

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ  
FELIPE MENECCUCCI PORTUGAL E SILVA  
FERNANDO JOSÉ CAMPOS

APLICAÇÃO DE CMM EM LINHA DE PRODUÇÃO  
DE USINADOS:  
UM ESTUDO DE CASO DE SUBSTITUIÇÃO DE  
GAGES DEDICADOS POR RECURSOS DIGITAIS DE  
MENSURAÇÃO (*LEAN ENGINEERING*)

TAUBATÉ – SP  
2023

FELIPE MENEUCUCCI PORTUGAL E SILVA  
FERNANDO JOSÉ CAMPOS

APLICAÇÃO DE CMM EM LINHA DE PRODUÇÃO  
DE USINADOS:  
UM ESTUDO DE CASO DE SUBSTITUIÇÃO DE  
GAGES DEDICADOS POR RECURSOS DIGITAIS DE  
MENSURAÇÃO (*LEAN ENGINEERING*)

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia da Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Me. Paulo Cesar Corrêa Lindgren

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Me. Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren

TAUBATÉ – SP

2023

**Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI  
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi  
Universidade de Taubaté - Unitau**

S586a Silva, Felipe Menecucci Portugal e  
Aplicação de CMM em linha de produção de usinados: um estudo de caso de substituição de gases dedicados por recursos digitais de mensuração (Lean Engineering) / Felipe Menecucci Portugal e Silva, Fernando José Campos. -- 2023.  
59 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2023.  
Orientação: Prof. Me. Paulo Cesar Corrêa Lindgren, Departamento de Engenharia Mecânica.  
Coorientação: Prof. Me. Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Medição. 2. Qualidade. 3. Engineering. 4. Lean. 5. Inspeção. I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. Graduação em Engenharia de Mecânica. II. Campos, Fernando José.

CDD – 658.5

FELIPE MENEUCCI PORTUGAL E SILVA  
FERNANDO JOSÉ CAMPOS

APLICAÇÃO DE CMM EM LINHA DE PRODUÇÃO DE USINADOS:  
UM ESTUDO DE CASO DE SUBSTITUIÇÃO DE GAGES DEDICADOS POR  
RECURSOS DIGITAIS DE MENSURAÇÃO (LEAN ENGINEERING)

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

DATA: \_\_\_\_\_

RESULTADO: \_\_\_\_\_

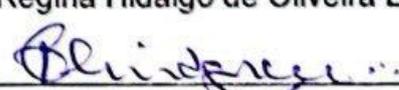
**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Me. Paulo Cesar Corrêa Lindgren

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: \_\_\_\_\_  


Prof.<sup>a</sup> Me. Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: \_\_\_\_\_  


Prof. Me. Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: \_\_\_\_\_  


Dezembro de 2023

Dedicamos este trabalho a nossa família e amigos, pelo companheirismo e apoio durante todo o curso.

Aos nossos orientadores, que conduziram nosso trabalho com paciência e dedicação, sempre se mostrando disponíveis a compartilhar todo o seu conhecimento em prol de um grande resultado.

Eu, Felipe Menecucci, dedico este trabalho primeiramente a Deus, a toda minha família pelo apoio durante todos esses anos, futura esposa e todos os amigos que contribuíram para a minha graduação.

Eu, Fernando Campos, dedico este trabalho a Deus por toda capacitação, meus pais e filhos por serem a minha inspiração, e a minha companheira Anne Matarazzo, suporte e grande incentivadora em todos os momentos, nos quais pensei em sucumbir à exaustão.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradecemos a todos nossos familiares, que sempre incentivaram nossos estudos acreditando piamente em nosso potencial.

À Universidade de Taubaté – UNITAU, que ofereceu seu ambiente, seus recursos e profissionais capacitados que contribuíram para nossa formação acadêmica.

Ao nosso orientador, Paulo Cesar Corrêa Lindgren por toda a motivação, incentivo, atenção e troca de conhecimentos que se tornaram essenciais na orientação deste trabalho, bem como à professora coorientadora, Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren, por nos suportar em todos os momentos que solicitamos sua ajuda.

Agradecemos ao Professor Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto pela prontidão em compor a banca examinadora e por agregar conhecimentos importantes para nosso desenvolvimento profissional e acadêmico.

## RESUMO

Uma linha de produção eficiente, em uma empresa de usinagem seriada, operando sem desperdícios, é fundamental para manter a qualidade e conseqüentemente a satisfação do cliente. Especialmente nas indústrias de autopeças que possuem alta demanda, a busca pela eficiência nos processos é de suma importância para manter o nível de qualidade e competitividade que o mercado exige. Nesse contexto, através de um estudo de caso realizado na Empresa Alfa, este trabalho visa demonstrar a substituição de gages dedicados por máquinas tridimensionais (CMM - *Coordinate Measuring Machine*), em uma linha de usinagem de Carcaça do Diferencial, baseando-se em conceitos relacionados a metodologia da *Lean* e a *Lean Engineering* concentrado na eliminação de desperdícios, melhoria contínua em processos de usinados, buscando maximizar a eficiência e a qualidade. A aplicação dos princípios de Melhoria Contínua baseados na metodologia *Lean* permitiu evidenciar e analisar os resultados dos custos diretos e indiretos incluindo a aquisição, manutenção, automação e infraestrutura relacionados a ambas as abordagens. Além disso, foi realizada uma análise dos sistemas de medição para demonstrar sua estabilidade no controle de processo. A comparação de custos e a precisão dos meios de controle são fundamentais para avaliar a viabilidade financeira de novos métodos de medição, além de criar um fluxo contínuo e eficiente nos processos da empresa, resultando em ganhos de produtividade e redução de desperdícios pela eliminação de processos desnecessários.

**Palavras-chave:** CMM (*Coordinate Measuring Machine*). Gages dedicados. Qualidade. *Lean Engineering*.

## **ABSTRACT**

An efficient production line, in a serial machining company, operating without waste, is essential to maintain quality and consequently customer satisfaction. Especially in the auto parts industries that have high demand, the search for process efficiency is extremely important to maintain the level of quality and competitiveness that the market demands. In this context, through a case study carried out at Company Alfa, this work aims to demonstrate the replacement of dedicated gauges by three-dimensional machines (CMM - Coordinate Measuring Machine), in a Differential Housing machining line, based on related concepts Lean methodology and Lean Engineering focus on eliminating waste, continuous improvement in machined processes, seeking to maximize efficiency and quality. The application of Continuous Improvement principles based on the Lean methodology made it possible to highlight and analyze the results of direct and indirect costs including acquisition, maintenance, automation and infrastructure related to both approaches. Furthermore, an analysis of the measurement systems was carried out to demonstrate their stability in process control. Cost comparison and the precision of control means are fundamental to evaluating the financial viability of new measurement methods, in addition to creating a continuous and efficient flow in the company's processes, resulting in productivity gains and waste reduction by eliminating processes unnecessary.

**Keywords:** CMM – (Coordinate Measuring Machine). Dedicated gauges. Quality. Lean Engineering.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lean Manufacturing e Industria 4.0.....	17
Figura 2 - Torno CNC DOVI TDU-300 COM COMANDO SIEMENS 802D.....	18
Figura 3 – Gage Dedicado .....	23
Figura 4 - Esquema simplificado de uma máquina de medir por coordenadas .....	26
Figura 5 - Produtos fabricados na empresa Alfa, local de montagem no veículo .....	31
Figura 6 - Carcaça do Diferencial 3D .....	32
Figura 7 - Gage Dedicado para controle de Carcaça do Diferencial .....	33
Figura 8 - Layout da linha de produção da Carcaça do Diferencial.....	35
Figura 9 - CMM (Máquina de Medição por Coordenada).....	40
Figura 10 - <i>Layout</i> da linha de produção.....	43

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Custos de Implementação e utilização de Gage Dedicado. ....	39
Quadro 2 - Cronograma de Implementação. ....	41
Quadro 3 - Custos de Implementação e utilização de CMM. ....	46
Quadro 4 - Resultados de R&R dos meios de medição. ....	48
Quadro 5 - Comparação dos custos de implementação e utilização de Gage Dedicado e CMM. ....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>CMM</b>	<i>Coordinate Measuring Machine</i> (Máquina de Medição por Coordenadas)
<b>CNC</b>	<i>Computer Numerical Control</i> (Controle Numérico Computadorizado)
<b>MMC</b>	Máquinas de Medição Computadorizada
<b>MSA</b>	<i>Measurement System Analysis</i> (Análise de Sistemas de Medição)
<b>R&amp;R</b>	<i>Reproducibility and Repeatability</i> (Reprodutibilidade e Repetibilidade)

## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i> .....	15
1.1.2	<i>Objetivo Específico</i> .....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	A FILOSOFIA LEAN E LEAN ENGINEERING .....	16
2.2	PROCESSOS DE USINAGEM NA INDÚSTRIA DE AUTOPEÇAS .....	17
2.3	DISPOSITIVOS DE FABRICAÇÃO, MONTAGEM E INSPEÇÃO .....	18
2.3.1	<i>A importância do uso de “gages” nos processos automotivos</i> .....	19
2.3.2	<i>Características de “Gages Dedicados”</i> .....	20
2.4	SISTEMAS DE MEDIÇÃO – HISTÓRICO E EVOLUÇÃO .....	23
2.4.1	<i>Máquinas de Medição por Coordenadas (CMM - Coordinate Measuring Machines)</i> .....	24
2.4.2	<i>O ambiente de operação tradicional das CMM</i> .....	26
3	METODOLOGIA.....	28
4	ESTUDO DE CASO .....	29
4.1	CARACTERÍSTICAS DA EMPRESA ALFA, SEUS PROCESSOS E PRINCIPAIS PRODUTOS .....	29
4.2	O USO TRADICIONAL DE GAGES DEDICADOS NA EMPRESA ALFA – LINHA DE PRODUÇÃO DA CARÇAÇA DO DIFERENCIAL.....	32
4.2.1	<i>Processo de Utilização</i> .....	33
4.2.2	<i>Vantagens</i> .....	35
4.2.3	<i>Desvantagens</i> .....	36
4.2.4	<i>Custos</i> .....	38
4.2.5	<i>Resultados</i> .....	39
4.3	PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE CMM EM SUBSTITUIÇÃO DOS GAGES DEDICADOS .....	40
4.3.1	<i>Processo de Utilização</i> .....	41
4.3.2	<i>Vantagens</i> .....	43
4.3.3	<i>Desvantagens</i> .....	45
4.3.4	<i>Custos</i> .....	45
4.3.5	<i>Resultados</i> .....	46
4.4	CARACTERÍSTICAS DO TESTE EFETUADO.....	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
5.1	COMPARAÇÃO DE GAGES DEDICADOS COM A CMM .....	48
5.1.1	<i>Comparação dos meios de medição através de MSA</i> .....	48
5.1.2	<i>Comparação dos meios de medição através de análise de custos</i> .....	49
5.2	VANTAGENS E DESVANTAGENS A PARTIR DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	51
5.3	OS PRINCIPAIS GANHOS OBTIDOS NA SUBSTITUIÇÃO DO GAGE DEDICADO POR CMM.....	52
5.3.1	<i>Ganhos em Produtividade e Qualidade</i> .....	52
5.3.2	<i>Ganhos em Flexibilidade</i> .....	52
5.3.3	<i>Ganhos em Custos de Fabricação e Manutenção dos Gages Dedicados</i> .....	52

<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>
	<b>ANEXOS: .....</b>	<b>58</b>
	<b>ANEXO 1 – Estudo R&amp;R do Gage Dedicado (Dispositivo Eletrônico Multi-cotas).....</b>	<b>58</b>
	<b>ANEXO 2 – Estudo R&amp;R da CMM (Coordinate Measuring Machine).....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, a indústria de usinagem enfrenta um cenário de evolução tecnológica constante. O avanço das técnicas de fabricação e o uso cada vez mais disseminado da automação estão redefinindo os padrões de eficiência e precisão na produção de peças usinadas. Nesse contexto, a substituição de gages dedicados por equipamentos de Medição por Coordenadas (CMM - *Coordinate Measuring Machine*) emerge como uma proposta interessante.

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise abrangente e crítica das vantagens e desvantagens associadas à proposta de substituir os tradicionais gages dedicados por CMMs nas linhas de produção de usinados. O uso de gages dedicados tem sido uma prática estabelecida na indústria por décadas, oferecendo medições precisas e confiáveis. No entanto, as CMMs representam uma abordagem inovadora que promete maior versatilidade e eficiência no processo de inspeção e medição de peças usinadas.

Ao longo deste estudo, serão examinadas as implicações dessa mudança, considerando os benefícios potenciais, como a redução de custos, o aumento da precisão e a capacidade de realizar medições complexas, bem como os potenciais desvantagens, como os desafios de integração, os custos iniciais de aquisição e a curva de aprendizado associada à operação das CMMs. Será buscado identificar as melhores práticas e estratégias para implementar com sucesso essa transição, levando em consideração as especificidades da indústria e das empresas envolvidas.

Este estudo visa fornecer percepções valiosas para empresas que estão considerando a substituição de gages dedicados por CMMs em suas operações de usinagem, ajudando a tomar decisões informadas e estratégicas. Ao final da análise, espera-se oferecer uma visão equilibrada das implicações dessa mudança, destacando as oportunidades e os desafios que as empresas podem enfrentar ao abraçar essa inovação na busca contínua pela excelência na produção de peças usinadas.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar as vantagens e desvantagens da proposta de substituição de gages dedicados por equipamentos CMM (*Coordinate Measuring Machine*) na linha de produção de usinados.

