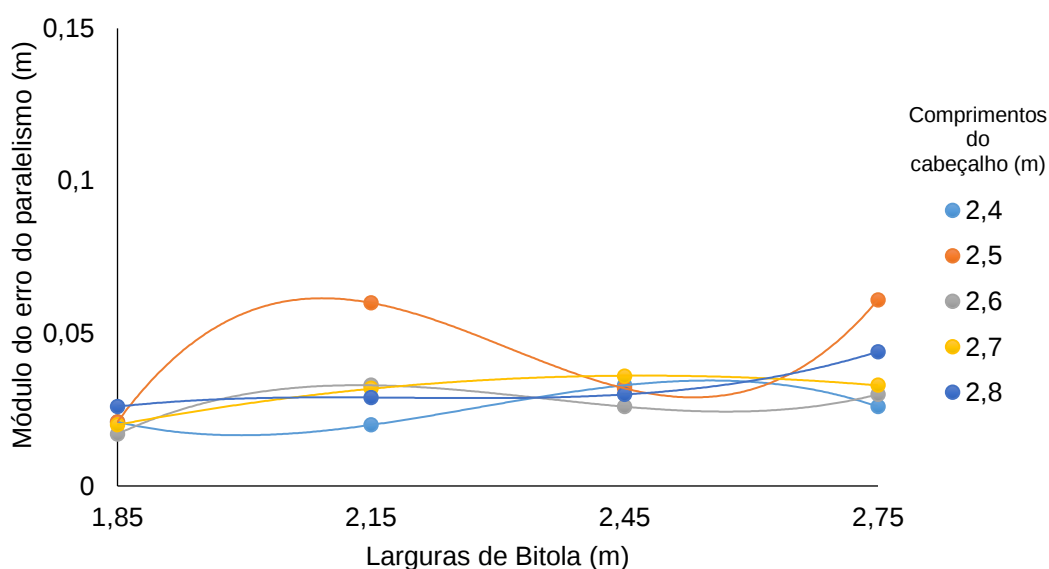


Figura 17. Regressão do módulo do erro do paralelismo das larguras de bitola dentro dos comprimentos do cabeçalho.

Tabela 6. Modelo matemático das larguras de bitola dentro dos comprimentos do cabeçalho.

Comprimentos do cabeçalho (m)	Modelo matemático	R ²
2,40	$y = 2,382 - 3,209x + 1,433x^2 - 0,2102x^3$	1
2,50	$y = -9,113 + 12,100x - 5,279x^2 + 0,761x^3$	1
2,60	$y = -2,520 + 3,306x - 1,417x^2 + 0,201x^3$	1
2,70	$y = -0,208 + 0,197x - 0,040x^2$	0,99
2,80	$y = -0,896 + 1,268x - 0,578x^2 + 0,0879x^3$	1

Diante disso, os comprimentos do cabeçalho sem interferência dos raios de curvatura não causam erro de paralelismo do conjunto trator-protótipo maior do que o considerado aceitável, pois neste caso não ocorre desvio lateral entre eles ocasionado pelo trajeto.

Ao analisar-se a Figura 18, verifica-se que as bitolas também apresentaram erro de paralelismo abaixo do valor aceitável e que as bitolas de 2,75 m e 2,15 m, com o cabeçalho de 2,50 m comprimento, obtiveram erros maiores que 0,05 m.

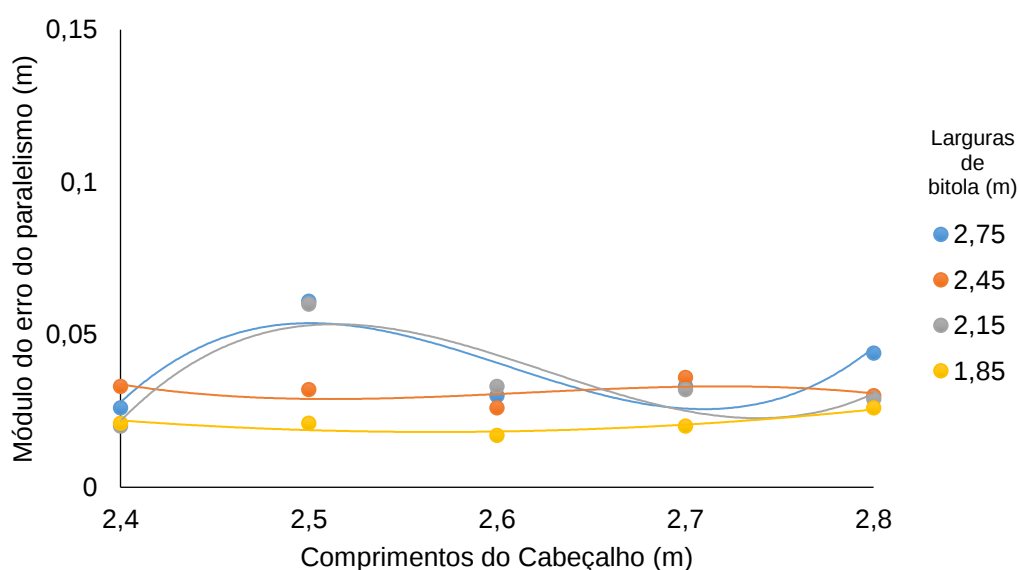


Figura 18. Regressão do módulo do erro do paralelismo dos comprimentos do cabeçalho dentro das larguras de bitola.

Tabela 7. Modelo matemático dos comprimentos do cabeçalho dentro das larguras de bitola

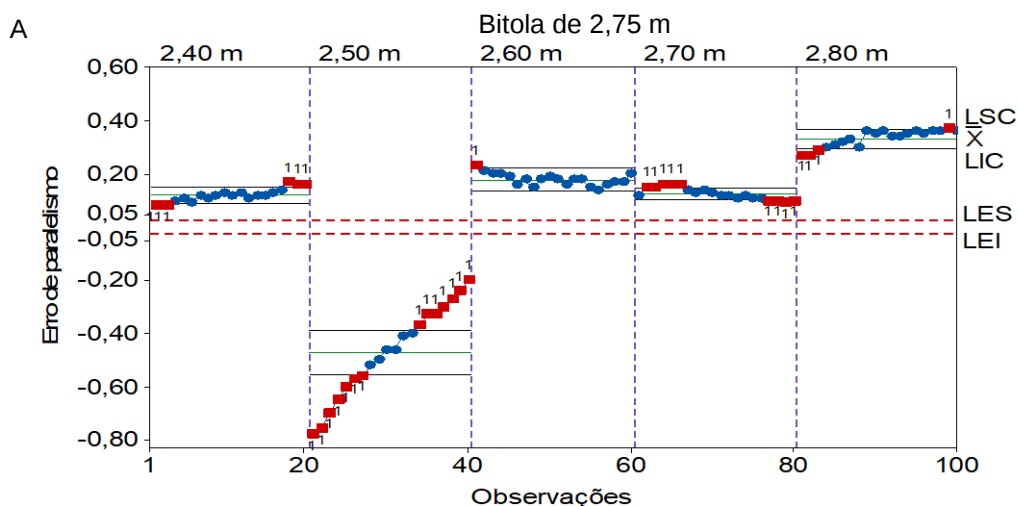
Larguras de bitola (m)	Modelo matemático	R ²
2,75	$y = -108,289 + 125,163x - 48,126x^2 + 6,158x^3$	0,71
2,45	$y = 14,092 - 16,137x + 6,163x^2 - 0,783x^3$	0,26
2,15	$y = -98,996 + 113,579x - 43,341x^2 + 5,503x^3$	0,77
1,85	$y = 0,838 - 0,641x + 0,125x^2$	0,82

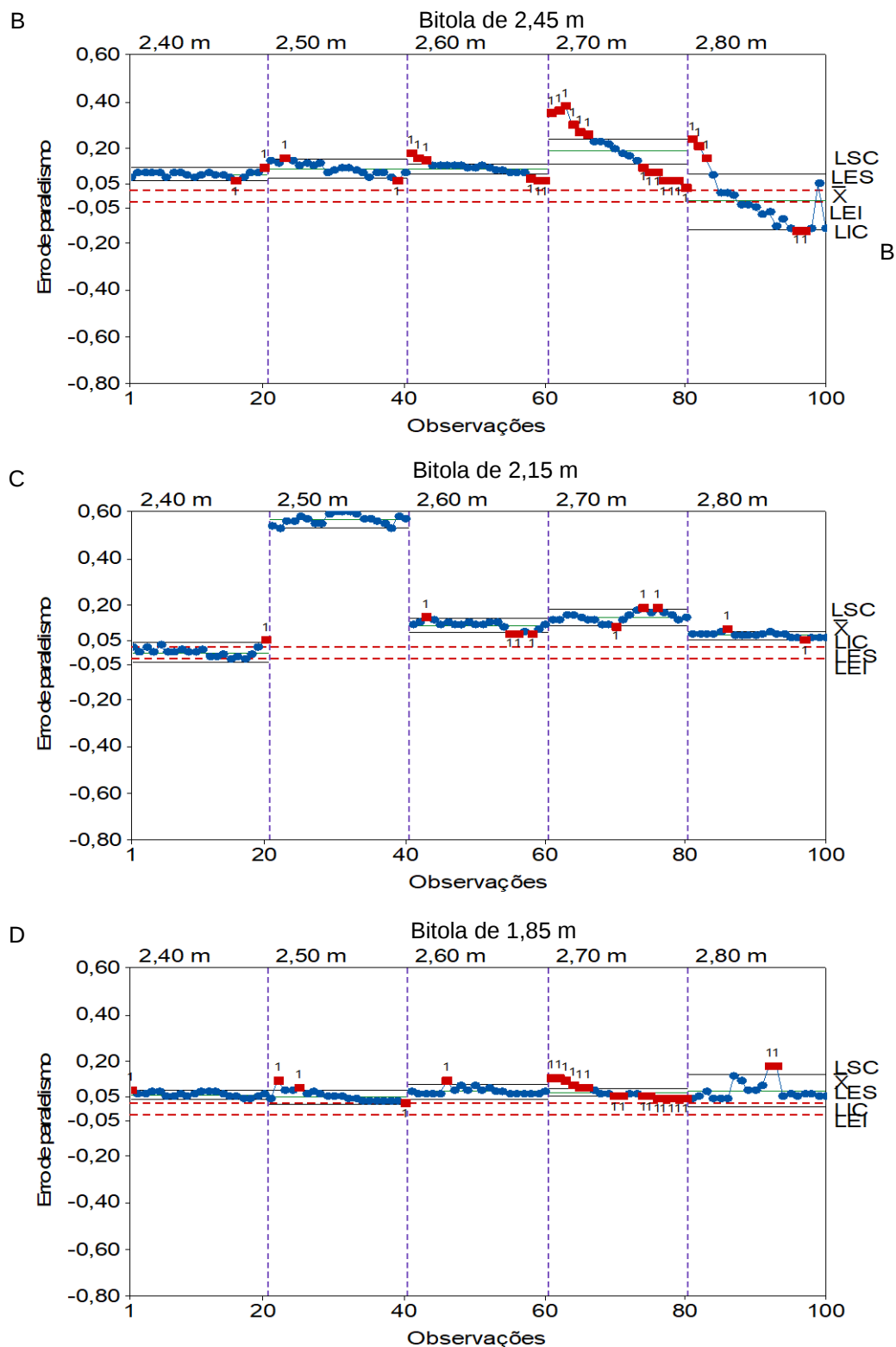
Pode-se observar, também, que a bitola de 1,85 m apresentou os menores erros de paralelismo nos cabeçalhos estudados, porém não se pode atribuir aos tratamentos utilizados esses menores erros devido ao sinal de correção RTK apresentar erro de $\pm 2,5$ cm, quando medido da linha projetada para a executada, e de 0,05 m entre as linhas executadas.

Em condições de trajeto reto, a variação da largura da bitola do protótipo não causa erro de paralelismo, pois nessa condição o conjunto trator-equipamento não sofre influência ocasionada pelos trajetos curvos.

4.2 Cartas de controle

O erro de paralelismo no raio de 16,4 m, na bitola de 2,75 m, com todos os comprimentos de cabeçalhos (Figura 19A), apresentou instabilidade no processo, com pontos acima e abaixo dos limites superiores e inferiores de controle, como também a existência de 100% dos pontos fora dos limites específicos.





LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 19. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 16,4 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m

(D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

O comprimento do cabeçalho de 2,50 m apresentou maior variabilidade, mais pontos fora dos limites de controle e somente nele todos os pontos ficaram abaixo do limite específico inferior, com valores de erros de paralelismo negativo. Esses erros negativos ficam a esquerda a linha projetada o que causa diminuição entre as linhas executadas, o que resulta na sobreposição entre elas.

Na bitola de 2,45 m, todos os comprimentos do cabeçalho proporcionaram pontos acima e abaixo dos limites de controle, demonstrando comportamento instável (Figura 19B). O cabeçalho com comprimento de 2,80 m apresentou maior variabilidade, que é inversamente proporcional à qualidade do processo, e apesar da maior variabilidade foi o único cabeçalho com 15% dos erros de paralelismo que ficaram entre os limites específicos, sendo que, nos demais comprimentos do cabeçalho, 100% dos erros de paralelismo ficaram acima de 2,5 cm, o que proporcionou o afastamento entre os semicírculos realizado pelo conjunto trator-protótipo ao longo do raio estudado.

Na Figura 19C (bitola de 2,15 m), somente no comprimento do cabeçalho de 2,60 m houve estabilidade no processo, porém os erros de paralelismo estão muito distantes e acima do limite específico superior.

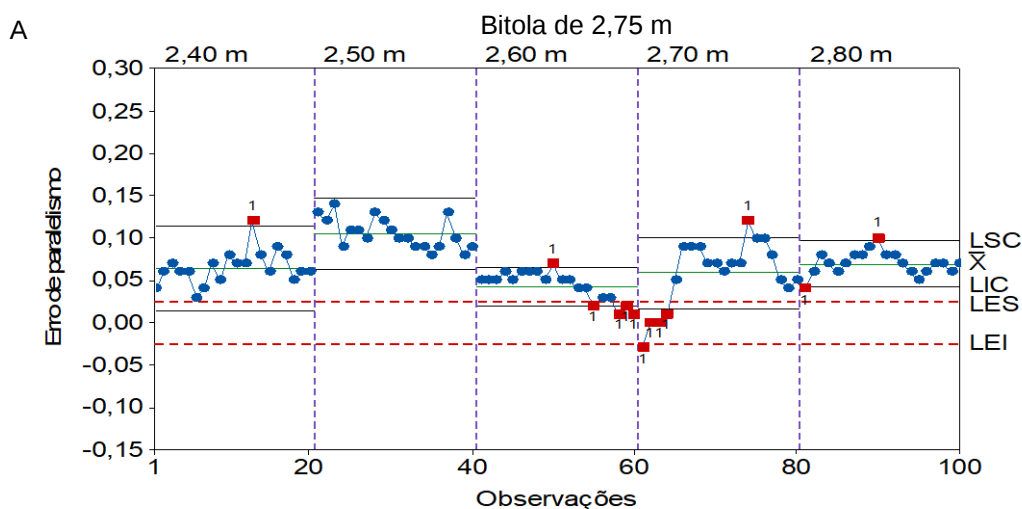
Na bitola de 1,85 m, em todos os comprimentos do cabeçalho, houve pelo menos um ponto fora dos limites de controle (Figura 19D), sendo um indicativo de atuação de causas extrínsecas ao processo. Todos os erros de paralelismo ficaram acima do limite específico superior, e a maior variabilidade foi observada no maior comprimento de cabeçalho (2,80 m).

