

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Lucas Emanuel Souza Pereira

**ESTUDO DE CASO: COMPARAÇÃO ENTRE CONTROLE  
DIMENSIONAL REALIZADO POR DISPOSITIVO MANUAL E  
CONTROLE TRIDIMENSIONAL REALIZADO POR MEIO DE  
MÁQUINA COMPUTADORIZADA NOS BLOCOS DE MOTOR TURBO  
PARA AUTOMÓVEIS**

Betim

2025

LUCAS EMANOEL SOUZA PEREIRA

**ESTUDO DE CASO: COMPARAÇÃO ENTRE CONTROLE  
DIMENSIONAL REALIZADO POR DISPOSITIVO MANUAL E  
CONTROLE TRIDIMENSIONAL REALIZADO POR MEIO DE  
MÁQUINA COMPUTADORIZADA NOS BLOCOS DE MOTOR TURBO  
PARA AUTOMÓVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Dr. Rogério Eustáquio de Souza

**Coorientador:**

Betim  
2025

## FICHA CATALOGRÁFICA

P436e Pereira, Lucas Emanuel Souza

Estudo de caso: comparação entre controle dimensional realizado por dispositivo manual e controle tridimensional realizado por meio de máquina computadorizada nos blocos de motor turbo para automóveis / Lucas Emanuel Souza Pereira. – 2025.

92 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientação: Prof. Me. Rogério Eustáquio de Souza

1. Usinagem. 2. Controle dimensional. 3. Blocos de motor. 4. Metrologia. 5. Engenharia Mecânica. I. Pereira, Lucas Emanuel Souza. II. Título.

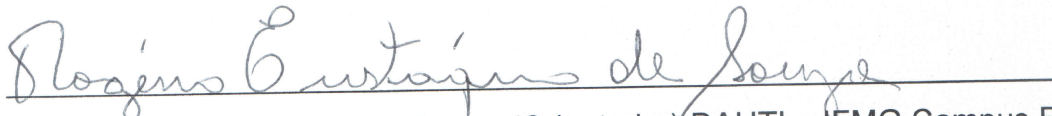
CDU: 006.91

Lucas Emanuel Souza Pereira

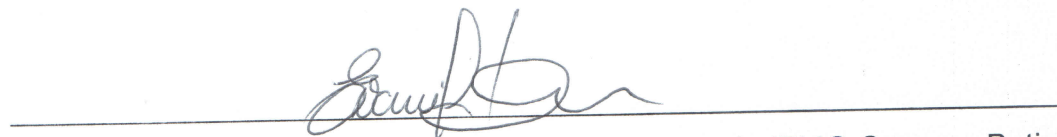
**ESTUDO DE CASO: COMPARAÇÃO ENTRE CONTROLE  
DIMENSIONAL REALIZADO POR DISPOSITIVO MANUAL E  
CONTROLE TRIDIMENSIONAL REALIZADO POR MEIO DE  
MÁQUINA COMPUTADORIZADA NOS BLOCOS DE MOTOR TURBO  
PARA AUTOMÓVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Engenharia  
Mecânica do Instituto Federal de Minas  
Gerais Campus Betim como requisito  
parcial à obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

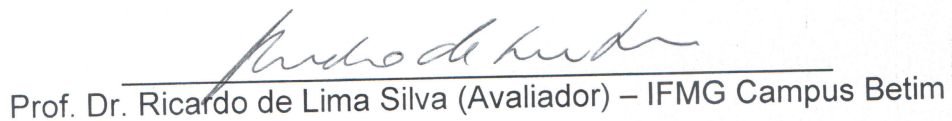
Aprovado em 09 de setembro de 2025, pela banca examinadora:



Prof. Msc. Rogério Eustáquio de Souza (Orientador) DAUTI – IFMG Campus Betim



Prof. Msc. Evanilton José Alves Barbosa (Avaliador) - IFMG Campus Betim



Prof. Dr. Ricardo de Lima Silva (Avaliador) – IFMG Campus Betim

Dedico este trabalho aos meus pais, Gilson e Dalva, pelo apoio incondicional e incentivo constantes ao longo de toda a minha jornada, desde a infância até a realização deste objetivo. Sem o exemplo de esforço, dedicação e valores que me transmitiram, esta conquista não seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus irmãos Gilson Jr, Milene e Everton pelo apoio incondicional e incentivo ao longo desta jornada. Estendo meus agradecimentos a Ederson Silva e Anderson Santos, pelo apoio e colaboração nos momentos em que mais precisei.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Rogério Eustáquio de Souza, pela dedicação, paciência e orientação durante todas as etapas deste trabalho. Sua experiência e apoio foram fundamentais para a construção deste estudo, contribuindo de maneira significativa para meu aprendizado acadêmico e profissional.