### 1.1.2 Objetivo Específico

Para alcançar o principal objetivo deste trabalho, serão realizadas as seguintes etapas:

- Investigar as abordagens utilizadas pela empresa alfa no que se refere a medições e inspeções de peças usinadas.
- Entender a filosofia *Lean* aplicada aos processos de produção.
- Analisar e compreender as técnicas atualmente adotadas, bem como a identificação dos desafios enfrentados por essas práticas.
- Apresentar os sistemas de medição, e suas aplicações.
- Explorar a capacidade dos gages dedicados e da (CMM) e suas funcionalidades.
- Desenvolver um estudo de caso comparando os dois meios de medição.
- Comparar os custos associados à utilização de gages dedicados em comparação com as CMMs.
- Avaliar a precisão e a repetibilidade das medições pelos dois meios.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A Filosofia Lean e Lean Engineering

A *Lean* e a *Lean Engineering* são abordagens de gestão, desenvolvimento e se concentram na eliminação de desperdícios, melhoria contínua e maximização do valor para o cliente.

A *Lean* visa identificar e eliminar todos os tipos de desperdícios, como excesso de produção, transporte desnecessário, estoques excessivos, movimentação excessiva, defeitos e tempo de espera. Tendo como foco principal a criação de valor para o cliente. Tem uma cultura de melhoria contínua, onde todos os membros da equipe estão envolvidos na identificação e implementação de melhorias nos processos. A produção e a entrega são sincronizadas para minimizar o estoque e reduzir o tempo de ciclo, garantindo que os produtos sejam produzidos apenas quando necessário (*Just in Time*). A *Lean* enfatiza o trabalho em equipe e a colaboração entre diferentes departamentos e níveis hierárquicos para otimizar processos. (PEDRA, 2023)

Na *Lean Engineering*, o foco é estendido para o ciclo de desenvolvimento de produtos e serviços, o objetivo é projetar produtos que atendam às necessidades dos clientes de forma eficiente e com o mínimo de desperdício. Assim como na *Lean* tradicional, a *Lean Engineering* adota um sistema de desenvolvimento puxado, onde os projetos são iniciados com base na demanda do cliente. As equipes de desenvolvimento são multidisciplinares e colaboram estreitamente para evitar retrabalho e melhorar a qualidade, o uso de prototipagem e testes frequentes ajuda a identificar e corrigir problemas no início do ciclo de desenvolvimento. Busca identificar os recursos e características que agregam valor aos produtos, eliminando elementos que não contribuem para o valor do cliente. (PEDRA, 2023)

Em resumo, tanto a *Lean* quanto a *Lean Engineering* têm como objetivo fundamental a maximização do valor para o cliente, a eliminação de desperdícios e a busca contínua por melhorias nos processos, seja na produção ou no desenvolvimento de produtos e serviços. Ambas as filosofias promovem uma mentalidade de eficiência, qualidade e colaboração para alcançar esses objetivos.

**Figura 1 - Lean Manufacturing e Industria 4.0**

Fonte: Mark Crawford (2016)

## 2.2 Processos de Usinagem na Indústria de Autopeças

Os processos de usinagem desempenham um papel fundamental na indústria de autopeças, pois permitem a fabricação de componentes precisos e de alta qualidade para veículos. O torneamento é um processo que envolve a rotação da peça de trabalho enquanto uma ferramenta de corte remove material para criar formas cilíndricas, cônicas ou outras formas. Isso é comumente usado para criar eixos, cubos de rodas, parafusos e outras peças redondas. Na fresagem, uma ferramenta rotativa com múltiplas arestas de corte é usada para remover material da peça de trabalho para criar formas complexas, ranhuras, superfícies planas e contornos. Isso é amplamente utilizado na fabricação de componentes de garfos de transmissão, cárter de óleo e motores. O processo de furação é usado para criar orifícios em peças, como blocos de motor, painéis de carroceria e entre outros. Pode envolver broqueamento, perfuração por mandrilhamento ou outras técnicas. A retificação é usada para obter tolerâncias extremamente precisas e superfícies muito suaves. É comum na produção de componentes críticos, como rolamentos, virabrequins e eixos de transmissão. O processo de eletroerosão a fio (*Wire EDM*) utiliza descargas elétricas para remover material de peças de trabalho. É eficaz na usinagem de peças complexas com tolerâncias apertadas, como moldes e matrizes. A fresagem controlada por computador (CNC) é uma versão automatizada da fresagem, em que máquinas CNC precisas executam operações de usinagem com base em programação prévia. Isso

permite a produção eficiente e precisa de peças complexas em grandes volumes. Semelhante à fresagem CNC, o torneamento CNC usa máquinas controladas por computador para criar componentes girando a peça de trabalho e cortando o material com ferramentas de corte controladas por CNC. O brochamento é um processo que utiliza uma ferramenta especializada chamada brocha para criar ranhuras internas ou externas em peças, como engrenagens e polias. Usado para criar roscas em peças, como parafusos e porcas, o torneamento de rosca é um processo crucial na fabricação de autopeças. (REVISTA FERRAMENTAL, 2021)

Esses processos de usinagem desempenham um papel essencial na produção de uma ampla variedade de componentes automotivos, garantindo que eles atendam às tolerâncias rigorosas e aos padrões de qualidade exigidos pela indústria automotiva. A seleção do processo de usinagem adequado depende das características da peça, do material, das tolerâncias requeridas e da eficiência desejada na produção.

Na imagem a seguir, é mostrado um Torno CNC similar ao utilizado na Empresa Alfa onde foi realizado o estudo de caso.

**Figura 2 - Torno CNC DOVI TDU-300 COM COMANDO SIEMENS 802D**



Fonte: Elaborada pelos autores (2023)

### **2.3 Dispositivos de Fabricação, Montagem e Inspeção**

Os dispositivos para montagem, inspeção industrial são equipamentos fabricados sob desenho que proporcionam qualidade, padronização e ou a automatização de máquinas e processos em diversos segmentos da indústria. A

automação consiste em um conjunto de equipamentos e tecnologias que reduzem ao mínimo a necessidade de intervenção humana para o funcionamento das máquinas e garantindo melhores resultados na qualidade do produto ou peça fabricada.

A verificação das características é realizada através de dispositivos de fixação, estes são projetados e fabricados com o objetivo de monitorar, simular e garantir a montagem final destes produtos no futuro cliente, seja este na próxima etapa do processo ou um destinatário externo, ressalta-se que estes dispositivos devem ser de simples utilização, para proporcionar agilidade ao processo, e garantia da repetibilidade do seu uso, auxiliando a eliminar em alguns casos a utilização de equipamentos de medição tridimensional com o objetivo de alavancar quais são as reais vantagens para a utilização de equipamentos de medição e monitoramento.

Com a definição do produto e com base no desenho avalia-se as especificações que necessitam ser aferidas, ou seja, serem controladas após a etapa de fabricação. Para realização da aferição propriamente dita, é projetado um dispositivo de medição e monitoramento que visa controlar a posição de furos (concentricidade), e os desvios de forma do produto. Na fabricação deste dispositivo utiliza alumínio como matéria-prima, pois a sua densidade característica proporciona um ganho ergonômico significativo, diminuindo o peso do dispositivo. A criação e desenvolvimento de uma ferramenta complexa exige profissionais qualificados para a parte inicial de projeto, máquinas complexas como centros de usinagem de última geração, todo este investimento reflete no valor final do dispositivo, relativamente alto, mas de grande benefício, pois sua principal função é detectar problemas, garantindo assim a qualidade final do produto. Sendo esta finalidade comprovada no desenvolvimento deste trabalho, pois se evita que produtos divergentes do desenho chegue ao cliente final. (FÜHR, 2009)

### **2.3.1 A importância do uso de “gages” nos processos automotivos**

O uso de gages dedicados, também conhecidos como gabaritos ou dispositivos de medição, desempenha um papel crucial no processo automotivo. Esses instrumentos são projetados especificamente para medir, verificar e garantir a precisão e a qualidade dos componentes.

Uma das principais razões pelas quais o uso de gages é importante na indústria automotiva é manter a garantia de qualidade, os gages dedicados são projetados com base em especificações precisas e tolerâncias apertadas, tornando-os ideais para verificar a conformidade de componentes automotivos com os padrões de qualidade estabelecidos sendo essencial para garantir a segurança dos veículos e a satisfação dos clientes. Os gages eliminam grande parte do erro humano na medição e facilita a consistência na produção, permite medições rápidas e precisas, acelerando o processo de inspeção e reduzindo o tempo de ciclo de produção. Uma vez que, são projetados para se encaixar perfeitamente com o componente que está sendo verificado. Isso proporciona uma produção mais eficiente e custos mais baixos. A medição precisa fornecida pelos gages ajuda a identificar rapidamente peças defeituosas e a intervenção precoce para ajustar ou descartar componentes fora de especificação, reduzindo o desperdício e os custos associados a produtos defeituosos. Os gages geralmente são registrados e rastreáveis, o que é essencial para o controle de qualidade e a conformidade com regulamentações e padrões da indústria automotiva. Os dados coletados podem ser usados para análise estatística e melhoria contínua dos processos de fabricação auxiliando as empresas a identificar áreas de oportunidade e aperfeiçoar seus métodos de produção. Isso promove a padronização de processos de medição, garantindo que todas as peças sejam medidas de acordo com as mesmas normas e critérios. Na indústria, a segurança é uma prioridade máxima ao garantir a qualidade e a precisão dos componentes, as empresas automotivas podem manter e aprimorar sua competitividade no mercado, construindo uma reputação de confiabilidade e desempenhando um papel essencial na garantia de qualidade, eficiência de produção e segurança. Esses dispositivos exercem um papel crítico na conformidade com padrões de qualidade rigorosos e contribuem para a fabricação de veículos seguros e confiáveis. (ZAMBELLI, 2023)

### **2.3.2 Características de “Gages Dedicados”**

Os gages dedicados têm características específicas que os diferenciam de outros instrumentos de medição. Estas características são projetadas para atender às necessidades de medição precisa e repetitiva na indústria.

São projetados especificamente para uma tarefa de medição ou inspeção particular, adaptados para atender às especificações de um componente ou conjunto de peças específicas, construídos para atender a tolerâncias muito apertadas, a fim de garantir medições precisas e repetíveis, fundamental para manter a qualidade e a conformidade em processos de fabricação, construídos a partir de materiais de alta qualidade e resistentes, como aço inoxidável, cerâmica ou outros materiais duráveis que podem suportar o uso constante e repetitivo. Geralmente incluem dispositivos de fixação, como garras, pinos ou almofadas, que garantem a posição correta do componente a ser medido. Isso ajuda a minimizar a variação na posição do componente durante a medição. Os gages possuem mecanismos de medição de alta precisão, como relógios comparadores, transdutores de deslocamento linear ou outros dispositivos de medição altamente sensíveis, são frequentemente rastreáveis a padrões de medição nacionais ou internacionais, o que garante a consistência e a confiabilidade das medições.

São projetados para minimizar o desgaste e a degradação ao longo do tempo, de forma a serem fáceis de usar, muitas vezes com procedimentos de medição simples que exigem treinamento mínimo. Podem incluir marcações claras, como escalas de medição, para facilitar a leitura e interpretação das medições.

Segundo Silva Neto (2018), os calibradores, amplamente adotados na indústria metalmeccânica, desempenham um papel essencial na fabricação de peças sujeitas a ajustes, onde as dimensões são fixadas pelo projeto com tolerâncias específicas. Uma abordagem comum para qualificar rapidamente essas peças é o uso de calibradores do tipo "Passa/Não passa". Esses dispositivos, devido à sua simplicidade e custo relativamente baixo, oferecem uma solução econômica para diversas questões de medição na indústria, como a verificação de furos, eixos, roscas, entre outros, determinando se estão dentro das tolerâncias especificadas.

Os calibradores fixos podem ser categorizados em três grupos distintos, dependendo de sua finalidade específica:

- Calibradores de Fabricação para Dimensões Limites: Esses calibradores desempenham um papel fundamental na verificação de peças, ajudando a assegurar que suas dimensões estejam dentro dos limites estabelecidos pelo projeto. São essenciais para garantir a conformidade durante o processo de fabricação.

- Calibradores de Referência e Contra Calibradores: Esta categoria de calibradores é empregada no controle e ajuste de outros calibradores. Sua função é crucial para manter a precisão e a consistência em toda a cadeia de medição, assegurando que os calibradores em uso estejam devidamente alinhados e regulados.
- Blocos Padrão: Os blocos padrão desempenham um papel específico na verificação de diferentes tipos de calibradores. Além disso, são utilizados para calibrar instrumentos de medição por leitura. Sua função é crucial para garantir a acurácia e a confiabilidade dos instrumentos de medição ao longo do tempo.

Fabricados geralmente em aço temperado, os calibradores podem apresentar superfícies retificadas para otimizar o contato com as peças a serem verificadas. A qualidade dessas superfícies é crucial, não apenas para facilitar a medição, mas também para influenciar a estabilidade dimensional do calibrador. Assim, esses dispositivos desempenham um papel fundamental na eficiência e precisão dos processos de fabricação, fornecendo uma abordagem acessível e prática para garantir a conformidade das peças com as tolerâncias estabelecidas.

Os gages dedicados são projetados para garantir que as medições estejam em conformidade com padrões de qualidade e regulamentos da indústria, proteger as superfícies de medição de contaminação, como poeira ou detritos, que podem afetar a precisão das medições. É importante a calibração regularmente, conforme procedimentos para garantir que eles continuem fornecendo medições precisas ao longo do tempo.

