



Cássio Mello

**AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DO SISTEMA DE POLIAS DA COLHEITADEIRA
SLC 65A USANDO GD&T E *LASER TRACKER***

Horizontalina - RS

2026

Cássio Mello

**AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DO SISTEMA DE POLIAS DA
COLHEITADEIRA SLC 65A USANDO GD&T E *LASER TRACKER***

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção na Faculdade Horizontina, sob a orientação da Prof. Ma. Eliane Garlet.

Horizontina - RS

2026

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**“Avaliação dimensional do sistema de polias da colheitadeira SLC 65A usando
GD&T e *Laser Tracker*”**

**Elaborada por:
Cássio Mello**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Produção

Aprovado em:
Pela Comissão Examinadora

Mestra. Eliane Garlet
Presidente da Comissão Examinadora - Orientadora

Doutor. Geovane Webler
FAHOR – Faculdade Horizontina

Mestra. Francine Centenaro Gomes
FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS
2026**

À Deus, por ser meu guia em todos os momentos, iluminando meus caminhos, fortalecendo minha fé e concedendo-me sabedoria para enfrentar e superar os desafios.

À minha família, em especial à minha esposa, à minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão, por serem meu alicerce e minha maior inspiração. Pelo amor, apoio e incentivo incondicionais, que foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À professora Eliane Garlet, pela orientação, paciência e dedicação ao longo do desenvolvimento deste Trabalho Final de Curso. Sua orientação foi essencial para a conclusão desta importante etapa.

“Quando se pode medir aquilo de que se fala e expressá-lo em números, sabe-se algo sobre isso; quando não se pode medir nem expressar em números, o conhecimento é pobre e insatisfatório.”
(William Thomson, Lord Kelvin)

RESUMO

A avaliação dimensional de equipamentos mecânicos de grande porte, especialmente aqueles de caráter histórico, apresenta desafios significativos relacionados à ausência de documentação técnica, restrições de acesso físico e condições não controladas de medição, o que compromete a confiabilidade dos resultados obtidos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o comportamento dimensional do sistema de polias da colheitadeira SLC 65A, por meio da aplicação de conceitos de Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico (GD&T) associados à metrologia de grande volume, utilizando *Laser Tracker*. O trabalho se justifica pela necessidade de aplicar ferramentas modernas de engenharia para viabilizar análises tecnicamente fundamentadas em ativos desenvolvidos em contextos tecnológicos distintos dos atuais. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso, de natureza aplicada, com abordagem quali-quantitativa e objetivos descritivos e exploratórios. A coleta de dados foi realizada em campo com o *Laser Tracker* AT960LR, enquanto o tratamento e a análise dos dados foram conduzidos com o auxílio dos softwares *Metrolog X4*, *Microsoft Excel* e *Minitab*, incluindo a avaliação de características geométricas e a realização de estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R). Os resultados apontaram comportamento dimensional heterogêneo, com polias conformes e outras com desvios significativos, como desalinhamentos entre eixos e erros de perpendicularidade, gerados pelo desgaste e pelas tolerâncias de fabricação da época. O estudo de R&R evidenciou limitações associadas à reprodutibilidade do sistema de medição, reforçando a influência do posicionamento, definição de referências e estratégia de medição na variabilidade dos resultados. O trabalho demonstrou a aplicabilidade prática do GD&T aliado à metrologia de grande volume na avaliação de ativos históricos em condições reais. A metodologia foi eficaz para caracterizar o comportamento dimensional do sistema de polias da SLC 65A e identificar não conformidades. Conclui-se que a integração entre GD&T, *Laser Tracker* e análise estatística é uma ferramenta robusta para inspeção em grande escala, reforçando a importância da correta definição de referências (*datums*) e contribuindo para a preservação técnica de ativos históricos.

Palavras-chave: Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico (GD&T). Metrologia dimensional de grande volume. Primeira Colheitadeira SLC 65A.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Controles e simbologia	16
Figura 2 - Quadro de controle	22
Figura 3 - Fachada MEA.....	26
Figura 4 - Fluxograma das etapas	31
Figura 5 - Colheitadeira SLC 65A	34
Figura 6 - Equipamento de medição Laser Tracker	36
Figura 7 - Posicionamento do Laser Tracker de medição.....	36
Figura 8 - Localização plano e círculos.....	38
Figura 9 - Alinhamento funcional	39
Figura 10 - Medição primeira posição.....	40
Figura 11 - Localização elementos medidos.....	41
Figura 12 - Posicionamento cones para salto	42
Figura 13 - Esfera receptora de alta precisão.....	43
Figura 14 - Resultado salto.....	44
Figura 15 - Características do lado esquerdo	45
Figura 16 - Interface inicial do software de medição Metrolog x4	46
Figura 17 - Árvore de característica e elementos de controle.....	47
Figura 18 - Especificação de quadro de resultado.....	48
Figura 19 - Resultado da avaliação de perfil lado direito	49
Figura 20 - Resultado da avaliação de posição lado direito.....	50
Figura 21 - Resultado da avaliação de posição lado esquerdo	51
Figura 22 - Resultado da avaliação de perfil lado esquerdo	51
Figura 23 - Resultado da avaliação de perpendicularidade	52
Figura 24 - Resultado de estudo R&R - resumo geral	55
Figura 25 - Resultado de estudo de R&R - variação entre operadores	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	TEMA.....	10
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	10
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA.....	10
1.4	JUSTIFICATIVA.....	11
1.5	OBJETIVOS.....	12
1.5.1	Objetivo geral.....	12
1.5.2	Objetivos específicos	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	A COLHEITADEIRA SLC 65A E A MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA BRASILEIRA ..	14
2.2	MEDIÇÃO E METROLOGIA DIMENSIONAL.....	15
2.3	DIMENSIONAMENTO E TOLERANCIAMENTO GEOMÉTRICO (GD&T)	16
2.3.1	Controles de forma	17
2.3.2	Controles de orientação	17
2.3.3	Controles de localização	18
2.3.3.1	Tolerância de posição	19
2.3.4	Controles de batimento	19
2.3.5	Controles de perfil.....	20
2.6	MEDIÇÃO POR <i>LASER TRACKER</i> E METROLOGIA DE GRANDE VOLUME..	22
2.7	<i>SOFTWARE</i> DE METROLOGIA <i>METROLOG X4</i>	23
2.8	ANÁLISE DE SISTEMA DE MEDIÇÃO (MSA).....	23
2.9	ESTUDO DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE (R&R).....	24
3	METODOLOGIA	25
3.1	LOCAL DE PESQUISA.....	25
3.2	MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS	26
3.2.1	Quanto a natureza.....	27
3.2.2	Método de Abordagem	28
3.2.3	Quanto aos objetivos	28
3.2.4	Métodos de procedimento	29
3.2.5	Técnicas de coleta de dados	29
3.2.6	Técnicas de análise de dados.....	30
3.2.7	Etapas das Atividades.....	31
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	33
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	33
4.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE ESTUDO	34
4.3	POSICIONAMENTO E ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO	35
4.4	DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO E ALINHAMENTO.....	38
4.5	AQUISIÇÃO DOS DADOS – PRIMEIRA POSIÇÃO	40
4.6	REALOCAÇÃO DO EQUIPAMENTO (SALTO DE MEDIÇÃO)	42
4.7	AQUISIÇÃO DOS DADOS – SEGUNDA POSIÇÃO	44
4.8	RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES DE GD&T	46
4.10	ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO (R&R).....	54
4.11	CONTRIBUIÇÕES TÉCNICAS E APLICAÇÕES PRÁTICAS DA PESQUISA ..	57
	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS.....	62
	APÊNDICE A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO <i>LASER TRACKER</i>	64
	APÊNDICE B – TABELA PARA ESTUDO DE R&R	65

1 INTRODUÇÃO

A metrologia dimensional desempenha um papel fundamental na engenharia mecânica, especialmente na avaliação funcional de sistemas responsáveis pela transmissão de potência e sincronização de movimentos. No caso de máquinas agrícolas, como as colheitadeiras, o correto posicionamento e alinhamento de componentes é essencial para garantir desempenho, confiabilidade e durabilidade dos sistemas mecânicos. Nesse cenário, a aplicação de conceitos de GD&T, aliada a técnicas modernas de medição tridimensional e à análise da variabilidade do processo de medição, destaca-se como uma abordagem robusta para a avaliação dimensional de conjuntos mecânicos complexos.

Este trabalho tem como tema a avaliação dimensional do sistema de polias da primeira colheitadeira brasileira, a SLC 65 A, equipamento que representa um marco histórico no desenvolvimento da indústria nacional de máquinas agrícolas, cujo nome do produto pertence ao grupo Schneider Logemann & Cia. Atualmente, essa colheitadeira encontra-se preservada e em exposição no Memorial da Evolução Agrícola (MEA), local onde este trabalho foi realizado, condição que, ao mesmo tempo em que reforça seu valor histórico, impõe desafios adicionais para a realização de medições dimensionais, uma vez que se trata de um equipamento de grande porte, com geometrias complexas e não fabricado segundo os padrões atuais de toleranciamento.

O problema central deste estudo consiste em como realizar uma avaliação dimensional confiável, repetível e tecnicamente fundamentada do sistema de polias da colheitadeira SLC 65 A, considerando suas características construtivas, limitações de acesso físico e a ausência de documentação dimensional completa. Além disso, torna-se necessário empregar uma metodologia de medição capaz de garantir precisão e rastreabilidade, bem como avaliar a influência do operador e do método de medição em um ambiente não controlado, típico de exposições museológicas.

Diante dessa problemática, o objetivo deste trabalho foi realizar a medição e avaliação dimensional do sistema de polias da colheitadeira, utilizando conceitos de GD&T para a definição e interpretação das características geométricas, em conjunto com a metrologia por meio do *Laser Tracker*. Complementarmente, conduziu-se um estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R), com o propósito de avaliar a

variação do sistema de medição, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos e a adequação do método aplicado à análise dimensional proposta.

A relevância deste estudo está na integração entre o GD&T, como linguagem padronizada para especificação geométrica (ASME, 2018), a metrologia de grande volume com uso do *Laser Tracker*, reconhecido por sua precisão em sistemas complexos (Schwenke *et al.*, 2002), e a análise de R&R para validação da confiabilidade dos processos de medição (AIAG, 2010). Nesse contexto, o trabalho contribui para o avanço técnico-científico e para a preservação do patrimônio industrial nacional.

1.1 TEMA

Avaliação dimensional do sistema de polias da colheitadeira SLC 65, utilizando GD&T e *Laser Tracker*.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho delimita-se à avaliação dimensional do sistema de polias da colheitadeira SLC 65A, realizada nas dependências do MEA, enquanto espaço museológico, utilizando os princípios de GD&T e o *Laser Tracker* modelo AT960LR, com foco na avaliação da confiabilidade do sistema de medição por meio de um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R). O estudo restringe-se à análise dimensional do referido sistema, não contemplando medições de outros subconjuntos da colheitadeira, avaliações funcionais, análises estruturais, ensaios dinâmicos ou comparações com medições realizadas em ambiente fabril ou de laboratório metrológico controlado.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

A colheitadeira SLC 65A, por tratar-se de um equipamento histórico de grande porte, apresenta desafios específicos para a realização de avaliações dimensionais. A ausência de documentação dimensional original, as limitações de acesso físico aos componentes e a execução das medições em um ambiente não controlado dificultam a aplicação direta de métodos convencionais de inspeção. Além disso, a variabilidade inerente ao sistema de medição, influenciada pelo operador, pelo método e pelo

equipamento, torna imprescindível a verificação da confiabilidade dos resultados obtidos.

Diante desse contexto, surge a necessidade de investigar as variações dimensionais presentes no sistema de polias da primeira colheitadeira brasileira, bem como a viabilidade da aplicação de conceitos modernos de metrologia dimensional, como o GD&T e a metrologia de grande volume com *Laser Tracker*, aliados a um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade. Assim, estabelece-se como problema de pesquisa a seguinte questão: Como a aplicação dos princípios de GD&T, associada à metrologia de grande volume, permite caracterizar de maneira confiável o comportamento dimensional do sistema de polias de uma colheitadeira em condições reais de inspeção?

1.4 JUSTIFICATIVA

A realização deste trabalho justifica-se pela relevância técnica, acadêmica e histórica de se aplicar conceitos modernos de metrologia dimensional a um equipamento que representa um marco da indústria nacional. A colheitadeira SLC 65A, primeira colheitadeira brasileira, além de seu valor simbólico, nunca havia sido submetida a uma avaliação dimensional sistematizada desde sua fabricação, o que torna este estudo inédito do ponto de vista metrológico. Dessa forma, o trabalho contribui diretamente para a documentação técnica e para a preservação do conhecimento associado a um importante patrimônio industrial brasileiro.

Do ponto de vista acadêmico, esta pesquisa amplia a discussão sobre a aplicabilidade do GD&T em contextos não convencionais, como produtos antigos e ambientes museológicos. A utilização do GD&T como linguagem padronizada para a interpretação de requisitos geométricos funcionais, conforme estabelecido pela norma ASME Y14.5, permite demonstrar que essa ferramenta não se restringe a projetos contemporâneos, mas pode ser empregada também como instrumento analítico para compreender concepções construtivas do passado (ASME, 2018). A associação desses conceitos à metrologia de grande volume e à análise da variabilidade do sistema de medição reforça a integração entre teoria normativa e prática experimental.

Para o setor profissional e industrial, o trabalho apresenta contribuição relevante ao demonstrar a aplicação do *Laser Tracker* em medições realizadas fora de ambientes controlados, cenário frequentemente encontrado em inspeções de campo, manutenção e análises de equipamentos existentes. A realização do estudo

de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) evidencia a preocupação com a confiabilidade do sistema de medição, alinhando-se às boas práticas recomendadas para validação metrológica e interpretação segura dos resultados (AIAG, 2010).

Por fim, para estudantes e futuros engenheiros, este trabalho configura-se como uma referência prática para a integração entre normas técnicas, tecnologias avançadas de medição e métodos estatísticos aplicados em um contexto real e inédito. Dessa forma, a pesquisa não apenas documenta, de maneira pioneira, a avaliação dimensional de um equipamento histórico, como também contribui significativamente para a formação técnica, crítica e aplicada dos envolvidos. Além disso, reforça o papel essencial da metrologia dimensional na engenharia, consolidando-se como base para o desenvolvimento de estudos acadêmicos, pesquisas e novos projetos de engenharia.

Do ponto de vista acadêmico, este estudo também se mostrou relevante por representar uma oportunidade concreta de aplicar, de forma prática, os conhecimentos adquiridos ao longo da formação em Engenharia de Produção. O desenvolvimento do trabalho possibilitou a vivência de situações reais de engenharia, promovendo a integração entre teoria e prática por meio da aplicação de conceitos técnicos, métodos de análise e ferramentas estudadas durante a graduação. Esse processo contribuiu significativamente para o desenvolvimento do senso crítico, da capacidade analítica e da maturidade profissional do pesquisador, consolidando sua formação e preparando-o para a atuação técnica fundamentada na área da engenharia.

1.5 OBJETIVOS

Diante do exposto, definiram-se os objetivos geral e específicos que nortearam o desenvolvimento deste estudo.

1.5.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento dimensional do sistema de polias da colheitadeira SLC 65A, aplicando GD&T e metrologia de grande volume com *Laser Tracker*.

1.5.2 Objetivos específicos

Para cumprir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Aplicar os princípios de GD&T na definição e interpretação das características geométricas do sistema de polias da colheitadeira SLC 65A;
- Realizar a medição dimensional do sistema de polias utilizando o *Laser Tracker* AT960LR, considerando sua aplicação em um sistema mecânico de grande porte;
- Avaliar a conformidade geométrica dos componentes em relação às especificações definidas com base em GD&T;
- Realizar um estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) do sistema de medição;
- Verificar a confiabilidade dos resultados obtidos;
- Identificar as contribuições do estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura tem como objetivo fundamentar teoricamente os principais conceitos, métodos e tecnologias que sustentam o desenvolvimento deste estudo, proporcionando uma base científica sólida para a análise proposta. Por meio do levantamento e da análise de publicações técnicas, normas, livros e documentos institucionais, busca-se contextualizar o objeto de estudo, bem como discutir os fundamentos da metrologia dimensional, do GD&T, da medição por *Laser Tracker* e da confiabilidade dos sistemas de medição.

A metrologia dimensional é essencial para o controle da qualidade industrial, assegurando rastreabilidade, exatidão e confiabilidade nas medições (Silva Neto, 2012; INMETRO, 2025), enquanto o GD&T constitui uma linguagem padronizada que permite especificar de forma clara e funcional as tolerâncias geométricas, facilitando a comunicação entre projeto, fabricação e inspeção (Meadows, 2019).

2.1 A COLHEITADEIRA SLC 65A E A MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA BRASILEIRA

A colheitadeira SLC 65A representa um marco histórico no desenvolvimento da mecanização agrícola nacional, sendo amplamente reconhecida como a primeira colheitadeira automotriz fabricada no Brasil, lançada em 1965 no município de Horizontina, no estado do Rio Grande do Sul. Desenvolvida pela empresa Schneider Logemann & Cia. (SLC), a máquina simboliza um avanço tecnológico significativo ao promover a nacionalização da colheita mecanizada, reduzindo a dependência de equipamentos importados e impulsionando o desenvolvimento da indústria nacional de máquinas agrícolas (Lexicar Brasil, 2024; ANFAVEA, 2020).