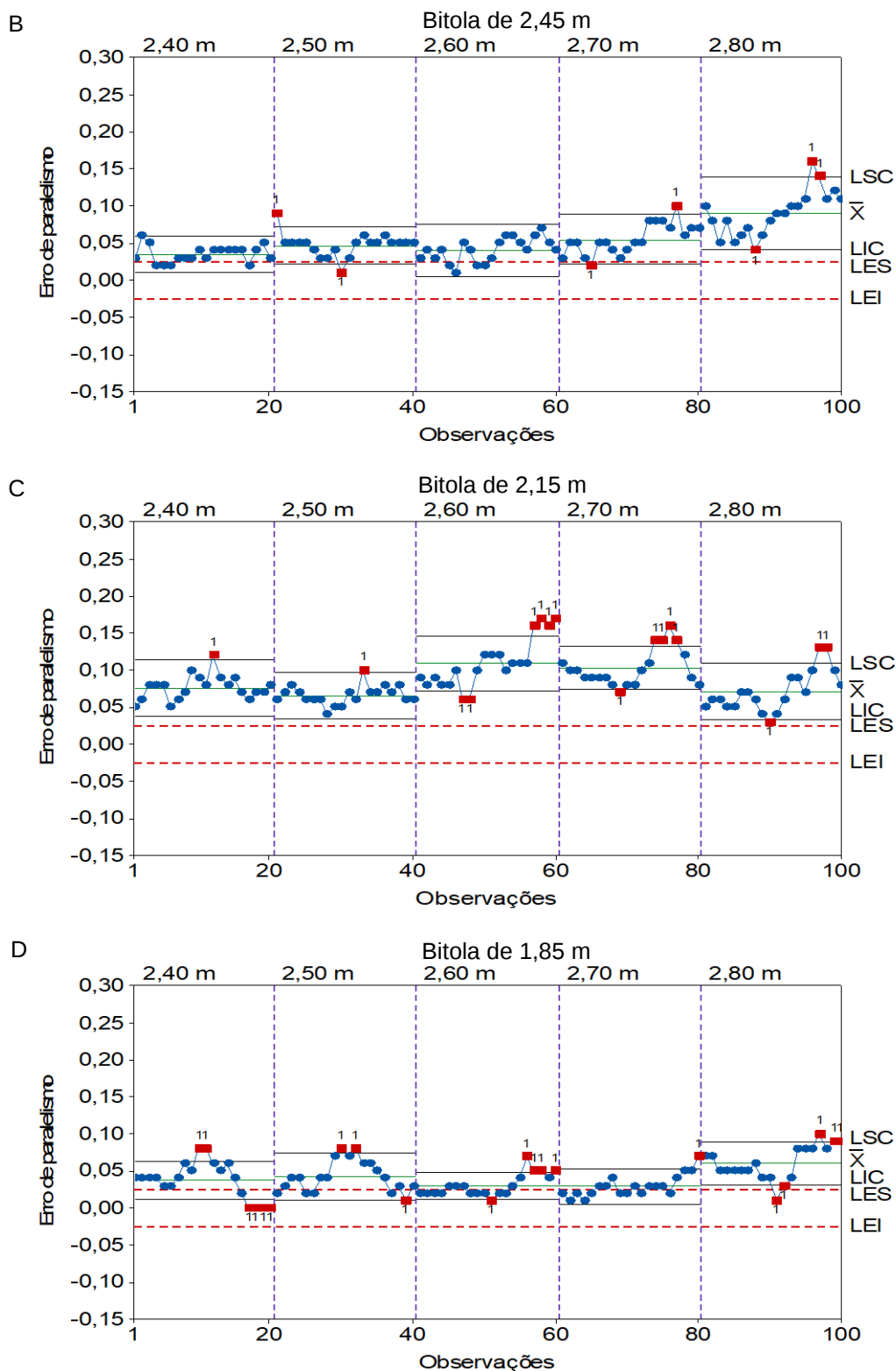
Todas as larguras de bitolas do protótipo e os comprimentos de cabeçalhos analisados no raio de 16,4 m estavam com erros acima do limite específico superior. Exceto na bitola de 2,75 m, com comprimento de cabeçalho de 2,60 m, os erros ficaram abaixo do limite específico inferior. Os erros positivos resultam no afastamento entre as linhas executadas. Resultados distintos foram encontrados por Baio e Moratelli (2011), que verificaram que o erro médio nas passadas com o piloto automático, foi negativo. Conforme os autores, o sinal negativo indica que o erro entre

as passadas foi à esquerda da linha projetada, o que resultou no fechamento das linhas de plantio de cana-de-açúcar.

Os menores raios proporcionam trajetos mais fechados, que dificultaram o protótipo de seguir o percurso planejado e realizado pelo trator, causando maior deslocamento lateral e maiores erros de paralelismo entre as passadas. Logo, quanto menor for o erro de paralelismo, melhor é a qualidade dos processos mecanizados.

No raio de 20 m, para todos os tamanhos de bitola e comprimentos do cabeçalho, houve comportamento semelhante ao observado no raio de 16,4 m, com os erros de paralelismo ficando acima do limite específico superior (Figura 20). Isto demonstrando que, em raios mais fechados, torna-se difícil para equipamentos de arrasto seguirem a linha projetada, ocorrendo o deslocamento lateral do equipamento e proporcionando erros de paralelismo que comprometem a qualidade dos processos mecanizados, como, por exemplo, preparo do solo, semeadura e colheita.





LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 20. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 20 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m

(D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

Conforme Santos et al. (2018), percursos curvos (com grau de curvatura de 23 a 25°) apresentaram mais pontos fora dos limites específicos ($\pm 3,8$ cm) com sinal de correção TRX quando comparados com o reto. Esses altos erros acima e/ou abaixo dos limites especificados podem comprometer a qualidade de semeadura do amendoim.

Na Figura 20A (bitola de 2,75 m), todos os comprimentos de cabeçalhos apresentaram indícios de que o processo está fora de controle, pois tinha pelo menos um ponto acima ou abaixo dos limites de controle. Somente no cabeçalho de 2,60 m, o processo apresentou estabilidade, porém os erros de paralelismo estavam muito acima do considerado aceitável ($\pm 2,5$ cm).

Na bitola de 2,45 m, com os comprimentos do cabeçalho de 2,50 m, 2,70 m e 2,80 m (Figura 20B), ocorreu instabilidade durante o processo, com pontos fora dos limites de controle. A maior variabilidade foi verificada no comprimento de 2,80 m. Logo, nesse comprimento, houve menor qualidade do processo, pois quanto maior for a variabilidade menor é a qualidade.

Com relação aos limites específicos estabelecidos, observa-se que, no raio de 20 m com bitola de 2,45 m e todos os comprimentos do cabeçalho, no mínimo 80% dos erros medidos, estavam acima do limite específico superior, o que favoreceu o distanciamento entre os semicírculos, isso causa espaçamento irregular entre os sulcos.

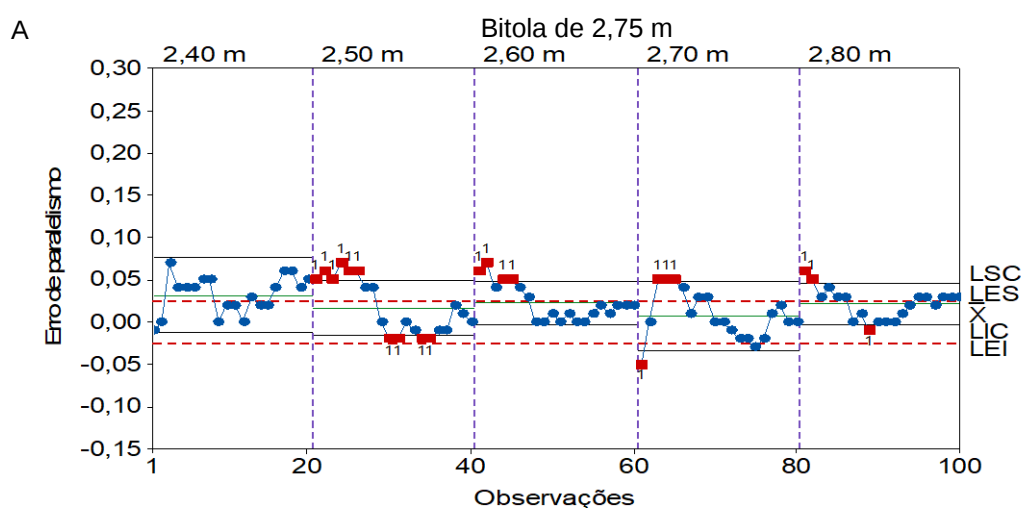
A distância irregular entre as passadas do conjunto mecanizado, tanto falha como foi observado, quanto sobreposição, pode provocar problemas nas demais operações subsequentes de todo o processo produtivo, por isso a importância das operações mecanizadas serem realizadas com o mínimo de erro de paralelismo entre as passadas do conjunto mecanizado para garantir a qualidade dos processos mecanizados.

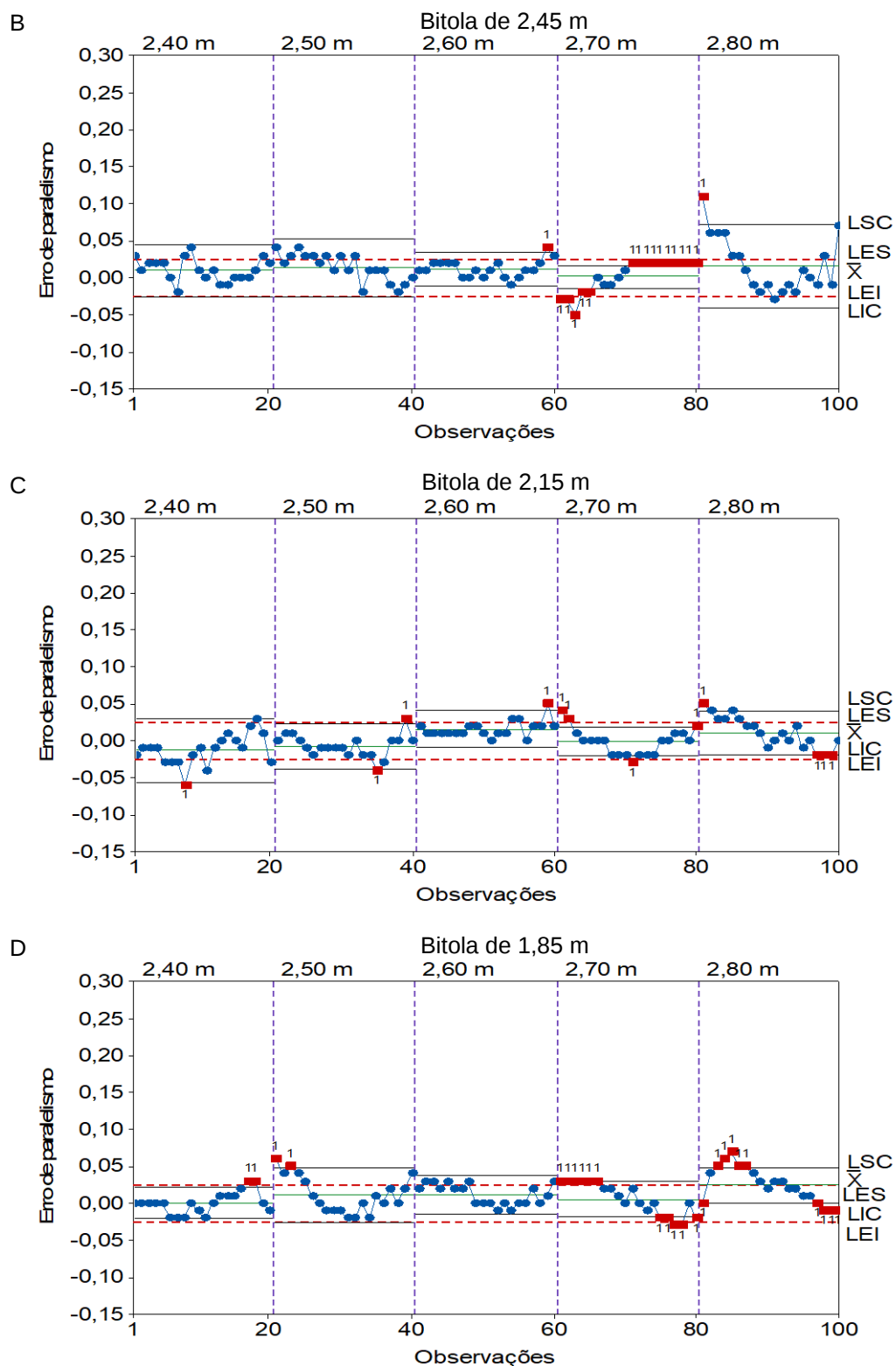
Os erros de paralelismo na bitola de 2,15 m, no raio de 20 m, com todos os comprimentos do cabeçalho (Figura 20C), apresentaram pontos fora dos limites de controle estabelecido, baseados na média, em mais ou menos três vezes o desvio padrão, causando instabilidade no processo. Com relação aos limites específicos,

verifica-se que 100% dos erros de paralelismo ficaram acima do limite específico superior, aumentando a distância entre os semicírculos. Nesse caso, se pensarmos em qualquer tipo de operação mecanizada, ocorreria uma falha entre as linhas.

Observa-se, na Figura 20D, que para todos os tratamentos testados houve instabilidade do processo, com pontos fora dos limites de controle, porém foi na bitola de 1,85 m que foi verificado maior quantidade de pontos entre os limites específicos quando comparada com as demais bitolas no mesmo raio (20 m), como também em todas as bitolas e comprimentos de cabeçalhos no raio de 16,4 m.

Na carta de controle 21A, somente o comprimento do cabeçalho de 2,40 m está sob controle estatístico e com 60% (12 pontos) dos erros de paralelismo acima do limite específico superior. Nos demais comprimentos do cabeçalho, o processo está instável, indicando a ocorrência de alguma causa extrínseca ao processo que provocou pontos fora dos limites de controle. Essas causas que provocaram a instabilidade do processo podem ser atribuídas ao fator máquina, pois em raios menores os equipamentos de arrasto não conseguem seguir corretamente o trajeto realizado pelo trator, devido o deslocamento lateral que ocorre entre eles causado pela maior distância entre o ponto de acoplamento no trator e o órgão ativo no equipamento.





LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 21. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 23,6 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m

(D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

A qualidade de determinado produto ou processo pode ser afetada pelos fatores 6Ms (Mão de obra, Matéria-prima, Métodos, Medição, Máquinas e Meio ambiente) ou pela combinação deles, se não realizados de forma correta (Trindade et al., 2007).