Essas características tornam os gages dedicados essenciais na indústria, onde a medição precisa e repetitiva é fundamental para garantir a qualidade dos produtos e componentes fabricados. Eles desempenham um papel fundamental na garantia de qualidade e na eficiência dos processos de produção.

**Figura 3 – Gage Dedicado**

Fonte: Elaborada pelos Autores (2023)

## 2.4 Sistemas de Medição – Histórico e Evolução

A evolução dos sistemas de medição tridimensionais (CMMs - *Coordinate Measuring Machines*) é uma história de avanços tecnológicos e aprimoramentos contínuos ao longo das últimas décadas.

Os sistemas de medição por coordenadas (CMM) têm uma história que remonta ao final do século XIX, mas sua evolução significativa começou nas décadas de 1950 e 1960, com o advento das máquinas tridimensionais de controle numérico. Durante os anos seguintes, houve melhorias significativas com a incorporação de computadores na automação das medições, tornando as CMMs mais precisas e flexíveis. A tecnologia de medição por coordenadas, teve um grande avanço com a incorporação do computador as máquinas de medição por coordenadas. Estas, usualmente se utilizam de apalpadores eletromecânicos no processo de localização/medição das coordenadas de pontos. O surgimento dos sistemas de digitalização de imagens, proporcionou uma outra forma de localizar pontos e medir suas coordenadas. O sistema de medição de coordenadas por imagens, efetua à medição das coordenadas de pontos sobre um objeto, a partir de suas imagens

digitalizadas e de parâmetros do sistema, e empregando a metodologia da triangulação tridimensional. Caracteriza-se o sistema em três módulos operacionais: módulo de aquisição de imagens, de digitalização de imagens e de processamento de imagens. Para cada módulo são caracterizadas/modeladas suas fontes de erros e influência destas nos erros das coordenadas dos pontos medidos. Efetuou-se o desenvolvimento do modelo matemático para o cálculo das coordenadas dos pontos em questão e, a partir deste modelo elaborou-se um programa para computador.

Nos anos 1990, as CMMs tornaram-se mais sofisticadas com avanços na tecnologia de software, possibilitando análises avançadas e relatórios automatizados já na década de 2000, a introdução de CMMs portáteis e sistemas ópticos proporcionou maior flexibilidade e mobilidade. Atualmente, as CMMs modernos incorporam tecnologias avançadas, como sensores a laser, câmeras de alta resolução e digitalização 3D, permitindo a captura rápida e precisa de dados em superfícies complexas.

Essa evolução continua, com a integração de sistemas CMM à automação e à Indústria 4.0, proporcionando eficiência na coleta e análise de dados para otimização de processos. As CMMs desempenham um papel fundamental em diversos setores, assegurando controle dimensional, garantia de qualidade e contribuindo para o desenvolvimento de produtos inovadores. (DE LUCA, 1990)

#### **2.4.1 Máquinas de Medição por Coordenadas (*CMM - Coordinate Measuring Machine*)**

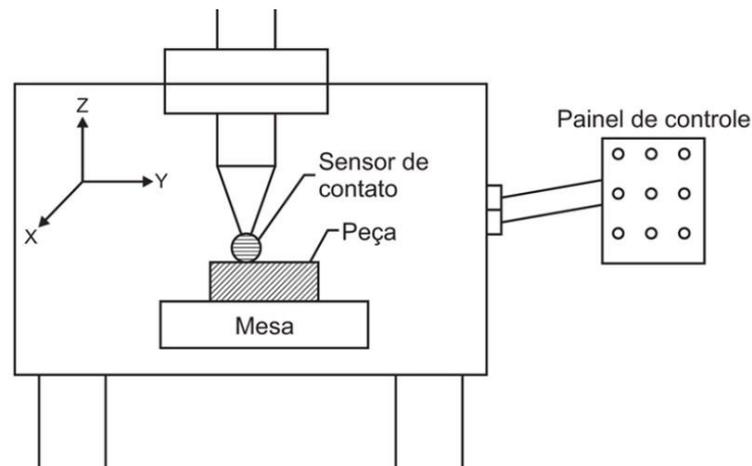
As Máquinas de Medição por Coordenadas (CMMs), ou *Coordinate Measuring Machines*, são dispositivos de medição de alta precisão usados para medir a geometria tridimensional de objetos e peças, desempenham um papel crítico na metrologia, controle de qualidade e inspeção de produtos em diversas indústrias.

As MMC trouxeram muitos benefícios para o setor produtivo, por serem muito versáteis e aplicáveis à maioria das formas e modelos de peças. Para a realização das medições basta programar a operação em função das características da peça. No caso da produção em série, as MMC podem ser interligadas por computador e dispensar a interferência do homem em muitas operações. Apesar de estarem sujeitas a erros de medição, apresentam menores possibilidades de erro quando comparadas com medições com instrumentos convencionais e operados pelo homem. (SILVA NETO, 2018, p.145)

A estrutura de uma CMM é geralmente rígida e composta de materiais como granito, alumínio ou cerâmica, a rigidez é importante para garantir medições precisas, uma vez que a deformação da estrutura pode afetar os resultados. A CMM possui uma mesa de medição onde a peça a ser medida é colocada. A mesa é movida em três eixos ortogonais sendo X, Y e Z, permitindo que a sonda de medição que é o componente que entra em contato com a peça para realizar as medições alcançando qualquer ponto da peça, todos os movimentos da mesa de medição são controlados por sistemas de acionamento, como guias lineares, fusos de esferas ou outros mecanismos de alta precisão. As máquinas tridimensionais são equipadas com sistemas de medição que convertem os movimentos da sonda em coordenadas 3D precisas. Isso envolve a captura de dados de medição, que são posteriormente processados pelo software de medição no computador que é usado para controlar a CMM e executar o software de medição, permite a programação das tarefas de medição, o processamento dos dados e a análise dos resultados sendo essencial para a programação da CMM, a análise de dados e a geração de relatórios de inspeção, podendo também incluir recursos de visualização 3D para comparação com modelos CAD. (SILVA NETO, 2018)

As peças a serem medidas são frequentemente fixadas em dispositivos de fixação para garantir estabilidade durante a medição, pode incluir dispositivos personalizados, grampos e sistemas de fixação, para garantir medições precisas, o ambiente de operação da CMM é controlado em termos de temperatura e umidade. Variações nesses parâmetros podem afetar a precisão das medições, um operador treinado é responsável por configurar a CMM, programar tarefas de medição, carregar peças, executar medições e interpretar os resultados. O operador deve ter um bom entendimento das técnicas de medição e da operação da máquina, pois requerem manutenção regular e calibração para garantir que funcionem corretamente e forneçam medições precisas ao longo do tempo. As CMMs são amplamente utilizadas na indústria para verificar a conformidade de peças com as especificações, realizar controle de qualidade e gerar dados precisos para melhorar processos de fabricação. (GREFIM, SILVA e CRUZ, 2018)

**Figura 4 - Esquema simplificado de uma máquina de medir por coordenadas**



Fonte: Silva Neto (2018)

#### **2.4.2 O ambiente de operação tradicional das CMM**

O ambiente tradicional onde as máquinas de medição por coordenadas (CMM) são encontradas é geralmente um espaço dedicado a atividades de metrologia, esses ambientes são projetados para garantir condições controladas e um layout que facilite o uso eficiente das CMMs, operam em espaços dedicados a atividades de medição e inspeção tendo como objetivo evitar interferências e variações ambientais que possam afetar as medições.

O ambiente é frequentemente controlado em termos de temperatura e umidade, as variações nesses parâmetros podem afetar a precisão das medições, por isso é importante manter condições estáveis, uma boa iluminação é essencial para a inspeção visual de peças e para a configuração da máquina, a iluminação deve ser uniforme e ajustável para atender às necessidades específicas, contém uma área da CMM para a preparação das peças a serem medidas, incluindo a limpeza, fixação e posicionamento das peças nos dispositivos, como mesas de medição, grampos e dispositivos personalizados, são frequentemente usados para segurar as peças com segurança durante as medições. (ARENHART, 2007).

O ambiente tradicional de uma CMM é projetado para otimizar a precisão das medições e a eficiência das operações de inspeção. A configuração exata pode variar dependendo das necessidades da indústria, da aplicação e do tamanho da CMM, mas

o controle ambiental, a iluminação adequada e o espaço de trabalho dedicado são características comuns em ambientes de operação de CMM.

### 3 METODOLOGIA

A maneira como uma pesquisa é conduzida determina sua capacidade de investigar fatos e argumentos (KAHLMAYER-MERTENS et al., 2007). Conforme Reis (2010), a pesquisa representa a abordagem sistemática do pesquisador na busca por soluções para problemas definidos.

O estudo de caso constitui uma pesquisa empírica na qual o pesquisador não exerce controle sobre eventos e variáveis circundantes (MARTINS, 2007). Thomas, Nelson e Silverman (2012) descrevem o estudo de caso como uma pesquisa descritiva que visa aprofundar a compreensão por meio da análise minuciosa de um caso singular para extrair conhecimento aplicável a casos semelhantes.

Yin (2001) menciona que o estudo de caso emprega múltiplos métodos, como documentação, arquivos, entrevistas, observação de participantes e artefatos físicos. Neste estudo, foram utilizados documentos operacionais e administrativos, além de registros de arquivos relacionados ao processo.

A inclusão de documentos em um trabalho científico é fundamental, pois valida os argumentos apresentados, enriquecendo o conteúdo discutido (YIN, 2001). Quanto ao propósito da pesquisa, este trabalho explora aspectos de um fenômeno para permitir propostas de estudos mais detalhados, caracterizando-se como pesquisa exploratória. Em relação à abordagem, trata-se de uma pesquisa qualitativa, que terá como ambiente natural as áreas de engenharia, qualidade e produção, onde os dados serão coletados e analisados.

## 4 ESTUDO DE CASO

Segundo Albertazzi (2017), o projeto de peças e componentes de máquinas atualmente demanda um nível de precisão cada vez mais elevado em relação à forma, à posição geométrica e às tolerâncias dimensionais. Nesse contexto, os processos de fabricação estão se tornando progressivamente mais sofisticados, rápidos e produtivos, com máquinas controladas por computadores diretamente a partir do projeto original.

Para avaliar e quantificar a variabilidade dos sistemas de medição, será adotado a metodologia de Análise de Sistemas de Medição (MSA - *Measurement System Analysis*) onde se inclui todas as etapas do processo de medição, desde a coleta dos dados até a análise e interpretação dos resultados.

As condições em que o processo de medição é efetuado devem estar perfeitamente claras para que ele possa ser repetido nas mesmas condições sempre que necessário. A maneira de preparar o mensurando para a medição, o tempo que deve ser esperado antes de a medição ser efetuada, o número de vezes e as posições em que as medições são repetidas e, por fim, a maneira de aplicar o sistema de medição sobre o mensurando fazem parte do procedimento de medição. O sistema de medição utilizado, os acessórios e os padrões envolvidos são parte dos meios de medição. As condições ambientais e a presença de outras grandezas influenciadoras e demais particularidades devem ser controladas para que o processo de medição esteja bem definido (Albertazzi, 2017, p. 10).

Nesse estudo de caso, serão exploradas as características da linha de produção da Empresa Alfa, bem como os testes e comparações em cada um dos meios de medição apresentados no capítulo 2.

### 4.1 Características da Empresa Alfa, Seus Processos e Principais Produtos

O Estudo de Caso foi desenvolvido em uma empresa multinacional atuante no mercado de autopeças, denominada neste trabalho de empresa Alfa, com o intuito de manter sua confidencialidade quanto as informações da mesma.

A Empresa Alfa é caracterizada pela produção e comercialização de componentes para o setor de autopeças, sendo voltada para a usinagem dos seguintes sistemas:

- Transmissão: Segmento constituído pela fabricação de peças para o sistema de transmissão de veículos comerciais;

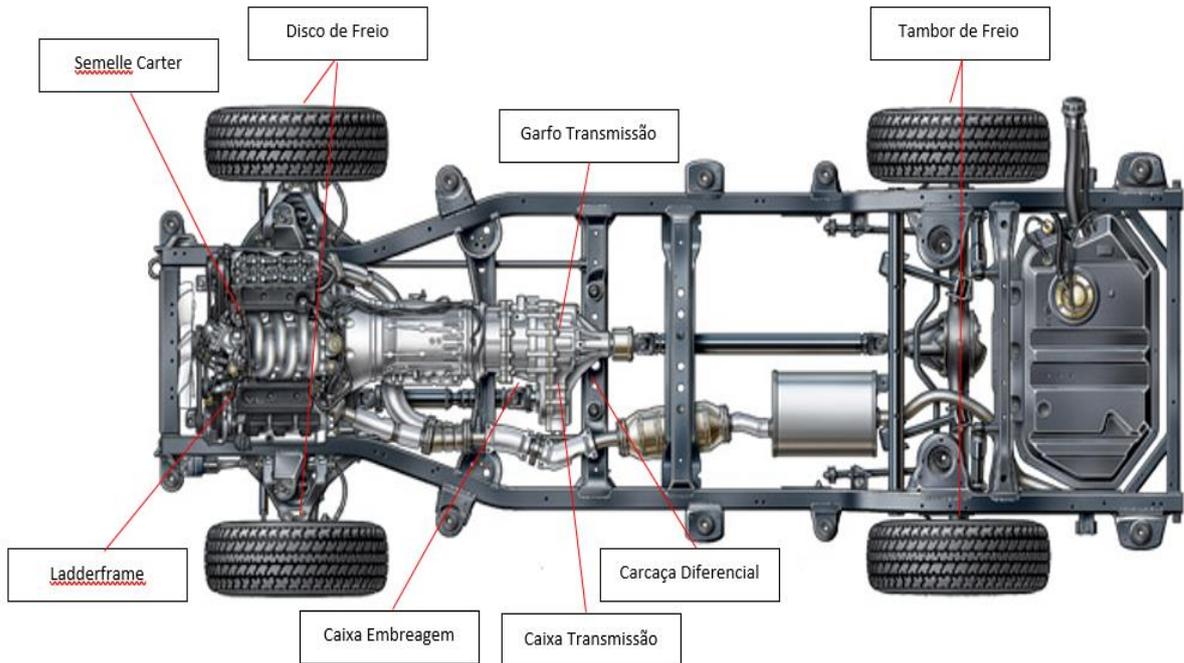
- Freios: Segmento constituído pela fabricação de peças que compõem os sistemas de frenagem;
- Motor: Segmento constituído pela fabricação de peças que compõem os motores dos veículos.