O desenvolvimento da SLC 65A esteve associado a práticas de engenharia reversa e adaptação tecnológica, baseadas na análise de soluções já consolidadas em mercados internacionais. Esse tipo de abordagem é amplamente descrito na literatura de engenharia como um mecanismo eficaz de transferência de tecnologia e aprendizagem industrial, permitindo a internalização de conhecimentos de projeto e manufatura e contribuindo para a evolução da capacidade técnica local (Groover, 2016; Kalpakjian; Schmid, 2014; MEA, 2025).

Sob a perspectiva da engenharia mecânica, a SLC 65A reflete práticas construtivas e critérios dimensionais característicos da década de 1960, período anterior à consolidação das normas modernas de toleranciamento geométrico.

Conforme discutido por Shigley *et al.* (2015) e pela norma ASME Y14.5 (2018), o controle geométrico moderno só se estruturou posteriormente, o que indica que máquinas desse período incorporaram requisitos funcionais por meio de soluções geométricas implícitas e ajustes práticos de fabricação. Dessa forma, a análise dimensional de seus sistemas mecânicos fornece uma base relevante para comparações com os padrões atuais de GD&T, permitindo uma melhor compreensão da evolução das práticas de engenharia (Shigley *et al.*, 2015; ASME, 2018).

2.2 MEDIÇÃO E METROLOGIA DIMENSIONAL

A metrologia é definida como a ciência da medição e de suas aplicações, englobando todos os aspectos teóricos e práticos relacionados à obtenção de valores confiáveis para grandezas físicas. No contexto da engenharia mecânica, a metrologia dimensional dedica-se à medição de comprimentos, ângulos, formas e características de superfície, sendo essencial para atividades de controle da qualidade, verificação da conformidade e avaliação funcional de componentes mecânicos. Nesse sentido, a metrologia constitui um dos pilares para a garantia da intercambialidade e do desempenho adequado de sistemas mecânicos (INMETRO, 2025; VIM, 2012).

O processo de medição consiste na comparação de uma grandeza desconhecida com um padrão previamente estabelecido, estando sujeito à influência de diversas fontes de variabilidade, tais como o instrumento de medição, o método empregado, o operador e as condições ambientais. Dessa forma, a confiabilidade dos resultados metrológicos não está associada apenas ao valor medido, mas também à rastreabilidade aos padrões nacionais ou internacionais, bem como à repetibilidade e reprodutibilidade do processo. Conforme destacam Almacinha (2016) e JCGM (2012), a avaliação dessas incertezas é fundamental para a correta interpretação dos resultados de medição e para a tomada de decisão em processos industriais.

Em aplicações envolvendo equipamentos de grande porte, como colheitadeiras, os métodos convencionais de medição tornam-se limitados em função das dimensões, da complexidade geométrica e das condições do ambiente de medição. Nesse contexto, destaca-se a metrologia de grande volume, que emprega sistemas avançados — como *laser trackers* e sistemas ópticos — capazes de realizar medições tridimensionais com elevado nível de exatidão em grandes escalas. Segundo Kunzmann *et al.* (2005) e Schwenke *et al.* (2008), essas tecnologias permitem manter níveis adequados de precisão e confiabilidade mesmo em ambientes

não controlados, sendo amplamente utilizadas em setores como aeroespacial, automotivo e de máquinas agrícolas.

2.3 DIMENSIONAMENTO E TOLERANCIAMENTO GEOMÉTRICO (GD&T)

O GD&T constitui uma linguagem técnica padronizada empregada para especificar, controlar e comunicar as variações geométricas admissíveis em peças e conjuntos mecânicos. Conforme estabelecido pela norma ASME Y14.5, o GD&T define um conjunto estruturado de símbolos, regras e princípios destinados ao controle de características como forma, orientação, localização, batimento e perfil, possibilitando a interpretação unificada da intenção de projeto entre as áreas de engenharia, manufatura e inspeção. Essa padronização reduz ambiguidades e aumenta a confiabilidade na fabricação e verificação de componentes mecânicos (ASME, 2018; Shigley *et al.*, 2015). A Figura 1 apresenta todos as simbologias referente aos tipos de controle no dimensionamento e toleranciamento geométrico.

Figura 1 - Controles e simbologia

CHARACTERISTIC	SYMBOL	CHARACTERISTIC	SYMBOL	CHARACTERISTIC	SYMBOL
STRAIGHTNESS	—	PROFILE OF A LINE		PARALLELISM	//
FLATNESS		PROFILE OF A SURFACE		POSITION	
CIRCULARITY		ANGULARITY		CIRCULAR RUNOUT	
CYLINDRICITY		PERPENDICULARITY		TOTAL RUNOUT	

Fonte: Adaptado de ASME (2018).

Conforme a Figura 1 o GD&T fundamenta-se no conceito de função geométrica, no qual as tolerâncias são associadas diretamente ao desempenho funcional da peça no conjunto. Essa abordagem permite maior flexibilidade nos processos de fabricação, sem comprometer a funcionalidade e a intercambialidade dos componentes. De acordo com Souza (2020) e Sigmetrix (2026), a correta aplicação do GD&T possibilita a otimização de tolerâncias, redução de custos produtivos e melhoria da qualidade, ao alinhar os requisitos geométricos às reais necessidades funcionais do projeto.

Além de sua ampla aplicação em projetos contemporâneos, o GD&T também pode ser utilizado como uma ferramenta analítica em estudos de engenharia reversa. Nesse contexto, a linguagem geométrica permite interpretar e reconstruir a lógica de projeto de produtos já existentes, especialmente aqueles desenvolvidos antes da

consolidação dessas normas. Conforme destacado por Souza (2020) e ASME (2018), a aplicação do GD&T em análises dimensionais contribui para a compreensão das relações funcionais entre superfícies e elementos geométricos, possibilitando a avaliação comparativa entre soluções históricas e os padrões atuais da engenharia mecânica.

2.3.1 Controles de forma

Os controles de forma são utilizados para limitar as variações geométricas de um elemento individual, sem a necessidade de referência a outros elementos ou sistemas de referência (*datums*). Esse grupo compreende os controles de retitude, planeza, circularidade e cilindridade, sendo empregados para garantir a integridade geométrica intrínseca da peça. Conforme estabelecido pela norma ASME Y14.5 (2018) e abordado por Henzold (2006), esses controles atuam diretamente sobre a geometria própria do elemento, assegurando que suas características atendam aos requisitos mínimos de forma independentemente de qualquer relação externa.

Uma característica essencial desses controles é justamente a ausência de referências externas, uma vez que sua avaliação está restrita à própria geometria do elemento analisado. Nesse contexto, conforme discutido por Souza (2020) e corroborado por Krulikowski (1998), os controles de forma são fundamentais para garantir a funcionalidade básica dos componentes, contribuindo para o desempenho adequado do produto mesmo antes de sua interação com outros elementos do conjunto.

2.3.2 Controles de orientação

Os controles de orientação têm como objetivo limitar a inclinação de um elemento em relação a um *datum* de referência, garantindo que a relação angular entre superfícies ou eixos seja mantida conforme os requisitos de projeto. Esse grupo compreende os controles de paralelismo, perpendicularidade e angularidade, sendo amplamente aplicado em conjuntos mecânicos que exigem alinhamento geométrico preciso para assegurar o correto funcionamento do sistema. Conforme definido pela norma ASME Y14.5 (2018) e discutido por Souza (2020), esses controles são essenciais para estabelecer relações espaciais consistentes entre elementos, permitindo a padronização e a interpretação clara das intenções de projeto.

Desvios de orientação podem gerar desalinhamentos progressivos entre componentes, resultando em aumento de atrito, desgaste prematuro e vibrações indesejadas, especialmente em sistemas rotativos e de transmissão de movimento. Segundo Shigley *et al.* (2015) e Souza (2020), a aplicação adequada dos controles de orientação contribui diretamente para a estabilidade geométrica, melhoria do desempenho funcional e aumento da vida útil dos conjuntos mecânicos, assegurando que as interações entre superfícies ocorram dentro das condições ideais previstas em projeto.

2.3.3 Controles de localização

Os controles de localização são empregados para definir a posição de elementos geométricos em relação a um sistema de referências, denominado *datum reference frame*, assegurando que a peça seja corretamente posicionada dentro de um conjunto mecânico. Esse grupo compreende os controles de posição, concentricidade e simetria, sendo fundamentais para garantir a correta localização funcional dos componentes e a coerência geométrica do sistema montado. Conforme estabelecido pela norma ASME Y14.5 (2018) e discutido por Souza (2020), esses controles permitem traduzir requisitos funcionais em especificações geométricas mensuráveis, promovendo a integração entre projeto, fabricação e inspeção. Além disso, conforme destacado por Sigmatrix (2026), a correta definição de *datums* é essencial para assegurar consistência na interpretação e na verificação das tolerâncias geométricas.

A aplicação adequada dos controles de localização está diretamente associada à intercambiabilidade dos componentes e à consistência dimensional dos conjuntos mecânicos. Nesse contexto, a tolerância de posição destaca-se como o controle mais robusto e amplamente recomendado, pois apresenta maior facilidade de medição, melhor interpretação funcional e maior aplicabilidade industrial quando comparada aos controles de concentricidade e simetria. Conforme apontado por Souza (2020), Shigley *et al.* (2015) e pela própria ASME (2018), o uso preferencial da tolerância de posição reduz ambiguidades na especificação e melhora a comunicação entre as áreas envolvidas, contribuindo para o aumento da qualidade e da confiabilidade dos produtos.

2.3.3.1 Tolerância de posição

A tolerância de posição controla a localização verdadeira de um elemento geométrico em relação aos *datums* estabelecidos, sendo considerada uma das ferramentas mais importantes do GD&T. Para elementos cilíndricos, a zona de tolerância geralmente assume forma cilíndrica, permitindo uma avaliação dos desvios geométricos com maior fidelidade em relação à condição funcional da peça. Conforme descrito pela ASME Y14.5 (2018) e por Souza (2020), essa abordagem possibilita uma representação mais realista das variações admissíveis, alinhando a verificação dimensional com o desempenho operacional esperado.

Para a avaliação da tolerância de posição, utiliza-se uma formulação baseada na combinação dos desvios nas direções ortogonais do plano de medição. O desvio de posição (TP) é calculado pela equação $TP = 2 \times \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}$, na qual os termos ΔX e ΔY representam as diferenças entre as posições medidas e nominais da característica. O fator multiplicativo 2 decorre da representação da zona de tolerância em forma diametral, conforme estabelecido pela ASME Y14.5, permitindo uma avaliação mais fiel da variação espacial da característica em relação à sua posição teórica (ASME, 2018; MakerStage, 2026).

Em sistemas de transmissão, como o sistema de polias da colheitadeira SLC 65A, a tolerância de posição é essencial para avaliar o alinhamento entre eixos e elementos rotativos. Desvios posicionais podem ocasionar vibrações, desalinhamentos, desgaste irregular e perda de eficiência do sistema, impactando diretamente a durabilidade e o desempenho do conjunto mecânico. Segundo Shigley *et al.* (2015) e Sigmetrix (2026), o controle adequado da posição contribui significativamente para a estabilidade geométrica e para a confiabilidade operacional de sistemas rotativos, reforçando sua relevância em análises dimensionais aplicadas a equipamentos reais.

2.3.4 Controles de batimento

Os controles de batimento são aplicados a superfícies de revolução e têm como finalidade avaliar a variação geométrica de um elemento durante sua rotação em torno de um eixo de referência. Esse grupo inclui o batimento circular e o batimento total, sendo especialmente relevante para componentes rotativos que exigem elevado grau de precisão geométrica. Conforme estabelecido pela norma ASME Y14.5 (2018) e

discutido por Krulikowski (2012), esses controles permitem verificar a combinação de desvios ao longo da rotação, assegurando que o comportamento geométrico da peça esteja compatível com sua função no conjunto.

Esses controles possibilitam a identificação de irregularidades geométricas que impactam diretamente o comportamento dinâmico do sistema, como vibração, ruído e desgaste prematuro. De acordo com Shigley *et al.* (2015) e Drake (2009), o batimento fornece uma avaliação integrada dos desvios de forma, orientação e localização, sendo particularmente útil em análises funcionais de eixos, mancais e componentes submetidos a movimento rotativo. Dessa forma, sua aplicação contribui para a melhoria do desempenho, da estabilidade e da confiabilidade de sistemas mecânicos, especialmente em condições reais de operação.

2.3.5 Controles de perfil

Os controles de perfil são considerados os mais completos dentro do sistema de GD&T, pois permitem o controle simultâneo de forma, orientação e localização de um elemento em relação a um perfil teórico verdadeiro. Esse grupo engloba o perfil de linha e o perfil de superfície, sendo amplamente aplicado em geometrias complexas e superfícies funcionais críticas, nas quais múltiplos requisitos geométricos precisam ser atendidos de forma integrada. Conforme definido pela norma ASME Y14.5 (2018) e discutido por Souza (2020), esses controles oferecem uma abordagem mais abrangente para a especificação geométrica, permitindo representar de maneira mais fiel a intenção de projeto.

Além disso, os controles de perfil destacam-se pela sua flexibilidade na definição das zonas de tolerância, que podem ser distribuídas de forma uniforme ou assimétrica em relação ao perfil nominal, conforme a necessidade funcional da peça. Segundo Souza (2020) e Krulikowski (2012), essa característica torna o perfil especialmente adequado para componentes de maior complexidade geométrica, como superfícies aerodinâmicas, perfis curvos e elementos de contato crítico. Dessa forma, a aplicação dos controles de perfil contribui diretamente para a melhoria do desempenho funcional, da qualidade dimensional e da confiabilidade dos sistemas mecânicos.

2.4 DATUMS NO DIMENSIONAMENTO

Os *datums* constituem a base do sistema de referência no GD&T, sendo elementos fundamentais para a correta interpretação das tolerâncias geométricas, uma vez que definem o sistema de coordenadas utilizado para a verificação das características dimensionais e geométricas de uma peça, conforme estabelecido pela ASME (2018).

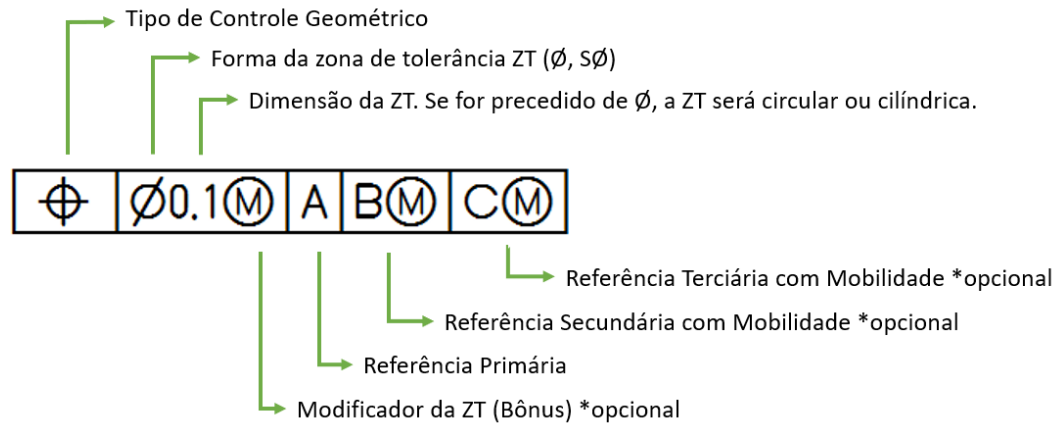
A escolha inadequada dos *datums* pode comprometer significativamente a confiabilidade dos resultados de medição, pois, segundo Souza e Wandeck (2009), a definição desses referenciais deve considerar prioritariamente a função real do componente no conjunto, e não apenas critérios geométricos, garantindo a coerência entre projeto, fabricação e inspeção.

Além disso, a correta simulação dos *datums* durante o processo de medição é essencial, especialmente em ambientes de metrologia tridimensional. Em sistemas como *Laser Tracker* e *softwares* metrológicos, a reconstrução adequada do sistema de referência (*Datum Reference Frame*) é determinante para assegurar a representatividade, repetibilidade e confiabilidade dos resultados obtidos (ASME, 2018).

2.5 QUADRO DE CONTROLE DE GD&T

O quadro de controle de GD&T, conhecido como *Feature Control Frame* (FCF), constitui o principal elemento gráfico responsável por formalizar a especificação das tolerâncias geométricas em desenhos técnicos. De acordo com Souza e Wandeck (2009), esse quadro não deve ser interpretado apenas como uma representação simbólica, mas como um recurso técnico essencial que comunica, de forma estruturada, os requisitos funcionais do componente, estabelecendo a relação entre tolerância, referência de *datums* e critérios de aceitação. Nesse sentido, o FCF atua como um elo direto entre projeto e inspeção, assegurando que a intenção funcional da peça seja corretamente traduzida em critérios mensuráveis e verificáveis ao longo do processo produtivo, a Figura 2 demonstra o quadro de tolerância.

Figura 2 - Quadro de controle



Fonte: Adaptado de ASME (2018).