Agradeço também a Ronan Alves, pelos valiosos ensinamentos e orientações técnicas, que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos e colegas com quem pude rir, aprender e evoluir, pois são as pessoas ao nosso redor que nos fazem ser seres humanos cada dia melhores.

A todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho, deixo registrado o meu sincero agradecimento.

*"O que observamos não é a própria natureza, mas a natureza exposta ao nosso método de questionamento."*

**Werner Heisenberg**

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso realizado em uma empresa de usinagem na região de Betim, Minas Gerais, cujo objetivo foi comparar o desempenho entre o dispositivo de controle dimensional manual (máscara) e a máquina de medição por coordenadas (MMC) no controle dimensional de blocos de motor, especificamente na identificação de deslocamento de usinagem em furos críticos. Para isso, foram analisados aspectos como tempo de inspeção, índice de refugo e custos operacionais. A metodologia adotada envolveu pesquisa aplicada com abordagem quantitativa e qualitativa, realizando medições comparativas em peças da produção por meio das duas tecnologias, além do levantamento de dados históricos no sistema da empresa. Os resultados demonstraram que o uso da máscara dimensional possibilitou redução no tempo total de inspeção em comparação à MMC, além da identificação eficiente de falhas dimensionais ainda na linha de produção. Observou-se também uma diminuição no índice de refugo externo, com retenção interna de peças não conformes, contribuindo para a redução de reclamações de clientes e retrabalhos. Em termos financeiros, a implementação da máscara apresentou menor custo de aquisição e manutenção frente à MMC, viabilizando sua aplicação em processos produtivos contínuos. Conclui-se que o dispositivo manual de controle dimensional é uma alternativa viável à medição tridimensional computadorizada em etapas específicas do processo produtivo, especialmente no controle preliminar de peças. Sua adoção contribui para a otimização do tempo de inspeção, redução de custos da qualidade e prevenção de não conformidades, alinhando-se aos objetivos estratégicos da empresa em termos de produtividade e atendimento aos requisitos técnicos do setor automotivo.

**Palavras-chave:** usinagem de blocos de motor; qualidade; controle dimensional; dispositivo de medição tridimensional.

## ABSTRACT

This study presents a case study conducted in a machining company located in the region of Betim, Minas Gerais, aiming to compare the performance of a manual dimensional control device (mask) and a coordinate measuring machine (CMM) in the dimensional inspection of engine blocks, specifically focusing on the detection of machining displacement in critical holes. To achieve this, aspects such as inspection time, scrap rate, and operational costs were analyzed. The adopted methodology involved applied research with both quantitative and qualitative approaches, performing comparative measurements on production parts using both technologies, in addition to collecting historical data from the company's system.

The results showed that the use of the dimensional mask allowed for a reduction in total inspection time when compared to the CMM, as well as efficient identification of dimensional failures directly on the production line. A reduction in the external scrap rate was also observed, with internal retention of non-conforming parts, contributing to fewer customer complaints and less rework. Financially, the implementation of the mask resulted in lower acquisition and maintenance costs compared to the CMM, supporting its application in continuous production processes.

It is concluded that the manual dimensional control device is a viable alternative to computerized three-dimensional measurement in specific stages of the production process, especially in preliminary part inspection. Its adoption contributes to optimizing inspection time, reducing quality-related costs, and preventing non-conformities, aligning with the company's strategic objectives regarding productivity and compliance with the technical requirements of the automotive sector.