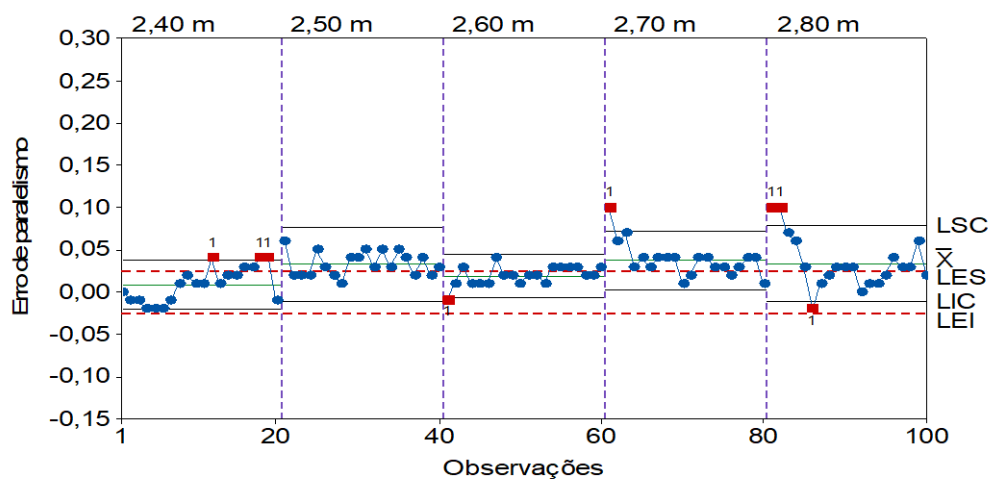
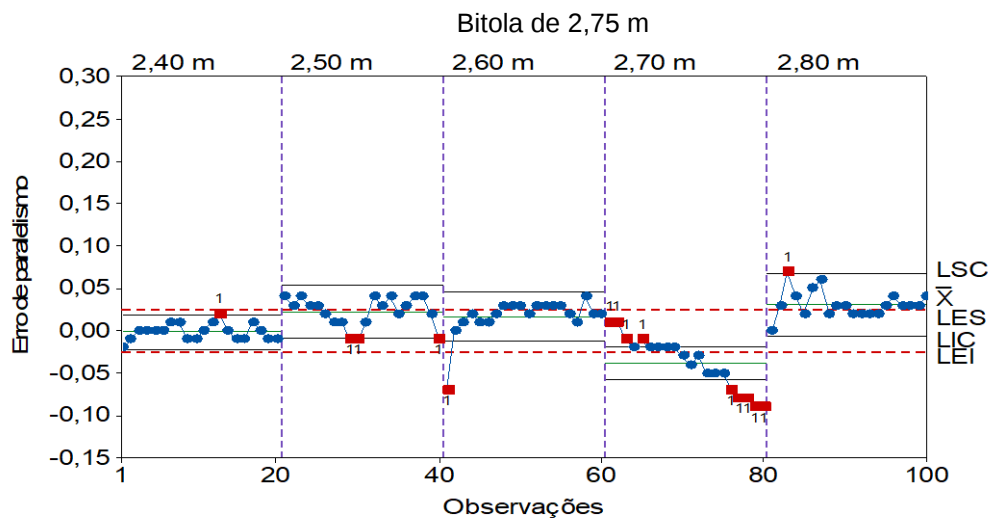
Na bitola de 2,45 m (Figura 21B), o processo ficou estável nos comprimentos do cabeçalho de 2,40 m e 2,50 m, com 80 % (16 pontos) e 60 % dos erros de paralelismo, respectivamente, dentro dos limites específicos. Já nos demais, o processo estava fora de controle. Apesar de o processo estar instável nos comprimentos de cabeçalhos de 2,60 m e 2,70 m, 90% (18 pontos) e 85% (17 pontos) dos erros, respectivamente, estavam entre os limites específicos, o que significa que não houve deslocamento lateral acentuado entre o conjunto trator-protótipo causado pelo comprimento do cabeçalho.

Para todos os comprimentos do cabeçalho na bitola do protótipo de 2,15 m (Figura 21C), o processo ficou instável, com pontos fora dos limites de controle, com ocorrência de causas aleatórias. Essa instabilidade pode ter ocorrido devido ao fator máquina e/ou método. Talvez o uso da bitola do protótipo de 2,15 m não tenha proporcionado boa estabilidade do protótipo ao se deslocar em trajetos curvos e tenha proporcionado deslocamento lateral acima ou abaixo do erro considerado aceitável ($\pm 2,5$ cm).

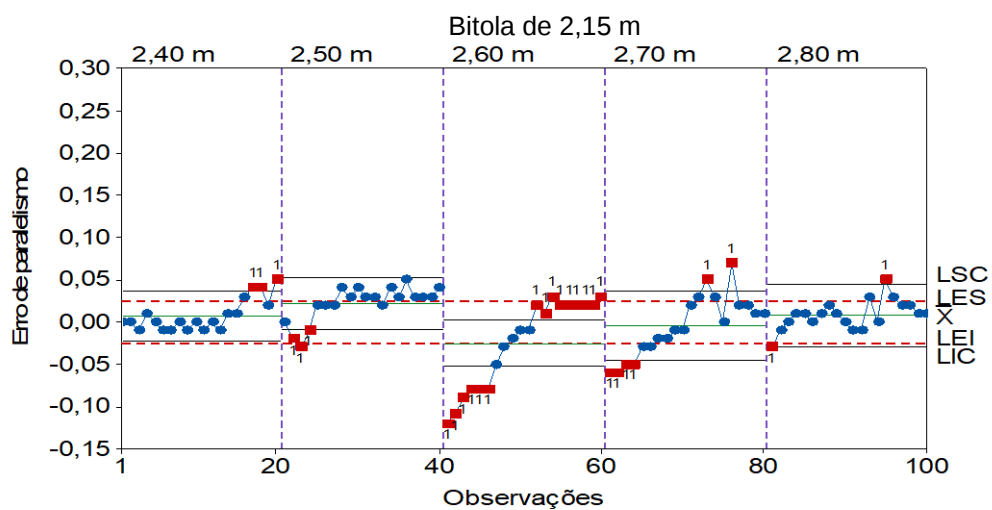
Na carta de controle 21D, os erros de paralelismo ficaram acima ou abaixo dos limites de controle para todos os comprimentos de cabeçalhos, exceto para o de 2,60 m. No comprimento de cabeçalho de 2,40 m, 90 % dos erros estão dentro dos limites específicos; para 2,80 m, apenas 50% dos pontos estão acima do limite específico superior, indicando que o uso do menor comprimento do cabeçalho, logo a menor distância entre o ponto de acoplamento no trator e órgão ativo no implemento causa menor erro de paralelismo.

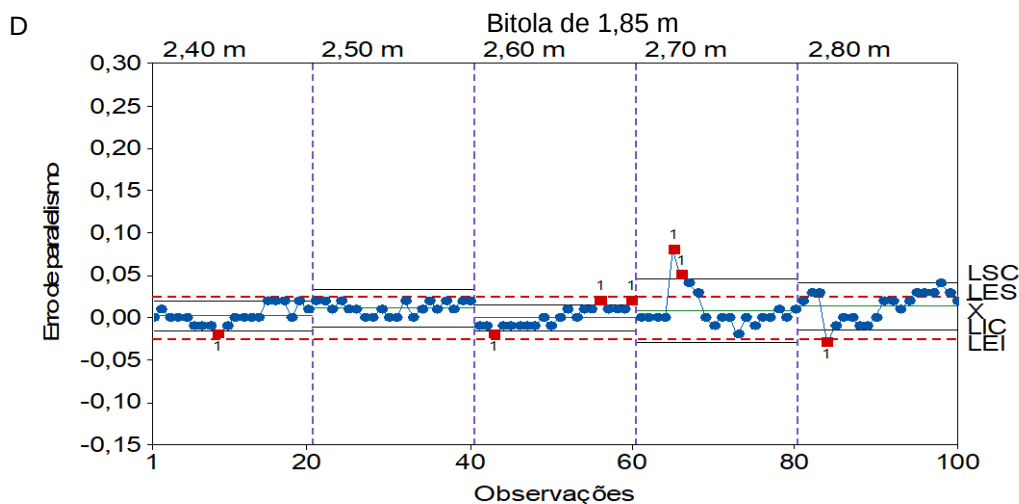
Na carta de controle 22, o menor comprimento de cabeçalho (2,40 m) foi o que obteve mais pontos entre os limites específicos para todas as bitolas do protótipo, no raio de 38 m.

A



C





LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 22. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 38 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

Mesmo apresentando pontos fora dos limites de controle, mas dentro dos limites específicos, significa que os erros de paralelismo são os mínimos possíveis e os adequados para realizar qualquer operação mecanizada com qualidade, pois eles encontram-se dentro da faixa de erro considerada aceitável fornecida pelo sinal de correção RTK e isso foi observado no cabeçalho com menor comprimento (2,40 m).

A menor distância entre o ponto de acoplamento no trator e o órgão ativo no equipamento propicia menor deslocamento lateral entre o conjunto trator-equipamento. Para Molin et al. (2015) nos equipamentos acoplados ao engate de três pontos do trator, o erro de paralelismo tende a diminuir o desalinhamento entre ambos, se comparados ao de arrasto, pois ambos formam um conjunto rígido.

Para a bitola do protótipo de 2,75 m (Figura 22A), observa-se que, em todos os comprimentos do cabeçalho, houve instabilidade no processo. O cabeçalho de 2,80 m de comprimento apresentou maior variabilidade e menor quantidade de pontos dentro dos limites específicos (35%) quando comparado com os demais, o que pode resultar na má qualidade da operação, principalmente em equipamentos de arrasto que podem sofrer maior deslocamento lateral quando a distância do ponto de acoplamento no trator e o órgão ativo no equipamento forem maior. Isso torna-se mais evidente em percursos de raios menores.

Carreira et al. (2018) relatam que, mesmo mudando o uso da inclinação de subsolagem em relação à linha de plantio em terreno plano (a linha de subsolagem era mudada para atingir o ângulo de 15° em relação à linha anterior), a plantadora de cana-de-açúcar não atingiu o paralelismo adequado; pois, por ser um equipamento de arrasto, possibilita os erros advindos devido ao arraste, e que a estrutura do equipamento, por si só, causa um deslocamento lateral.

Na Figura 22B, a maior variabilidade foi observada no comprimento do cabeçalho de 2,80 m. A variabilidade do processo é inversamente proporcional a qualidade, quanto maior a variabilidade menor será a qualidade nos processos mecanizados. Em quase todos os comprimentos de cabeçalhos na bitola de 2,45 m, houve indícios de instabilidade do processo com, pelo menos, um ponto fora dos limites de controle, e somente no cabeçalho de 2,60 m o processo estava estável, apesar da estabilidade, 65% dos pontos estavam fora dos limites específicos ($\pm 2,5$ cm). Os comprimentos do cabeçalho com melhor qualidade na operação foram os de 2,40 m e 2,60 m, pois apresentaram maior quantidade de pontos entre os limites específicos, 75% (15 pontos) e 65% (13 pontos), respectivamente, erro considerado adequado quando se utiliza o sinal de correção RTK.

Na bitola do protótipo de 2,15 m, todos os comprimentos dos cabeçalhos ficaram com pontos acima ou abaixo dos limites de controle (Figura 22C), com atuação de alguma causa aleatória, que pode ser atribuída ao fator máquina, pois os equipamentos de arrasto por si só podem sofrer deslocamento lateral, este se acentuou ainda mais quando foi submetido a trajetórias curvas. O cabeçalho com 2,60 m de comprimento foi o que obteve maiores erros fora dos limites de controle (65%).

A carta de controle 22D mostra que, na bitola de 1,85 m, os três menores comprimentos do cabeçalho (2,40 m, 2,50 m e 2,60 m) obtiveram melhor qualidade no processo com 100% dos erros de paralelismo dentro dos limites específicos, apesar de existirem pontos fora dos limites de controle nos cabeçalhos de 2,40 m e 2,60 m. Nesse caso, a qualidade do processo está sendo embasada principalmente nos limites específicos estipulados pelo uso do sinal de correção RTK ($\pm 2,5$ cm).

Os erros que estavam entre os limites específicos podem ter ocorrido devido ao erro de sinal da tecnologia e não foram atribuídos aos tratamentos usados. Só foram associados os erros de paralelismo aos tratamentos, aqueles que estavam

acima ou abaixo dos limites específicos. Logo, nessa bitola, o cabeçalho com comprimento de 2,80 m foi o que proporcionou maiores erros de paralelismo, com apenas 60% (12 pontos) dos erros dentro dos limites específicos.

Quando ocorrem pontos acima e/ou abaixo dos limites superior e inferior de controle, respectivamente, como também pontos fora dos limites específicos estipulados para o erro do paralelismo do conjunto trator-semeadora, isso caracteriza instabilidade no processo com baixa precisão (Santos et al., 2017).

As máquinas guiadas automaticamente apresentam dificuldade em permanecer alinhadas em percursos curvos, independentemente da qualidade do sinal recebida pelo rover no trator. Uma alternativa para diminuir os erros de paralelismo em trajetos curvos seria o uso de um sistema GNSS auxiliar, instalado no implemento, tecnologia chamada de Trueguide™, usada para manter o equipamento alinhado com linha projetada independente do alinhamento do trator.

Para Santos et. al (2018), na semeadura do amendoim, não justificaria a utilização da tecnologia Trueguide™, pois apresentou apenas 15,78% de instabilidade em trajetos curvo, em função de a semeadora estar acoplada ao sistema hidráulico do trator que causa menor deslizamento lateral, quando comprado a um equipamento de arrasto.

A carta de controle 22 foi usada como modelo para os resultados e a discussão das cartas de controle de raio 5 (41,6 m) ao raio 15 (110 m), pois observou-se que estas apresentam comportamento semelhante ao observado no raio de 38 m. As figuras relativas aos raios de 41,6 m e 110 m encontram-se no apêndice B.

5. CONCLUSÕES

As larguras de bitola e os comprimentos do cabeçalho do protótipo só causam erros de paralelismo acima do considerado aceitável quando são submetidos a trajetos com raios menores de 23,6 m.

Nos raios de curvatura menores que 23,6 m, a menor largura de bitola e o menor comprimento do cabeçalho do protótipo proporcionaram menores erros de paralelismo entre as passadas do conjunto trator-protótipo.

Nos raios acima de 38 m, as larguras de bitola e os comprimentos do cabeçalho do protótipo não causam erros de paralelismo maior que o considerado aceitável quando se utiliza sinal de correção RTK somente no trator.

Para manter o paralelismo do conjunto trator-equipamento nos raios menores que 23,6 m, torna-se necessário o uso de um sistema GNSS auxiliar (Trueguide TM).

Nos trajetos com maiores raios de curvatura e menores comprimentos do cabeçalho, associados com a menor largura de bitola do protótipo, proporcionam melhor qualidade nos processos mecanizados, sem causar sobreposição ou falha.

6. REFERÊNCIAS

Alves DBM, Abreu PAG de, Souza JS (2013) GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento. **Revista Brasileira de Geomática** 1:8-13.