Conforme a Figura 2, a correta interpretação e aplicação do quadro de controle de GD&T são fundamentais para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos. A ausência de uma leitura adequada do (FCF) pode levar à adoção de estratégias de medição inconsistentes, comprometendo a avaliação da conformidade geométrica, mesmo quando são utilizados sistemas avançados como o *Laser Tracker* e *softwares* metroológicos. Dessa forma, o quadro de controle orienta não apenas a especificação, mas também a definição do sistema de referência, a extração das características geométricas e a análise dos desvios, sendo indispensável para assegurar coerência metroológica e alinhamento entre medição e função do componente (ASME, 2018).

2.6 MEDIÇÃO POR *LASER TRACKER* E METROLOGIA DE GRANDE VOLUME

O *Laser Tracker* é um sistema de medição tridimensional de alta precisão amplamente empregado em aplicações de metrologia de grande volume. Seu princípio de funcionamento baseia-se na determinação de coordenadas espaciais por meio da medição simultânea de distâncias e ângulos, permitindo a obtenção de pontos com elevada exatidão em ambientes industriais. Sistemas de medição tridimensional baseados em coordenadas, como o *Laser Tracker*, desempenham papel fundamental na avaliação dimensional de componentes complexos, especialmente quando há necessidade de rastreabilidade e consistência metroológica em grandes volumes de medição (Muralikrishnan *et al.*, 2015; Faro, 2023).

Uma das principais vantagens dessa tecnologia é a possibilidade de realizar medições diretamente no ambiente de instalação do componente, reduzindo a necessidade de desmontagens e minimizando interferências no sistema avaliado.

Segundo Souza e Wandeck (2009), a aplicação de técnicas modernas de metrologia em campo contribui para uma melhor correlação entre o comportamento real do componente e os resultados de medição, sendo especialmente relevante em equipamentos de grande porte ou históricos. Dessa forma, o uso do *Laser Tracker* se mostra particularmente adequado para a avaliação dimensional de máquinas como a colheitadeira SLC 65A, permitindo medições precisas sem comprometer a integridade do equipamento.

2.7 SOFTWARE DE METROLOGIA METROLOG X4

O *Metrolog X4* é um *software* universal de metrologia tridimensional amplamente utilizado em aplicações industriais de inspeção e controle dimensional, sendo referência nos setores automotivo, aeroespacial e de manufatura de precisão. Desenvolvido pelo *Metrologic Group* e integrado ao portfólio da *Hexagon*, o *software* destaca-se por sua capacidade de operar de forma independente do *hardware*, oferecendo compatibilidade nativa com diferentes sistemas de medição, como máquinas de medição por coordenadas (CMM), braços articulados, *scanners* ópticos e *Laser Trackers*, permitindo a centralização do processo de inspeção em uma única plataforma (Hexagon, 2025; *Metrologic Group*, 2026).

Uma característica relevante do *Metrolog X4* é sua arquitetura de 64 *bits*, projetada para o processamento eficiente de grandes volumes de dados, incluindo arquivos CAD complexos e nuvens de pontos densas, sem comprometer o desempenho do sistema. Essa capacidade torna o *software* especialmente adequado para aplicações de metrologia de grande volume, nas quais é necessário analisar componentes e conjuntos de grande porte com elevados níveis de precisão e confiabilidade. Além disso, o *software* possibilita a comparação direta entre a geometria medida e o modelo nominal, utilizando recursos como mapas de cores e extração automatizada de elementos geométricos (*Metrologic Group*, 2026).

2.8 ANÁLISE DE SISTEMA DE MEDIÇÃO (MSA)

O *Measurement System Analysis* (MSA) é uma metodologia fundamental para avaliar a qualidade e a confiabilidade dos sistemas de medição utilizados em processos industriais e experimentais. Seu principal objetivo é identificar e quantificar as fontes de variação associadas às medições, assegurando que os dados obtidos

sejam representativos da condição real do objeto analisado. Conforme Souza (2020), a confiabilidade do sistema de medição é um fator crítico para a tomada de decisão em engenharia, pois resultados imprecisos podem comprometer análises dimensionais e interpretações técnicas, especialmente em aplicações que envolvem tolerâncias restritivas, como no contexto do GD&T.

Nesse sentido, o estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R), inserido no escopo do MSA, permite avaliar a variabilidade do sistema de medição a partir da influência do equipamento e do operador. De acordo com Souza (2021), a correta aplicação do MSA garante não apenas a validação dos dados coletados, mas também maior confiabilidade na análise geométrica, possibilitando interpretações mais seguras sobre conformidade e desempenho funcional dos componentes avaliados.

2.9 ESTUDO DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE (R&R)

O estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) é uma ferramenta estatística amplamente utilizada para avaliar a confiabilidade de sistemas de medição, conforme estabelecido no Manual de Análise de Sistemas de Medição (MSA). De acordo com a AIAG (2010), a repetibilidade está associada à variação observada quando um mesmo operador realiza medições sucessivas sobre a mesma característica, utilizando o mesmo instrumento e sob as mesmas condições, enquanto a reprodutibilidade refere-se à variação introduzida por diferentes operadores ao medir a mesma característica.

A aplicação do estudo de R&R permite quantificar a contribuição do sistema de medição na variabilidade total observada, sendo um requisito essencial para validar a confiabilidade dos dados coletados. Conforme destacam Souza e Wandek (2009), a adequada avaliação do sistema de medição é indispensável para garantir que os desvios identificados estejam relacionados às características reais do objeto analisado, e não a limitações do processo de medição. Nesse contexto, em medições realizadas com equipamentos avançados, como o *Laser Tracker*, a condução correta de estudos de R&R é fundamental para assegurar consistência, repetibilidade e confiabilidade metrológica dos resultados obtidos.

3 METODOLOGIA

A metodologia constitui a base deste trabalho, pois organiza de forma clara todo o caminho percorrido para alcançar os objetivos e responder ao problema de pesquisa. Conforme Marconi e Lakatos (2017), a metodologia científica é responsável por orientar o pesquisador na definição de procedimentos sistemáticos e lógicos, garantindo a confiabilidade e a validade dos resultados. Nesse sentido, ela não se limita à descrição das etapas do estudo, mas estabelece a estrutura que sustenta toda a investigação, assegurando coerência entre problema, objetivos e resultados.

Nesta etapa, são apresentados os métodos, procedimentos e técnicas utilizados na coleta, análise e interpretação dos dados. Também são descritas as ferramentas empregadas nas medições e na verificação da conformidade dimensional, evidenciando o rigor na condução do estudo. A adoção dessas práticas permitiu a obtenção de dados consistentes e representativos, contribuindo para uma análise fiel do comportamento dimensional do sistema estudado e reforçando a credibilidade dos resultados obtidos.

3.1 LOCAL DE PESQUISA

O Memorial da Evolução Agrícola (MEA), localizado na cidade de Horizontina (RS), é um complexo cultural e tecnológico dedicado à preservação da memória e da história da agricultura brasileira. O espaço reúne equipamentos históricos, exposições interativas e acervos que retratam a evolução da mecanização agrícola, integrando ciência, tecnologia, cultura e educação (MEA, 2026). A Figura 3 apresenta a fachada do local.

Figura 3 - Fachada MEA



Fonte: Adaptado de MEA (2026).

Conforme a Figura 3 os principais itens do acervo permanente do MEA encontram-se a colheitadeira SLC 65A, preservada como símbolo do desenvolvimento industrial nacional. A presença desse equipamento no memorial permite não apenas sua contemplação histórica, mas também sua utilização como objeto de estudo técnico, desde que respeitadas as restrições inerentes a um ambiente museológico.

A realização de medições e análises dimensionais em um ambiente como o MEA impõe desafios específicos, como limitações de acesso físico, ausência de controle ambiental rigoroso e restrições à desmontagem do equipamento. Por outro lado, esse contexto amplia a relevância acadêmica do estudo, pois simula condições frequentemente encontradas em inspeções de campo, manutenção e avaliações de máquinas existentes, reforçando o caráter aplicado e realista da pesquisa (GZH, 2025).

3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Os métodos e técnicas utilizados neste estudo foram definidos de forma a garantir coerência entre os objetivos propostos, o problema de pesquisa e os resultados esperados. A escolha dessas abordagens seguiu princípios da metodologia científica, buscando assegurar rigor, organização e confiabilidade em todas as etapas do trabalho. Conforme Marconi e Lakatos (2017), a definição adequada dos métodos

é essencial para orientar a investigação de forma lógica e sistemática, permitindo que os resultados obtidos sejam válidos e passíveis de análise crítica.

Dentro desse contexto, o estudo combina diferentes métodos e técnicas que envolvem desde a coleta até a análise de dados, incluindo medições dimensionais, aplicação de normas técnicas e utilização de ferramentas computacionais. Essa integração possibilita uma abordagem estruturada e consistente, garantindo que os dados obtidos sejam representativos e que as análises realizadas reflitam de forma fiel o comportamento do sistema avaliado, especialmente no contexto da aplicação dos princípios de GD&T.

3.2.1 Quanto a natureza

Este estudo pode ser entendido como uma pesquisa aplicada, pois tem como foco utilizar conceitos e normas técnicas em uma situação real, buscando gerar resultados práticos. De acordo com Marconi e Lakatos (2017), a pesquisa aplicada se caracteriza por estar voltada à solução de problemas concretos, aproximando o conhecimento teórico da realidade. Nesse contexto, o trabalho analisa o dimensional de uma colheitadeira fabricada em 1965, utilizando critérios normativos atuais para avaliar sua condição e comportamento.

Além disso, a caracterização como pesquisa aplicada também se evidencia pela utilização de ferramentas e normas consolidadas da engenharia moderna para a análise de um sistema mecânico real. Nesse sentido, destacam-se os princípios de dimensionamento e toleranciamento geométrico (GD&T), que, segundo a ASME Y14.5, constituem uma linguagem padronizada essencial para a correta interpretação das características geométricas e da intenção de projeto. De acordo com Meadows (2019), a aplicação adequada desses conceitos possibilita maior clareza na especificação e na avaliação de componentes, contribuindo diretamente para a qualidade e a confiabilidade dos processos de fabricação e inspeção. Assim, ao empregar normas técnicas atuais na análise de um equipamento histórico, o estudo reforça a relevância da integração entre conhecimento teórico consolidado e sua aplicação prática em contextos reais de engenharia.

3.2.2 Método de Abordagem

O presente trabalho adota uma abordagem metodológica mista, com predominância quantitativa, ao integrar a análise de dados numéricos provenientes de medições dimensionais com a interpretação das condições observadas durante a coleta. De acordo com Creswell (2021), enquanto a abordagem quantitativa permite uma análise objetiva baseada em valores mensuráveis, a abordagem qualitativa contribui para a compreensão do contexto em que os fenômenos ocorrem. Assim, a combinação dessas abordagens possibilita uma avaliação mais abrangente do sistema estudado, considerando tanto os resultados obtidos quanto as circunstâncias em que foram gerados.

Contudo, destaca-se que o enfoque principal do estudo é quantitativo, uma vez que envolve a coleta de dados numéricos e sua comparação com critérios definidos por normas técnicas. Conforme Creswell (2021), a pesquisa quantitativa favorece análises mais precisas e objetivas, proporcionando maior consistência às interpretações. Dessa forma, essa abordagem sustenta uma análise técnica confiável, fundamentada em resultados mensuráveis, contribuindo para a compreensão do comportamento dimensional do sistema avaliado.

3.2.3 Quanto aos objetivos

Quanto aos objetivos, a pesquisa pode ser classificada como descritiva e exploratória. Ela é descritiva na medida em que busca registrar, organizar e apresentar os resultados das medições realizadas, evidenciando o comportamento dimensional do equipamento sem promover alterações em seu estado original. Segundo Marconi e Lakatos (2022), pesquisas descritivas têm como propósito observar, registrar e analisar fenômenos.

Paralelamente, apresenta caráter exploratório por investigar uma situação pouco convencional: a aplicação de normas técnicas contemporâneas em um equipamento concebido em um contexto tecnológico distinto. Ainda conforme Marconi e Lakatos (2022), as pesquisas exploratórias buscam proporcionar maior familiaridade com o problema, especialmente quando há escassez de estudos prévios sobre o tema. Complementarmente, Gil (2019) destaca que a pesquisa exploratória é indicada quando o assunto ainda é pouco sistematizado, permitindo ampliar o entendimento e orientar investigações mais aprofundadas.

3.2.4 Métodos de procedimento

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa é caracterizada como um estudo de caso, uma vez que se concentra na análise aprofundada de um único objeto de estudo, permitindo examinar de forma detalhada suas características e condições dimensionais. Adicionalmente, incorpora a pesquisa bibliográfica como procedimento de apoio, fundamentando-se em normas técnicas, literatura especializada e referenciais teóricos que sustentam as análises realizadas. Conforme Yin (2015), o estudo de caso é especialmente adequado quando se busca compreender fenômenos contemporâneos inseridos em seu contexto real, sobretudo quando os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente definidos.

Nesse sentido, o estudo de caso se configura como o método predominante da pesquisa, pois possibilita uma investigação minuciosa e contextualizada do equipamento em análise, considerando suas particularidades históricas, construtivas e operacionais. Ainda segundo Yin (2015), essa estratégia permite o uso de múltiplas fontes de evidência, contribuindo para uma análise mais robusta e confiável. Dessa forma, a adoção do estudo de caso, aliada ao suporte da pesquisa bibliográfica, possibilita uma abordagem estruturada, aprofundada e coerente, favorecendo a compreensão do comportamento dimensional do equipamento frente aos padrões técnicos atuais.

3.2.5 Técnicas de coleta de dados

O procedimento adotado neste estudo baseou-se na investigação direta do objeto de análise em seu ambiente real, sem qualquer tipo de intervenção em sua estrutura original. As atividades foram conduzidas no próprio local onde a colheitadeira se encontra, respeitando as limitações impostas pelo ambiente museológico, como restrições de acesso, impossibilidade de desmontagem e ausência de controle ambiental rigoroso. Conforme Marconi e Lakatos (2022), métodos fundamentados em observação direta permitem a coleta de dados em condições reais, contribuindo para maior confiabilidade e representatividade dos resultados. Essa abordagem também está alinhada ao estudo de caso, que, segundo Yin (2015), possibilita a compreensão aprofundada de fenômenos inseridos em seu contexto real, especialmente quando não há controle sobre as variáveis envolvidas.

Nesse contexto, as medições foram realizadas diretamente nos componentes do sistema de polias, garantindo a obtenção de dados condizentes com as condições reais do equipamento. A utilização da observação direta associada à coleta em campo reforça o caráter aplicado da pesquisa, permitindo uma análise técnica mais próxima da realidade operacional. Conforme destacado por Creswell (2021), a coleta de dados em ambientes naturais contribui para a validade dos resultados, pois considera as variáveis presentes no contexto estudado.

Como procedimentos complementares, foi empregado levantamento documental. O levantamento documental consistiu na análise de registros e informações disponíveis sobre o equipamento estudado, contribuindo para sua contextualização histórica e técnica.

Por fim, a medição direta constituiu a principal técnica de coleta de dados, sendo realizada com o uso de instrumentos de alta precisão, como o *Laser Tracker*, onde o sistema apresenta precisão volumétrica da ordem de $\pm (0,015 \text{ mm} + 0,006 \text{ mm/m})$, o que corresponde, em termos práticos, a aproximadamente 0,10 mm em 10 metros de medição.

As medições foram conduzidas em condições reais de campo, possibilitando a obtenção de dados representativos do comportamento dimensional do sistema. Além disso, as condições ambientais foram monitoradas por meio de termohigrômetro (medidor de temperatura e umidade), assegurando a rastreabilidade das medições. Conforme Marconi e Lakatos (2022), a utilização de técnicas e instrumentos adequados é essencial para garantir a validade e a confiabilidade dos dados, reforçando a consistência dos resultados obtidos neste estudo.

3.2.6 Técnicas de análise de dados

Os dados coletados foram organizados e tratados com o auxílio de ferramentas computacionais, com destaque para o uso de *softwares* de metrologia, como o *Metrolog X4*, e planilhas eletrônicas no *Microsoft Excel* e *Minitab*. O uso do *Metrolog X4* permitiu o processamento e análise dos dados de medição de forma precisa, enquanto o *Excel* e o *Minitab* foram utilizados para organizar as informações, realizar cálculos complementares e estruturar os resultados de forma clara. O estudo de R&R foi conduzido conforme diretrizes do MSA (AIAG), avaliando a repetibilidade e a reprodutibilidade do sistema de medição por meio da análise de variação.