**Palavras-chave:** engine block machining; quality; dimensional control; three-dimensional measuring device

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bloco Motor de Alumínio de 4 cilindros . . . . .	20
Figura 2 – MMC modelo Hexagon 09.015.08 . . . . .	23
Figura 3 – Componentes de um sistema de medição baseado em uma máquina de medição Inspector e em um sistema de controle UMP360. . . . .	24
Figura 4 – Máscara de controle de deslocamento de usinagem Bloco Turbo. . . . .	25
Figura 5 – Tampões "passa/não passa" da máscara de controle de deslocamento de usinagem Bloco Turbo. . . . .	26
Figura 6 – máquina de medição por coordenadas(MMC) modelo Hexagon Global Performance 09.15.08 2013. . . . .	28
Figura 7 – cabeça de sonda de indexação motorizada modelo PH10M PLUS. . . . .	28
Figura 8 – Berço de apoio do bloco turbo. . . . .	29
Figura 9 – Posicionamento do bloco na máquina de medição por coordenadas(MMC). . . . .	30
Figura 10 – Posicionamento do bloco na máscara. . . . .	32
Figura 11 – Fixação do bloco na máscara. . . . .	33
Figura 12 – Fechamento da máscara para controle manual. . . . .	34
Figura 13 – Interpretação do mapa de controle do plano de usinagem da máscara. . . . .	35
Figura 14 – Controle manual feito pelo operador do posto. . . . .	36
Figura 15 – Fluxograma do setor de usinagem do bloco motor . . . . .	39
Figura 16 – Máquina de usinagem modelo CNC GROB G520 . . . . .	40
Figura 17 – Comparativo de tempo de deslocamento até o dispositivo:Dispositivo de medição dimensional x MMC (s) . . . . .	80
Figura 18 – Comparativo de tempo de carregamento e preparação:Dispositivo de medição dimensional x MMC (s) . . . . .	81
Figura 19 – Comparativo de tempo de controle:Dispositivo de medição dimensional x MMC (s) . . . . .	81
Figura 20 – Comparativo de tempo total de controle:Dispositivo de medição dimensional x MMC (s) . . . . .	82
Figura 21 – Evolução mensal do refugo interno do produto Bloco Turbo . . . . .	83
Figura 22 – Evolução mensal do refugo externo do produto Bloco Turbo . . . . .	84
Figura 23 – Comparativo de resultados estudados entre o dispositivo de medição dimensional e a Máquina tridimensional computadorizada. . . . .	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Tolerâncias de dimensão e posição da coordenada do furo 622 . . . . .	26
Tabela 2	– Relatório dimensional gerado pelo software da máquina de medição tridimensional: colunas e informações registradas. . . . .	31
Tabela 3	– Relatório dimensional com deslocamento de usinagem no index da peça . .	77
Tabela 4	– Relatório dimensional com deslocamento de usinagem no eixo EX340 . . .	78
Tabela 5	– Tempos de deslocamento, carregamento e controle das peças para controle na máquina de medição por coordenadas . . . . .	78
Tabela 6	– Tempos de deslocamento, carregamento e controle das peças para controle no dispositivo de medição dimensional . . . . .	79
Tabela 7	– Faixa de preços de máquinas CMM novas e usadas/retrofit (USD) . . . . .	85

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> (Comando Numérico Computadorizado)
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas
SOP	<i>Standard Operating Procedure</i> (Procedimento Operacional Padrão)
PFMEA	<i>Process Failure Mode and Effects Analysis</i> (Análise dos Modos de Falha e Efeitos no Processo)
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> (Indicador-chave de Desempenho)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
PDF	<i>Portable Document Format</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$D_{\text{máx}}$	Diâmetro máximo do furo
$D_{\text{mín}}$	Diâmetro mínimo do furo
$\varnothing$	Tolerância de diâmetro e diâmetro
$D_{\text{absoluto}}$	Diâmetro do furo no desenho do produto
$PR$	Tolerância do erro de posição

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>17</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>17</i>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Documentação Técnica de Processo</b>	<b>18</b>
<i>2.1.1</i>	<i>Desenho Técnico e Interpretação</i>	<i>18</i>
<i>2.1.2</i>	<i>PFMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falha de Processo)</i>	<i>18</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Procedimento padrão de operação</i>	<i>18</i>
<b>2.2</b>	<b>Bloco do Motor automotivo</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Usinagem no Alumínio e os fatores que afetam a qualidade do produto</b>	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>Gestão dos KPIs da qualidade no setor</b>	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Equipamentos e dispositivos de controle da qualidade dimensional</b>	<b>22</b>
<i>2.5.1</i>	<i>Maquina de medição por coordenadas</i>	<i>22</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Máscara de controle dimensional manual</i>	<i>25</i>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Cenário Atual da Empresa</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Tabela de comparação entre resultados quantitativo e qualitativos de medição</b>	<b>41</b>
<i>4.2.1</i>	<i>Resultados de medição dimensional Peça 1</i>	<i>42</i>
<i>4.2.2</i>	<i>Resultados de medição dimensional Peça 2</i>	<i>48</i>
<i>4.2.3</i>	<i>Resultados de medição dimensional Peça 3</i>	<i>55</i>
<i>4.2.4</i>	<i>Resultados de medição dimensional Peça 4</i>	<i>62</i>
<i>4.2.5</i>	<i>Resultados de medição dimensional Peça 5</i>	<i>69</i>
<b>4.3</b>	<b>Análise dos relatórios</b>	<b>76</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>88</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>90</b>