Arcoverde SNS, Souza CMA, Cortez JW, Guazina RA, Maciak PAG (2016) Qualidade do processo de semeadura da cultura do milho de segunda safra. **Revista Engenharia na agricultura** 24: 383-392.

Backman J, Oksanen T, Visala A (2010) Nonlinear Model Predictive Trajectory Control in Tractor-Trailer System for Parallel Guidance in Agricultural Field Operations. **IFAC Proceedings Volumes** 43:133-138.

Baio FHR, Moratelli RF (2011) Avaliação da acurácia no direcionamento com piloto automático e contraste da capacidade de campo operacional no plantio mecanizado da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola** 31:367-375.

Bernardi ACC, Naime JM, Resende ÁV, Bassoi LH, Inamasu RY (Eds) (2014) Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa, 596p.

Bettio CS, Ganascini D, Wunsch CA, Renosto LD, Gurgacz F (2016) Uso de piloto automático com sinal rtx na semeadura de trigo em curva aberta e fechada. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR** edição especial:1-6.

Carballido J, Perez-Ruiz M, Emmi L, Agüera J (2014) Comparison of positional accuracy between rtk and rtx gnss based on the autonomous agricultural vehicles under field conditions. **American Society of Agricultural and Biological Engineers** 30:361-366.

Cariou C, Lenain R, Thuilot B, Martine P (2010) Path following of a vehicle-trailer system in presence of sliding: Application to automatic guidance of a towed agricultural implement. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, **Proceedings...** Taipei: IEEE/RSJ, p. 4976- 4981.

Carvalho EA de, Araújo PC (2009) Leituras Cartográficas e Interpretações Estatísticas II: Noções básicas de sistema de posicionamento global GPS. Natal: EDUFERN, 244 p.

Carreira AS, Carreira VS, Tanaka EM (2018) Influência do ângulo de trajeto da subsolagem no paralelismo das linhas de plantio de cana-de-açúcar. In: X Sintagro - Simpósio Nacional de Tecnologia em Agronegócio, **Anais...** Presidente Prudente: FATEC, p. 1-5.

Cirani CBS, Moraes MAFD (2010) Inovação na indústria sucroalcooleira Paulista: Os determinantes da adoção das tecnologias de Agricultura de precisão. **Revista de Economia e Sociologia Rural** 48: 543-565.

Dolce O, Pompeo JN (1993) Fundamentos de matemática elementar 9: Geometria plana. 7 ed, São Paulo: Atual, 451p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) Sistema brasileiro de classificação de solos. EMBRAPA, 353p.

Filho RS, Cunha JPAR (2015) Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no Sudoeste de Goiás – Brasil. **Revista Engenharia Agrícola** 35:689-698.

Gan-Mor S, Clark RL, Upchurch BL (2007) Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. **Computers and Electronics in Agriculture** 59:31-38.

Guo J, Li X, Li Z, Hu L, Yang G, Zhao C, Fairbairn D, Watson D, Ge M (2018) Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. **Precision Agriculture** 19:895–911.

Huynh VT, Smith RN, Kwok NM, Katupitiya J (2012) A nonlinear pi and backstepping-based controller for tractor-steerable trailers influenced by slip. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, **Proceedings...** Minnesota: IEEE, p. 245-252.

Lopes MB, Milan M, Coelho JLD (1995) Qualidade em operações agrícolas mecanizadas na cultura da cana-de-açúcar. **Stab: Açúcar, Alcool e Subprodutos**, 13:26-30.

Mantovani EC, Magdalena C (Eds.) (2014) Manual de agricultura de precisión. Montevideo: IICA, 176p.

Molin JP (2017) Agricultura de precisão: números do mercado brasileiro. Piracicaba: Agricultura de Precisão: boletim técnico 3, 7p. Disponível: http://www.agriculturadeprecisao.org.br/upimg/publicacoes/pub_-boletim-tecnico-03--agricultura-de-precisao-numeros-do-mercado-brasileiro-11-04-2017.pdf. Acessado em 30 de outubro de 2019.

Molin JP, Amaral LR, Colaço AF (2015) Agricultura de Precisão. 1.ed. São Paulo: Oficina de textos, 233p.

Monico JFG (2008) Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações. 2ª ed. São Paulo: Editora Unesp, 480p.

Montgomery DC (2016) Introdução ao controle estatístico de qualidade. 7ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 549p.

Montgomery DC (2009) Introduction to statistical quality control. 6th Edition. United States of America: Wiley, 734p.

Oliveira CC, Miriam DG, Caruso SF, Sakuma AM (2013) Manual para elaboração de cartas de controle para monitoramento de processos de medição quantitativos em laboratórios de ensaio. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 76p.

Ortiz BV, Balkcom KB, Duzy L, Van Santen E, Hartzog DL (2013) Evaluation of agronomic and economic benefits of using RTK-GPS-based auto-steer guidance systems for peanut digging operations. **Precision Agriculture** 14:357-375.

Oksanen T, Backman J (2016) Implement Guidance model for ISO 11783 standard. **IFAC-Papers OnLine** 49:033-038.

Passalaqua BP (2018) **Erros de percurso em carretas de transbordos de cana-de-açúcar**. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

Passalaqua BP, Molin J P, Salvi JV, Aguilera AP (2016) Misalignment between sugar cane transshipment trailers and tractor. In: 13th International Conference on Precision Agriculture, **Proceedings...** St. Louis: International Society of Precision Agriculture, p. 1-6.

Pérez-Ruiz M, Carballido J, Agüera J, Gil JA (2011) Assessing GNSS correction signals for assisted guidance systems in agricultural vehicles. **Precision Agriculture** 12:639–652.

Raupp LF (2012) **Piloto automático para veículos agrícolas**. 62 f. Monografia (Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Salvi JV, Molin JP, Casarin Júnior RD, Santos GN, Spekken M (2014) Avaliação dos erros de paralelismo de um conjunto colhedora e trator-transbordo de cana de açúcar. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, **Anais...** São Pedro: SBEA, p. 1-6.

Samohyl RW (2009) Controle estatístico da qualidade. Rio de Janeiro: Elsevier, 275p.

Santos AF, Correa LN, Gírio LAS, Paixão CSS, Silva RP (2018) Position errors in sowing in curved and rectilinear routes using autopilot. **Revista Engenharia Agrícola** 38:568-576.

Santos AF, Silva RP, Tavares TO, Ormond ATS, Rosalen DL, Assis LC (2017) Parallelism error in peanut sowing operation with auto-steer guidance. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 21:731-736.

Santos AF, Kazama EH, Ormond ATS, Tavares TO, Silva RP (2016) Quality of mechanized peanut digging in function of the auto guidance. **African Journal of Agricultural Research** 11:4894-4901.

Silva RP, Voltarelli MA (2015) Controle de qualidade em operações agrícolas. In: Silva RP, Voltarelli MA, Cassia MT (Eds). Controle de qualidade em operações agrícolas mecanizadas. Jaboticabal: SBEA, p. 19-28.

Silva RP, Souza FG, Cortez JW, Furlani CEA, Vigna GP (2007) Variabilidade espacial e controle estatístico do processo de perdas na colheita mecanizada do algodoeiro. **Revista Engenharia Agrícola** 27:742-752.

Trindade C, Rezende JLP, Jacovine LAG, Sartório ML (2007) Ferramentas da Qualidade: Aplicação na atividade florestal. 2ª Ed. Viçosa: UFV, 159p.

Vellidis G, Ortiz B, Beasley J, Hill R, Henry H, Brannen H (2013) Using RTK-based GPS guidance for planting and inverting peanuts. In: 9th European Conference on Precision Agriculture, **Proceedings...** Lleida: Wageningen University, p. 1-8.

Zerbato C, Furlani CEA, Oliveira MF, Voltarelli MA, Tavares TO, Carneiro FM (2019) Quality of mechanical peanut sowing and digging using autopilot. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 23:630-637.

APÊNDICE A – Análise de variância dos efeitos principais e interações os fatores para raios de curvatura, comprimentos do cabeçalho e larguras de bitola do protótipo.

Tabela 8. Análise de variância para efeitos principais e interações para o módulo do erro do paralelismo.

Causas de Variação	GL	F _{Erro paralelismo}	P _{Erro paralelismo}
Raio (R)	14	1166,58**	< 0,0001
Bitola (B)	3	187,89**	< 0,0001
Cabeçalho (C)	4	144,73**	< 0,0001
R x B	42	95,91**	< 0,0001
R x C	56	91,77**	< 0,0001
B x C	12	51,84**	< 0,0001
R x B x C	168	47,60**	< 0,0001
Resíduo	5700	-	-
Total	5999		
C.V		67,07	

**Significativo a 1% de probabilidade. C.V: Coeficiente de Variação.

Tabela 9. Síntese de análise de variância e do teste de médias do desdobramento de interação entre os raios de curvatura e larguras de bitola para o módulo do erro do paralelismo (m).

Causas de Variação		Bitolas (m)			
		B1	B2	B3	B4
Raios (m)	R1	0,245 aA	0,123 aC	0,185 aB	0,066 aD
	R2	0,069 bB	0,054 bC	0,085 bA	0,040 bD
	R3	0,026 cdA	0,020 defAB	0,016 cdefB	0,018 defAB
	R4	0,026 cdA	0,029 cdA	0,026 cA	0,012 efB
	R5	0,027 cA	0,020 defA	0,022 cdefA	0,009 fB
	R6	0,013 eB	0,026 cdeA	0,026 cA	0,011 efB
	R7	0,026 cdAB	0,028 cdeA	0,019cdefBC	0,013 efC
	R8	0,017cdeAB	0,014 fB	0,013 efB	0,024 cdA
	R9	0,026 cdA	0,015 fC	0,023 cdeAB	0,016 defBC
	R10	0,017 cdeB	0,028 cdeA	0,022cdefAB	0,017 defB
	R11	0,027 cA	0,031 cA	0,024 cdA	0,030 bcA
	R12	0,011 eB	0,023 cdefA	0,014 defB	0,009 fB
	R13	0,013 eB	0,027 cdeA	0,016 cdefB	0,020 cdeAB
	R14	0,016 deA	0,019 efA	0,019 cdefA	0,015 defA
	R15	0,019 cdeA	0,014 fA	0,012 fA	0,015 defA
DMS	R		0,010		
	B		0,008		

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e maiúscula nas colunas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. R1=16,4 m; R2=20 m; R3=23,6; R4=38 m; R5=41,6 m; R6=45,2 m; R7=59,6 m; R8=63,2 m; R9=66,8 m; R10=81,2 m; R11=84,8 m; R12=88,4 m; R13=102,8 m; R14=106,4 m; R15=110m. B1=2,75 m; B2=2,45m; B3=2,15 m; B4=1,85 m.

Tabela 10. Síntese de análise de variância e do teste de médias do desdobramento de interação entre os raios de curvatura e comprimentos do cabeçalho para o módulo do erro do paralelismo (m).

Causas de Variação		Cabeçalhos (m)				
		C1	C2	C3	C4	C5
Raios (m)	R1	0,071 aE	0,301 aA	0,121 aD	0,135 aC	0,146 aB
	R2	0,054 bC	0,065 bAB	0,056 bC	0,062 bBC	0,073 bA
	R3	0,019 cdefA	0,021defA	0,017 cdA	0,018 eA	0,025 cA
	R4	0,012 fB	0,025 defA	0,025 cA	0,030 cdA	0,025 cA
	R5	0,018 cdefAB	0,018 efAB	0,016 cdB	0,020 deAB	0,026 cA
	R6	0,025 cdeA	0,028 cdeA	0,013 dBC	0,019 deAB	0,009 eC
	R7	0,029 cA	0,020 defAB	0,018 cdB	0,016 eB	0,025 cAB
	R8	0,017 defA	0,018 efA	0,014 cdA	0,019 deA	0,017 cdeA
	R9	0,017 defA	0,024 defA	0,022 cdA	0,015 eA	0,022 cdA
	R10	0,012 fC	0,030 cdA	0,021 cdBC	0,021deB	0,021 cdB
	R11	0,024 cdeB	0,038 cA	0,023 cdB	0,034 cA	0,021 cdB
	R12	0,011 fA	0,014 fA	0,012 dA	0,016 eA	0,017 cdeA
	R13	0,028 cdA	0,016 fB	0,013 dB	0,014 eB	0,025 cA
	R14	0,020 cdefA	0,014 fA	0,013 dA	0,018 eA	0,022 cdA
	R15	0,016 efA	0,020 defA	0,013 dA	0,012 eA	0,013 deA
DMS	R			0,011		
	C			0,009		

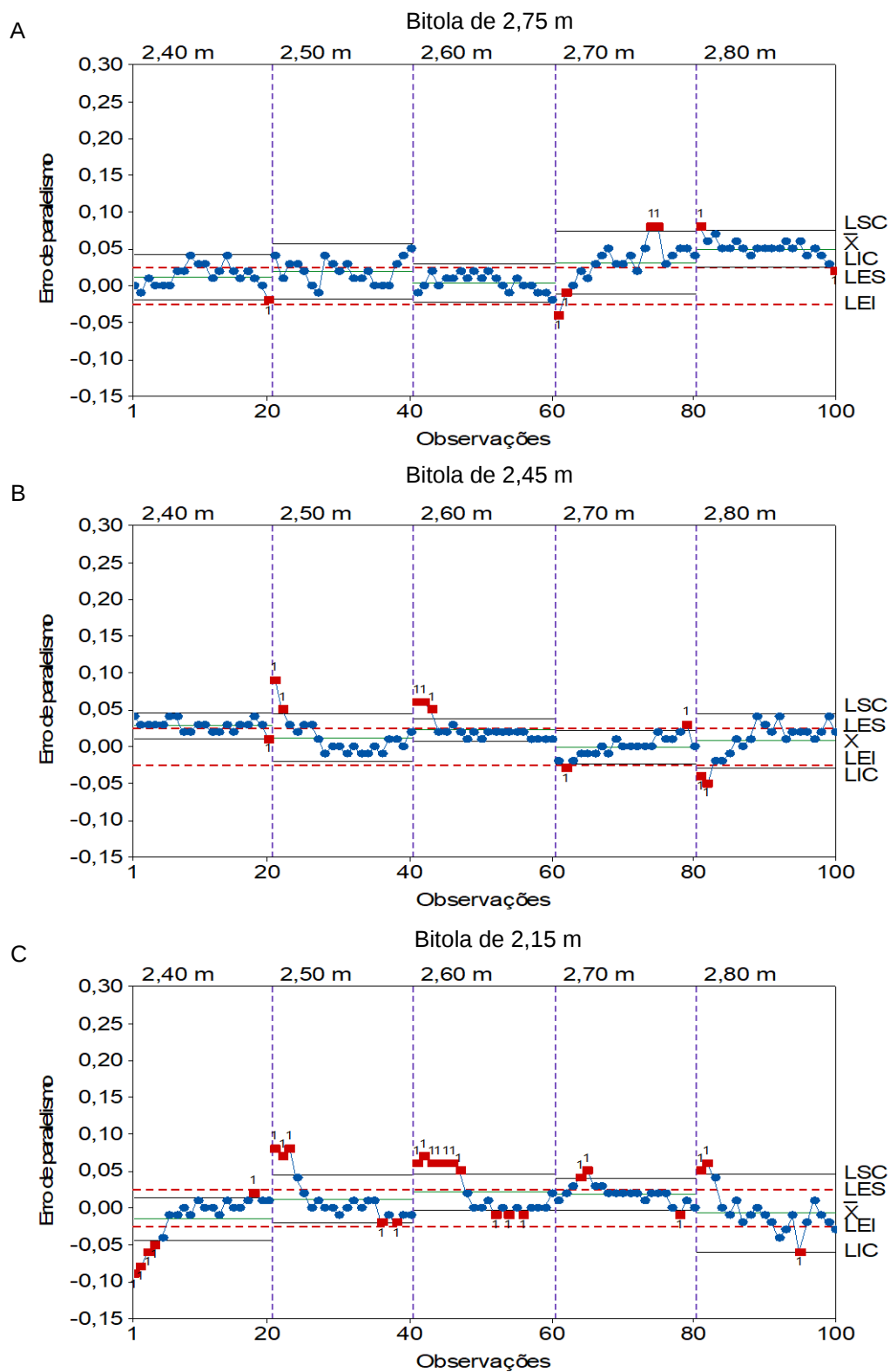
Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e maiúscula nas colunas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. R1=16,4 m; R2=20 m; R3=23,6; R4=38 m; R5=41,6 m; R6=45,2 m; R7=59,6 m; R8=63,2 m; R9=66,8 m; R10=81,2 m; R11=84,8 m; R12=88,4 m; R13=102,8 m; R14=106,4 m; R15=110m. C1=2,40 m; C2=2,5 m; C3=2,60 m; C4=2,70 m; C5=2,80 m.