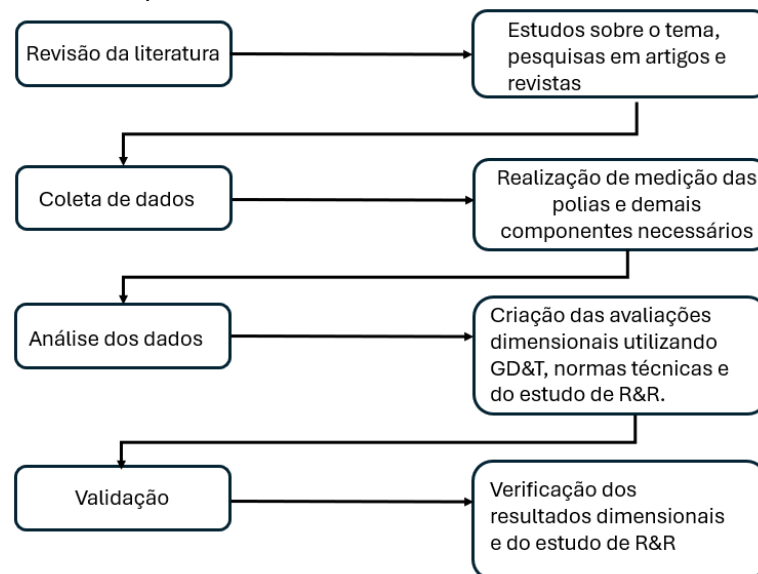
A análise foi baseada na comparação entre os valores medidos e os limites estabelecidos pelas normas técnicas vigentes. A partir disso, foi possível identificar desvios dimensionais, avaliar a conformidade do equipamento e interpretar os resultados de maneira objetiva, garantindo uma análise técnica consistente e alinhada aos critérios normativos.

3.2.7 Etapas das Atividades

O desenvolvimento desta pesquisa foi organizado em etapas bem definidas, com o objetivo de garantir uma condução lógica, estruturada e coerente entre os objetivos propostos e os resultados alcançados. Essa divisão em fases permitiu acompanhar o progresso do trabalho de forma clara e controlada, assegurando que cada etapa contribuísse diretamente para a qualidade final do estudo.

O fluxo metodológico adotado pode ser visualizado na Figura 4, a qual sintetiza de maneira objetiva todas as etapas realizadas ao longo da pesquisa.

Figura 4 - Fluxograma das etapas



Fonte: Autor (2026).

Conforme apresentado na Figura 4, o estudo teve início com a revisão da literatura, complementada pela análise de estudos em artigos e revistas técnicas. Essa etapa foi essencial para a construção do embasamento teórico e para o levantamento das normas técnicas aplicáveis, que serviram como base para todo o desenvolvimento do trabalho. A partir desse contexto, foi possível compreender os

principais conceitos envolvidos e definir os critérios que orientaram as análises dimensionais realizadas.

Na sequência, avançou-se para a coleta de dados, etapa que envolveu tanto o planejamento quanto a execução das medições. Inicialmente, foram definidos o objeto de análise, os pontos de medição, os equipamentos a serem utilizados e as estratégias necessárias para garantir a confiabilidade e a rastreabilidade dos dados. Posteriormente, foram realizadas as medições das polias e dos demais componentes necessários, utilizando três operadores diferentes para complementar a medição e possibilitando a realização de um estudo de R&R, assegurando a obtenção de dados consistentes e representativos do sistema analisado.

Após a coleta, foi realizada a análise dos dados, que contemplou a organização, tratamento e avaliação das informações obtidas. Nessa fase, foram desenvolvidas as avaliações dimensionais com base nos princípios de GD&T, nas normas técnicas aplicáveis e no estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R). Essa abordagem permitiu uma análise mais completa e criteriosa dos resultados, possibilitando a identificação de conformidades e eventuais desvios dimensionais.

Por fim, foi realizada a etapa de validação, na qual se procedeu à verificação dos resultados dimensionais e dos dados provenientes do estudo de R&R. Esse momento foi fundamental para assegurar a confiabilidade das medições e a consistência das conclusões obtidas. Dessa forma, o fluxo metodológico adotado não apenas organiza as etapas do trabalho, mas também evidencia de maneira clara e estruturada todo o percurso seguido ao longo da pesquisa, permitindo, assim, responder ao problema de pesquisa proposto e atingir os objetivos estabelecidos.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das medições realizadas no sistema de polias da colheitadeira SLC 65A. Inicialmente, foi realizada uma contextualização do objeto de estudo e das condições em que as medições foram conduzidas, destacando aspectos como o ambiente, as características geométricas das peças e os desafios encontrados durante a coleta de dados. Também são descritos os procedimentos adotados, com ênfase no uso do *Laser Tracker* AT960LR e na definição das referências geométricas com base nos princípios de GD&T, considerando pontos de medição, alinhamentos, saltos e critérios de avaliação dimensional.

Na sequência, os dados obtidos são analisados de forma detalhada, contemplando a consistência das medições, a avaliação da repetitividade e reprodutibilidade (R&R) e a verificação do comportamento geométrico das polias. A partir dessas análises, foi possível identificar possíveis desvios dimensionais e avaliar a confiabilidade do processo de medição, contribuindo para uma melhor compreensão do desempenho geométrico do conjunto.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

O MEA tem como principal finalidade preservar e apresentar a história da mecanização agrícola, reunindo máquinas e equipamentos que marcaram a evolução do setor ao longo dos anos além de apresentar uma enorme riqueza de informações em seu acervo museológico pertinentes da época. Dentre os itens de maior relevância presentes no memorial, destaca-se a colheitadeira SLC 65A, conforme ilustrada na Figura 5, considerada um marco no desenvolvimento da indústria agrícola nacional, sendo o principal objeto de estudo deste trabalho.

Figura 5 - Colheitadeira SLC 65A



Fonte: Autor (2026).

O foco deste estudo foi na análise dimensional do sistema de polias da SLC 65A, componente essencial para o funcionamento do conjunto mecânico da máquina. Por se tratar de um equipamento histórico, as medições exigem cuidados específicos, tanto pela ausência de documentação técnica detalhada quanto pelas condições naturais de desgaste ao longo do tempo. Nesse contexto, a utilização de técnicas modernas de metrologia, como o *Laser Tracker*, permite avaliar com maior precisão o comportamento geométrico desses componentes, contribuindo para a preservação do equipamento e para a geração de dados relevantes para estudos técnicos e acadêmicos.

4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE ESTUDO

No cenário atual, a avaliação dimensional do sistema de polias da colheitadeira SLC 65A foi realizada em condições que apresentam diversas limitações práticas, principalmente pela ausência de documentação técnica completa e pela necessidade de executar medições diretamente no equipamento. O processo iniciou com a definição dos pontos de medição no próprio sistema, sendo necessário que o operador analisasse visualmente os componentes e determinasse, com base em sua experiência, quais regiões deveriam ser avaliadas.

A partir dessa definição, o operador interpretou as características geométricas do sistema de forma adaptada, utilizando conceitos de GD&T para estabelecer referências que faziam sentido do ponto de vista funcional. No entanto, como não existia um procedimento padronizado, essas decisões dependeram fortemente do conhecimento técnico e da experiência individual, o que poderia gerar diferenças na forma de medir e interpretar os resultados.

Além disso, as medições foram realizadas em um ambiente museológico, o que impôs desafios adicionais como restrições de acesso, impossibilidade de desmontagem e ausência de controle ambiental rigoroso. Fatores como temperatura, umidade e limitações físicas do equipamento influenciaram diretamente o processo, tornando a execução das medições mais complexa e aumentando a possibilidade de variações nos dados obtidos.

Outro aspecto relevante foi a variabilidade do próprio sistema de medição. Pequenas diferenças no posicionamento do equipamento, na execução das medições ou na repetição das leituras geram resultados distintos. Dessa forma, identificou-se como principal problema a dificuldade de garantir medições confiáveis, repetíveis e padronizadas em um equipamento histórico, evidenciando a necessidade da aplicação de metodologias estruturadas, como o GD&T aliado à metrologia de grande volume e ao estudo de R&R, para aumentar a consistência e a confiabilidade das análises.

4.3 POSICIONAMENTO E ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO

A definição da estratégia de medição foi uma etapa essencial para garantir que os dados obtidos fossem confiáveis e representassem de forma adequada o sistema analisado. Utilizou-se o equipamento *Laser Tracker AT960LR* (Figura 6) e demonstrado no Apêndice A seu certificado de calibração onde comprova que o equipamento está apto para uso.

Figura 6 - Equipamento de medição *Laser Tracker*



Fonte: Autor (2026).

Nesse contexto, o equipamento conforme a Figura 6, foi deslocado até o MEA, por se tratar de um equipamento móvel facilita muito a realização de atividades em que o produto a ser inspecionado não consegue ir até o laboratório de metrologia. O equipamento foi inicialmente posicionado na parte traseira do lado direito da colheitadeira, conforme representado pela Figura 7.

Figura 7 - Posicionamento do *Laser Tracker* de medição



Fonte: Autor (2026).

Conforme a Figura 7, o posicionamento adotado foi definido com base em critérios técnicos, principalmente relacionados à obtenção de um campo de visão adequado e mais livre para os pontos a serem coletados e que neste formato facilita que toda a medição seja executada em apenas 2 etapas, criando desta forma uma maior assertividade na coleta dos pontos nas características desejadas. A partir desse posicionamento, foi possível capturar com maior qualidade as geometrias localizadas no lado direito do sistema de polias, reduzindo interferências e regiões fora do alcance do equipamento. Dessa forma, a configuração inicial contribuiu diretamente para a eficiência da coleta de dados, proporcionando maior estabilidade e confiabilidade ao processo de medição, isso é importante para os dias atuais, onde o correto posicionamento além de agilizar o processo, garante uma maior qualidade nas medições executadas.

Outro aspecto importante considerado, foi a própria condição física da máquina. Por se tratar de um equipamento histórico, inserido em um ambiente museológico, existem limitações significativas, como a impossibilidade de desmontagem e o acesso restrito a determinadas áreas. Além disso, a presença de estruturas próximas e componentes adjacentes influencia diretamente a forma como o equipamento de medição pode ser posicionado e utilizado.

Diante dessas limitações, foi necessário realizar um planejamento prévio mais cuidadoso, buscando garantir que as regiões mais relevantes do sistema fossem devidamente contempladas. Antes do início das medições, foram avaliadas diferentes possibilidades de posicionamento do equipamento, até a definição da posição mais adequada. A partir disso, foram selecionados os pontos de medição, definida a sequência de coleta e estabelecidas as geometrias consideradas essenciais para a análise.

Essas decisões foram baseadas em conceitos de metrologia dimensional e nos princípios de GD&T, com o objetivo de manter coerência entre as medições realizadas e assegurar que os dados obtidos fossem consistentes ao longo de todo o processo. Além disso, também foi considerado o impacto do posicionamento do equipamento na precisão das medições, uma vez que variações de distância e ângulo podem influenciar diretamente a qualidade dos pontos capturados.

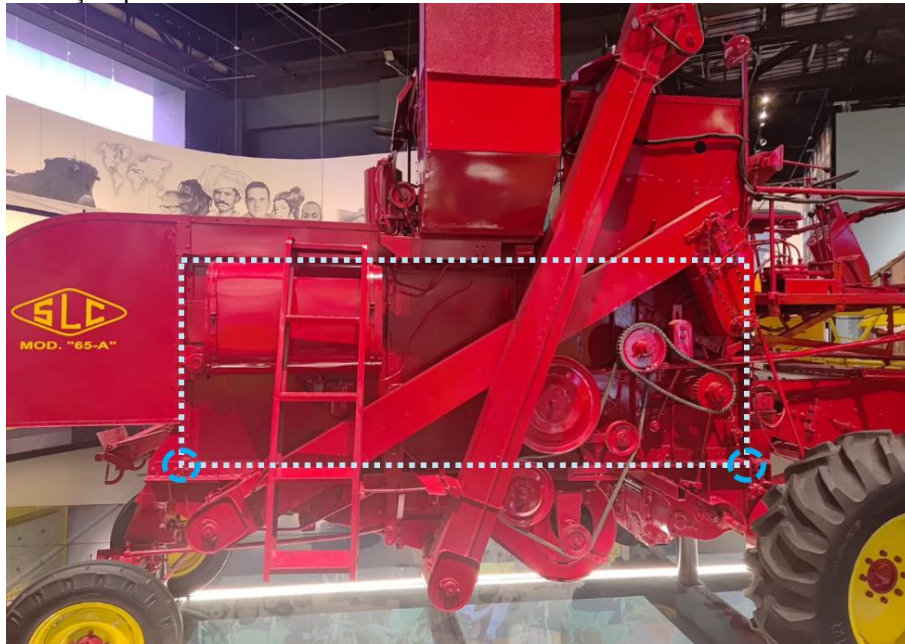
Por fim, outro ponto relevante foi a preocupação com a continuidade do processo de medição ao longo de toda a estrutura analisada. Como nem todas as

regiões da máquina poderiam ser alcançadas a partir de uma única posição, a estratégia previu a necessidade de reposicionamento do equipamento.

4.4 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO E ALINHAMENTO

A definição do sistema de referência foi uma etapa fundamental para garantir a organização e a coerência das medições realizadas ao longo do estudo. Para isso, inicialmente foi realizada a medição de um plano na estrutura da máquina, região essa que foi analisada previamente considerando suas espessuras e por conter uma possibilidade reduzida de variações, esse plano foi utilizado como base primária para a construção do alinhamento, sendo responsável por restringir os três primeiros graus de liberdade, correspondentes a uma translação e duas rotações, é importante considerar uma maior área possível para fazer a pré-localização assegurando qualidade nas próximas etapas da medição. O plano estabeleceu uma referência inicial estável, servindo como base para a orientação do sistema de coordenadas no espaço tridimensional, representado pela Figura 8.

Figura 8 - Localização plano e círculos



Fonte: Autor (2026).

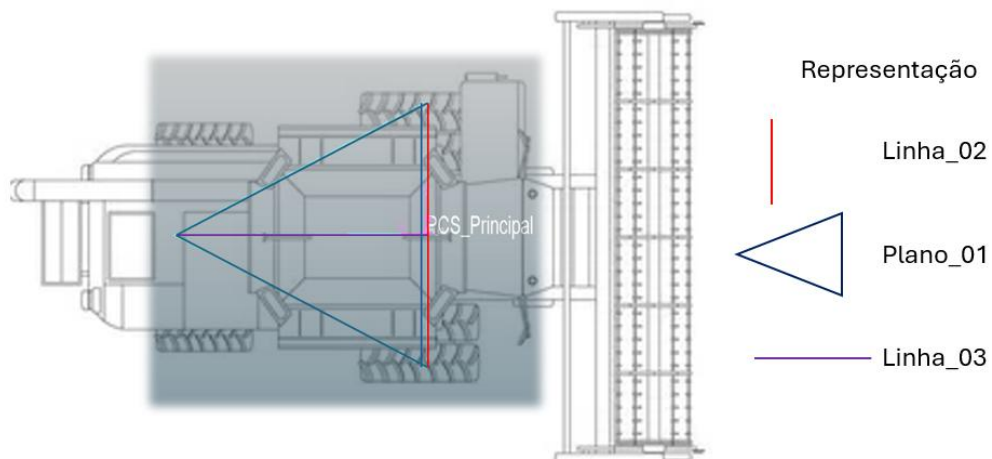
Conforme demonstrada na Figura 8, também foram medidos dois furos, destacados em azul na figura, que complementaram a definição do referencial. Esses elementos contribuíram para a restrição de dois graus de liberdade adicionais associados à translação, permitindo, posteriormente, a eliminação do último grau de

liberdade relacionado à rotação. A partir da combinação entre o plano e os dois elementos circulares, foi possível construir um sistema de coordenadas tridimensional consistente, capaz de localizar com precisão a posição da colheitadeira em relação ao equipamento de medição.

Essa abordagem permitiu estruturar as medições dentro de um mesmo contexto geométrico, garantindo a rastreabilidade entre os pontos coletados e mantendo a coerência ao longo de todo o processo. Isso se torna especialmente relevante em medições realizadas em campo, onde diferentes fatores podem influenciar diretamente a qualidade final dos dados obtidos.

Com base no sistema de referência estabelecido, foi possível definir os elementos utilizados como base para a criação dos *datums* aplicados nas análises de GD&T. Para essa etapa, foram considerados elementos funcionais da máquina, como superfícies cilíndricas e eixos, a partir dos quais foram estruturadas referências primária, secundária e terciária. Para o *Datum* primário, foi necessário medir um círculo no rodado da frente em cada lado e mais um círculo no eixo que interliga os rodados traseiros. O *Datum* secundário e terciário foi construído de pontos, planos e linhas de intersecção conforme a linha_02 o plano_01 e a linha_03 obtendo um alinhamento funcional do comportamento da colheitadeira, representada na Figura 9 do *software* de medição *metrolog x4*.

Figura 9 - Alinhamento funcional



Fonte: Autor (2026).

Dessa forma, conforme representado na Figura 9, foi possível estabelecer um sistema de alinhamento robusto, garantindo o completo travamento dos graus de

liberdade e assegurando maior confiabilidade nas avaliações de GD&T provenientes do processo de medição.

4.5 AQUISIÇÃO DOS DADOS – PRIMEIRA POSIÇÃO

Com o sistema de referência definido e o equipamento devidamente posicionado, foi iniciada a etapa de aquisição dos dados na primeira posição do *Laser Tracker*. Nesse momento, as medições se concentraram principalmente no lado direito da colheitadeira, onde está localizada uma parte relevante do sistema de polias analisado, como componentes do sistema de trilha, polias de tomada de força e redução, além de elementos dos sistemas de ventilação, separação e elevação. A coleta foi realizada de forma progressiva, respeitando a lógica definida anteriormente para garantir organização e consistência nos dados, demonstrada na Figura 10.