# 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Pires(2024), a crescente competitividade no contexto empresarial, em especial no segmento industrial, fomenta a incessante busca por uma diminuição de custos que garanta a preservação de lucros significativos, o que demanda a otimização dos processos produtivos. Nos setores de fundição e de usinagem, por exemplo, a diminuição dos custos de produção está intimamente relacionada ao monitoramento da qualidade, uma vez que a incidência de falhas em processos e produtos está, em várias situações, associada à perda expressiva de materiais, mão de obra e recursos operacionais (PRINCE *et al.*, 2024).

Trata-se de um assunto amplamente debatido na literatura, abordando a questão da perda, a qual é caracterizada como toda a despesa adicional necessária para a execução de um produto em função das modificações decorrentes do trabalho realizado, do retorno e da deterioração ocasionada pela reconfiguração do suprimento. Os custos “diretos” referem-se ao produto em questão, no qual a perda de maneira mais elementar e uma parte da entidade em análise estão relacionados à estrutura. (SANTOS; SARMENTO, 2024). A finalidade da implementação de instrumentos de controle dimensional na usinagem consiste em minimizar as perdas, assegurando a entrega de um produto que atenda às especificações do cliente na redução de custos pela não qualidade do produto final entregue ao cliente.

O custo da não qualidade refere-se ao conjunto de gastos que as organizações incorrem devido a falhas em seus processos, produtos ou serviços. Esses custos incluem atividades como retrabalho, desperdício de materiais, devoluções, perdas de clientes e garantias, parada de máquinas ou linha produtiva, que poderiam ser evitados por meio de um sistema de gestão da qualidade eficiente (JURAN; GODFREY, 1999). Em indústrias de manufatura, esses custos impactam diretamente a produtividade, a competitividade e a lucratividade, uma vez que absorvem recursos que poderiam ser direcionados para melhorias ou inovação (CROSBY, 2020).

A norma ISO(INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION) 9000:2015 estabelece que um produto é considerado em conformidade quando atende a todos os requisitos dispostos em normas técnicas, regulamentações e contratos. Nesse contexto, a detecção antecipada de falhas na produção contribui para a prevenção de despesas com produtos que não cumprem as especificações, os quais, ao serem entregues ao cliente, resultam em custos adicionais e problemas para a imagem da empresa (ISO, 2015). Portanto, corporações do ramo da usinagem devem operar com um amplo conjunto de controles que influenciam de forma adversa o processo de usinagem e que, por conseguinte, reduzem a produtividade da organização (PIRES, 2024). A implementação de dispositivos de controle dimensional pode auxiliar nesse propósito, ao permitir a detecção de falhas, como a não execução durante o processo de usinagem, representando um benefício para a produtividade da organização.

Além da qualidade do produto, a implementação de dispositivos de controle dimensional resulta, como consequência, em vantagens para a produtividade da linha de usinagem, uma vez

que reduz as inspeções sem padrão e o tempo despendido em retrabalho (PRINCE *et al.*, 2024). A empresa, assim, tem a possibilidade de ser mais competitiva do que seus concorrentes em relação ao custo da qualidade do produto. Ao atuar em diferentes esferas, consegue, simultaneamente, elevar a eficiência e a qualidade no atendimento ao cliente, enquanto reduz os custos.

No presente contexto, é pertinente avaliar a viabilidade da implementação do dispositivo de controle dimensional na linha de usinagem da empresa em estudo. O objetivo consiste em assegurar que os cabeçotes atendam às especificações solicitadas pelos clientes, prevenindo crescimento de desperdício interno e reduzindo a quantidade de reclamações externas. Essa abordagem integra o plano global do grupo da empresa estudada, que visa aprimorar continuamente a eficiência na produção e a qualidade dos produtos.

A usinagem é essencial para a fabricação de componentes metálicos com elevada precisão, especialmente nas indústrias automotiva e de fundição. Entretanto, Santos e Sarmiento(2024) indicam que as imperfeições dimensionais constituem um dos principais motivos para falhas na montagem final dos automóveis, uma vez que elementos com essas inadequações não operam de maneira adequada. Portanto, a implementação de um sistema rigoroso de controle de qualidade torna-se fundamental, principalmente quando os objetivos da empresa visam à atuação no mercado internacional.