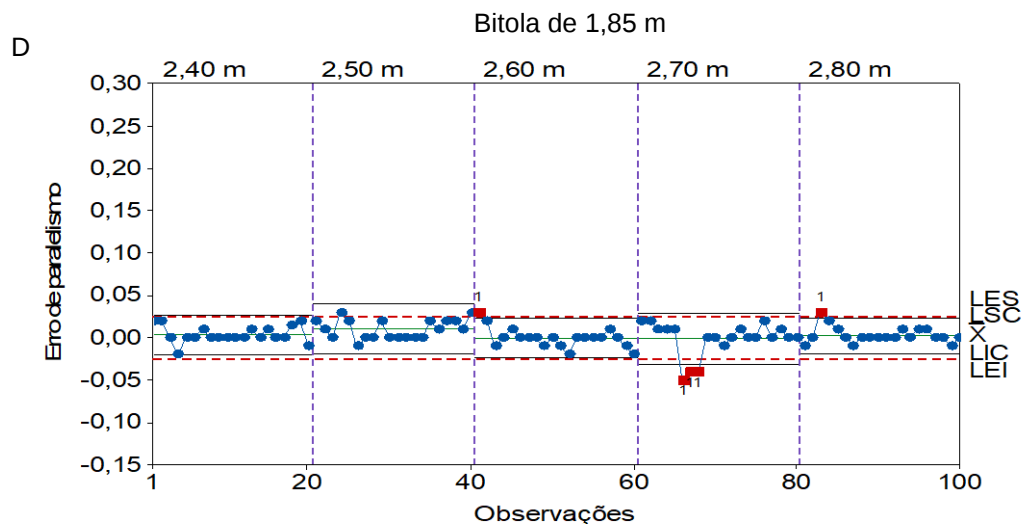
Tabela 11. Síntese de análise de variância e do teste de médias do desdobramento de interação entre larguras de bitola e comprimentos do cabeçalho para o módulo do erro do paralelismo (m).

Causas de Variação		Cabeçalhos (m)				
		C1	C2	C3	C4	C5
Bitolas (m)	B1	0,026 bD	0,061 aA	0,030 abCD	0,033 aC	0,044 aB
	B2	0,033 aAB	0,032 bAB	0,026 bC	0,036 aA	0,030 bBC
	B3	0,020 cC	0,060 aA	0,033 aB	0,032 aB	0,029 bB
	B4	0,021 cAB	0,021 cAB	0,017 cB	0,020 bB	0,026 bA
DMS	B			0,004		
	C			0,005		

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e maiúscula nas colunas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. B1=2,75 m; B2=2,45m; B3=2,15 m; B4=1,85 m. C1=2,40 m; C2=2,5 m; C3=2,60 m; C4=2,70 m; C5=2,80 m.

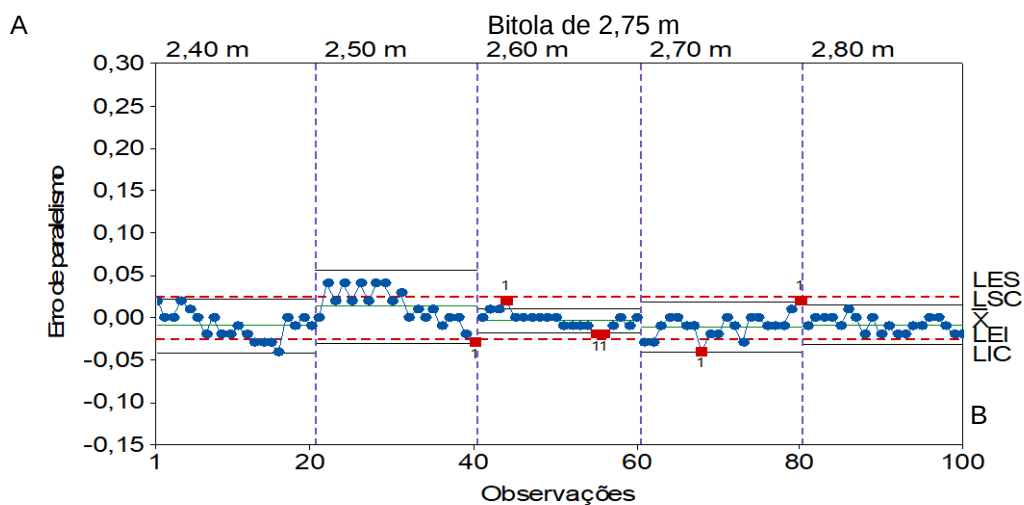
APÊNDICE B – Cartas de controle individual para erro de paralelismo.

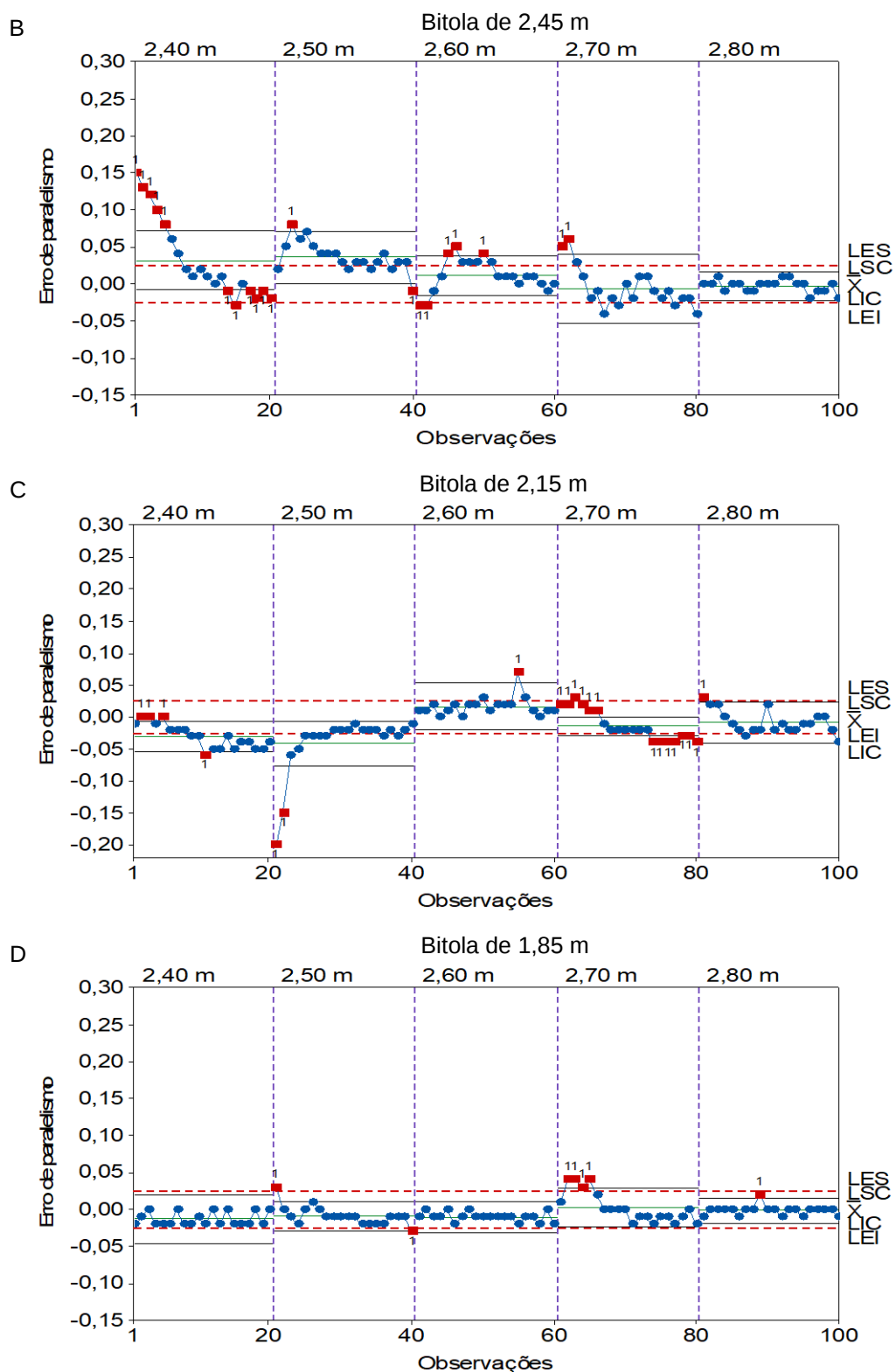




LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 23. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 41,6 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

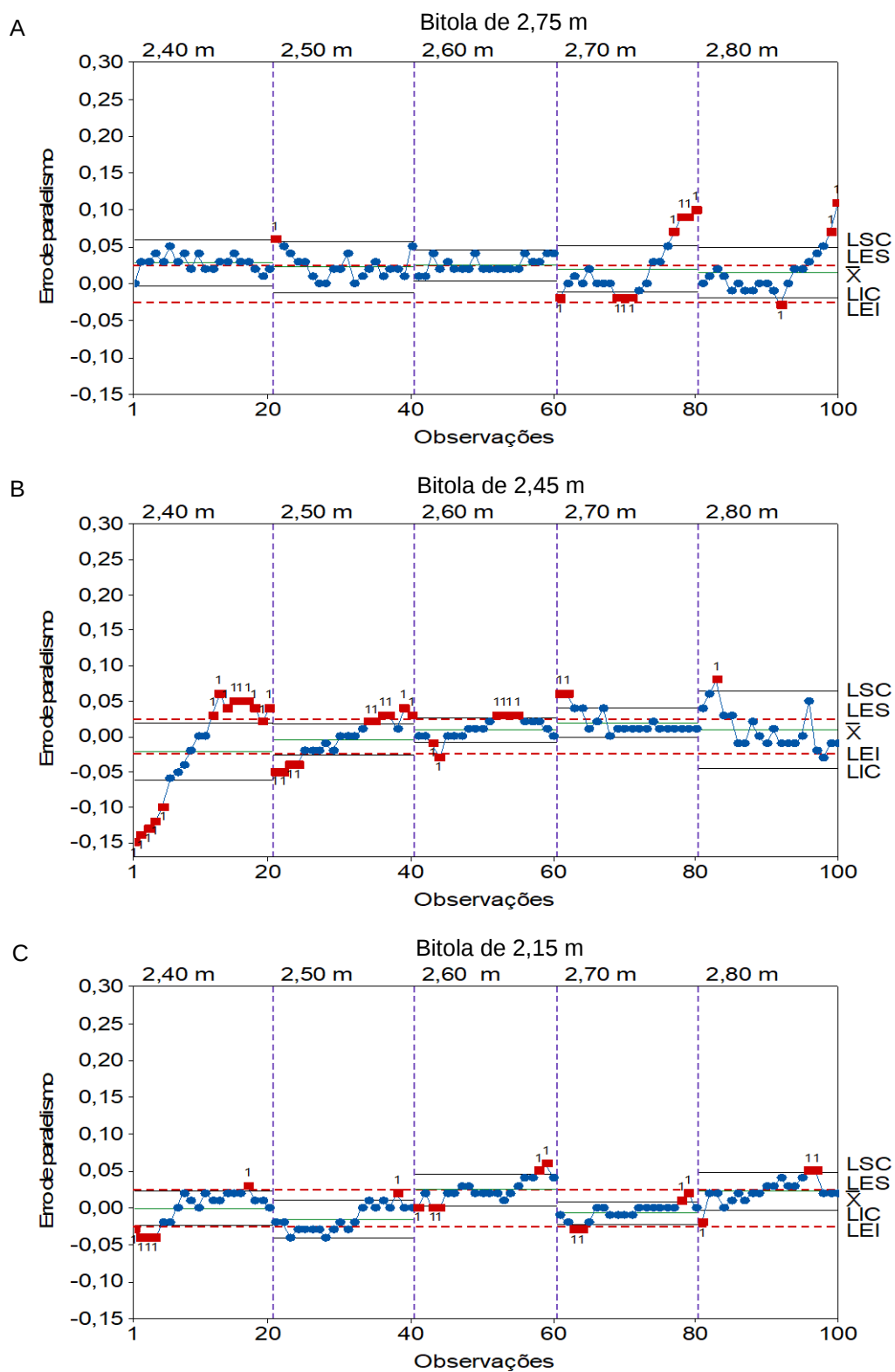


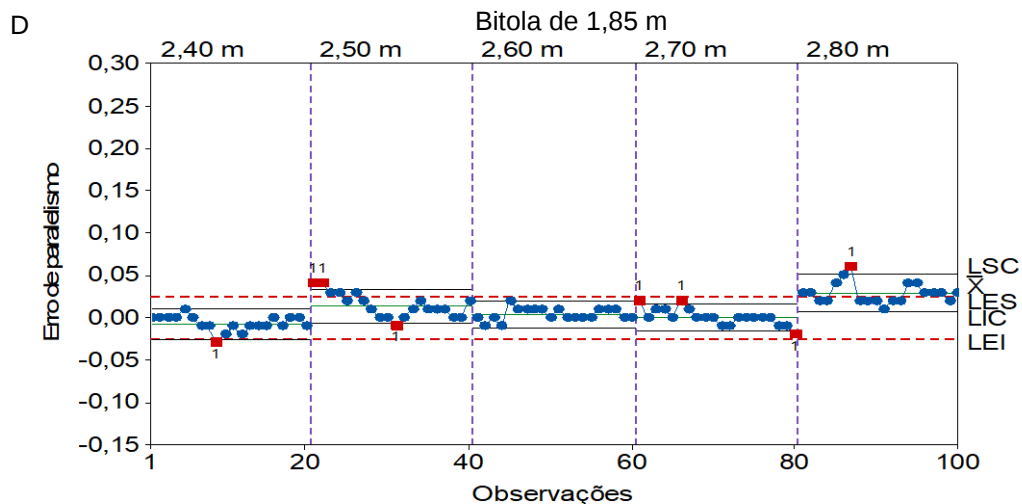


LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 24. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 45,2 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m