Figura 10 - Medição primeira posição

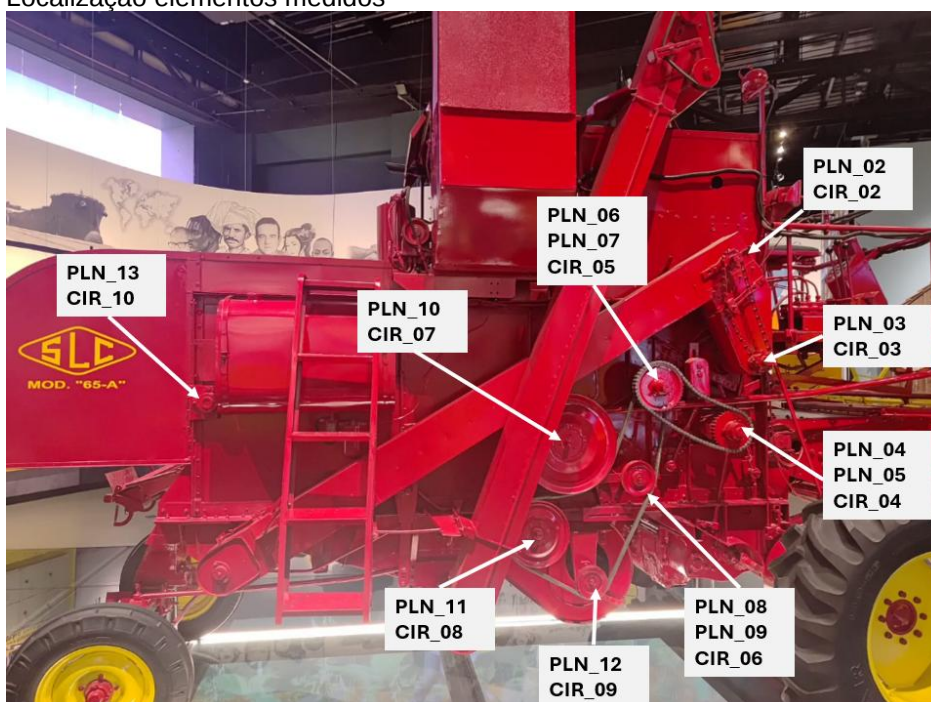


Fonte: Autor (2026).

Conforme mostra a Figura 10, foram realizadas medições em diversas polias e superfícies planas, buscando entender seu comportamento dimensional. Com uma quantidade mínima de 4 pontos por elemento, houve a preocupação de coletar pontos suficientes para permitir uma boa definição das geometrias no momento do processamento.

Esse cuidado foi importante para garantir que os elementos reconstruídos no *software* estivessem o mais próximo possível da condição real da máquina. A Figura 11 demonstra a localização de cada polia e plano medido.

Figura 11 - Localização elementos medidos



Fonte: Autor (2026).

Conforme a Figura 11, foi necessário medir vários componentes, representados pelas abreviações correspondentes a PLN plano e CIR círculo, onde em cada característica foi coletado no mínimo 4 pontos. Além disso, ainda nessa primeira posição, foram realizadas medições específicas em duas polias com a participação de três operadores distintos, com o objetivo de estruturar parte do estudo de repetitividade e reprodutibilidade (R&R). Essa coleta adicional permitiu avaliar a variabilidade associada ao processo de medição, considerando a influência do operador na aquisição dos dados. Esse procedimento foi posteriormente repetido na segunda posição do equipamento, garantindo consistência na análise do sistema de medição ao longo de todo o processo.

Durante a execução, o comportamento da medição pôde ser considerado estável, com boa resposta do equipamento. De forma geral, essa primeira etapa de coleta permitiu obter um conjunto consistente de dados geométricos, que serviu de base para a continuidade do trabalho. Além disso, também ajudou a identificar regiões que não poderiam ser completamente medidas a partir dessa posição, o que reforçou

a necessidade de reposicionamento do equipamento para dar sequência à aquisição dos dados.

4.6 REALOCAÇÃO DO EQUIPAMENTO (SALTO DE MEDIÇÃO)

Após a conclusão das medições na primeira posição, foi necessário realizar o reposicionamento do *Laser Tracker* para dar continuidade à coleta de dados. Essa etapa foi motivada principalmente pelas limitações do campo de visão, já que algumas regiões do sistema de polias não eram acessíveis a partir da posição inicial, devido à geometria da máquina e à presença de obstáculos físicos.

Para viabilizar esse reposicionamento sem perder a consistência das medições, foi adotado um procedimento estruturado de transferência do sistema de referência. Inicialmente, foram posicionados três cones com imãs, (Figura 12) em locais previamente definidos na estrutura da máquina, os quais passaram a atuar como referências físicas temporárias.

Figura 12 - Posicionamento cones para salto



Fonte: Autor (2026).

A partir disso, conforme a Figura 12, este local foi necessário para manter o melhor posicionamento possível. Também utilizou-se uma esfera receptora de sinal de alta precisão conforme demonstrada na Figura 13, onde foram coletados pontos

nesses três elementos, permitindo a transferência do sistema de referência do equipamento para estes três elementos fixos.

Figura 13 - Esfera receptora de alta precisão



Fonte: Autor (2026).

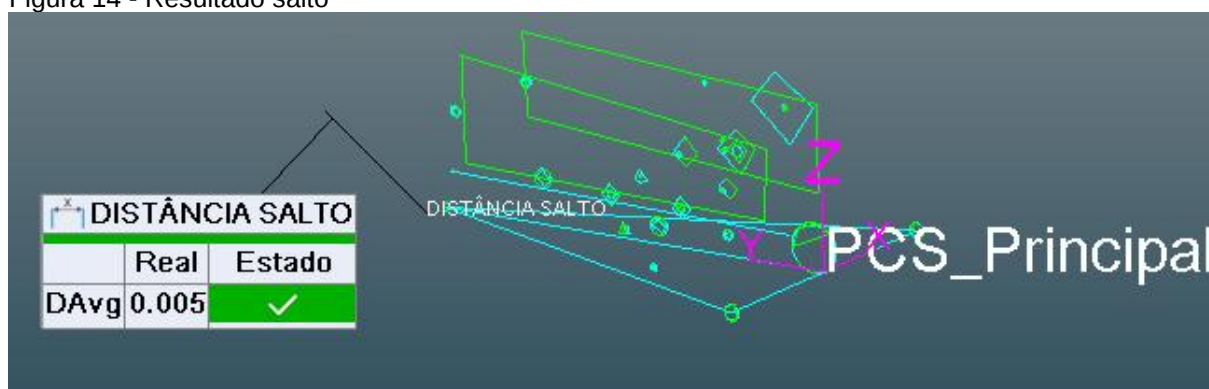
Com o referencial devidamente estabelecido nesses pontos externos demonstrados na Figura 12 e Figura 13, foi possível realizar o deslocamento do *Laser Tracker* de sua posição original para uma segunda posição de medição, porém, agora do outro lado da máquina para a coleta dos pontos do lado esquerdo. Esse novo posicionamento também foi definido considerando aspectos como acesso físico e qualidade do campo de visão, garantindo condições adequadas para a continuidade da coleta de dados na outra região da máquina. Esta etapa exigiu cuidado e atenção especiais, pois poderia comprometer o restante da medição. Por isso, é importante realizar esta análise para determinar quantos posicionamentos são necessários para executar toda a medição, quantos saltos serão necessários e, consequentemente, verificar se o processo de medição é capaz de absorver todos os erros decorrentes desses saltos. Esse aspecto também é crucial nos dias atuais.

Após o reposicionamento, foi necessário executar novamente a medição da esfera sobre os três cones, com o objetivo de transferir o sistema de referência de volta para o equipamento. Desta forma, o *Laser Tracker* passou a reconhecer novamente sua posição dentro do mesmo referencial previamente definido,

assegurando a continuidade e a integração dos dados obtidos nas duas posições. Como etapa final desse procedimento, foi realizada a validação do salto de medição por meio da verificação do erro associado à reconexão dos pontos.

O resultado real obtido foi de 5 micrômetros demonstrado na Figura 14, valor considerado extremamente aceitável dentro do contexto de medições de grande volume.

Figura 14 - Resultado salto



Fonte: Autor (2026).

Esse resultado conforme mostra a Figura 14, indica que o processo de reposicionamento foi executado com elevada precisão, garantindo confiabilidade suficiente para o prosseguimento das medições e das análises subsequentes.

4.7 AQUISIÇÃO DOS DADOS – SEGUNDA POSIÇÃO

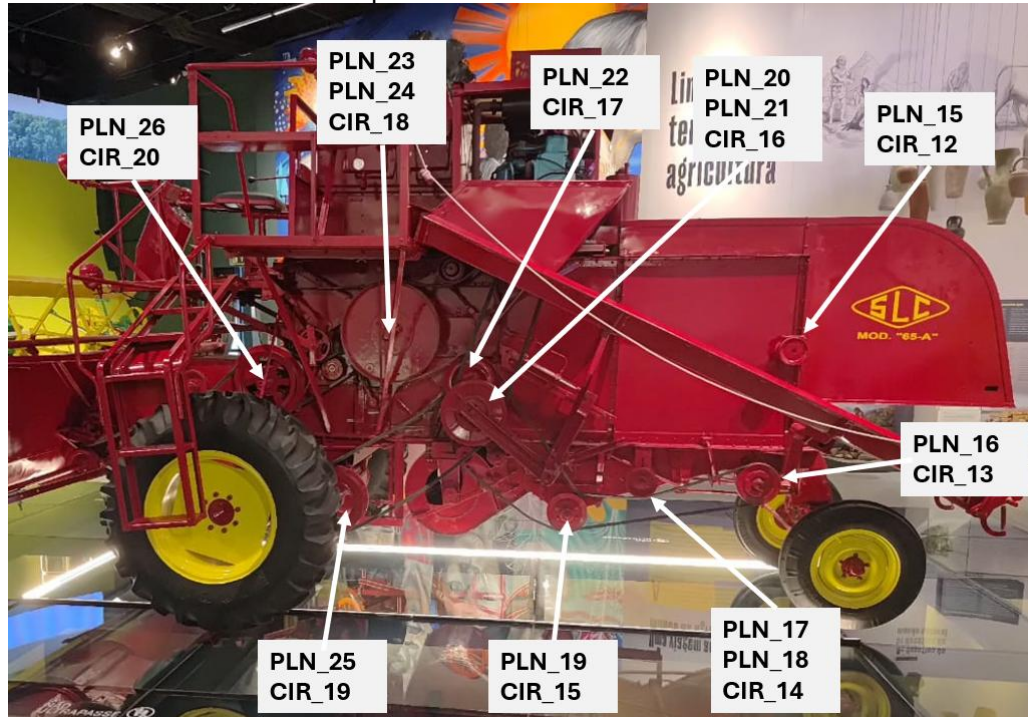
Após o reposicionamento do *Laser Tracker* e a confirmação de que o sistema de referência estava corretamente restabelecido, foi iniciada a aquisição dos dados na segunda posição. Nessa etapa, o objetivo principal foi medir as regiões da colheitadeira que não haviam sido alcançadas na primeira posição, permitindo dar continuidade ao levantamento das geometrias do sistema de polias.

A coleta seguiu a mesma lógica utilizada anteriormente, mantendo um padrão consistente de medição. Foram realizadas medições em polias e superfícies planas consideradas relevantes para a análise, similar ao primeiro lado medido, sempre com a preocupação de coletar uma quantidade suficiente de pontos para garantir uma boa definição das geometrias no processamento posterior. Esse cuidado ajudou a manter a uniformidade dos dados entre as diferentes etapas da medição.

Com o equipamento posicionado em uma nova região, foi possível obter um campo de visão mais favorável para pontos que antes estavam obstruídos. Isso tornou

a medição mais direta em algumas áreas, reduzindo a necessidade de ajustes durante a coleta e tornando o processo mais fluido em comparação com a primeira posição, seguindo a mesma medição de componentes funcionais conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Características do lado esquerdo



Fonte: Autor (2026).

A sequência ilustrada na Figura 15, mostra também que além das coletas de polias e planos, foram feitas medições específicas em duas polias com a participação de três operadores diferentes. Essa repetição foi importante para manter a coerência do estudo de R&R, garantindo que a análise da variabilidade do sistema de medição considerasse condições semelhantes ao longo de todo o processo.

De forma geral, essa segunda etapa resultou em um conjunto de dados mais completo, consistente e representativo do comportamento geométrico do sistema. A integração entre as duas posições, viabilizada pelo controle adequado do sistema de referência, garantiu que todas as informações pudessem ser analisadas de forma conjunta, representando com fidelidade o comportamento do sistema de polias da colheitadeira SLC 65A.

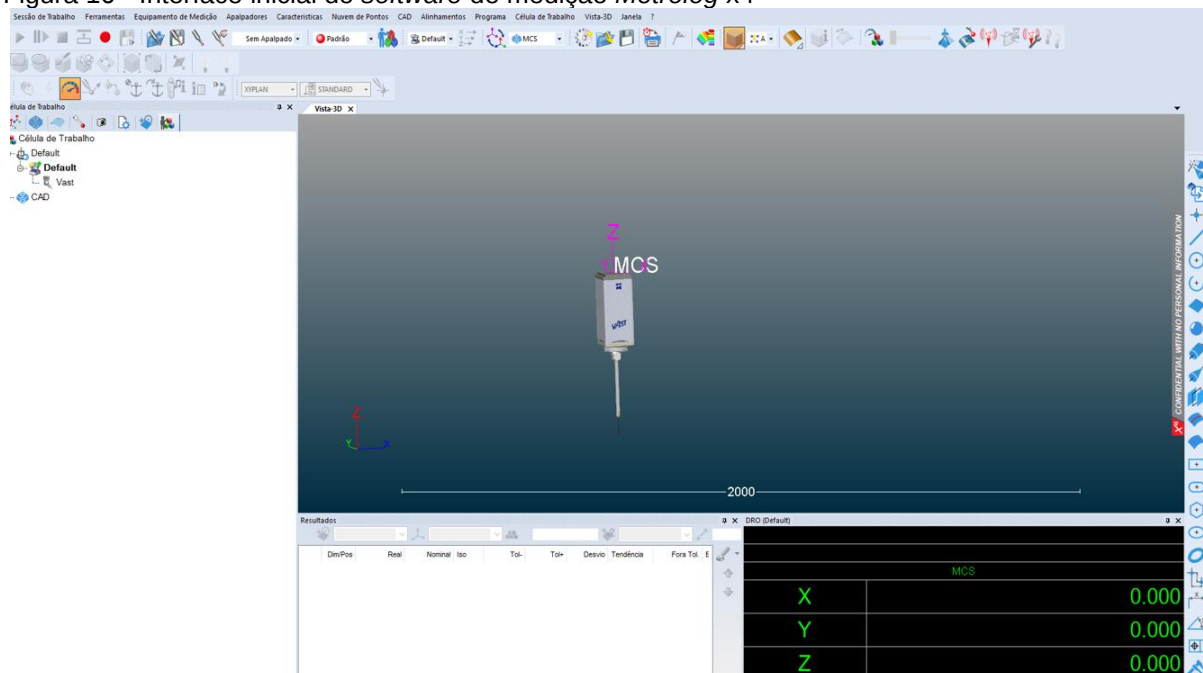
4.8 RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES DE GD&T

Nesta etapa do trabalho, são apresentadas as avaliações geométricas obtidas a partir da aplicação dos conceitos de GD&T, com foco nas análises de erro de forma, planicidade, perpendicularidade, posição (ou localização) e perfil. O objetivo principal foi verificar o comportamento geométrico das polias medidas, considerando critérios funcionais e limites de tolerância previamente definidos.

Para a aplicação das avaliações de GD&T, foi necessário dar continuidade ao uso do *software* de metrologia tridimensional *Metrolog X4*, que já vinha sendo utilizado nas etapas anteriores do processo. Essa ferramenta teve um papel fundamental não apenas na organização dos elementos medidos, mas principalmente na realização de análises mais completas das características geométricas do conjunto, considerando não só aspectos dimensionais, mas também os requisitos funcionais envolvidos.

Ao abrir o projeto no *software*, o operador tem acesso à interface principal do *Metrolog X4*, onde estão concentradas todas as informações relacionadas à medição. Nesse ambiente, é possível visualizar simultaneamente, os pontos coletados em campo e os elementos geométricos construídos a partir desses dados. Para facilitar o entendimento dessa etapa, a Figura 16 demonstra a interface inicial do *software*.