Conforme Santos e Sarmiento(2024) , a metodologia FMEA (Análise de Modos de Falha e Efeitos) aplicada aos processos de usinagem possibilita um efeito benéfico ao permitir a identificação de falhas antes que estas se tornem inconvenientes. Por meio dessa metodologia, torna-se viável a implementação de ações tanto corretivas quanto preventivas, visando à mitigação de riscos que podem advir de etapas específicas do processo produtivo. Essa modalidade de abordagem contribui para a formulação de decisões estratégicas, visando à melhoria contínua dos processos industriais.

Além da Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA), é possível empregar outras ferramentas de qualidade, como o Controle Estatístico de Processos (SPC) e dispositivos de medição automatizados, para avaliar a conformidade de peças usinadas, em tempo real. Essas tecnologias possibilitam alterações imediatas na cadeia produtiva, promovendo, dessa forma, a diminuição do desperdício e o incremento da eficiência do processo (PIRES, 2024). Dessa forma, a empresa é capaz de preservar um elevado padrão de qualidade em suas operações sem comprometer a produtividade.

A implementação de dispositivos automatizados de controle dimensional encontra-se alinhada ao fenômeno da Indústria 4.0, que visa integrar tecnologias avançadas para aprimorar os processos produtivos. Dispositivos inteligentes e sistemas de monitoramento contínuo contribuem para aprimorar o controle acerca das especificações do produto e da conformidade, enquanto reduzem a dependência da inspeção manual (PRINCE *et al.*, 2024). Isso ocasiona um ambiente de produção que é mais eficaz e seguro.

Outro fator significativo refere-se aos gastos relacionados à qualidade insatisfatória. Despesas elevadas decorrentes de retrabalhos, resíduos de materiais e devoluções podem influenciar de maneira significativa a lucratividade, ressaltando a importância de medidas preventivas. A implementação de dispositivos de controle de precisão possibilita a considerável diminuição desses custos, ao eliminar falhas no início do processo produtivo, o que, por sua vez, eleva a eficiência do procedimento de usinagem (SANTOS; SARMENTO, 2024).

A diminuição das despesas em decorrência da baixa qualidade contribui igualmente para a manutenção do processo produtivo. A redução de sucata e retrabalho diminui o desperdício de matérias-primas e energia, o que está alinhado às práticas de manufatura sustentável. Dessa forma, além das vantagens financeiras, a implementação de dispositivos de controle dimensional contribui para mitigar o impacto ambiental gerado pela produção industrial (PIRES, 2024).

Conforme as indústrias atingem níveis elevados de precisão e eficácia por meio da aplicação de tolerâncias dimensionais adequadas, a utilização de equipamentos tridimensionais e estratégias de controle de qualidade segue a perspectiva apresentada por (MOREIRA, 2012). A integração dessas práticas contribui para a redução de desperdícios, o aumento da produtividade e a maior satisfação dos clientes. Dessa forma, os investimentos em tecnologia e gestão da qualidade tornam-se essenciais para o sucesso das organizações no atual cenário competitivo.

Assim sendo, a implementação de um equipamento de controle dimensional na linha de produção de usinagem da empresa em estudo representa uma estratégia benéfica e vantajosa, tanto do aspecto econômico quanto do qualitativo. Essa medida contribui para a redução dos índices de desperdícios internos e dos registros de queixas externas, resultando em uma melhoria na eficiência e na competitividade do setor automobilístico. Ademais, a aderência a normas internacionais de qualidade eleva a imagem da empresa no cenário global.

Este projeto tem como finalidade avaliar a redução de falhas e dos custos operacionais por meio da análise da aplicação de um dispositivo de controle dimensional na usinagem de cabeçotes, em substituição ao uso de um equipamento tridimensional computadorizado. A metodologia adotada envolverá a coleta e análise de dados do processo produtivo, a comparação entre os períodos com e sem o uso do dispositivo, além da avaliação das melhorias obtidas. Os resultados esperados incluem a retenção interna de produtos com não conformidades para análise e correção das falhas, bem como a prevenção do envio de itens fora de especificação ao cliente, assegurando o atendimento aos requisitos técnicos exigidos.