Alguns de seus principais produtos são:

- Garfos de Transmissão: componente responsável por engatar e desengatar as engrenagens na caixa de câmbio. Ele é uma peça bifurcada que se move em torno do eixo de mudança de marchas e permite que o motorista selecione as diferentes posições de marcha ao operar a alavanca de câmbio.
- Suporte do Cárter (*Ladder Frame*): peça que consiste em uma estrutura rígida e robusta que é acoplada no motor fornecendo a base para fixar o mesmo.
- Caixa do Cárter (*Semelle Carter*): caixa ou recipiente de metal, localizado na parte inferior do motor, que armazena o óleo lubrificante do motor. A principal função do cárter é garantir que haja um suprimento constante de óleo para lubrificar as peças móveis do motor, reduzindo o atrito e o desgaste.
- Carcaça do Diferencial: alojamento que abriga o conjunto de engrenagens do diferencial de um veículo. O diferencial é um componente crucial nos eixos de transmissão que permite que as rodas girem em velocidades diferentes, tornando as curvas mais fáceis de serem feitas;

A Empresa Alfa possui processos de usinagem automatizados que utilizam robôs, sistemas integrados com alta tecnologia e salas climatizadas, para redução de variações térmicas na linha de produção. A seguir são mostrados alguns dos componentes fabricados na Empresa Alfa.

**Figura 5 - Produtos fabricados na empresa Alfa, local de montagem no veículo**

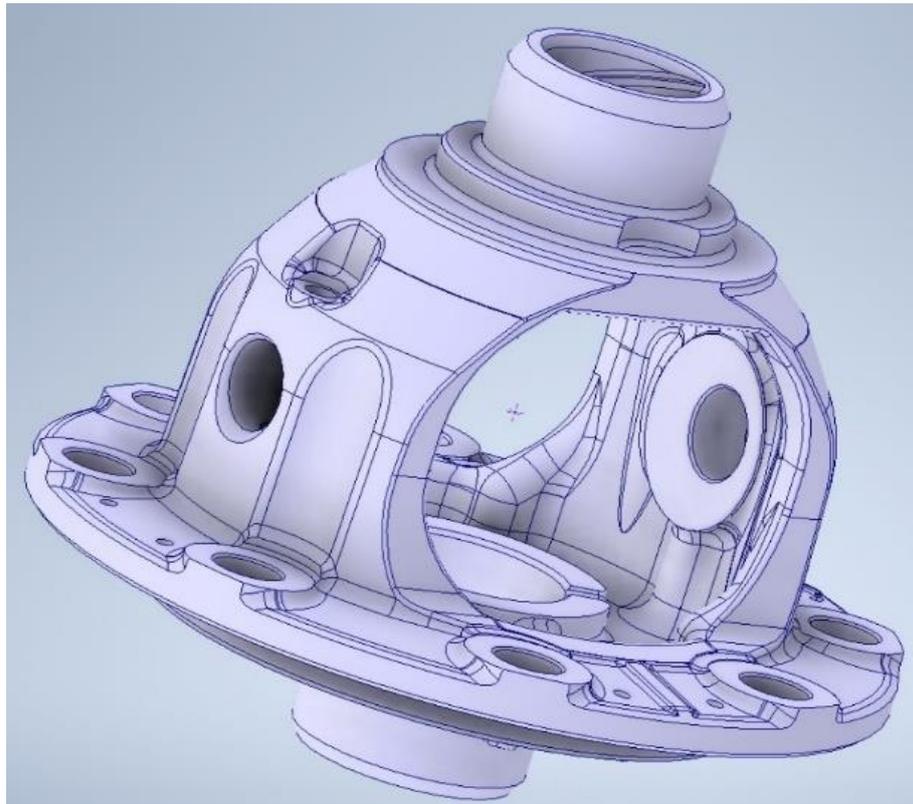


**Fonte: Elaborada pelo Autor (2023)**

Na imagem anterior, as peças citadas (Caixa do Cárter, Discos de Freio, Garfo de Transmissão, Tambor de Freio, Suporte do Cárter, Caixa da Embreagem, Caixa de Transmissão, Carcaça do Diferencial) foram identificadas para melhor visualização de seu local de montagem a fim de facilitar o reconhecimento na aplicação do veículo.

Neste estudo de caso será abordado o controle dimensional do componente Carcaça do Diferencial, em linha dedicada com Gage igualmente dedicado e controle por CMM.

A seguir, é apresentada a figura 6 de uma Carcaça do Diferencial semelhante ao produto usinado na linha de produção da Empresa Alfa.

**Figura 6 - Carcaça do Diferencial 3D**

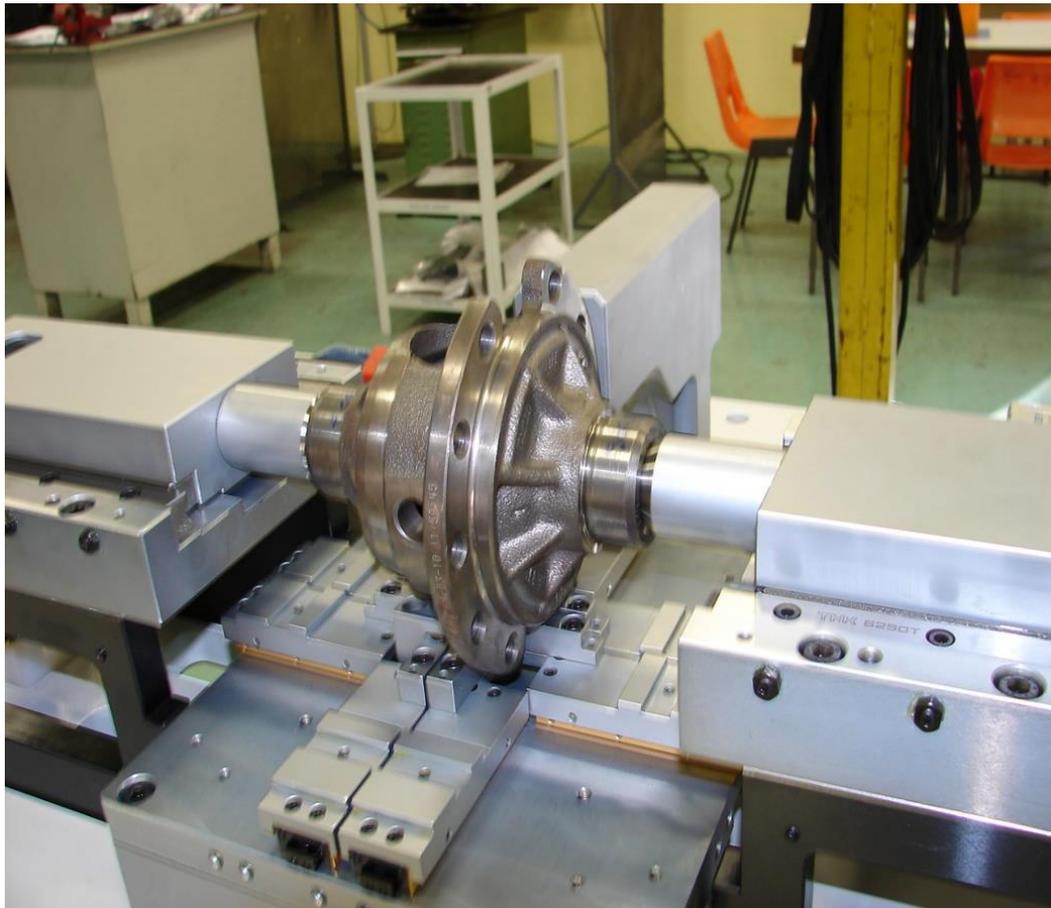
Fonte: Elaborada pelos Autores (2023)

#### **4.2 O uso tradicional de Gages Dedicados na Empresa Alfa – Linha de Produção da Carcaça do Diferencial**

Para Lira (2015), nenhum método de fabricação ou processo de usinagem pode atingir precisamente as dimensões pré-determinadas para uma peça. Se soubermos a margem de erro tolerável, podemos escolher os métodos de fabricação e o controle das dimensões de forma a reduzir custos e aumentar a produtividade. E ainda segundo ele, para realizar esse controle, utilizamos instrumentos de medição, os quais também são calibrados por outros instrumentos chamados padrões. No âmbito da mecânica, estamos principalmente interessados em medir dimensões lineares e angulares. No entanto, diversos outros fatores podem afetar as dimensões, como força, temperatura, pressão, massa e até mesmo o tempo.

Na figura 7, a seguir, é apresentado um Gage Dedicado para controle da Carcaça do Diferencial semelhante ao utilizado para estudo na Empresa Alfa.

**Figura 7 - Gage Dedicado para controle de Carcaça do Diferencial**



**Fonte: Empresa Alfa (2021)**

Com base na proposta deste estudo de caso, será explorado a seguir o processo de utilização de gages dedicados na empresa Alfa, na linha de produção da Carcaça do Diferencial.

#### **4.2.1 Processo de Utilização**

São descritas a seguir as etapas do processo que utiliza Gage dedicado na linha da Carcaça do Diferencial da empresa Alfa.

- **Projeto de Gages:** Primeiramente o processo se inicia com o projeto e fabricação dos gages dedicados, o que envolve a criação de berços com pontos de apoio conforme indicação dos desenhos de produto e os pontos de medição específicos para as características das peças que serão fabricadas. Os gages são projetados de forma precisa a fim de que as peças obtenham um encaixe

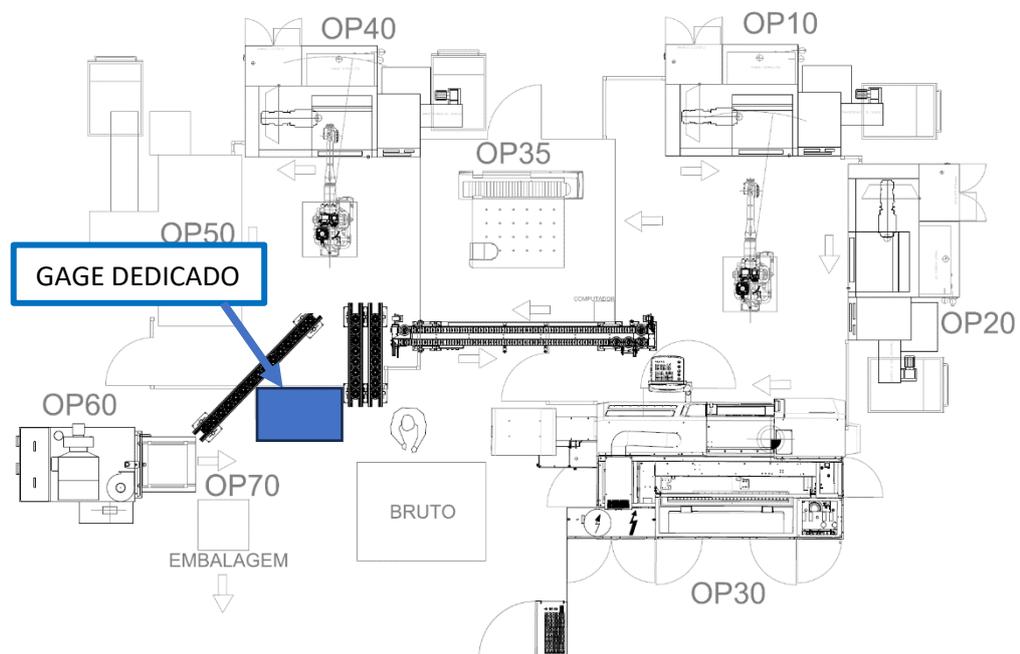
perfeito e permitiam medições exatas das características críticas.