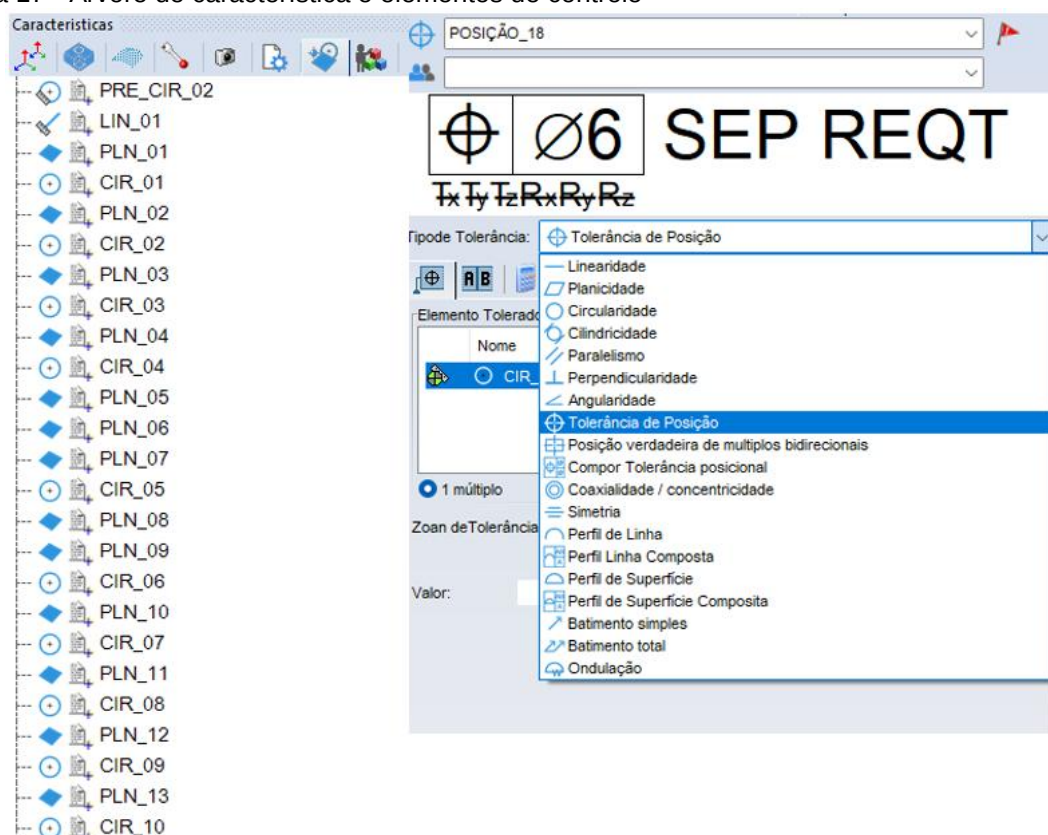
Figura 16 - Interface inicial do *software* de medição *Metrolog x4*



Fonte: Autor (2026).

Conforme apresentada na Figura 16, o uso do *Metrolog X4* destaca-se pela organização das informações por meio da chamada “árvore” do projeto. Essa estrutura apresenta, de forma hierárquica, todos os elementos criados, como planos, círculos, eixos, alinhamentos e características avaliadas. Essa visualização facilita muito a compreensão de como o modelo foi construído e quais entidades estão disponíveis para análise. A Figura 17 apresenta a árvore de características e elementos de controle.

Figura 17 - Árvore de característica e elementos de controle



Fonte: Autor (2026).

Além de organizar, conforme mostra a Figura 17, essa estrutura em árvore também contribuiu diretamente para a rastreabilidade das medições, já que cada elemento poderia ser acessado, revisado e reutilizado conforme necessário. Isso foi especialmente relevante quando se trabalha com GD&T, pois muitas análises dependem da escolha correta de referências e elementos base.

Com os elementos organizados, iniciou-se a aplicação das tolerâncias geométricas. O *software* oferece ferramentas específicas que permitem selecionar as geometrias de interesse e associá-las às características de GD&T desejadas, como posição, concentricidade, paralelismo e batimento conforme apresentado na Figura

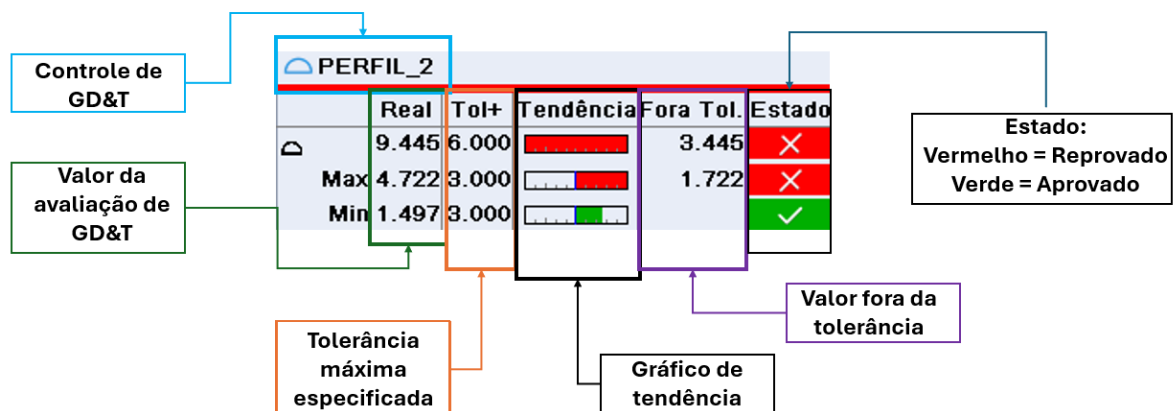
17. Esse processo exige bastante atenção, principalmente na definição dos elementos que serão avaliados e das referências utilizadas.

Durante essa etapa, também foi necessária a definição dos *datums* (referências), que servem como base para todas as análises geométricas. A escolha correta desses referenciais é essencial para garantir que os resultados estejam coerentes com o comportamento real da peça. No contexto deste trabalho, esses *datums* foram definidos com base nas superfícies e elementos medidos anteriormente, sempre respeitando a lógica de montagem e funcionamento do sistema de transmissão.

Para manter um critério uniforme ao longo das análises, foi adotada uma tolerância padrão de 6 para as avaliações de perfil, posição e perpendicularidade. Essa padronização ajudou a tornar os resultados mais comparáveis entre si, facilitando a interpretação dos desvios geométricos identificados ao longo do estudo.

Para visualizar os resultados, foram criadas vistas relacionadas a posição, perfil e perpendicularidade e gerados quadros de avaliações, conforme especificado detalhadamente na Figura 18, que contempla o tipo de controle de GD&T, o valor da avaliação. Ou seja, o resultado encontrado, a tolerância máxima especificada, o gráfico de tendência com o objetivo de ficar mais visual o entendimento, os valores fora da tolerância e o estado que representa se o resultado encontrado está aprovado ou reprovado.

Figura 18 - Especificação de quadro de resultado

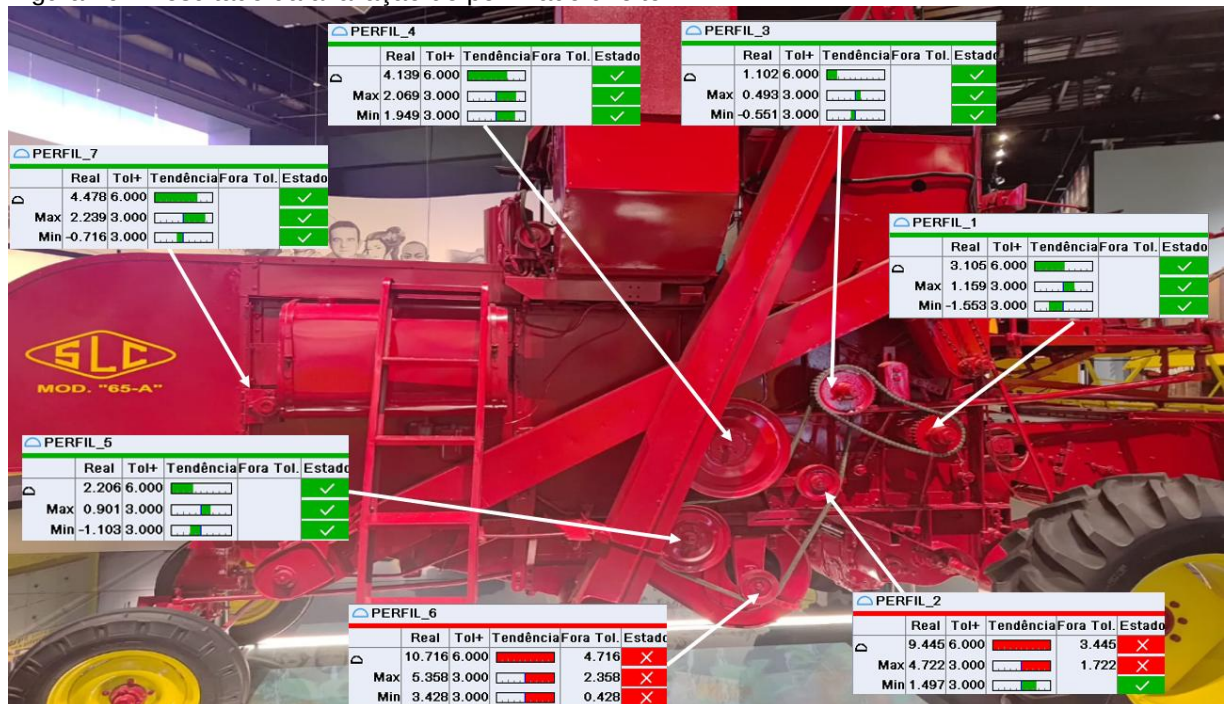


Fonte: Autor (2026).

Na sequência, esses quadros (Figura 18) representam na prática as avaliações realizadas no *software*, permitindo uma melhor visualização dos resultados obtidos. A primeira avaliação está relacionada a condição da avaliação de perfil de todo o lado

direito da máquina, onde mostra a variação exclusivamente das faces das polias em relação ao sistema de referências de *datums* ABC. Aplicando o toleranciamento geométrico de perfil de 6, pode-se observar que a variação máxima e mínima ao longo de seu eixo pode ser de no máximo 3mm. A Figura 19 apresenta a avaliação de 7 características de perfil, sendo que os perfis 1,3,4,5,7 foram considerados aprovados por estarem atendendo as especificações e os perfis 2 e 6 foram considerados reprovados por ultrapassarem os limites de tolerância especificados.

Figura 19 - Resultado da avaliação de perfil lado direito

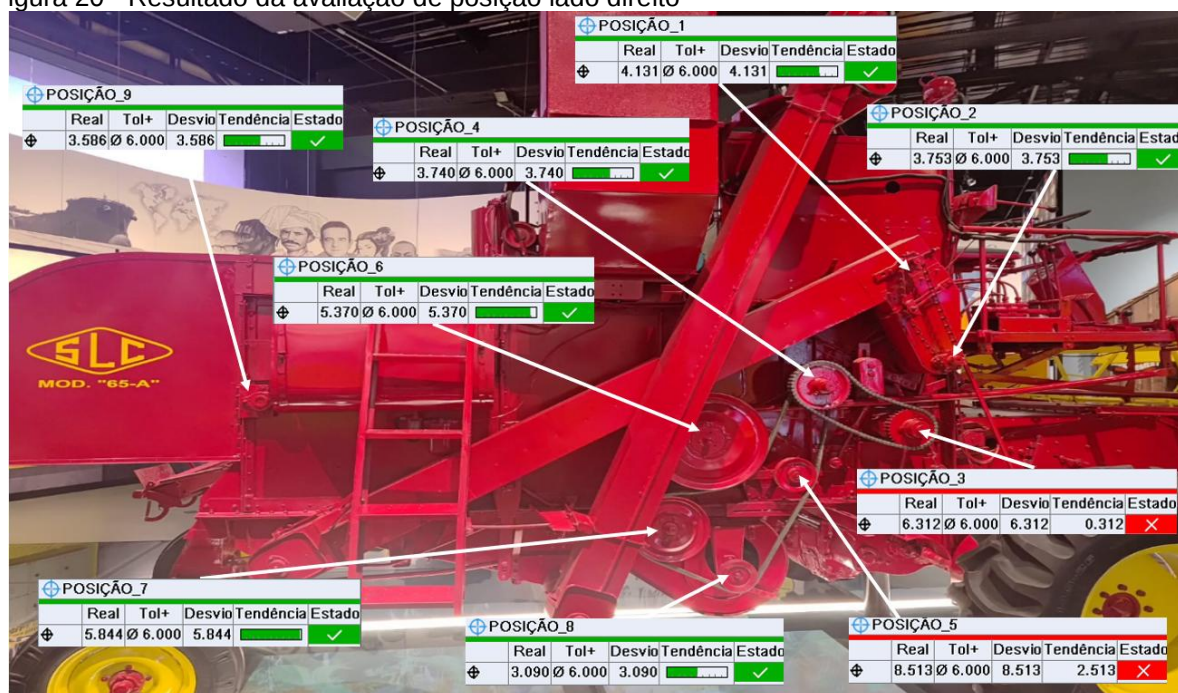


Fonte: Autor (2026).

Conforme a Figura 19, estes resultados de perfil são cruciais para identificar possíveis desvios em alinhamentos entre polias, o que pode gerar ao longo de sua vida útil desgastes prematuros, falhas e quebras de componentes.

Seguindo com as avaliações dimensionais do lado direito também foram avaliadas as posições das polias em relação ao sistema de *datums*. Conforme representada na Figura 20, foram avaliadas 9 polias, sendo que destas 7 foram consideradas aprovadas por estarem atendendo as especificações e 2 delas foram consideradas reprovadas, por ultrapassarem os limites especificados.

Figura 20 - Resultado da avaliação de posição lado direito

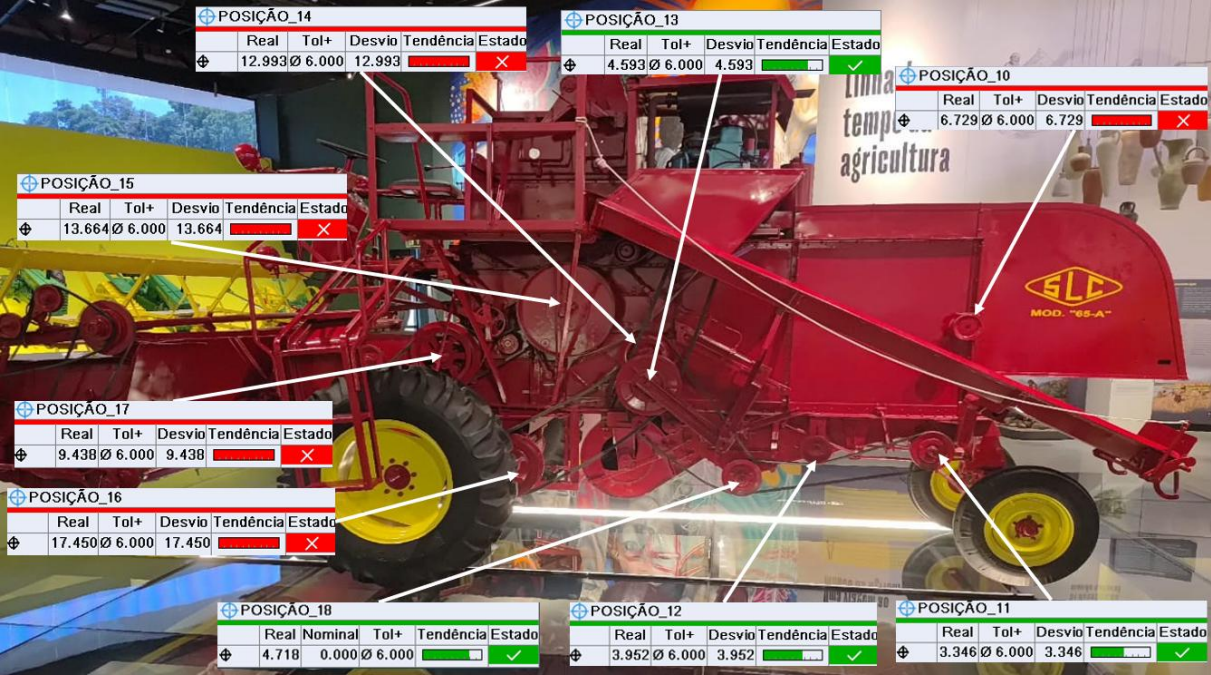


Fonte: Autor (2026).

Conforme a Figura 20, as variações de resultado são consideradas pequenas e que por ter uma maior quantidade de aprovações neste sistema de polias é possível afirmar que o mesmo teve um bom funcionamento de seu sistema. Adicionalmente, a proximidade entre as polias pode ter contribuído, à época de sua montagem, para o aumento da estabilidade do sistema, favorecendo o desempenho e a qualidade do funcionamento do sistema de transmissão do lado direito da máquina.

Para as análises do lado esquerdo da máquina também foram consideradas avaliações de perfil e posição em suas principais polias, a Figura 21 apresenta os resultados das variações de posição encontrados. Para o lado esquerdo as posições aprovadas em sua totalidade foram a 11, 12, 13 e a 18. Já as reprovações para este lado esquerdo ficaram direcionadas para as posições 10, 14, 15, 16, 17. Para este lado, o comportamento foi considerado mais crítico, onde a posição 16 apresentou resultados com 2,9 vezes a mais do que o especificado em sua tolerância o que junto com os demais resultados podem comprometer o sistema já nos momentos iniciais de sua operação. Porém, para a época, por ser as primeiras máquinas fabricadas e por não ter equipamentos de medição tridimensional para identificar estas possíveis variações, isso era muito comum de ocorrer.