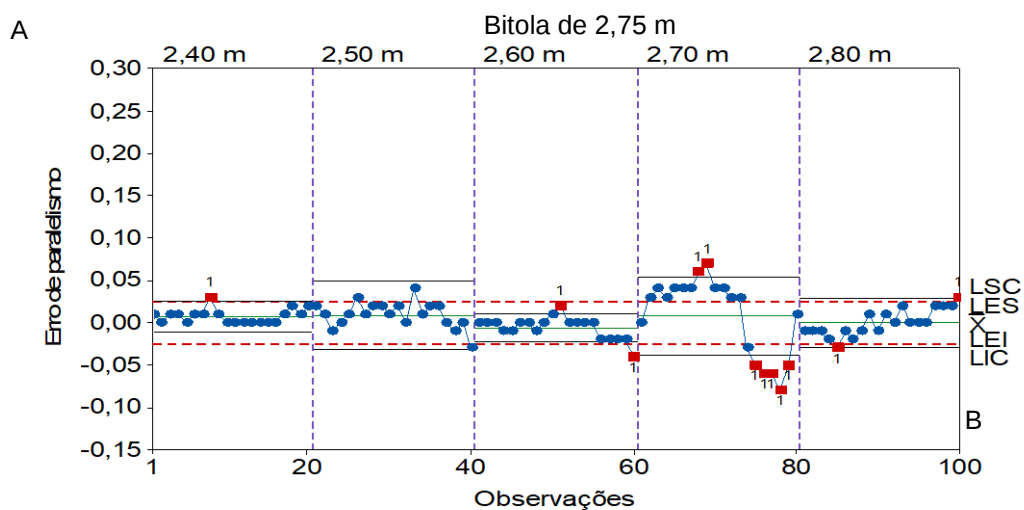
(D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

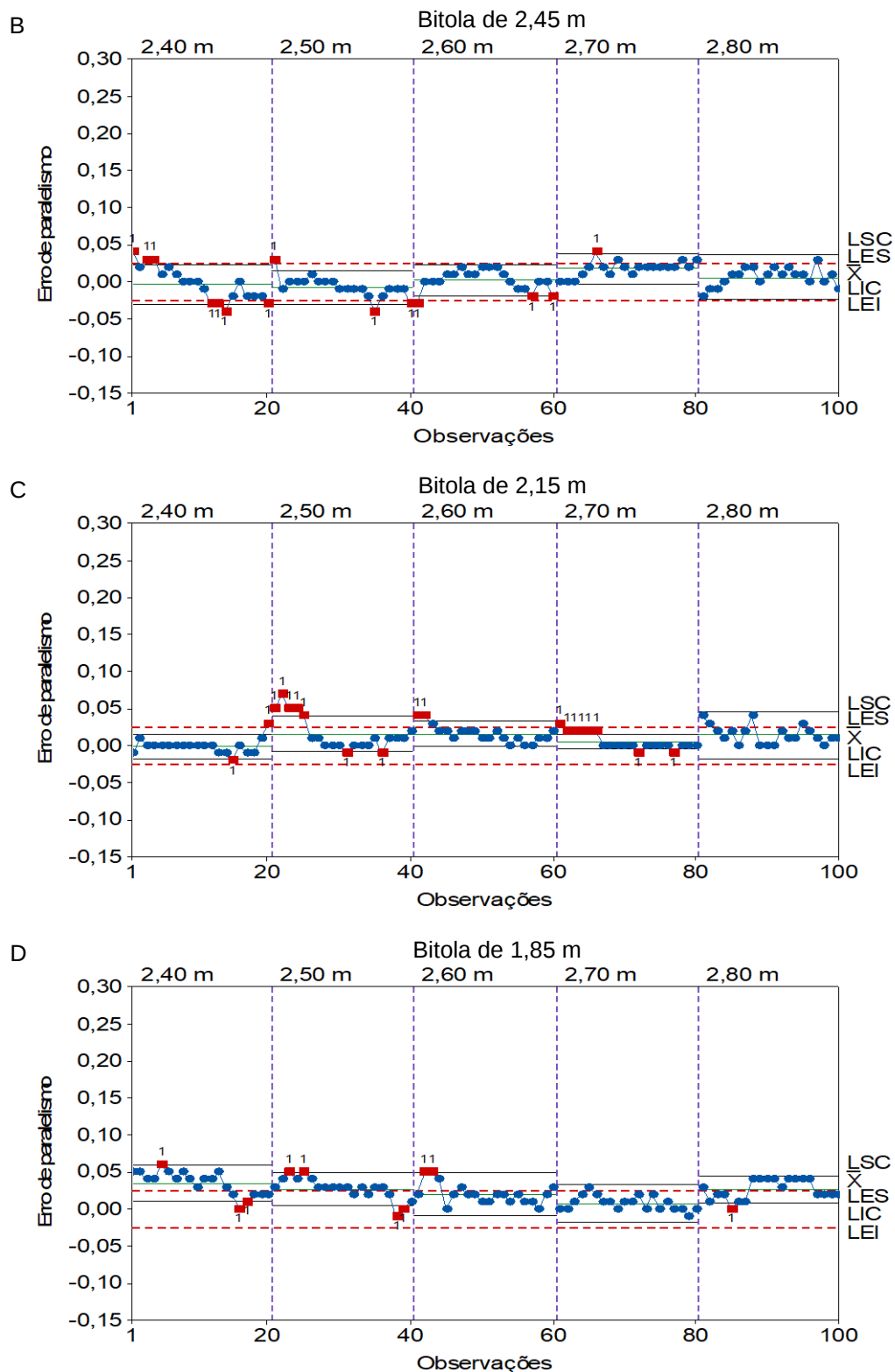




LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 25. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 59,6 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

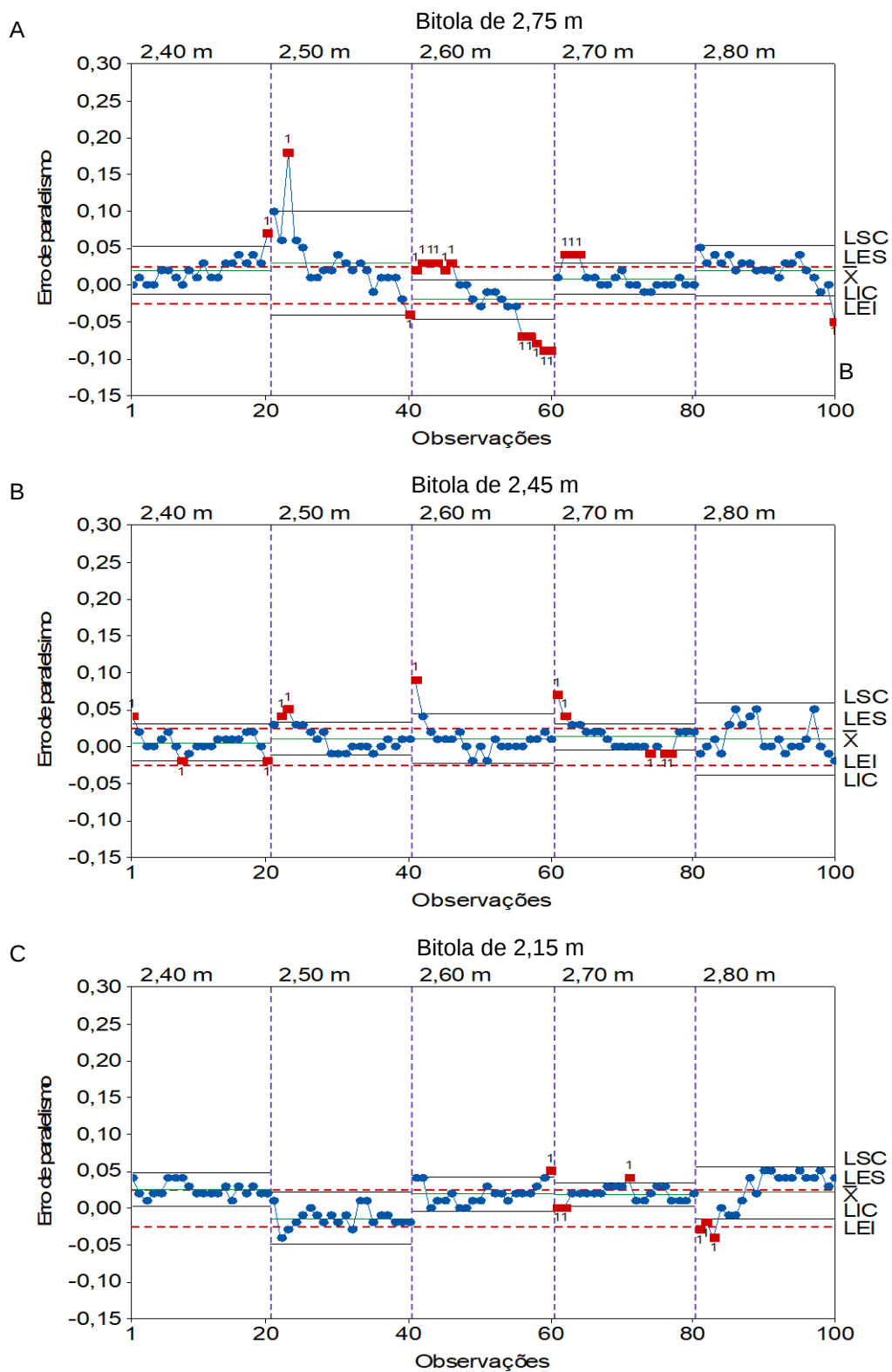


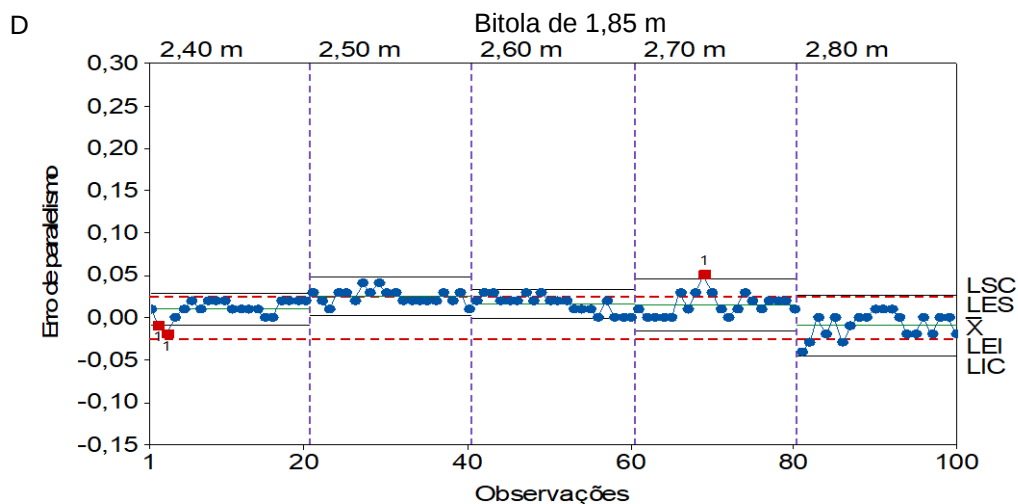


LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 26. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 63,2 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m

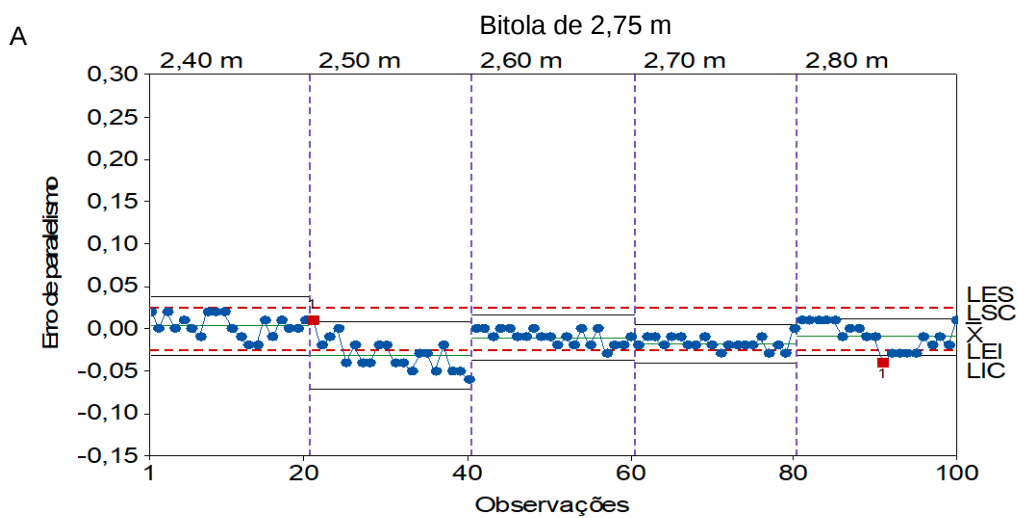
(D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

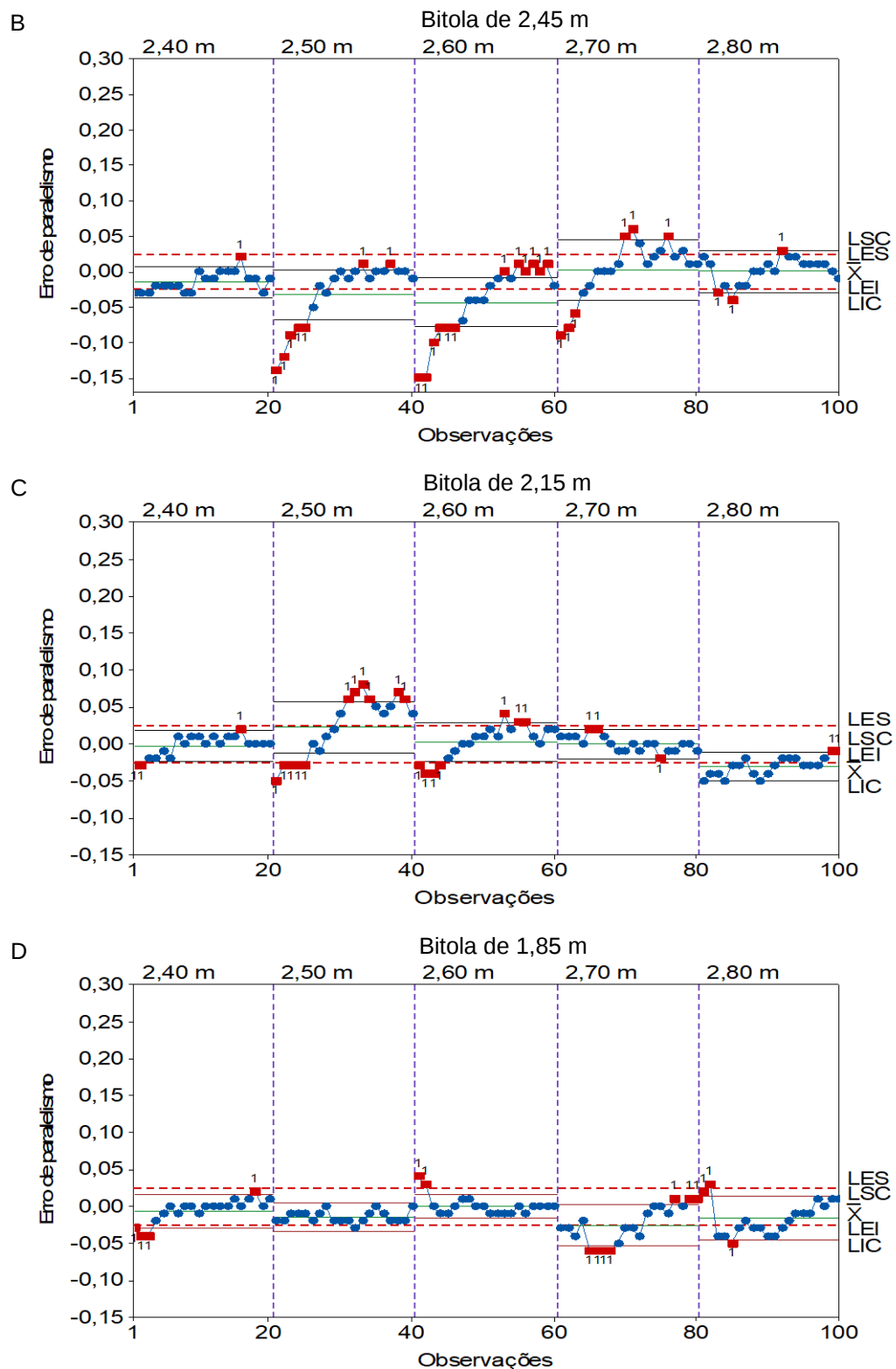




LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 27. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 66,8 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