- **Calibração e Verificação:** Antes de serem utilizados, os gages são calibrados e verificados para garantir que estejam em conformidade com as especificações. A calibração é um processo importante para garantir que os gages forneçam medições precisas.
- **Setup e Produção:** Os gages são posicionados de forma que as peças usinadas possam ser verificadas quanto às dimensões críticas à medida que são fabricadas. Durante a configuração (*setup*) da linha de produção da Carcaça do Diferencial, os operadores realizam as medições do produto no referido Gage e ajustam os parâmetros da máquina para o início da produção em série.
- **Verificação Contínua:** À medida que as peças são usinadas, elas são regularmente verificadas pelo operador onde requer também uma calibração do Gage previamente, sendo nesta linha de produção em uma frequência a cada hora.
- **Aprovação ou Rejeição:** Com base nas medições obtidas usando os gages dedicados, as peças são aprovadas ou rejeitadas. Caso a peça não atender às tolerâncias especificadas, ela é geralmente considerada refugo e rejeitada, podendo, em alguns casos, ser retrabalhada ou descartada.
- **Feedback para o Processo de Usinagem:** Os resultados da medição usando os gages na linha de produção da Carcaça do Diferencial fornecem feedback para o processo de usinagem permitindo que os operadores façam ajustes no processo e na máquina, como alterações de ferramentas, velocidade de corte, ou outros parâmetros, garantindo que as próximas peças sejam produzidas dentro das especificações.
- **Documentação e Rastreabilidade:** Todos os resultados das medições obtidos com os gages dedicados são armazenados em seu sistema de banco de dados a fim de fornecer rastreabilidade e registro de qualidade, garantindo que as peças atendam a padrões de qualidade e as regulamentações do cliente quanto ao arquivamento temporário dos registros de controle do produto.
- **Manutenção Preventiva:** Os gages, assim como outros dispositivos, requerem manutenção periódica para garantir seu desempenho de forma adequada e

confiável incluindo limpeza, recalibração e em alguns casos, a substituição de peças desgastadas ou em fim de vida útil que podem comprometer a estabilidade e repetibilidade da medição.

Abaixo, na figura 8, segue uma representação do layout da linha de produção da Carcaça do Diferencial da Empresa Alfa, indicando os locais de cada operação e da localização do Gage Dedicado.

**Figura 8 - Layout da linha de produção da Carcaça do Diferencial**



**Fonte: Elaborada pelos Autores (2023)**

Os gages sempre desempenharam um papel crítico no controle de qualidade e na fabricação de componentes de autopeças na empresa Alfa. Eles auxiliam na garantia do atendimento das especificações de *design* e qualidade do produto e resultam em componentes finais seguros e confiáveis.

#### **4.2.2 Vantagens**

A utilização dos gages dedicados na Empresa Alfa possuem várias vantagens significativas conforme descrito a seguir:

- **Exatidão e Precisão:** Os gages dedicados são projetados especificamente para medir características particulares da peça usinada na linha da Carcaça do Diferencial, resultando em medições precisas e exatas, garantindo que as peças atendam às tolerâncias especificadas.
- **Conformidade com Normas:** Os gages dedicados são construídos e calibrados de acordo com as normas da indústria de autopeças garantindo que as medições do produto estejam em conformidade com as regulamentações e especificações de desenho, contribuindo para a qualidade e segurança do produto final.
- **Produção Eficiente:** Os gages dedicados permitem medições rápidas e eficientes ajudando a manter a produção contínua, sem atrasos significativos devido a verificações de qualidade que podem atrasar o processo.
- **Detecção Prévia de Problemas:** A capacidade de verificar as peças durante o processo de usinagem da Carcaça do Diferencial na linha da Empresa Alfa, permite a detecção prévia de problemas e, caso uma peça não atenda às especificações, ações corretivas podem ser tomadas de maneira imediata, economizando tempo e recursos.

Desta forma, verifica-se que a utilização de gages dedicados desempenha um papel fundamental na garantia da qualidade, eficiência e segurança na produção de componentes usinados na Empresa Alfa.

#### **4.2.3 Desvantagens**

Embora os gages dedicados ofereçam várias vantagens no controle de qualidade de peças usinadas na linha de produção da Carcaça do Diferencial da Empresa Alfa, também existem algumas desvantagens que estão associadas à sua utilização:

- **Especialização Limitada:** Gages dedicados são projetados para medições específicas e características da peça usinada na linha de produção da Carcaça do Diferencial, significando que não são facilmente adaptáveis para medições

de peças de outras linhas com outras características. Portanto, a especialização pode limitar sua flexibilidade.

- **Custo Inicial Elevado:** A fabricação e calibração de gages dedicados podem ter um alto custo podendo representar um investimento significativo, especialmente para peças com dimensões ou características complexas que exigem gages altamente específicos.
- **Tempo de Fabricação (*lead time*):** O projeto e a fabricação de gages dedicados sob medida podem levar tempo, o que pode atrasar a implementação da produção ou do controle de qualidade.
- **Manutenções Necessária:** Gages dedicados requerem manutenção regular para garantir sua precisão ao longo do tempo. Isso inclui calibração, limpeza e possíveis reparos. A manutenção pode gerar custos adicionais.
- **Desatualização:** À medida que as especificações de produtos e processos mudam, os gages dedicados podem se tornar obsoletos e não mais adequados para a produção podendo resultar em custos adicionais para atualização ou substituição.
- **Limitações de Medição:** Gages dedicados podem não ser adequados para medir características muito complexas ou peças com geometrias não convencionais.
- **Falta de Flexibilidade:** Devido à sua natureza específica, os gages dedicados podem não ser adequados para adaptação a mudanças nos processos de produção ou para medições de novas peças. Isso pode dificultar a incorporação de inovações ou acomodação de novas exigências do mercado.
- **Calibração periódica:** A utilização de gages dedicados requer uma calibração periódica pelo operador devido a variações no processo tais como temperatura ambiente na linha de produção, partículas em suspensão provenientes também do ambiente fabril e possíveis variações no próprio Gage provenientes de sua confecção projetual.
- **Limitações de Escala e Volume de Produção:** Para produções em grande escala, a utilização de gages dedicados para verificar todas as peças pode ser inviável devido à demanda de tempo. Nesses casos, pode ser necessário implementar sistemas automatizados de medição.

- Perda de Produtividade: A verificação de peças com gages dedicados pode resultar em tempos de inatividade, à medida que as peças são retiradas da linha de produção para medição podendo afetar a eficiência e a produtividade.

É importante notar que as desvantagens na utilização dos gages dedicados podem variar dependendo da aplicação, do tipo de peça, das especificações e dos processos de produção.

#### **4.2.4 Custos**

Segundo Lira (2015), em uma análise de despesas, são considerados fatores como o montante inicial de investimento, o espaço de laboratório necessário, a depreciação, o tempo de medição e processamento, os custos de manutenção, a elaboração de programas, e a utilização efetiva da máquina (quantidade de peças produzidas), entre outros aspectos.

Para o estudo foram considerados a média de três orçamentos de diferentes fornecedores da Empresa Alfa, fabricantes de gages dedicados. A partir das análises realizadas, são ilustrados no Quadro 1 os resultados dos custos para a utilização de Gage Dedicado na linha de usinagem da Carcaça do Diferencial. Nessa tabela do Quadro 1, constam primeiramente os custos de implementação como aquisição do equipamento, custos com automação (que neste caso foi nulo, pois não é aplicável ao processo), infraestrutura correspondente as instalações e adaptações de mobiliário e *layout*.

Também nesta tabela são apresentados os custos anuais referentes a manutenção, sendo eles mão de obra, refugos (*scrap*) devido à incerteza de medição do equipamento, calibração mais manutenções preventivas e corretivas, e por último o valor de depreciação do equipamento.

Ao final é apresentado o valor total para a aplicação do Gage Dedicado na linha de produção da Carcaça do Diferencial na Empresa Alfa.

**Quadro 1 - Custos de Implementação e utilização de Gage Dedicado**

GAGE DEDICADO	
DESCRIÇÃO - IMPLEMENTAÇÃO	CUSTO
AQUISIÇÃO - GAGE DEDICADO	-R\$ 625.697,00
AUTOMAÇÃO	R\$ -
INFRAESTRUTURA	-R\$ 25.000,00
<b>INVESTIMENTO</b>	<b>-R\$ 650.697,00</b>
DESCRIÇÃO - ANUAL	
MÃO OBRA	-R\$ 126.000,00
SCRAP POR INCERTEZA MEDIÇÃO	-R\$ 357.000,00
MANUTENÇÃO + CALIBRAÇÃO	-R\$ 4.900,00
DEPRECIÇÃO	-R\$ 62.569,70
<b>CUSTO ANUAL</b>	<b>-R\$ 550.469,70</b>
<b>TOTAL</b>	<b>-R\$ 1.201.166,70</b>

Fonte: Elaborada pelos Autores (2023)

#### 4.2.5 Resultados

A utilização de Gages dedicados na Empresa Alfa para o controle de peças na linha de produção da Carcaça do Diferencial, são úteis para medir peças de maneira precisa e eficiente, garantindo que atendam aos padrões de qualidade. No entanto, eles são especializados e não podem medir diferentes tipos de peças. Além disso, custam caro para serem feitos e mantidos, e podem se tornar obsoletos com o tempo. Eles também podem causar atrasos na produção. A pesquisa constante e a avaliação das necessidades de qualidade são essenciais para melhorar o uso desses gages na produção.

Desta forma, a decisão de usá-los depende das necessidades específicas da empresa; em alguns casos, combinar gages dedicados com tecnologias mais flexíveis pode ser uma melhor solução.

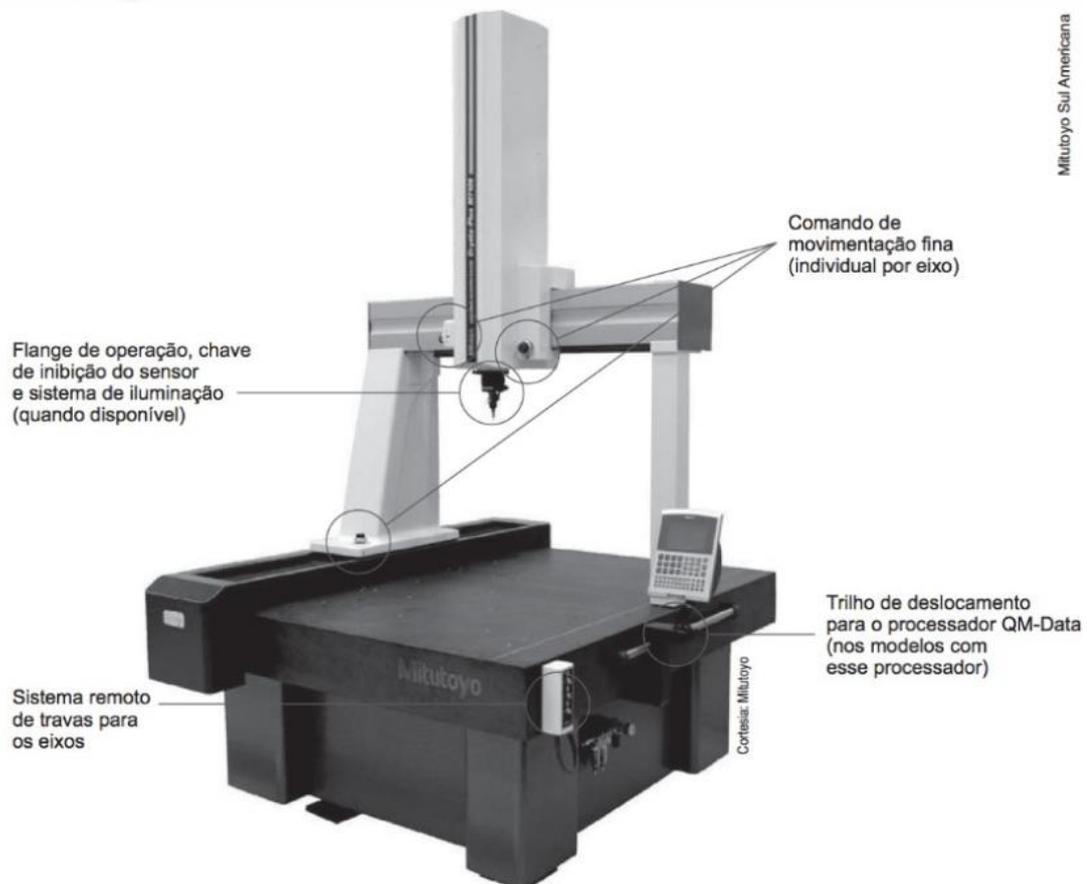
### 4.3 Proposta de Aplicação de CMM em substituição dos Gages Dedicados

A partir do objetivo proposto deste trabalho, o estudo de caso se propõe analisar a substituição de Gage Dedicado por CMM. Desta forma, descreve-se a seguir o processo de utilização de CMM na Empresa Alfa, na linha de produção da Carcaça do Diferencial.

As MMC trouxeram muitos benefícios para o setor produtivo, por serem muito versáteis e aplicáveis à maioria das formas e modelos de peças. Para a realização das medições basta programar a operação em função das características da peça (Silva Neto, 2018, p. 144).

Na imagem 9, a seguir, é mostrada uma CMM similar a utilizada na Empresa Alfa onde foi realizado o estudo de caso.

**Figura 9 - CMM (Máquina de Medição por Coordenada)**



Fonte: Catálogo Mitutoyo Sul Americana (2017)

Para visualização das etapas de aplicação da CMM na linha de produção da Carcaça do Diferencial, a seguir é apresentado, no quadro 2, um cronograma de implementação, desde o início da análise de custo até a fase final de produção.