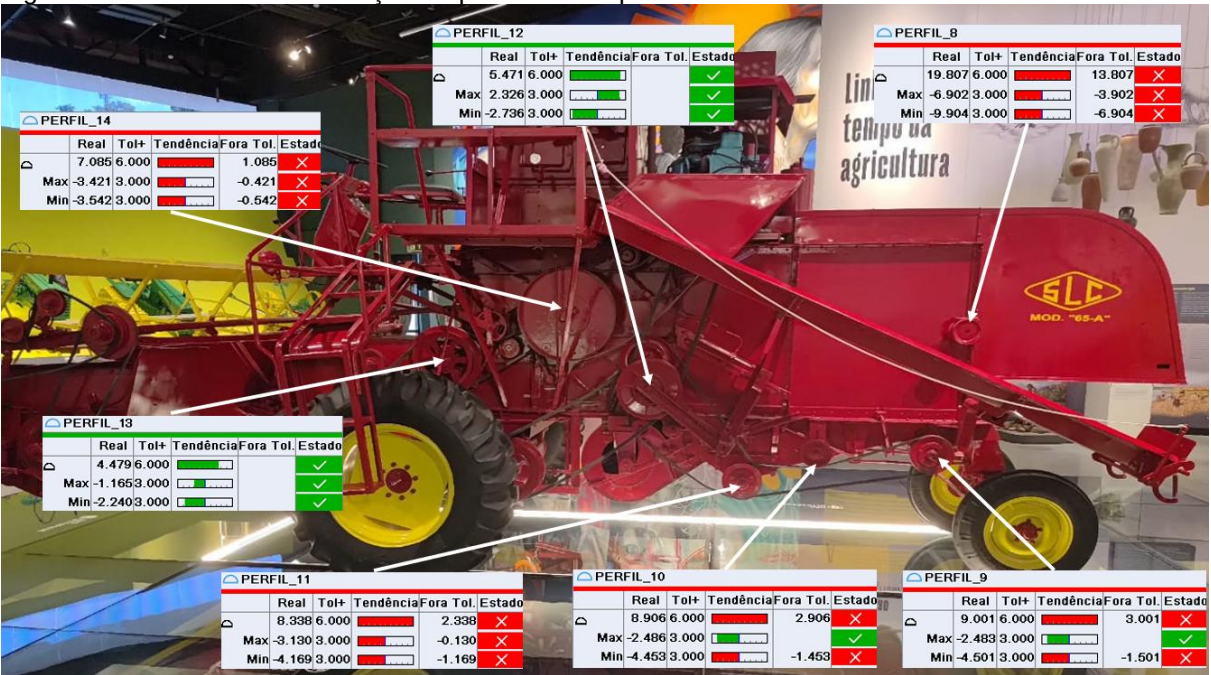
Figura 21 - Resultado da avaliação de posição lado esquerdo



Fonte: Autor (2026).

A Figura 21 apresenta os resultados de posição do lado esquerdo, também foram avaliados o perfil de algumas polias do lado direito. Estes perfis do lado direito, representada na Figura 22, pode-se observar uma aprovação para os perfis 12 e 13 e reprovação nos perfis 8, 9, 10, 11 e 14, sendo que o perfil 8 apresentou um valor de reprovação de 3,3 vezes maior do que a sua especificação.

Figura 22 - Resultado da avaliação de perfil lado esquerdo



Fonte: Autor (2026).

Os valores de perfil encontrados no lado esquerdo conforme representada na Figura 22, mostra um comportamento onde foi necessária uma análise adicional aprofundada de como está o comportamento do corpo da máquina, levando a realizar uma possível análise de uma contraprova, para identificar este comportamento de reprovação.

Esta análise foi realizada a fim de se observar comportamentos dimensionais semelhantes e que podem contribuir com estes resultados. Para esta análise adicional, foi aplicado uma avaliação de perpendicularidade, conforme a Figura 23, o resultado de perpendicularidade foi de 19.879mm ficando similar ao encontrado nas avaliações anteriores.

Figura 23 - Resultado da avaliação de perpendicularidade



Fonte: Autor (2026).

Conforme apresentado na Figura 23 e a partir das análises realizadas, foi possível observar que os resultados apresentaram um comportamento misto. Algumas polias ficaram dentro das especificações estabelecidas, enquanto outras apresentaram desvios superiores às tolerâncias definidas. Esse cenário indica a existência de variações geométricas no conjunto, possivelmente relacionadas ao desgaste ao longo do tempo, às condições de operação da máquina ou até mesmo às características construtivas originais.

Ao final da análise técnica, ficou bastante evidente a presença de um erro significativo de perpendicularidade em alguns dos elementos avaliados. Além disso, observou-se um comportamento consistente de desalinhamento das laterais da máquina para o lado esquerdo, considerando a visão do operador. Esse entendimento não surgiu de forma isolada, mas foi reforçado pelo fato de que as medições realizadas próximas à extremidade da máquina apresentaram valores de desvio muito semelhantes entre si, indicando um padrão de comportamento geométrico ao longo do conjunto.

Esses resultados mostram que os desvios identificados não são aleatórios, mas sim, consequência de uma condição geométrica existente no sistema, possivelmente acumulada ao longo do tempo devido ao uso, esforços mecânicos ou até mesmo características do próprio processo construtivo da máquina. Esse tipo de leitura é extremamente importante, pois permite não apenas identificar onde estão os desvios, mas também compreender como eles se distribuem e se relacionam dentro do sistema analisado.

Dessa forma, é possível afirmar que o objetivo geral do trabalho foi plenamente atendido, uma vez que o comportamento dimensional do sistema de polias da colheitadeira SLC 65A foi avaliado com sucesso por meio da aplicação de GD&T e de técnicas de metrologia de grande volume com o uso do *Laser Tracker*. A análise permitiu identificar de forma clara aspectos relacionados ao posicionamento, alinhamento e variações geométricas do conjunto, mesmo se tratando de um equipamento histórico.

Além disso, a avaliação da conformidade geométrica dos componentes permitiu identificar claramente quais elementos atendem às especificações estabelecidas e quais apresentam desvios superiores aos limites definidos, evidenciando um comportamento misto no conjunto. Esse resultado reforça a importância da utilização de metodologias estruturadas de análise, como o GD&T, para a interpretação adequada das condições geométricas em sistemas reais.

De maneira geral, o uso combinado do GD&T com o *software Metrolog X4* possibilitou transformar os dados coletados em campo em informações de alto valor técnico. Ao considerar não apenas dimensões isoladas, mas também as relações geométricas e funcionais entre os elementos, foi possível obter uma compreensão mais completa do comportamento do sistema analisado, contribuindo diretamente para a robustez e a qualidade dos resultados apresentados neste trabalho.

4.10 ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO (R&R)

A análise do sistema de medição foi realizada por meio de um estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R), com o objetivo de avaliar a variabilidade associada ao processo de medição utilizado neste trabalho. Esse tipo de análise é fundamental para garantir que os resultados obtidos sejam confiáveis e que as variações observadas estejam relacionadas ao objeto medido, e não ao próprio sistema de medição.

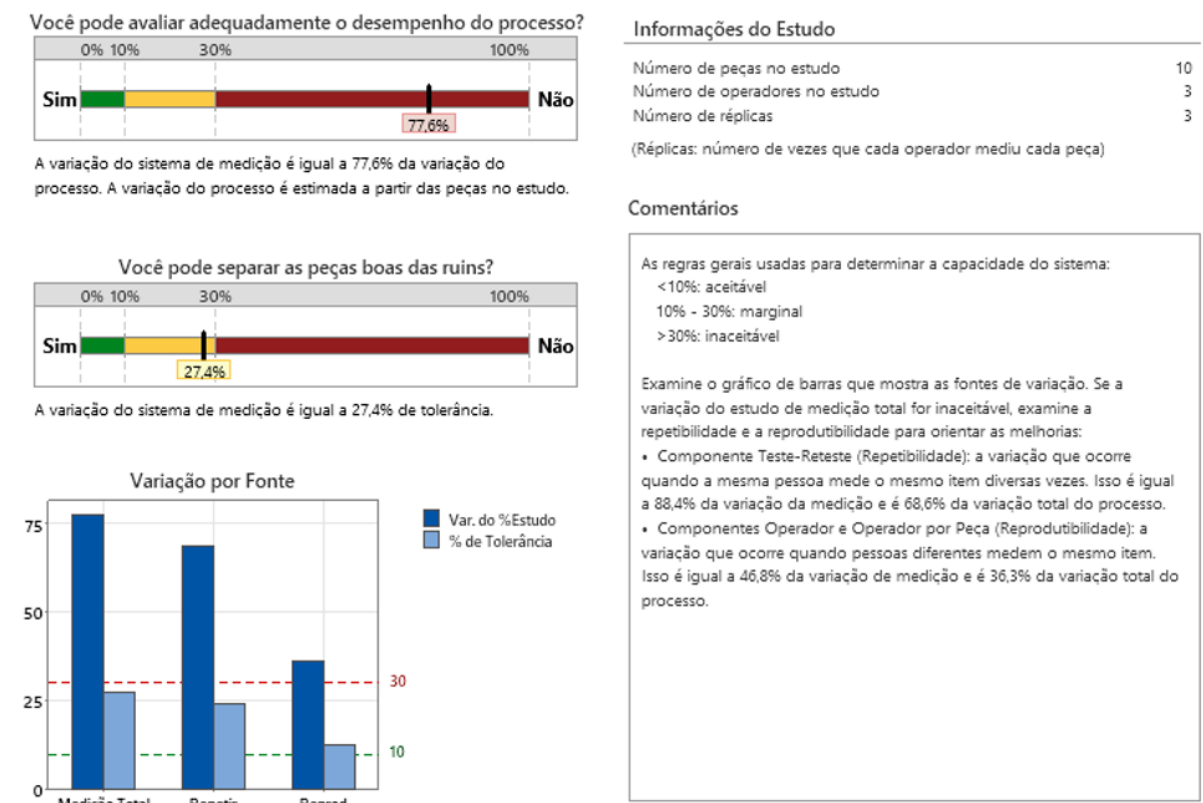
Para a condução do estudo, foi monitorado a temperatura do ambiente utilizando um aparelho de termo-higrômetro encontrando 26° graus centígrados em uma média de três leituras. E para as medições foram considerados três operadores distintos, de modo a avaliar a influência do fator humano no processo de medição. Além disso, foi selecionado uma característica geométrica do conjunto analisado. Cada operador realizou um total de 30 medições, seguindo o mesmo procedimento previamente definido, garantindo a padronização do processo. Essa repetição foi essencial para a avaliação da repetibilidade, ou seja, da variação obtida quando o mesmo operador mede a mesma característica sob as mesmas condições. Ao mesmo tempo, a participação de múltiplos operadores permitiu analisar a reprodutibilidade, que está relacionada à variação entre diferentes avaliadores.

Os dados coletados durante as medições foram inicialmente organizados com o auxílio do *software Microsoft Excel* conforme demonstrado no Apêndice B. Nesse ambiente, foram compilados os resultados obtidos diretamente do *software Metrolog X4*, permitindo estruturar as informações de forma clara e preparar os dados para a etapa de análise estatística. O uso do *Excel* facilitou a organização das medições, além de possibilitar uma verificação inicial de consistência dos dados.

Na sequência, os dados foram importados para o *software Minitab*, amplamente utilizado para análises estatísticas em engenharia e qualidade. Através dessa ferramenta, foi possível realizar o estudo de R&R de forma mais completa, aplicando métodos estatísticos adequados para quantificar as variabilidades de repetibilidade e reprodutibilidade. O *Minitab* também permitiu a geração de gráficos e indicadores que facilitaram a interpretação dos resultados, conforme a Figura 24, onde o desempenho do processo ficou em 77,6% com indicação inadequada para a repetibilidade. Isso se deve à falta de um número maior de amostras para a realização do estudo. Já no estudo de reprodutibilidade a capacidade do sistema ficou com 27,4%, resultado esse

que fica na taxa de porcentagem marginal de 10% a 30%, novamente aplicado ao baixo número de amostragem no estudo.

Figura 24 - Resultado de estudo R&R - resumo geral

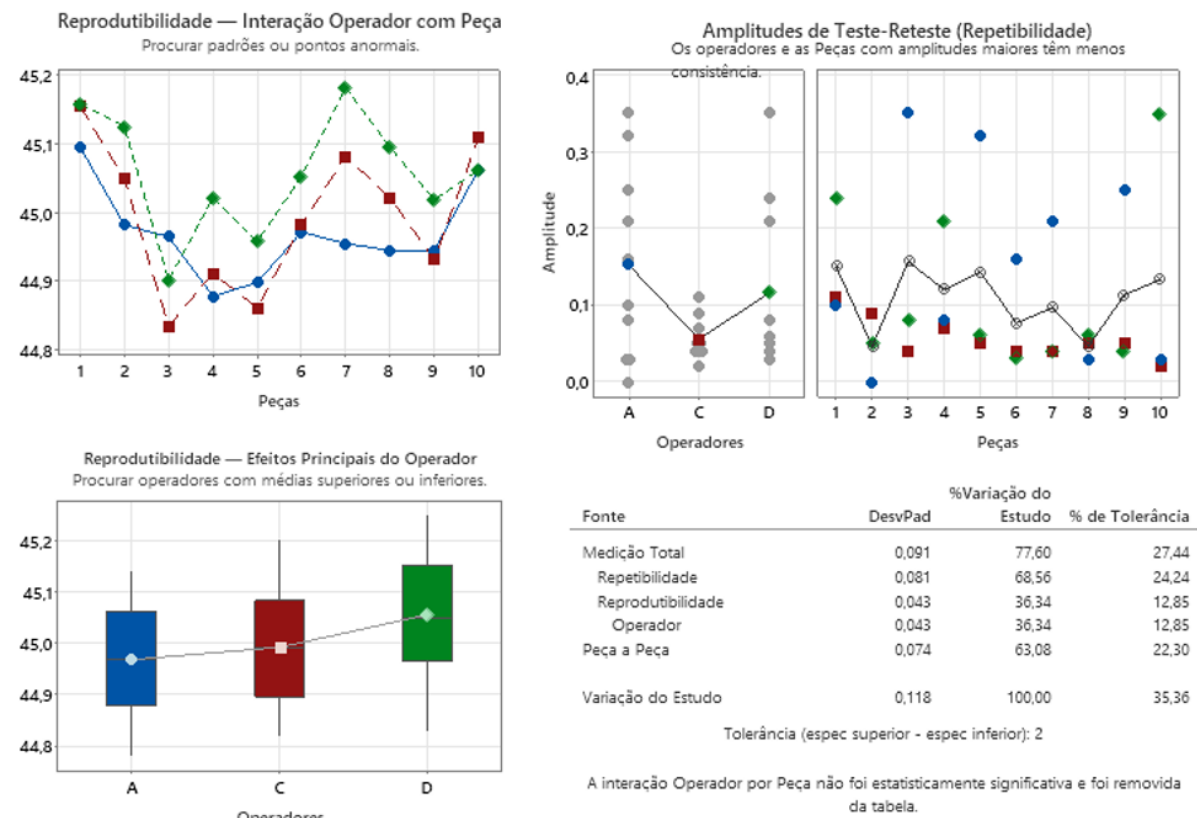


Fonte: Autor (2026).

A partir das análises realizadas conforme a Figura 24, foi possível identificar a contribuição de cada fonte de variação no processo de medição, distinguindo a parcela associada aos operadores. Essa separação entre os operadores é essencial para entender se o sistema de medição é capaz de fornecer resultados confiáveis ou se existem fatores que comprometem sua precisão.

A Figura 25 apresenta os resultados específicos encontrados pelos operadores A, C e D durante as rodadas de medição demonstrando as variações entre operadores e peças. Novamente foi possível observar uma baixa variação de resultados entre os operadores, mesmo em um ambiente não controlado e um produto antigo.

Figura 25 - Resultado de estudo de R&R - variação entre operadores



Fonte: Autor (2026).

De forma geral, conforme demonstrado na Figura 25, o estudo de R&R permitiu validar o sistema de medição utilizado neste estudo, fornecendo evidências de sua capacidade (ou possíveis limitações) em avaliar as características geométricas analisadas. Além disso, os resultados obtidos contribuem para dar maior credibilidade às medições realizadas e às análises apresentadas ao longo do estudo.

Os resultados obtidos ao longo das medições também tiveram um papel importante na construção das análises desenvolvidas no estudo. A partir deles, foi possível identificar com mais clareza aspectos relacionados ao posicionamento, alinhamento e variações geométricas dos elementos avaliados. Assim, a pesquisa não se limitou apenas à coleta de dados, mas buscou interpretar essas informações de forma técnica, conectando os resultados com o comportamento real do conjunto.

Por fim, vale destacar que a adoção de uma abordagem mais estruturada, aliando os conceitos de GD&T à metrologia de grande volume, agregou valor significativo ao estudo. Essa combinação permitiu uma análise mais completa do sistema, indo além de medições isoladas e proporcionando uma visão mais consistente sobre a geometria do conjunto estudado. Isso reforça a importância de

não apenas medir, mas compreender o significado dos resultados dentro de um contexto de engenharia.

4.11 CONTRIBUIÇÕES TÉCNICAS E APLICAÇÕES PRÁTICAS DA PESQUISA

A análise dimensional realizada no sistema de polias da colheitadeira SLC 65A permitiu compreender, de forma clara e inédita, o comportamento geométrico de um equipamento com mais de 60 anos de existência. Os resultados mostram um comportamento diferente entre os lados da máquina: enquanto o lado direito ainda apresenta uma geometria relativamente estável, compatível com uma boa transmissão de potência, o lado esquerdo já evidencia deformações acumuladas ao longo do tempo. Uma das principais descobertas foi o desvio de perpendicularidade de 19,879 mm, acompanhado de um desalinhamento para a esquerda, indicando que a estrutura provavelmente sofreu ao longo dos anos com efeitos como fadiga, pequenas torções e acomodações estruturais, seja durante sua operação ou já no período em que passou a integrar o Memorial.