Dessa maneira, a investigação tem como objetivo oferecer respaldo à empresa de usinagem em estudo em sua estratégia de usinagem, visando a uma decisão estratégica mais refinada. Ao verificar a usabilidade e a funcionalidade do equipamento, este estudo poderá ser aplicado em outros projetos que visam solucionar os problemas de controle dimensional nas indústrias do setor automotivo e metalúrgico.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 *Objetivo geral***

O propósito deste estudo é avaliar a efetividade de um dispositivo de controle manual de precisão dimensional na linha de usinagem da empresa em estudo em relação a uma máquina de controle tridimensional computadorizada, com o objetivo de reduzir o número de peças defeituosas encontradas pelo cliente e a saturação do equipamento de medição tridimensional computadorizado.

### **1.1.2 *Objetivos específicos***

- Comparar o impacto do uso da máscara no indicador de refugo interno e externo(cliente) e comparar com o uso do equipamento de medição tridimensional computadorizado.
- Comparar o tempo de controle entre a máscara e a máquina tridimensional.
- Analisar a viabilidade financeira da implementação do equipamento de controle dimensional manual e comparar com o uso do equipamento de medição tridimensional computadorizado.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Documentação Técnica de Processo**

#### **2.1.1 Desenho Técnico e Interpretação**

A produção de peças mecânicas exige cuidados com a intercambialidade e a funcionalidade dos componentes necessários para a montagem industrial. Para esse fim, as tolerâncias são calculadas e detalhadas em um projeto técnico, indicando os limites de alterações toleráveis no tamanho de um componente específico (FALAVIGNA, 2024). Este princípio específico é extremamente eficaz para assegurar a qualidade dos produtos produzidos e reduzir o tempo gasto em retrabalhos e os materiais que podem ser desperdiçados. Conforme Moreira(2012), a correta determinação das tolerâncias das dimensões afeta diretamente a eficiência dos processos produtivos, uma vez que regula os desvios que podem ocorrer nos processos.

#### **2.1.2 PFMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falha de Processo)**

Diante da complexidade e criticidade do processo de usinagem do bloco turbo de alumínio, torna-se essencial a aplicação de ferramentas da qualidade voltadas à prevenção de falhas, como a PFMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falha de Processo). O PFMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falha de Processo) discutido na figura ??) é uma ferramenta sistemática utilizada na gestão da qualidade para identificar, analisar e priorizar modos de falha potenciais em processos produtivos, com o objetivo de prevenir a ocorrência de defeitos e melhorar a confiabilidade operacional. Sua aplicação permite mapear cada etapa do processo, prever possíveis falhas, avaliar seus efeitos e causas, e propor ações corretivas com base em critérios de severidade, ocorrência e detecção. Conforme orienta Stamatis (2003), o PFMEA é essencial para antecipar problemas antes que eles ocorram, promovendo uma abordagem proativa na gestão de riscos. A partir dessa análise, são definidos os controles de processo e inspeção a serem realizados na linha de produção, como verificações dimensionais, testes funcionais e inspeções visuais. Segundo o manual AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP(2008), os controles determinados no PFMEA são fundamentais para detectar falhas ainda no processo produtivo, garantindo que apenas produtos conformes avancem para as etapas seguintes, além de subsidiar a elaboração do plano de controle e as instruções de trabalho do operador.

#### **2.1.3 Procedimento padrão de operação**

O Procedimento padrão de operação é uma ferramenta de padronização operacional usada para garantir que todas as atividades sejam executadas da mesma forma, independentemente de quem as realize, promovendo qualidade, segurança e eficiência no ambiente de produção (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009). Ele descreve passo a passo as ações a serem tomadas pelo

operador, especifica os recursos necessários (máquinas, ferramentas, equipamentos de proteção individual) e define os critérios de aceitação do produto ou serviço em questão.

A importância do POP reside na sua capacidade de:

- **Reduzir variações no processo:** garantindo que o produto final tenha qualidade consistente, independentemente do operador (CORRÊA; GIANESI, 2014);
- **Facilitar o treinamento de novos colaboradores:** servindo como guia prático e didático;
- **Melhorar a segurança do trabalho:** ao incluir procedimentos seguros e obrigatoriedade do uso de EPIs;
- **Atender normas de qualidade:** como a ISO 9001, que exige a documentação e padronização de processos críticos (STANDARDIZATION, 2015);
- **Permitir rastreabilidade e melhoria contínua:** uma vez que desvios podem ser comparados ao procedimento padronizado.