**Quadro 2 - Cronograma de Implementação**

CRONOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DE CMM												
	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22
ANÁLISE CUSTO												
ORÇAMENTO												
APROVAÇÃO DIREÇÃO												
AQUISIÇÃO EQUIPAMENTO												
MONTAGEM / INFRA ESTRUTURA												
ESTUDO R&R												
APLICAÇÃO												
TREINAMENTO												
PRODUÇÃO												

Fonte: Elaborada pelos Autores (2022)

#### 4.3.1 Processo de Utilização

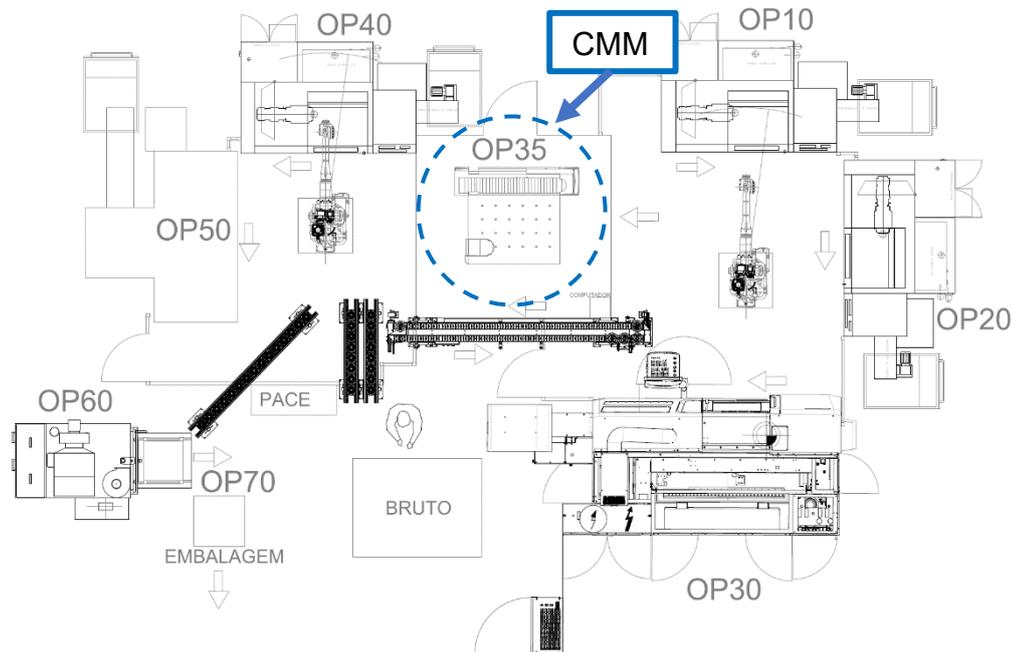
A utilização de uma CMM (*Coordinate Measuring Machine*) instalada na Empresa Alfa, envolve vários processos. Abaixo, serão descritas as etapas de como a CMM é utilizada na linha de produção da Carcaça do Diferencial:

- **Configuração da CMM na Linha de Produção:** A CMM é instalada em uma posição estratégica na linha de produção automatizada, onde ela pode acessar as peças que serão usinadas e inspecionadas. A máquina é calibrada e ajustada para garantir que as medições sejam precisas.
- **Coleta de Peças para Inspeção:** Conforme as peças usinadas são produzidas na linha de montagem automática, elas são direcionadas para a área de inspeção. Isso é feito por meio de transportadores automáticos e robô.
- **Fixação das Peças na CMM:** As peças são fixadas na mesa de medição da CMM, usando fixadores ou dispositivos de fixação. Isso garante que as peças estejam posicionadas de forma estável e precisa para a medição.
- **Início da Inspeção:** A CMM inicia o processo de medição. Isso é feito usando uma sonda de contato que toca fisicamente a peça com um apalpador, que efetua a medição por toque e *scanning*.

- **Medição e Coleta de Dados:** A CMM mede diversas características da peça, como dimensões, tolerâncias, ângulos, formas e posições, coletando dados detalhados sobre a geometria da peça.
- **Comparação com Especificações do Projeto:** Os dados medidos pela CMM são comparados com as especificações do projeto e as tolerâncias de qualidade. Qualquer desvio é identificado e registrado.
- **Tomada de Decisões:** Com base nas medições, a CMM toma decisões automaticamente. Se a peça atender às especificações, ela será aprovada e direcionada para a próxima etapa da produção. Se houver desvios significativos, a peça será marcada para retrabalho ou descarte.
- **Geração de Relatórios e Documentação:** A CMM gera relatórios detalhados das medições realizadas, que são armazenados e documentados para fins de controle de qualidade e rastreabilidade, sendo essenciais para auditorias e garantia de qualidade.
- **Feedback para o Processo de Produção:** Com base nas medições da CMM, o sistema de produção automatizada pode ser ajustado para otimizar a usinagem e garantir que as peças atendam às especificações.
- **Controle Contínuo de Qualidade:** A CMM continua a inspecionar peças à medida que são produzidas na linha, garantindo um controle de qualidade contínuo e identificando qualquer variação do processo.

A seguir, na figura 10, tem-se uma representação do *layout* da linha de produção da Carcaça do Diferencial da Empresa Alfa, indicando os locais de cada operação e dos meios de medição estudados.

**Figura 10 - Layout da linha de produção**



**Fonte: Elaborada pelos Autores (2023)**

Essa integração da CMM na linha de produção da Carcaça do Diferencial ajuda a garantir que os componentes usinados atendam às especificações de qualidade e que qualquer desvio seja identificado e corrigido em tempo real. Isso contribui para a eficiência da produção e a entrega de produtos de alta qualidade aos clientes.

#### **4.3.2 Vantagens**

A utilização de uma CMM instalada na linha de produção da Carcaça do Diferencial oferece várias vantagens significativas, conforme descritas abaixo:

- **Precisão Superior:** As CMMs são conhecidas por sua alta precisão de medição. Isso garante que as dimensões do componente usinado sejam medidas com grande exatidão, ajudando a cumprir tolerâncias rigorosas.
- **Controle da Qualidade Contínuo:** Com a CMM integrada na linha de produção, é possível realizar verificações de qualidade contínuas, garantindo que todas as peças atendam às especificações, sem a necessidade de retirar amostras aleatórias.
- **Deteção de Desvios em Tempo Real:** A CMM pode identificar desvios nas dimensões da peça à medida que são produzidas, permitindo correções

imediatas no processo de usinagem para evitar a produção de peças não conformes.

- **Maior Eficiência na Produção:** A inspeção automatizada com CMM reduz a necessidade de inspeções manuais demoradas, o que resulta em maior eficiência na linha de produção.
- **Redução de Retrabalho:** Ao detectar problemas de qualidade em tempo real, a CMM ajuda a minimizar a produção de peças defeituosas, reduzindo o retrabalho e economizando recursos.
- **Documentação Detalhada:** A CMM gera relatórios detalhados de medição que fornecem documentação rigorosa das inspeções de qualidade, contribuindo para rastreabilidade e registros precisos.
- **Melhoria da Satisfação do Cliente:** A utilização da CMM garante que os produtos finais atendam a padrões de qualidade elevados, o que aumenta a satisfação do cliente e a reputação da empresa.
- **Ajustes de Processo Oportunos:** Com base nas medições da CMM, é possível realizar ajustes imediatos no processo de produção, otimizando a qualidade e a eficiência.
- **Maior Flexibilidade de Design:** A capacidade de medir com precisão peças complexas permite maior flexibilidade no design de componentes, possibilitando soluções mais inovadoras.
- **Redução de Custos a Longo Prazo:** Embora a instalação de uma CMM possa ser um investimento inicial alto, a redução de custos relacionados a retrabalho, desperdício de material e inspeções manuais compensa esse custo a longo prazo.

A utilização de uma CMM na linha de produção da Carcaça do Diferencial da Empresa Alfa oferece vantagens significativas, melhorando a qualidade, a eficiência e a satisfação do cliente, ao mesmo tempo que reduz os custos operacionais e ajuda a garantir a conformidade do produto de acordo com suas especificações de projeto.

### 4.3.3 Desvantagens

Embora a CMM (*Coordinate Measuring Machine*) ofereça várias vantagens na indústria Alfa, sua integração na linha de produção da Carcaça do Diferencial também pode apresentar algumas desvantagens conforme será descrito abaixo:

- **Custo Inicial Elevado:** A aquisição e instalação de uma CMM pode ser custosa, especialmente quando se consideram as máquinas de alta precisão e automação necessárias para a integração na linha de produção.
- **Espaço Necessário:** A CMM e seus sistemas de automação requerem espaço significativo na linha de produção, o que pode ser uma limitação em ambientes de produção com espaço restrito.
- **Complexidade:** A operação e manutenção de uma CMM podem ser complexas e exigem treinamento especializado para operadores, bem como pessoal técnico para manutenção e calibração.
- **Custos Operacionais:** Além do custo inicial, os custos operacionais, como manutenção, calibração e treinamento, podem aumentar o custo total de propriedade.
- **Integração Complexa:** A integração de uma CMM em uma linha de produção automática pode ser complexa e exigir coordenação entre diferentes sistemas de automação, software e máquinas.

Foi observado que as principais desvantagens na utilização de CMM estão relacionadas aos custos de implementação e à necessidade de mão de obra especializada.

### 4.3.4 Custos

Seguindo a mesma sistemática descrita no item 4.2.5, a seguir serão apresentados os custos do investimento para implementação de CMM. Na tabela ilustrada no quadro 3, apresentada a seguir, são mostrados os custos referentes a aquisição do equipamento, automação que, diferentemente do Gage Dedicado, se faz necessário sua utilização para otimização do processo e infraestrutura.

Também são apresentados os custos anuais referentes a manutenção, sendo eles mão de obra (que neste caso foi nulo, pois não é aplicável ao processo automático), refugos (*scrap*) devido à incerteza de medição do equipamento, calibração e manutenções (preventivas e corretivas) e depreciação do equipamento. E, finalmente, o valor total para a aplicação da CMM na linha de produção da Carcaça do Diferencial na Empresa Alfa.

**Quadro 3 - Custos de Implementação e utilização de CMM**

CMM	
DESCRIÇÃO - IMPLEMENTAÇÃO	CUSTO
AQUISIÇÃO-CMM	-R\$ 750.000,00
AUTOMAÇÃO	-R\$ 250.000,00
INFRAESTRUTURA	-R\$ 80.000,00
<b>INVESTIMENTO</b>	<b>-R\$ 1.080.000,00</b>
DESCRIÇÃO - CUSTOS ANUAIS	
MÃO OBRA	R\$ -
SCRAP POR INCERTEZA MEDIÇÃO	R\$ -
MANUTENÇÃO + CALIBRAÇÃO	-R\$ 7.900,00
DEPRECIÇÃO	-R\$ 75.000,00
<b>CUSTO ANUAL</b>	<b>-R\$ 82.900,00</b>
<b>TOTAL</b>	<b>-R\$ 1.162.900,00</b>

Fonte: Elaborada pelos Autores (2023)

#### 4.3.5 Resultados

Ao considerar as vantagens e desvantagens da utilização de uma CMM na linha de produção da Carcaça do Diferencial da Empresa Alfa, observa-se que a decisão de implementar essa tecnologia deve ser uma ponderação cuidadosa entre os benefícios e desafios. A CMM oferece precisão elevada, versatilidade e eficiência operacional, sendo especialmente valiosa em setores onde a qualidade é primordial. No entanto, os custos iniciais significativos, a complexidade operacional, o tempo de medição e os requisitos específicos de ambiente podem representar desafios a serem considerados.

#### 4.4 Características do teste efetuado

Para analisarmos a viabilidade do uso de uma CMM em substituição ao Gage Dedicado, além de custos apresentados, foi realizado um estudo de R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade) para comparar os resultados dos dois meios de medição, neste caso CMM com carga e descarga automática e o Gage Dedicado (Dispositivo Eletrônico multi-cotas) a fim de avaliarmos a precisão e a confiabilidade desses métodos de medição.

Medições realizadas em ambientes de produção industrial ocorrem sob condições bem menos controladas do que as existentes na ocasião da calibração do sistema de medição em um laboratório de metrologia. Instabilidades ambientais, diferenças entre operadores, características do mensurando e outros aspectos da produção são fortes fatores de influência que podem levar à incerteza do processo de medição para níveis muito acima dos encontrados nas condições de calibração (Albertazzi, 2017, p. 344).

Para a realização da análise comparativa entre os dois métodos de controle, foi separado um conjunto de peças representativas correspondente ao que normalmente é medido na linha de produção da Carcaça do Diferencial da Empresa Alfa.

Posteriormente foram escolhidos três operadores, que já conhecem os métodos, para realizarem as medições com esses dispositivos, pois é necessário que tenham familiaridade com os métodos de medição a fim de se evitar possíveis variações no processo de análise. A partir desse preparo foram realizadas as medições para o estudo, e os resultados obtidos serão apresentados a seguir.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados os resultados dos testes realizados no capítulo anterior e serão apresentadas as comparações dos gages dedicados com a CMM, as vantagens e desvantagens a partir dos resultados obtidos e os principais ganhos obtidos na substituição dos gages dedicados pela CMM.

Conforme apresentado anteriormente, a seguir serão discutidos os resultados dos estudos de MSA (*Measurement System Analysis*) a fim de comparar a variabilidade dos dois métodos de medição.

### 5.1 Comparação de Gages Dedicados com a CMM

#### 5.1.1 Comparação dos meios de medição através de MSA

A seguir é apresentado o quadro 4, com o recorte dos resultados dos estudos de MSA de ambos os métodos. Esses valores podem ser mais bem apreciados nas planilhas detalhadas nos anexos 1 e 2.

**Quadro 4 - Resultados de R&R dos meios de medição**

	Gage Dedicado	CMM
<b>Variação Total:</b>	10,19%	2,64%
<b>Variação pela Tolerância:</b>	14,18%	6,85%

Fonte: Elaborada pelos Autores (2023)

Conforme o quadro acima pode-se verificar os seguintes resultados:

CMM (*Coordinate Measuring Machine*):

- A Variação Total de 2,64% indica que, no geral, a medição com a CMM obteve uma baixa variação em relação às medições totais realizadas.
- A Variação pela Tolerância de 6,85% mostra que a maior parte dessa variação está dentro das tolerâncias especificadas, o que é uma boa

indicação de que a CMM está fornecendo medições precisas em relação às especificações.