No contexto do Memorial da Evolução Agrícola, o trabalho ganha ainda mais importância por estabelecer, pela primeira vez, um registro técnico do estado dimensional atual da máquina. Esse tipo de informação permite identificar pontos críticos, acompanhar a evolução dessas deformações ao longo do tempo e embasar decisões futuras relacionadas à conservação ou restauração. Na prática, a máquina deixa de ser apenas um item exposto e passa a ser um ativo com histórico técnico documentado, o que contribui diretamente para sua preservação.

Do ponto de vista prático, o estudo mostra de forma bem clara que é possível utilizar o *Laser Tracker* AT960LR junto com os conceitos de GD&T, conforme a ASME Y14.5, fora de um ambiente controlado. Isso é extremamente relevante, pois comprova que é viável realizar avaliações dimensionais completas diretamente no campo, mesmo sem a disponibilidade de documentação técnica original e sem necessidade de desmontagem do equipamento. Essa abordagem abre espaço para aplicações importantes em empresas, como manutenção preditiva, engenharia reversa e projetos de atualizações de *retrofit*, sempre com maior confiabilidade nos resultados.

Para fabricantes e áreas de engenharia, a metodologia se mostra bastante útil no diagnóstico de máquinas antigas, permitindo identificar desalinhamentos que muitas vezes não são visíveis, avaliar desgaste ao longo do tempo e atuar na melhoria

da confiabilidade mecânica dos sistemas. Como consequência, há um impacto direto na redução de falhas associadas a problemas geométricos, especialmente em sistemas onde o alinhamento é crítico para o bom funcionamento.

Em uma perspectiva mais ampla, fica claro que para a indústria, essa não é uma solução pontual. A metodologia pode ser aplicada em diversos setores que trabalham com equipamentos de grande porte, como colheitadeiras, tratores, máquinas florestais, mineração, siderurgia, papel e celulose, petróleo e grandes estruturas metálicas. Isso mostra que o trabalho tem um alcance muito maior do que o estudo de um único equipamento, podendo servir como referência para diferentes aplicações.

Do ponto de vista da metrologia, o estudo também trouxe aprendizados importantes. Ficou evidente a robustez e a flexibilidade do *Laser Tracker* em ambiente real, mesmo fora de condições ideais. Ao mesmo tempo, também se observou que fatores como definição de *datums*, estratégia de medição e posicionamento do equipamento influenciam diretamente os resultados. O estudo de R&R, ainda que com limitações de amostragem, indicou baixa variação entre operadores e erros muito reduzidos, na ordem de micrômetros, reforçando que o método é confiável quando bem aplicado.

Além disso, o trabalho reforça um ponto importante: em muitos casos reais de engenharia, especialmente envolvendo máquinas antigas ou sem histórico técnico, não existe um “cenário ideal” de medição. Ainda assim, os resultados mostram que, com a metodologia adequada, é possível obter dados consistentes e tomar decisões técnicas fundamentadas. Isso amplia significativamente o campo de atuação da metrologia de grande volume, aproximando-a ainda mais das necessidades práticas da indústria.

Por fim, o estudo se destaca por ir além de uma simples análise dimensional. Ele propõe uma abordagem estruturada, aplicável e validada em campo, conectando conceitos de GD&T, metrologia e análise estatística de forma prática. As contribuições vão desde a preservação de um equipamento histórico até aplicações diretas em diferentes setores industriais, mostrando que o trabalho possui não apenas valor acadêmico, mas também um impacto real e relevante para a engenharia.

CONCLUSÃO

A aplicação de técnicas avançadas de metrologia industrial em ativos de caráter histórico representa um passo fundamental para a preservação do patrimônio tecnológico e para a validação de métodos modernos de engenharia em cenários complexos. Desta forma, o problema de pesquisa proposto, relacionado à realização de uma avaliação dimensional confiável do sistema de polias da colheitadeira SLC 65A em condições reais de inspeção, foi devidamente atendido ao longo do desenvolvimento deste estudo. A solução foi viabilizada por meio da aplicação integrada dos conceitos de GD&T, da metrologia de grande volume com o uso do *Laser Tracker* AT960LR e da análise de confiabilidade do sistema de medição por meio do estudo de R&R. Essa abordagem permitiu superar limitações como a ausência de documentação técnica, restrições de acesso físico e condições ambientais não controladas, garantindo resultados consistentes e tecnicamente fundamentados.

Em relação aos objetivos específicos, todos foram plenamente alcançados. Em relação ao primeiro objetivo específico que se tratava da aplicação dos princípios de GD&T foi realizada na definição e interpretação das características geométricas do sistema de polias, por meio da criação de *datums*, alinhamentos e critérios de avaliação no *software Metrolog X4*. O segundo objetivo que se referia a medição dimensional, foi executada utilizando o *Laser Tracker* em ambiente real de campo, com a coleta estruturada de pontos e reconstrução das geometrias dos componentes.

Quanto ao terceiro objetivo específico, relacionado à avaliação da conformidade geométrica, ele foi atendido por meio da aplicação de tolerâncias de posição, perfil e perpendicularidade, o que permitiu identificar claramente os elementos que estavam em conformidade, bem como aqueles que apresentavam desvios significativos.

Na sequência, o quarto objetivo, voltado ao estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R), foi conduzido com a participação de três operadores distintos, com análise estatística realizada no *software Minitab*, possibilitando quantificar de forma objetiva a variabilidade do sistema de medição. O quinto objetivo, referente a confiabilidade dos resultados, esta foi verificada a partir da análise

conjunta dos dados, evidenciando consistência entre as medições realizadas e baixa variação entre operadores, o que reforça a robustez do método adotado.

Por fim, o último objetivo, referente a contribuição do estudo, este se destaca por demonstrar, na prática, a viabilidade da aplicação integrada de GD&T, metrologia de grande volume e análise estatística em condições reais, mesmo na ausência de documentação técnica e fora de ambientes controlados. Além disso, os resultados obtidos fornecem uma base relevante para diferentes aplicações, desde a preservação de ativos históricos até o suporte a atividades industriais como manutenção preditiva, engenharia reversa e diagnóstico de falhas geométricas. Dessa forma, o trabalho não apenas cumpre seus objetivos, mas também amplia as possibilidades de utilização dessas ferramentas em contextos diversos, agregando valor técnico tanto para a área acadêmica quanto para a engenharia aplicada.

Quanto ao objetivo geral, que consistiu em avaliar o comportamento dimensional do sistema de polias da colheitadeira SLC 65A por meio da aplicação de GD&T e metrologia de grande volume, pode-se afirmar que foi plenamente atingido. A análise realizada permitiu caracterizar de forma clara o comportamento geométrico do conjunto, evidenciando um cenário heterogêneo, no qual coexistem regiões com estabilidade dimensional e outras com desvios significativos, como desalinhamentos e erros de perpendicularidade. Além disso, o estudo demonstrou, na prática, a viabilidade da aplicação de conceitos de GD&T em equipamentos históricos, mesmo na ausência de documentação técnica, o que representa um avanço relevante do ponto de vista aplicado.

Destaca-se que o estudo vai além do atendimento aos objetivos propostos, ao apresentar uma abordagem estruturada e validada para análise dimensional em condições reais, frequentemente encontradas na indústria. A integração entre metrologia de grande volume, interpretação geométrica e análise estatística mostrou-se eficaz e consistente, contribuindo para a geração de dados confiáveis mesmo em um cenário desafiador. Dessa forma, o estudo consolida-se como uma referência prática para aplicações semelhantes, reforçando a importância do uso de ferramentas modernas de engenharia tanto na preservação de ativos históricos quanto na solução de problemas reais em contextos industriais, agregando valor técnico significativo à área de metrologia dimensional e à engenharia aplicada.

Como sugestões para trabalhos futuros, destaca-se a ampliação do uso de técnicas de escaneamento tridimensional, possibilitando a obtenção de uma nuvem

de pontos completa do equipamento e sua posterior aplicação em processos de engenharia reversa. A partir desses dados, torna-se viável a construção de um modelo matemático representativo da máquina, além da elaboração de desenhos técnicos em 2D, contribuindo para a documentação de um equipamento que atualmente não possui registros detalhados.

Também se sugere a realização de estudos dimensionais mais abrangentes, incluindo outros componentes da colheitadeira, como eixos, estruturas e sistemas de transmissão, permitindo uma análise mais completa do comportamento geométrico global do equipamento. Essas abordagens complementares podem não apenas aprofundar o entendimento técnico do ativo estudado, mas também ampliar significativamente as possibilidades de aplicação da metodologia desenvolvida, tanto na preservação de equipamentos históricos quanto em contextos industriais e de engenharia.

REFERÊNCIAS

- AIAG. **Automotive Industry Action Group**. *Measurement Systems Analysis (MSA)*. 4. ed. Detroit: AIAG, 2010.
- ALMACINHA, João. **Metrologia dimensional industrial**. Lisboa: IST Press, 2016.
- ANFAVEA. **Anuário da indústria automobilística brasileira**. São Paulo: ANFAVEA, 2020.
- ASME. **American Society of Mechanical Engineers**. ASME Y14.5-2018: *Dimensioning and Tolerancing*. New York: ASME, 2018.
- CRESWELL, John W. **Research design: qualitative, quantitative and mixed methods approaches**. 6. ed. Sage, 2021.
- DRAKE, Paul J. **Dimensioning and tolerancing handbook**. New York: McGraw-Hill, 2009.
- FARO. **Understanding Laser Trackers**. 2023. Disponível em: <<https://www.faro.com>>. Acesso em: 25 jun. 2026.
- GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of modern manufacturing**. 6. ed. Hoboken: Wiley, 2016.
- GZH. **Memorial da Evolução Agrícola preserva história da mecanização**. Porto Alegre, 2025. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br>>. Acesso em: 26 Mai. 2026.
- HENZOLD, Georg. **Geometrical dimensioning and tolerancing for design, manufacturing and inspection**. Oxford: Elsevier, 2006.
- HEXAGON. **Metrolog X4**. Disponível em: <<https://hexagon.com/products/metrolog-x4>>. Acesso em: 25 jun. 2026.
- INMETRO. **Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia**. Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM). Rio de Janeiro: INMETRO, 2025.
- JCGM. **Joint Committee for Guides in Metrology**. *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. 2012.
- KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. **Manufacturing engineering and technology**. 7. ed. Pearson, 2014.
- KRULIKOWSKI, Alex. **Fundamentals of geometric dimensioning and tolerancing**. 3. ed. Delmar, 2012.
- KRULIKOWSKI, Alex. **Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing**. 2. ed. Albany: Delmar Publishers, 1998.

- KUNZMANN, H. *et al.* *Large volume metrology: the state-of-the-art*. **CIRP Annals**, v. 54, n. 2, p. 702–729, 2005.
- LEXICAR BRASIL. **História da SLC 65A**. 2024. Disponível em: <<https://www.lexicarbrasil.com.br>>. Acesso em: 26 Mai. 2026.
- MAKERSTAGE. **Position tolerance formula explanation**. 2026. Disponível em: <<https://makerstage.com>>. Acesso em: 18 Abr. 2026.
- MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2022.
- MEA. **Memorial da Evolução Agrícola**. Acervo histórico. Horizontina, 2025. Disponível em: <<https://mea.org.br>>. Acesso em: 10 março 2026.
- MEADOWS, James D. **Geometric dimensioning and tolerancing**. 2. ed. New York: CRC Press, 2019.
- METROLOGIC GROUP. **Metrolog X4 documentation**. 2026. Disponível em: <<https://www.metrologic.group>>. Acesso em: 5 Mai. 2026.
- MURALIKRISHNAN, Bala *et al.* **Laser trackers for large-scale dimensional metrology**: A review. *Precision Engineering*, 2015.
- SCHWENKE, H. *et al.* *Geometric error measurement and compensation of machines: An update*. **CIRP Annals**, v. 57, n. 2, p. 660–675, 2008.
- SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Mechanical engineering design**. 10. ed. New York: McGraw-Hill, 2015.
- SIGMETRIX. **GD&T training material**. 2026. Disponível em: <<https://www.sigmetrix.com>>. Acesso em: 10 maio 2026.
- SILVA NETO, João Cirilo da. **Metrologia e controle dimensional**. São Paulo: Blucher, 2012.
- SOUZA, André. **Fundamentos de GD&T aplicados à metrologia dimensional**. Curso de metrologia e toleranciamento geométrico. 2020.
- SOUZA, André. **Metrologia aplicada e análise de sistemas de medição (MSA)**. Curso técnico em metrologia dimensional. 2021.
- SOUZA, André; WANDECK, Ronaldo. **Metrologia dimensional e GD&T aplicados à engenharia**. Curso técnico. 2009.
- VIM. **Vocabulário Internacional de Metrologia**. 3. ed. JCGM, 2012.
- YIN, Robert K. **Case study research: design and methods**. 5. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2015.

APÊNDICE A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO LASER TRACKER



Certificado de Calibração

Certificado de Calibração com os valores de medição fornecidos pelo fabricante

Produto: Leica Absolute Tracker AT960-LR
Artigo N°: 576863
N° Série: 752803

Certificado N°: 393-25
Data Realizada: 29-Jul-25
Ordem Serviço: WO-00472849

Cliente: John Deere Brasil Ltda.
 Av Eng Jorge A D Logemann #600
 Horizontina - RS
 Brasil

Local da Calibração:
 Hexagon MI, Laboratório Leica

Condição: Após a Inspeção

Conformidade:

O Certificado de Calibração com os valores de medição fornecidos pelo fabricante corresponde ao Certificado de Calibração de acordo com a norma DIN 55 350 Part 18-4.2.2.

Certificado:

Certificamos que o produto descrito foi testado com o seguinte resultado:

☒ Conformidade Os resultados do teste estão dentro das especificações do produto.

O equipamento usado para os testes é rastreado por padrões nacionais ou através de procedimentos reconhecidos. Esse Certificado foi estabelecido por nosso Sistema de Gestão de Qualidade, auditado e certificado na ISO 9001 por uma autoridade de acreditação nacional independente.

Hexagon Manufacturing Intelligence - São Paulo - SP
 29 de julho de 2025

Lider da Qualidade: Ednilson Silva

Certificado No. 393-25
 Art. No. 5003909
 Este Certificado não deve ser reproduzido parcialmente
 exceto com autorização por escrito do responsável pela emissão.

2/8

Hexagon Manufacturing Intelligence
 Rua: Dom Aguiar, nº 190 - Vila Sofia
 04671-245 - São Paulo - SP
 Brasil
www.hexagonmi.com

APÊNCICE B – TABELA PARA ESTUDO DE R&R

Resultados	Avaliadores	Repetição	Peça
45,04	A	1	1
44,98	A	1	2
44,96	A	1	3
44,92	A	1	4
45,1	A	1	5
44,9	A	1	6
45,01	A	1	7
44,93	A	1	8
44,85	A	1	9
45,04	A	1	10
45,1	A	2	1
44,98	A	2	2
44,79	A	2	3
44,84	A	2	4
44,81	A	2	5
44,95	A	2	6
45,03	A	2	7
44,94	A	2	8
45,1	A	2	9
45,07	A	2	10
45,14	A	3	1
44,98	A	3	2
45,14	A	3	3
44,87	A	3	4
44,78	A	3	5
45,06	A	3	6
44,82	A	3	7
44,96	A	3	8
44,88	A	3	9
45,07	A	3	10
45,09	C	1	1
45,08	C	1	2
44,82	C	1	3
44,87	C	1	4
44,88	C	1	5
45	C	1	6
45,08	C	1	7
44,99	C	1	8
44,95	C	1	9
45,12	C	1	10
45,2	C	2	1

45,07	C	2	2
44,82	C	2	3
44,94	C	2	4
44,87	C	2	5
44,96	C	2	6
45,1	C	2	7
45,03	C	2	8
44,94	C	2	9
45,1	C	2	10
45,17	C	3	1
44,99	C	3	2
44,86	C	3	3
44,92	C	3	4
44,83	C	3	5
44,98	C	3	6
45,06	C	3	7
45,04	C	3	8
44,9	C	3	9
45,1	C	3	10
45,25	D	1	1
45,15	D	1	2
44,86	D	1	3
44,97	D	1	4
44,95	D	1	5
45,04	D	1	6
45,2	D	1	7
45,06	D	1	8
45,03	D	1	9
45,17	D	1	10
45,01	D	2	1
45,12	D	2	2
44,9	D	2	3
44,94	D	2	4
44,99	D	2	5
45,07	D	2	6
45,18	D	2	7
45,12	D	2	8
45,03	D	2	9
45,18	D	2	10
45,21	D	3	1
45,1	D	3	2
44,94	D	3	3
45,15	D	3	4
44,93	D	3	5
45,04	D	3	6

45,16	D	3	7
45,1	D	3	8
44,99	D	3	9
44,83	D	3	10

Fonte: Autor (2026).