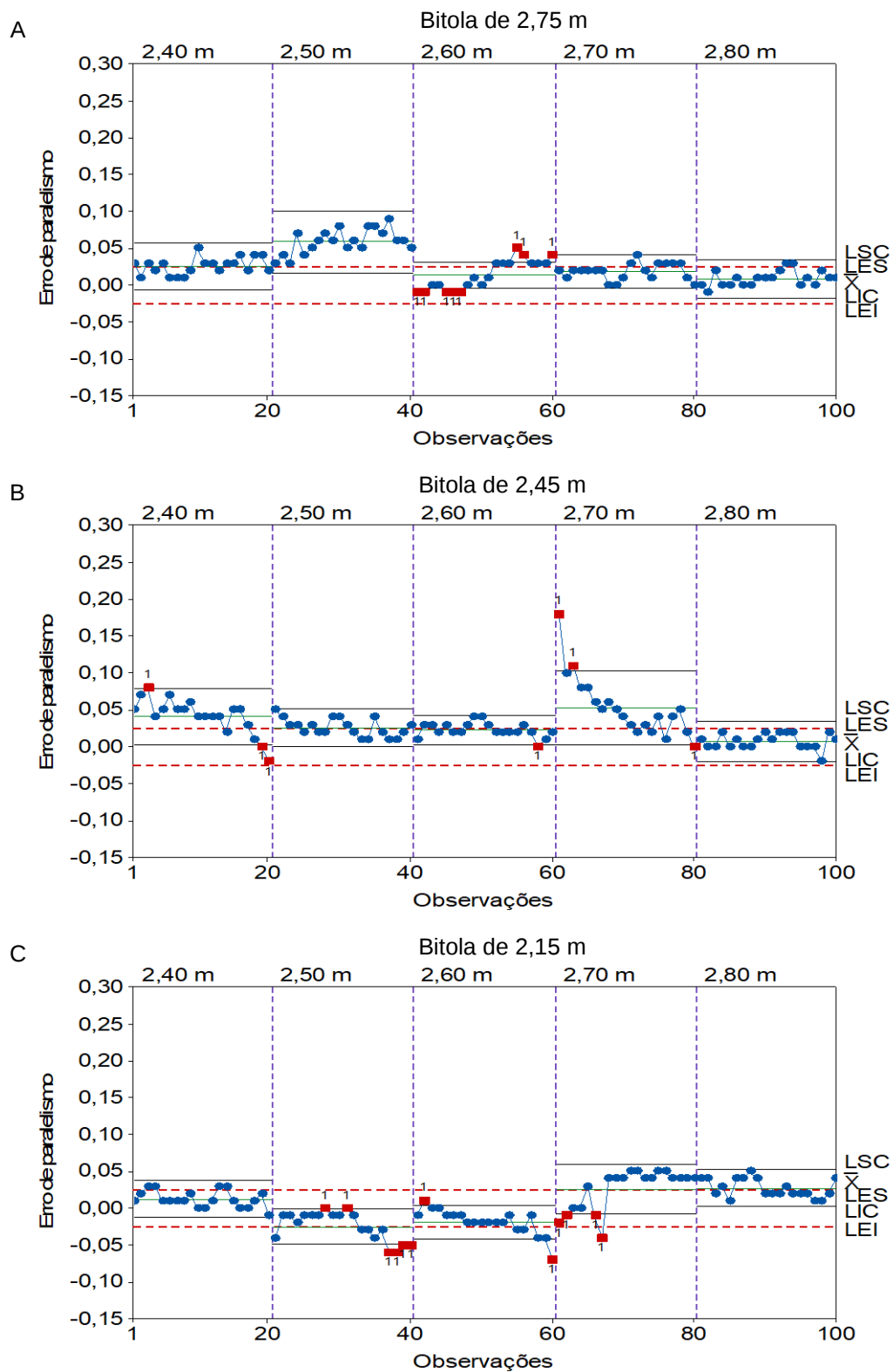


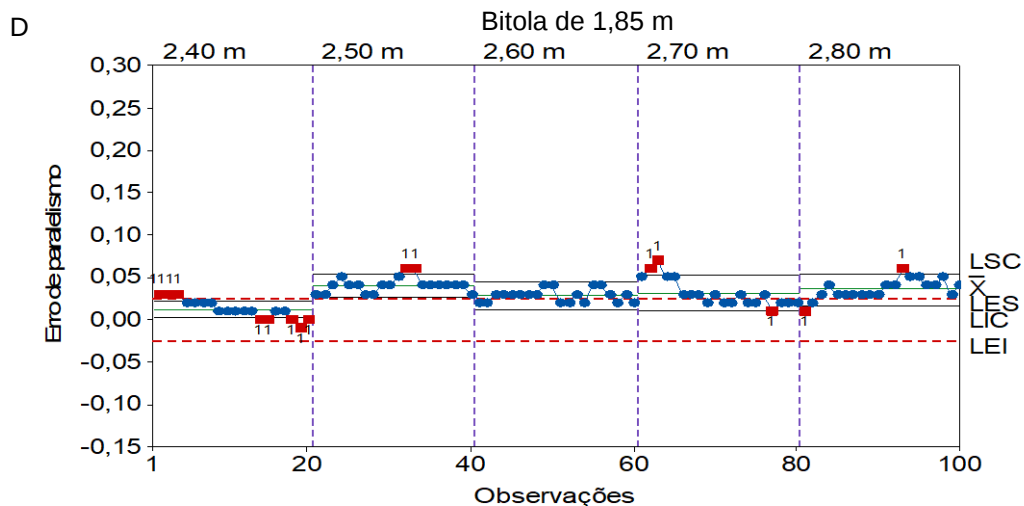


LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 28. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 81,2 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m

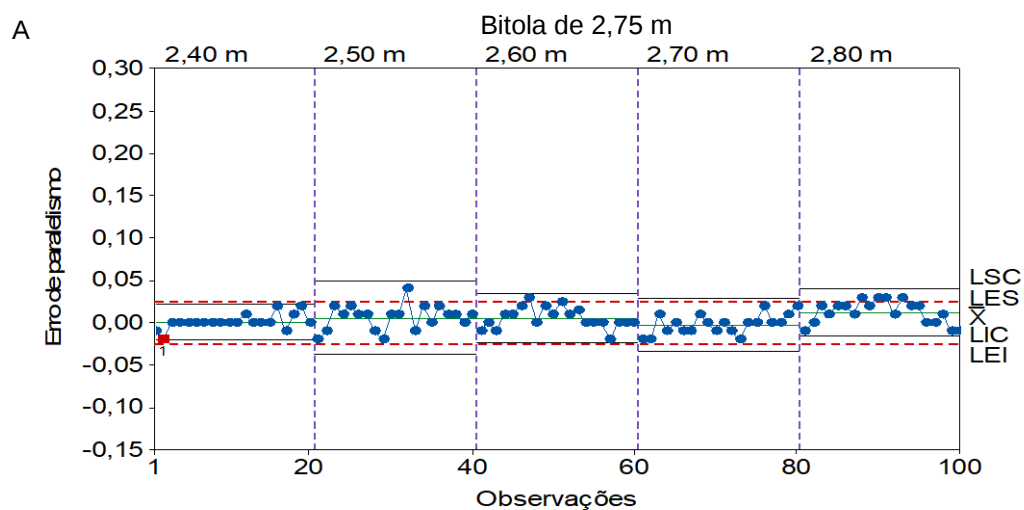
(D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

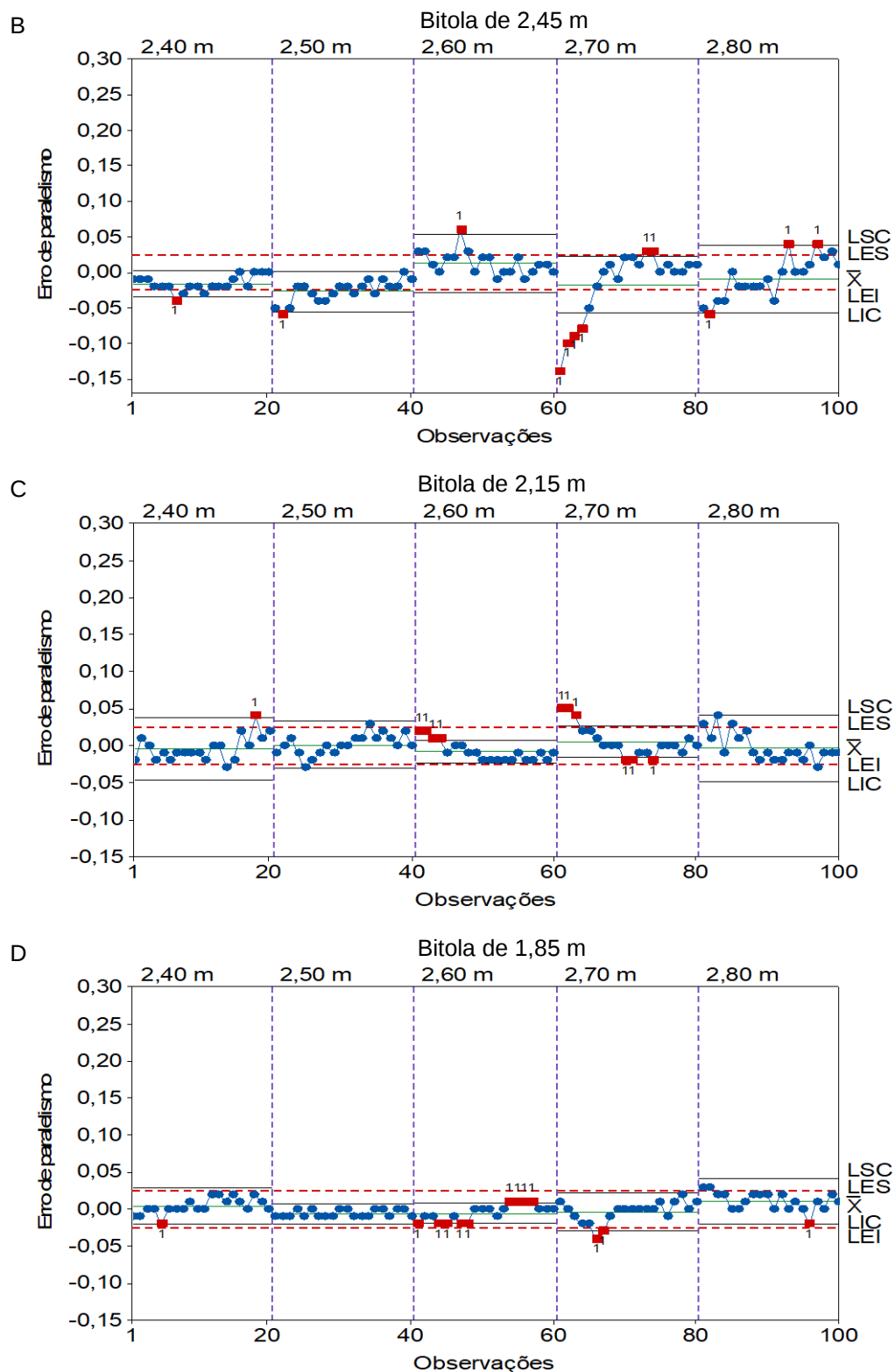




LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 29. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 84,8 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