Gage Dedicado (Dispositivo Eletrônico multi-cotas):

- A Variação Total de 10,19% indica que a medição com o Gage Dedicado tem uma variação total mais alta em relação às medições totais realizadas, em comparação com a CMM.
- A Variação pela Tolerância de 14,18% mostra que a maior parte dessa variação está dentro das tolerâncias especificadas, mas é mais alta em comparação com a CMM.

Outro dado relevante desta análise, que deve ser levado em consideração, é o resultado final de R&R de cada meio estudado, relacionado ao manual de MSA quanto aos parâmetros aceitáveis. O Resultado da CMM fica abaixo de 10%, ou seja, considerado aprovado pelo parâmetro do manual. No entanto, o resultado de R&R do Gage Dedicado, em ambos os critérios, ficou acima de 10%, considerado aceitável pelo manual, mas com a necessidade de melhoria, ou seja, apresentando uma desvantagem em relação a CMM. Na prática, isso implica em um maior número de peças refugadas (*scrap*), gerando um maior desperdício no processo de produção.

Com base nesses resultados revisados, a CMM demonstrou uma performance superior em termos de precisão e variação em relação ao Gage Dedicado. A Variação Total e a Variação pela Tolerância são ambas mais baixas para a CMM, indicando medições mais consistentes e precisas.

### **5.1.2 Comparação dos meios de medição através de análise de custos**

A seguir será apresentado o quadro 5 com os custos de implementação, custos anuais e análises de viabilidade. Para a análise comparativa, além das informações já apresentadas anteriormente, foram acrescentados os valores referentes a vida útil da linha, que possui cinco anos de duração para a produção da Carcaça do Diferencial da Empresa Alfa. Estas informações incluem a depreciação e o retorno anual do investimento para cada meio de medição.

**Quadro 5 - Comparação dos custos de implementação e utilização de Gage Dedicado e CMM**

GAGE DEDICADO		CMM	
DESCRIÇÃO - IMPLEMENTAÇÃO	CUSTO	DESCRIÇÃO - IMPLEMENTAÇÃO	CUSTO
AQUISIÇÃO - GAGE DEDICADO	-R\$ 625.697,00	AQUISIÇÃO-CMM	-R\$ 750.000,00
AUTOMAÇÃO	R\$ -	AUTOMAÇÃO	-R\$ 250.000,00
INFRAESTRUTURA	-R\$ 25.000,00	INFRAESTRUTURA	-R\$ 80.000,00
INVESTIMENTO	-R\$ 650.697,00	INVESTIMENTO	-R\$ 1.080.000,00
DESCRIÇÃO - ANUAL		DESCRIÇÃO - CUSTOS ANUAIS	
MÃO OBRA	-R\$ 126.000,00	MÃO OBRA	R\$ -
SCRAP POR INCERTEZA MEDIÇÃO	-R\$ 357.000,00	SCRAP POR INCERTEZA MEDIÇÃO	R\$ -
MANUTENÇÃO + CALIBRAÇÃO	-R\$ 4.900,00	MANUTENÇÃO + CALIBRAÇÃO	-R\$ 7.900,00
DEPRECIÇÃO	-R\$ 62.569,70	DEPRECIÇÃO	-R\$ 75.000,00
CUSTO ANUAL	-R\$ 550.469,70	CUSTO ANUAL	-R\$ 82.900,00
TOTAL	-R\$ 1.201.166,70	TOTAL	-R\$ 1.162.900,00
EFICIENCIA OPERACIONAL	R\$ 826.200,00	EFICIENCIA OPERACIONAL	R\$ 826.200,00
RETORNO 1º ANO	-R\$ 374.966,70	RETORNO 1º ANO	-R\$ 336.700,00
RETORNO 2º ANO	-R\$ 99.236,40	RETORNO 2º ANO	R\$ 406.600,00
RETORNO 3º ANO	R\$ 176.493,90	RETORNO 3º ANO	R\$ 1.149.900,00
RETORNO 4º ANO	R\$ 452.224,20	RETORNO 4º ANO	R\$ 1.893.200,00
RETORNO 5º ANO	R\$ 727.954,50	RETORNO 5º ANO	R\$ 2.636.500,00

Fonte: Elaborada pelos Autores (2023)

Conforme o quadro acima, pode-se verificar os seguintes resultados:

Gage Dedicado (Dispositivo Eletrônico multi-cotas):

- Menor investimento inicial e retorno positivo somente a partir do terceiro ano.
- Custos operacionais anuais mais altos.
- Total de investimentos mais os custos anuais resultam em um custo maior.
- Valor de retorno mais baixo ao final do projeto.

CMM (*Coordinate Measuring Machine*):

- Investimento inicial significativamente maior e retorno positivo considerável já no segundo ano.
- Custos operacionais anuais mais baixos.
- Total de investimentos mais os custos anuais resultam em um custo menor.
- Valor de retorno significativamente mais alto ao final do projeto.

Com base nos resultados acima, ambas as opções têm custos iniciais significativos, sendo a CMM substancialmente mais cara. Em contrapartida, o Gage Dedicado tem custo de implementação menor, chegando a ser 39,8% mais econômico, consequência da ausência de automação e a necessidade de uma infraestrutura mais simples. Como se pode ver, indicado em vermelho, no quadro acima, o custo inicial maior da CMM se deve à necessidade de automação e infraestrutura mais complexa.

Com relação aos custos anuais, a CMM se mostra muito mais vantajosa com menores custos, gerando uma economia de 84,9% em relação ao Gage Dedicado. Isso se deve ao fato de que o Gage Dedicado possui um gasto elevado com a utilização de mão de obra necessária para o processo, e a produção de refugos (*scraps*), devido a maior variabilidade nas medições, demonstradas na análise comparativa de MSA. Somando os investimentos iniciais mais os custos anuais, a diferença entre os dois meios de medição se mostra pouco relevante sendo 3,3% maior para o Gage Dedicado.

Em relação a comparação do retorno de investimento entre os dois métodos, a CMM apresenta um retorno mais rápido, atingindo números positivos já no segundo ano, demonstrando um ganho substancial de 72,4% em relação ao Gage Dedicado no quinto ano de produção.

## **5.2 Vantagens e desvantagens a partir dos resultados obtidos**

A partir das análises comparativas realizadas e dos dados obtidos, pôde-se observar como vantagens em utilizar a CMM, o fato de se necessitar de um menor investimento anual, devido a automação do processo, que torna desnecessários custos com mão de obra adicional. Outra vantagem é a minimização de desperdícios com a geração de refugos devido a melhor exatidão e repetibilidade do equipamento. E finalmente, a vantagem de um retorno de investimento mais rápido bem como o retorno considerável ao final do projeto.

Como desvantagem, observou-se um custo inicial de implementação mais elevado e a necessidade de um espaço físico maior para alocação, dificultando sua aplicação em linhas de produção pequenas.

### **5.3 Os principais ganhos obtidos na substituição do Gage Dedicado por CMM**

#### **5.3.1 Ganhos em Produtividade e Qualidade**

Um dos maiores ganhos obtidos na substituição do Gage Dedicado pela CMM é a minimização de refugos gerados por variações do equipamento devido à incerteza de medição. Esse ganho reflete em menos retrabalhos gerados, menos interrupções na produção e o aumento da qualidade no produto acabado, resultando em uma maior satisfação do cliente.

#### **5.3.2 Ganhos em Flexibilidade**

A CMM, além de mais precisa nas medições de peças complexas como a Carcaça do Diferencial produzida na Empresa Alfa, mostrou-se muito mais flexível quando houve a necessidade de acrescentar novas características para controle do produto e adequações na rotina de medição solicitadas pelo cliente. A flexibilidade da máquina permitiu correções rápidas no programa de medição, o que seria muito mais dificultoso em se tratando do Gage Dedicado, pois seria necessário o acionamento do fabricante para a realização dos ajustes gerando mais custos não previstos no desenvolvimento do projeto.

Outro ganho em flexibilidade se observa quando existe a necessidade de utilização da CMM para controle de outros produtos, sendo necessário apenas a elaboração de outro programa de medição, e de um dispositivo de apoio para o produto. Feito isso, o equipamento estava pronto para ser utilizado novamente, minimizando tempo de máquina ociosa. Isso mostra que a CMM é um equipamento altamente adaptável e flexível para diferentes aplicações.

#### **5.3.3 Ganhos em Custos de Fabricação e Manutenção dos Gages Dedicados**

Por ser um equipamento que possui normas e diretrizes industriais para sua fabricação, geralmente as CMM's são equipamentos com variedades de modelo

existentes no mercado a pronta entrega. Já os gages dedicados, por serem equipamentos projetados para cada tipo de produto específico, possuem um *lead time* (prazo e entrega) mais elevado, estimado em 180 dias, o que pode gerar atrasos na fase de desenvolvimento quando necessária uma rápida aplicação do projeto.

Ganhos relacionados à manutenção também são consideráveis, pois os gages dedicados necessitam de intervenções regulares para manter sua precisão durante a vida útil, gerando custos adicionais não previstos inicialmente.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve início a partir de uma experiência profissional na Empresa Alfa, o que na prática via-se como uma vantagem, pois ainda não haviam estudos consistentes que comprovassem a aplicação discutida.

Ao realizar esse trabalho, verificou-se que de fato existe essa expressiva vantagem na substituição dos Gages Dedicados por CMM, garantindo um processo mais satisfatório ao cliente, com melhor qualidade. Sua implementação não apenas impacta positivamente a qualidade do produto, mas também proporciona ganhos substanciais em produtividade e flexibilidade. Sua capacidade de realizar ajustes rápidos e adaptar-se a diferentes produtos contribui para uma linha de produção muito mais eficiente. Os benefícios em custos de fabricação e manutenção reforçam a análise de viabilidade econômica da CMM, consolidando-a como uma escolha estratégica para empresas comprometidas com a excelência na produção e controle da qualidade.

Considerando-se os custos associados a cada método de medição, torna-se evidente que, embora a CMM exija um investimento inicial substancial, seus custos operacionais anuais significativamente inferiores compensam essa diferença ao longo da vida útil da linha de produção. Com uma expressiva economia de 84,9% em custos anuais, em comparação com os gages dedicados, a CMM destaca-se como uma opção muito mais eficiente e economicamente viável.

O desenvolvimento deste trabalho foi fundamental para a compreensão desse processo e visualização dos benefícios bem como das dificuldades enfrentadas na implementação de CMM no processo de usinagem. Destacando-se as melhores práticas a serem seguidas, esperamos que esse TG venha a facilitar a implementação eficaz e eficiente de CMMs adotando uma abordagem de *Lean Engineering*, proporcionando benefícios significativos em termos de qualidade e eficiência e minimização de desperdícios.

## 7 REFERÊNCIAS

ARENHART; F. **Desempenho Metrológico de Máquinas de Medição por Coordenadas no Âmbito Industrial Brasileiro**. 2007. Disponível em:

[https://www.abcm.org.br/downloads/3Y\\_monografia.pdf](https://www.abcm.org.br/downloads/3Y_monografia.pdf)

CRAWFORD; M. **5 Lean Principles Every Engineer Should Know**. 2016. Disponível em:

[5 Lean Principles Every Engineer Should Know - ASME](#)

DE LUCA; J.C. **Medição de Coordenadas Tri Direcionais Através da Digitalização de Imagens**. 1990. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/157625/81592.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

FÜHR; T. **"APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO."** *Salão do Conhecimento* (2009). Disponível em:

15226-Texto%20do%20artigo-48199-2357-2-20191029.pdf

GREFIM; D.; SILVA ; R.; CRUZ; W. **Máquina de Medir por Coordenadas Utilizando Microcontrolador e Sistema Supervisório**. 2018. Disponível em:

[https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9527/1/CT\\_COMET\\_2018\\_2\\_05.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9527/1/CT_COMET_2018_2_05.pdf)

KAHLMAYER-MERTENS et al. *Como elaborar projetos de pesquisa: linguagem e método*. Rio de Janeiro: FGV, 2007.

LIRA; F. **Metrologia dimensional**: técnicas de medição e instrumentos para controle e fabricação industrial. São Paulo: Erica, 2015. Livro. (1 recurso online). ISBN 9788536519852. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788536519852>. Acesso em: 20 nov. 2023.

MITUTOYO. **Catálogo Mitutoyo Sul Americana. 2017.**

Disponível em:

[Catálogos Geral | Mitutoyo](#)

MARTINS, Jorge Santos. Projetos de pesquisa, ensino e aprendizagem em sala de aula. Campinas: Autores Associados, 2007

PEDRA; D. **O que é Lean Manufacturing? 5 princípios: O que é Lean Manufacturing?** 2023. Disponível em:

<https://www.siteware.com.br/processos/o-que-e-lean-manufacturing/>

REVISTA FERRAMENTAL, **Usinagem: o que é e qual a importância desse processo?** 2021. Disponível em:

<https://www.revistaferramental.com.br/artigo/usinagem-o-que-e-qual-a-importancia-desse-processo/>

REIS, Linda G. Produção de monografia: da teoria à prática. Brasília: SENAC, 2010.