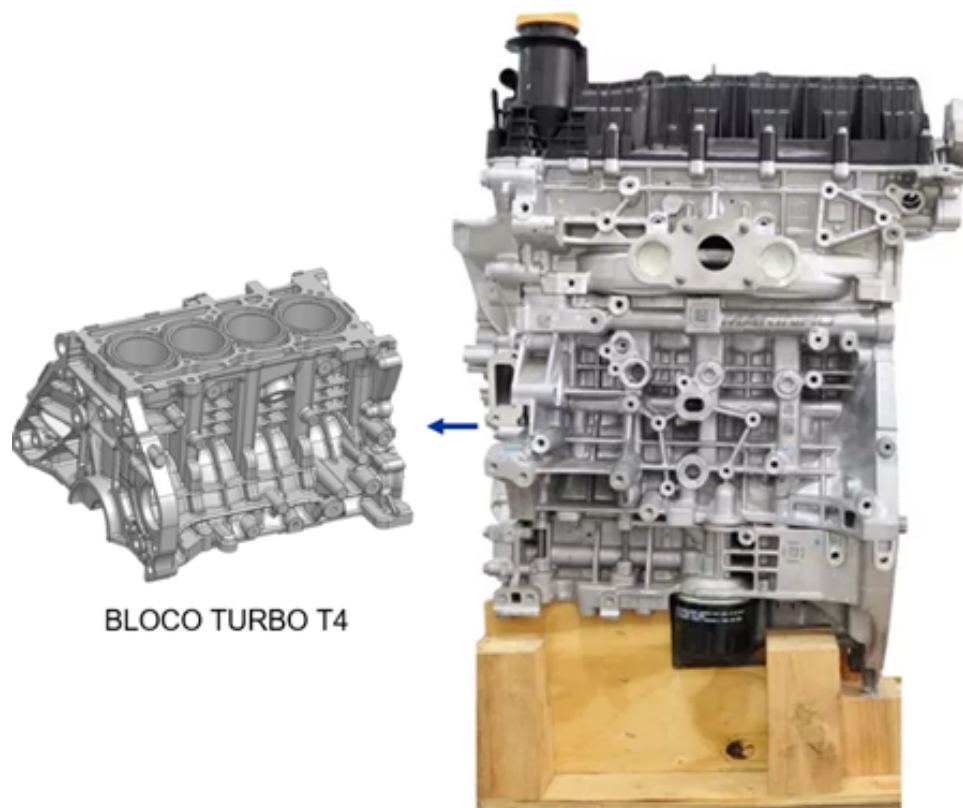
A padronização dos processos é a base para a excelência operacional e deve ser mantida por meio da atualização constante do POP, conforme melhorias forem implementadas (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

## 2.2 Bloco do Motor automotivo

O bloco do motor, também conhecido como bloco de cilindros, é a estrutura principal de um motor de combustão interna. Sua função fundamental é acomodar e sustentar os componentes móveis e fixos do motor, como os cilindros, pistões, virabrequim, bielas, camisas de cilindro e canais de refrigeração e lubrificação. Trata-se de um componente fabricado, geralmente, em ferro fundido ou alumínio fundido, devido à sua resistência mecânica e térmica. Cada cilindro é usinado no bloco e serve como câmara onde ocorre o movimento alternativo dos pistões durante os ciclos de admissão, compressão, combustão e escape. Além disso, o bloco também abriga os dutos por onde circulam o óleo lubrificante e o líquido de arrefecimento, essenciais para o funcionamento seguro e eficiente do motor. Em muitos projetos modernos, o bloco é integrado à parte inferior do motor, compondo o chamado monobloco, que aumenta a rigidez estrutural e reduz o número de componentes.

O bloco do motor mostrado na figura 1, portanto, além de servir como base estrutural, contribui diretamente para o desempenho, durabilidade e eficiência térmica do motor. Seu projeto deve considerar aspectos como resistência à fadiga térmica, dissipação de calor e absorção de vibrações (HEYWOOD, 1988).

Figura 1 – Bloco Motor de Alumínio de 4 cilindros



Fonte: Próprio autor, 2025.

### 2.3 Usinagem no Alumínio e os fatores que afetam a qualidade do produto

A usinagem é uma técnica que possibilita a remoção de material durante o processo de produção, visando alcançar uma geometria específica e um excelente acabamento superficial. O avanço na tecnologia de usinagem ao longo dos anos permitiu um controle mais estrito das dimensões finais dos componentes, assegurando a aderência às normas definidas no projeto (BUTTON; AGOSTINHO; VILELLA, 2004). De acordo com Diniz(2020), a seleção de certos parâmetros, como a velocidade de corte, o avanço e a profundidade do corte, é crucial para a confiabilidade dimensional e a qualidade do produto acabado.