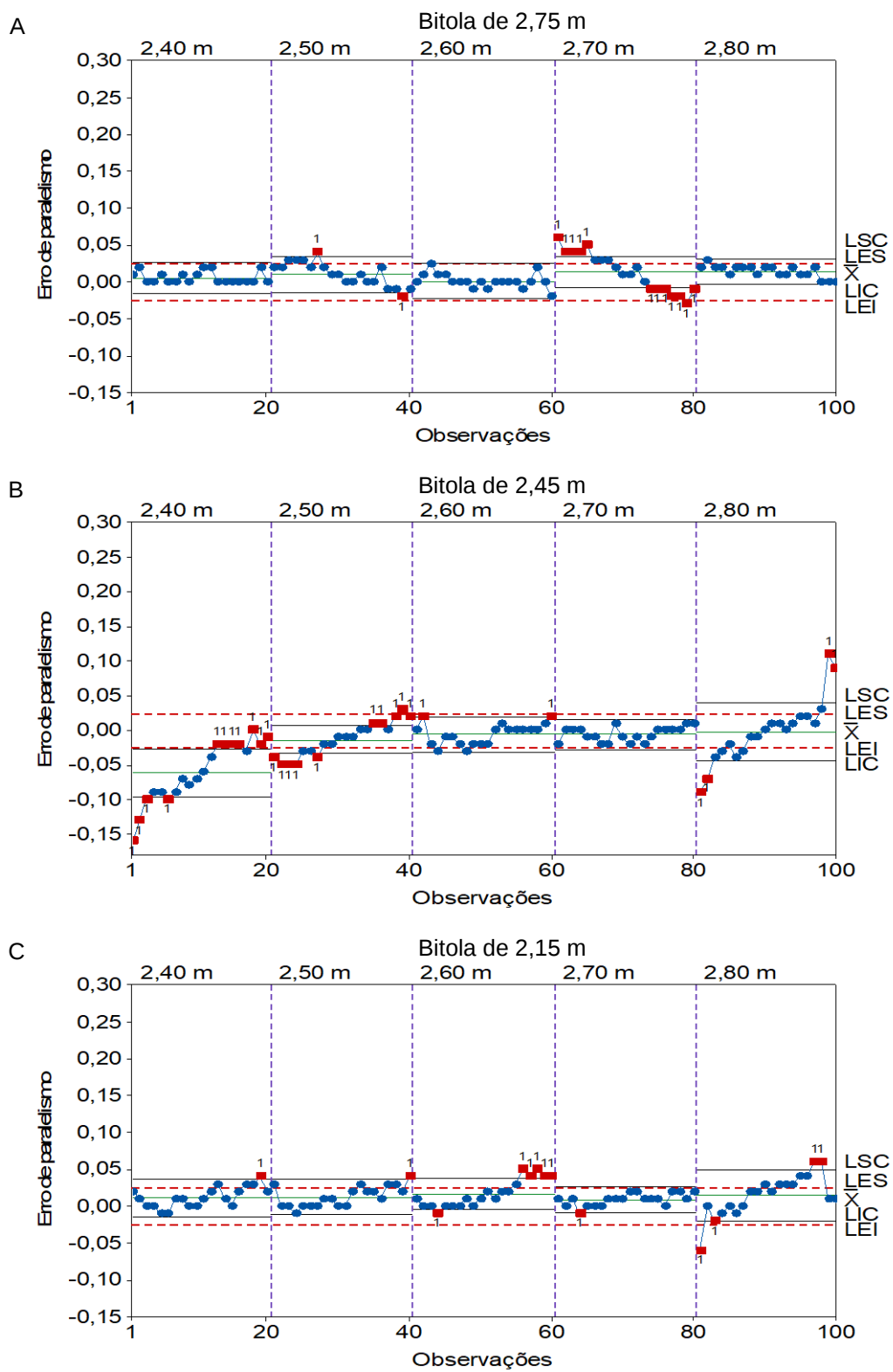


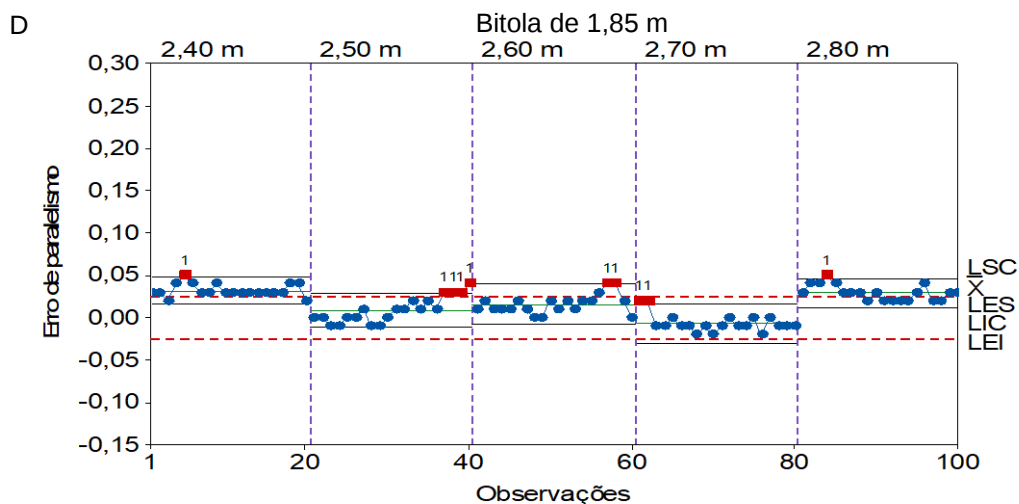


LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 30. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 88,4 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m

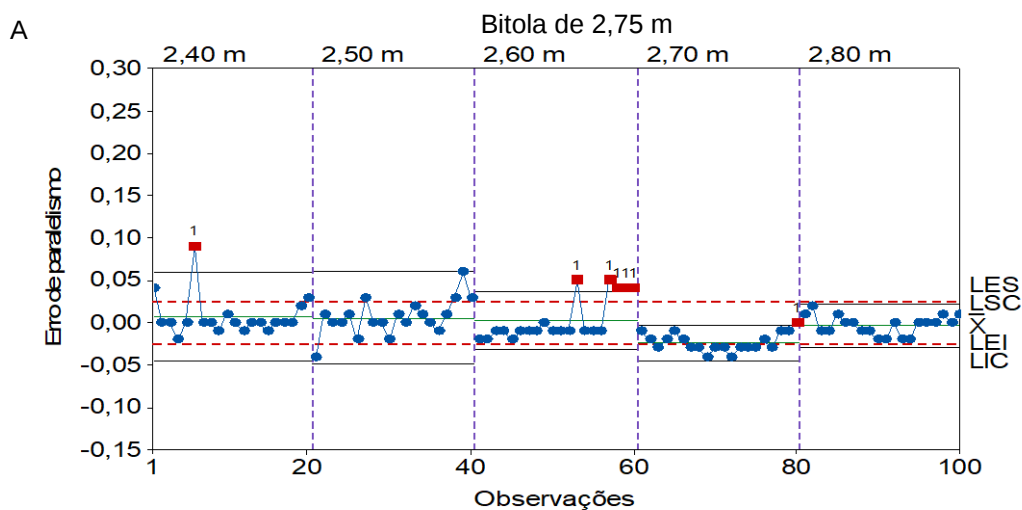
(D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

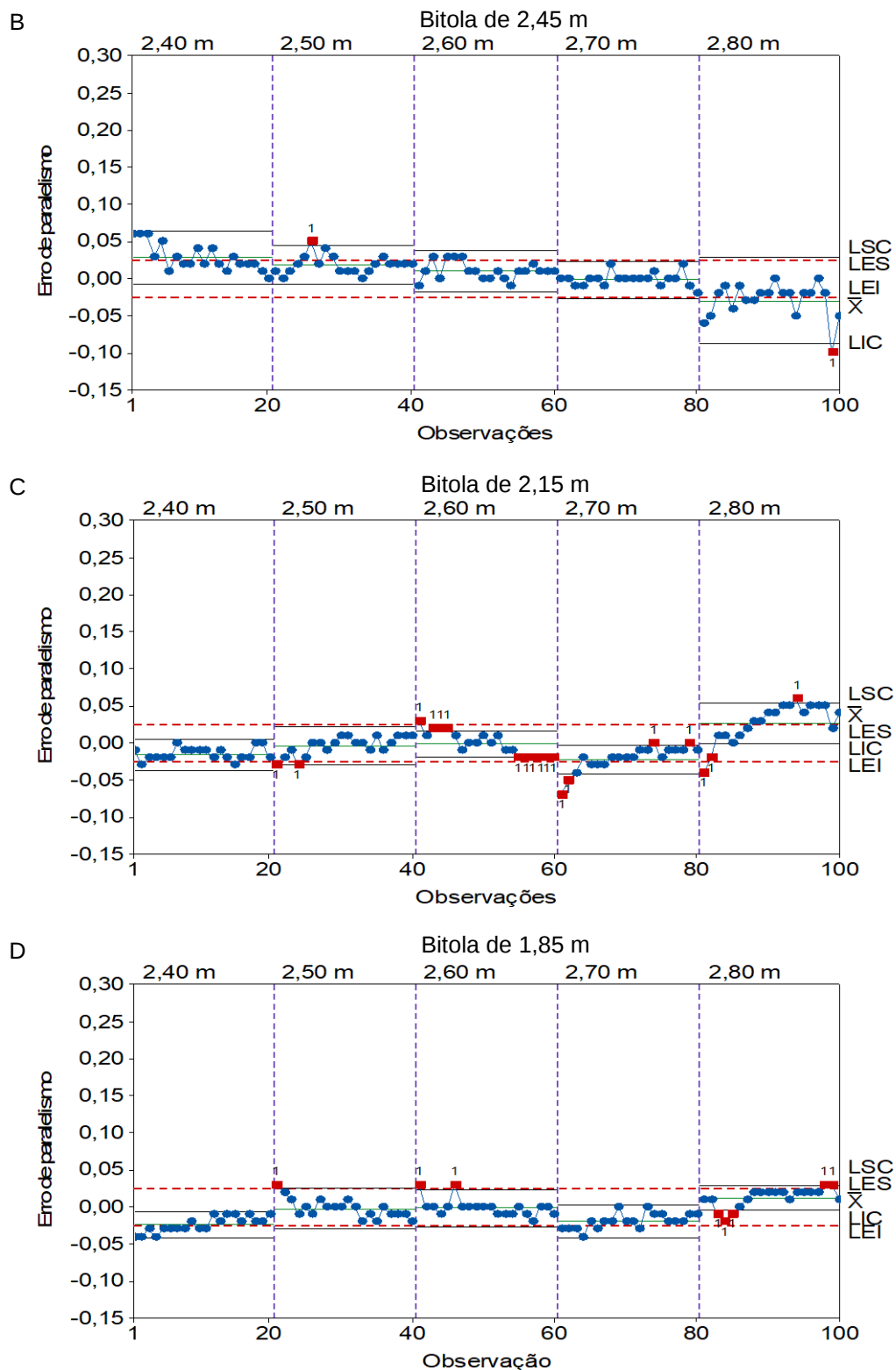




LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 31. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 102,8 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).

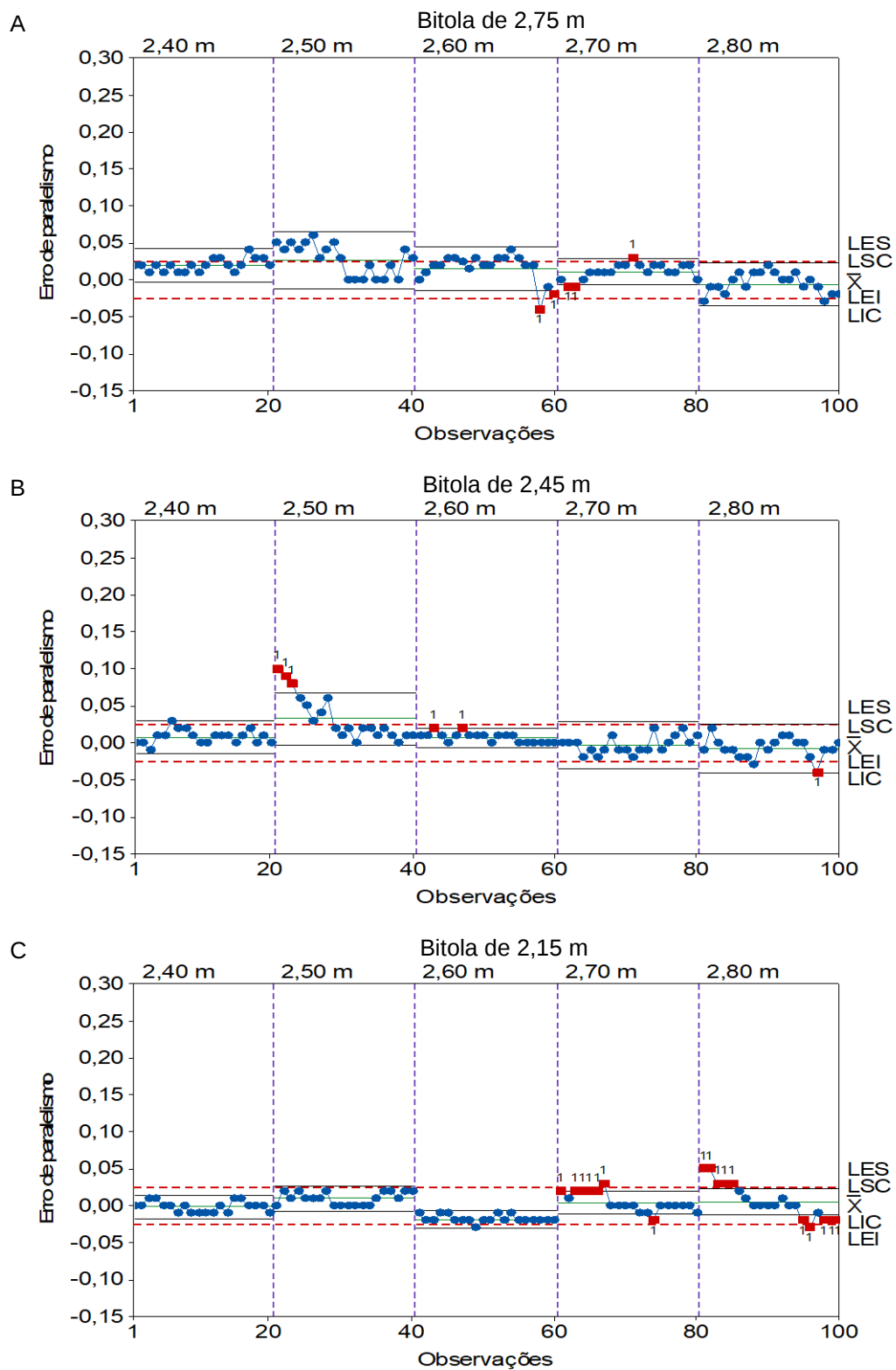


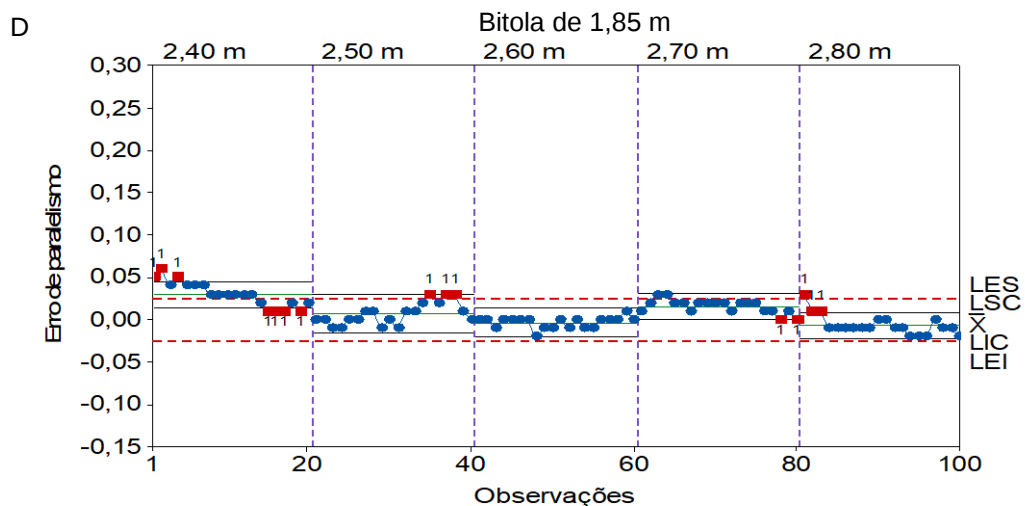


LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 32. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 106,4 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m

(D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).





LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle. $\bar{X}$: Média. LES: Limite Específico Superior. LEI: Limite Específico Inferior.

Figura 33. Carta de controle individual para o erro de paralelismo no raio 110 m para as Bitolas: B1= 2,75 m (A), B2= 2,45 m (B), B3= 2,15 m (C) e B4= 1,85 m (D) com todos os comprimentos do cabeçalho (C1=2,40 m, C2=2,50 m, C3=2,60 m, C4=2,70 m e C5=2,80 m).