SILVA NETO, João Cirilo da. **METROLOGIA E CONTROLE DIMENSIONAL: CONCEITOS, NORMAS E APLICAÇÕES.** 2. ed. rev., ampl Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018. Livro. (1 recurso online). ISBN 9788595152861. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788595152861>. Acesso em: [22 nov. 2023](#).

SOUSA; A. **Fundamentos de metrologia científica e industrial.** 2. ed. rev., atual., ampl Barueri: Manole, 2017. Livro. (1 recurso online). ISBN 9788520454879.

Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788520454879>. Acesso em: 20 nov. 2023.

THOMAS, Jerry R; NELSON, Jack K; SILVERMAN, Stephen J. Métodos de pesquisa em atividade física. São Paulo: Artmed, 2012.

VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA: Conceitos Fundamentais E Gerais E Termos Associados. (VIM 2012). 1ª edição luso-brasileira. Portaria do Inmetro nº 232, de 08 de maio de 2012.

YIN, Robert K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZAMBELLI; R. **Por que a metrologia é essencial para a eficiência na indústria?** 2023. Disponível em:

[https://blog-pt.checklistfacil.com/metrologia/#Metrologia\\_industrial](https://blog-pt.checklistfacil.com/metrologia/#Metrologia_industrial)

## ANEXOS:

## ANEXO 1 – Estudo R&amp;R do Gage Dedicado (Dispositivo Eletrônico Multi-cotas).

Estudo de Repetitividade e Reprodutibilidade - Método da Média e Amplitude													
Fábrica	EMPRESA ALFA			Dimensão	LSE	0,010	mm	Peças (n)	10				
Depto.	QUALIDADE OPERACIONAL			Circularidade 0,010	LIE	0,000	mm	Operadores (g)	3				
Cliente	-			Instrumento	DISPOSITIVO MULTI-COTAS (GAGE DEDICADO)			Repetições (r)	3				
Peça	-			Data	12/01/2022			Tolerância	0,010				
Repetição		Peça										Médias	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Operador	A	1	0,002	0,004	0,005	0,003	0,003	0,006	0,006	0,008	0,002	0,009	0,0048
		2	0,002	0,004	0,005	0,003	0,003	0,006	0,007	0,009	0,002	0,009	0,0050
		3	0,002	0,004	0,004	0,003	0,003	0,006	0,006	0,008	0,002	0,010	0,0048
		Média	0,002	0,004	0,005	0,003	0,003	0,006	0,006	0,008	0,002	0,009	$\bar{X}_a$
	Amplitude	0,0000	0,0000	0,0010	0,0000	0,0000	0,0000	0,0010	0,0010	0,0000	0,0010	$R_a$	0,0004
	B	1	0,002	0,004	0,004	0,003	0,003	0,006	0,007	0,008	0,002	0,009	0,0048
		2	0,002	0,004	0,004	0,003	0,003	0,006	0,006	0,009	0,002	0,009	0,0048
		3	0,002	0,004	0,005	0,003	0,003	0,006	0,006	0,009	0,002	0,010	0,0050
		Média	0,002	0,004	0,004	0,003	0,003	0,006	0,006	0,009	0,002	0,009	$\bar{X}_b$
	Amplitude	0,0000	0,0000	0,0010	0,0000	0,0000	0,0000	0,0010	0,0010	0,0000	0,0010	$R_b$	0,0004
	C	1	0,002	0,004	0,004	0,003	0,003	0,006	0,006	0,009	0,002	0,009	0,0048
		2	0,002	0,004	0,005	0,003	0,003	0,006	0,007	0,009	0,002	0,009	0,0050
3		0,002	0,004	0,004	0,003	0,003	0,006	0,006	0,008	0,002	0,010	0,0048	
Média		0,0020	0,0040	0,0043	0,0030	0,0030	0,0060	0,0063	0,0087	0,0020	0,0093	$\bar{X}_c$	0,0049
Amplitude	0,0000	0,0000	0,0010	0,0000	0,0000	0,0000	0,0010	0,0010	0,0000	0,0010	$R_c$	0,0004	
Média da peça		0,0020	0,0040	0,0044	0,0030	0,0030	0,0060	0,0063	0,0086	0,0020	0,0093	$\bar{X}_{p=}$	0,0049
Repetições		$D_4$	$R = (R_a + R_b + R_c) / \#g =$					0,0004		Operadores (g)		$K_2$	
2		3,27	$X_{DIFF} = \max(X) - \min(X) =$					0,0000		2		0,7071	
3		2,58	$LSC_R = R \times D_4 =$					0,0010		3		0,5231	
Repetitividade (VE) Variação do Equipamento $VE = R \times K_1 =$			Repetições		$K_1$		RESULTADOS						
0,0002			2		0,8862								
Reprodutibilidade (VA) Variação entre Operadores $VA^2 = (\bar{X}_{DIFF} \times K_2)^2 - (VE^2 / (nr))$ $VA =$			3		0,5908								
0,0000			Peças		$K_3$		%VE		%VT		%TOL		
Repetitividade & Reprodutibilidade $R\&R^2 = VE^2 + VA^2$ $R\&R =$			2		0,7071		= 100 [VE/VT]		10,19%		14,18%		
0,0002			3		0,5231		= 100 [VA/VT]		0,00%		0,00%		
Variação da Peça (VP) $VP = R_p \times K_3 =$			4		0,4467		= 100 [R&R/VT]		10,19%		14,18%		
0,0023			5		0,4030		= 100 [VP/VT]		99,48%		138,42%		
Variação Total (VT) $VT^2 = R\&R^2 + VP^2$ $VT =$			6		0,3742		Número de Categorias Distintas (ndc) $\geq 5$ $ndc = 1,41[VP/R\&R] =$						
0,0023			7		0,3534								
Limites de Controle Médias (LSC/LIC) $LSCx = \bar{X} + A_2\bar{R} =$ $LICx = \bar{X} - A_2\bar{R} =$			8		0,3375								
0,00528 0,00446			9		0,3249		13,765						
			10		0,3146		Resultado do estudo:						
			VT		Sistema de Medição Aceitável, apresenta o $NDC \geq 5$ , e graficamente não demonstra variação significativa, necessita melhoria.								
			TOL		Sistema de Medição Aceitável, apresenta o $NDC \geq 5$ , e graficamente não demonstra variação significativa, necessita melhoria.								
<ol style="list-style-type: none"> <li>Obter uma amostra constituída de 10 peças, que representa o intervalo real ou esperado da variação do processo (valores mínimo, médio, máximo e fora do especificado);</li> <li>Identificar cada avaliador com uma letra A, B, C, e as peças com números de 01 até 10;</li> <li>Calibrar o dispositivo de medição, caso isto seja parte dos procedimentos usuais do sistema de medição;</li> <li>Obter dos avaliadores A, B, C as medições das 10 amostras, com 03 repetições, conforme solitação no estudo;</li> <li>Obter dos avaliadores B e C as medições, das mesmas 10 amostras, conforme rotina do avaliador A, de modo que um avaliador não conheça a leitura dos demais;</li> <li>Plotar os resultados na área determinada para cada peça, na Planilha de Repetitividade e Reprodutibilidade.</li> <li>Analisar o resultado estatístico (<math>NDC \geq 5</math>), se abaixo da referência reprovado;</li> <li>Analisar o gráfico de amplitudes, as aptitudes não devem ultrapassar o <math>LSCr</math>, caso ocorra, analisar os índices de VA e VE;</li> <li>Analisar o gráfico das médias, o gráfico deve apresentar 50% das médias fora dos limites de controle (<math>LSC</math> e <math>LIC</math>), caso não apresentar, analisar o item 1.</li> </ol>													

## ANEXO 2 – Estudo R&R da CMM (Coordinate Measuring Machine).

Estudo de Repetitividade e Reprodutibilidade - Método da Média e Amplitude														
Fábrica	EMPRESA ALFA			Dimensão	LSE	0,0100	mm	Peças (n)	10					
Depto.	QUALIDADE OPERACIONAL			Circularidade 0,010	LIE	0,0000	mm	Operadores (g)	3					
Cliente	-			Instrumento	CMM (COORDINATE MEASURING MACHINING)			Repetições (r)	3					
Peça	-			Data	05/09/2022			Tolerância	0,0100					
Repetição		Peça										Médias		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Operador	K	1	0,0020	0,0042	0,0049	0,0031	0,0032	0,0062	0,0060	0,0081	0,0160	0,0052	0,0059	
		2	0,0023	0,0041	0,0050	0,0032	0,0032	0,0060	0,0061	0,0082	0,0159	0,0051	0,0059	
		3	0,0024	0,0042	0,0051	0,0030	0,0034	0,0063	0,0060	0,0080	0,0159	0,0052	0,0060	
		Média	0,0022	0,0042	0,0050	0,0031	0,0033	0,0062	0,0060	0,0081	0,0159	0,0052	$\bar{X}_{a..}$	0,0059
	Amplitude	0,0004	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	$R_{a..}$	0,0002
	B	1	0,0024	0,0039	0,0050	0,0030	0,0033	0,0060	0,0060	0,0080	0,0161	0,0049	0,0059	
		2	0,0021	0,0040	0,0051	0,0032	0,0032	0,0061	0,0061	0,0082	0,0160	0,0050	0,0059	
		3	0,0024	0,0042	0,0050	0,0032	0,0032	0,0060	0,0062	0,0082	0,0162	0,0052	0,0060	
		Média	0,0023	0,0040	0,0050	0,0031	0,0032	0,0060	0,0061	0,0081	0,0161	0,0050	$\bar{X}_{b..}$	0,0059
	Amplitude	0,0003	0,0003	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	$R_{b..}$	0,0002
	C	1	0,0024	0,0041	0,0050	0,0031	0,0032	0,0060	0,0062	0,0081	0,0158	0,0051	0,0059	
		2	0,0020	0,0041	0,0048	0,0032	0,0032	0,0061	0,0060	0,0082	0,0161	0,0051	0,0059	
3		0,0024	0,0042	0,0050	0,0031	0,0033	0,0063	0,0061	0,0081	0,0159	0,0052	0,0060		
Média		0,0023	0,0041	0,0049	0,0031	0,0032	0,0061	0,0061	0,0081	0,0159	0,0051	$\bar{X}_{c..}$	0,0059	
Amplitude	0,0004	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0003	0,0002	0,0001	0,0003	0,0001	0,0001	$R_{c..}$	0,0002	
Média da peça		0,0023	0,0041	0,0050	0,0031	0,0032	0,0061	0,0061	0,0081	0,0160	0,0051	$\bar{X}_{...}$	0,0059	
												$R_{p..}$	0,0137	
Repetições	$D_4$	$R = (R_a + R_b + R_c) / \#g =$						0,0002		Operadores (g)	$K_2$			
2	3,27	$X_{DIFF} = \max(X) - \min(X) =$						0,0000		2	0,7071			
3	2,58	$LSC_R = R \times D_4 =$						0,0005		3	0,5231			
Repetitividade (VE) Variação do Equipamento $VE = R \times \bar{K}_1 =$			Repetições		$K_1$		RESULTADOS							
0,0001			2		0,8862									
Reprodutibilidade (VA) Variação entre Operadores $VA^2 = (X_{DIFF} \bar{K}_2)^2 - (VE^2 / (nr))$ $VA =$			3		0,5908									
0,0000			Peças		$K_3$									
Repetitividade & Reprodutibilidade $R\&R^2 = VE^2 + VA^2$ $R\&R =$			2		0,7071									
0,0001			3		0,5231									
Variação da Peça (VP) $VP = R_p \times K_3 =$			4		0,4467									
0,0043			5		0,4030									
Variação Total (VT) $VT^2 = R\&R^2 + VP^2$ $VT =$			6		0,3742									
0,0043			7		0,3534									
Limites de Controle Médias (LSC/LIC) $LSC_x = \bar{X} + A_2 \bar{R} =$ $LIC_x = \bar{X} - A_2 \bar{R} =$			8		0,3375									
0,00611 0,00572			9		0,3249									
			10		0,3146		Número de Categorias Distintas (ndc) $\geq 5$ $ndc = 1,41[VP/R\&R] =$							
							53							
Resultado do estudo:														
			VT		Sistema de Medição Aprovado, atende os limites de controle e a Variação Total.									
			TOL		Sistema de Medição Aprovado, atende os limites de controle e a Variação pela Tolerância.									
<p>1. Obter uma amostra constituída de 10 peças, que representa o intervalo real ou esperado da variação do processo (valores mínimo, médio, máximo e fora do especificado);</p> <p>2. Identificar cada avaliador com uma letra A, B, C, e as peças com números de 01 até 10;</p> <p>3. Calibrar o dispositivo de medição, caso isto seja parte dos procedimentos usuais do sistema de medição;</p> <p>4. Obter dos avaliadores A, B, C as medições das 10 amostras, com 03 repetições, conforme solicitação no estudo;</p> <p>5. Obter dos avaliadores B e C as medições, das mesmas 10 amostras, conforme rotina do avaliador A, de modo que um avaliador não conheça a leitura dos demais;</p> <p>6. Plotar os resultados na área determinada para cada peça, na Planilha de Repetitividade e Reprodutibilidade.</p> <p>7. Analisar o resultado estatístico (NDC <math>\geq 5</math>), se abaixo da referência reprovado;</p> <p>8. Analisar o gráfico de amplitudes, as amplitudes não devem ultrapassar o LSCr, caso ocorra, analisar os índices de VA e VE;</p> <p>9. Analisar o gráfico das médias, o gráfico deve apresentar 50% das médias fora dos limites de controle (LSC e LIC), caso não apresentar, analisar o item 1.</p>														