Existem diversas variáveis que podem afetar a qualidade do produto usinado, como, por exemplo, a vida útil de ferramentas de corte e o preset incorreto da ferramenta na CNC.

O preset de ferramentas em máquinas CNC refere-se ao procedimento de medição e registro preciso das dimensões das ferramentas de corte antes do início da usinagem. Esse processo é essencial para garantir que o programa de comando numérico execute os movimentos com base nas medidas reais das ferramentas montadas, compensando automaticamente variações no comprimento ou no diâmetro que possam interferir na exatidão dimensional da peça final. Além de definir as coordenadas de referência da ferramenta em relação ao ponto zero da máquina,

o preset também está diretamente relacionado à correta parametrização das condições de corte, como velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de usinagem ( $a_p$ ). A ausência ou realização inadequada do preset pode provocar erros de posicionamento, desgaste prematuro da ferramenta, danos à peça ou até falhas operacionais graves. Portanto, trata-se de uma etapa fundamental para a repetibilidade, produtividade e qualidade do processo de manufatura assistido por CNC (DINIZ *et al.*, 2020).

A vida útil das ferramentas de corte também é um fator determinante para a qualidade final do produto usinado, influenciando diretamente características como rugosidade superficial, precisão dimensional e integridade geométrica da peça. À medida que a ferramenta sofre desgaste – seja ele por abrasão, adesão, difusão ou fratura – ocorre um aumento nas forças de corte e na temperatura da zona de usinagem, o que pode comprometer a estabilidade do processo, causar vibrações e gerar falhas como rebarbas, alterações na forma ou até mesmo o descarte da peça (refugo). Dessa forma, a manutenção preventiva, o monitoramento do desgaste e a seleção adequada do material da ferramenta e do parâmetro de corte tornam-se indispensáveis para garantir a conformidade do produto e a eficiência do processo produtivo CNC (DINIZ *et al.*, 2020).

## 2.4 Gestão dos KPIs da qualidade no setor

Na indústria automobilística, os Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) de qualidade representam ferramentas indispensáveis para o monitoramento e a melhoria contínua dos processos produtivos. Esses indicadores viabilizam a análise da eficácia operacional, a identificação de gargalos produtivos e a conformidade dos produtos com os padrões técnicos e normativos. Dentre os principais KPIs adotados no setor, destacam-se os índices de refugo interno e externo, os quais se referem, respectivamente, às perdas identificadas durante o processo produtivo e às falhas percebidas após a entrega ao cliente final. O gerenciamento eficaz desses indicadores é essencial para reduzir custos, otimizar a produção e elevar o nível de satisfação do consumidor (SILVA; SANTOS; PEREIRA, 2016).

O refugo interno está relacionado a produtos que, por não atenderem aos requisitos de qualidade especificados em projeto e desenho técnico, são descartados ou retrabalhados ainda dentro do ambiente fabril. As causas dessas não conformidades podem incluir falhas em máquinas, desvios dimensionais, erros humanos ou inadequação da matéria-prima. A análise detalhada desse tipo de indicador permite o mapeamento de causas raízes e a proposição de ações corretivas, conforme demonstrado por (SILVA; SANTOS; PEREIRA, 2016), os quais observaram, em um estudo de caso na indústria metalmeccânica, que a atuação direta sobre os processos críticos pode reduzir em até 30% os refugos internos.

Por sua vez, o refugo externo configura-se como uma das principais preocupações das montadoras, visto que envolve a entrega de produtos defeituosos ao cliente final, resultando

em reclamações, devoluções, perdas de imagem e custos adicionais com assistência técnica ou substituição de peças. Conforme apontado por (OLIVEIRA; FIGUEIREDO, 2017), a adoção de sistemas de gestão da qualidade, como a norma ISO 9001, aliada ao controle estatístico de processo (CEP), tem-se mostrado eficaz na mitigação desse tipo de ocorrência, contribuindo significativamente para a melhoria da confiabilidade dos produtos.

O acompanhamento contínuo e estruturado dos índices de refugo permite, ainda, a construção de metas mensuráveis e o acompanhamento dos resultados decorrentes de programas de melhoria contínua. Em estudo conduzido por (COSTA; BARBOSA; DIAS, 2018), observou-se que a utilização integrada de KPIs com ferramentas de análise de falhas, como o FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), possibilita uma redução significativa dos desvios de processo e, conseqüentemente, do número de peças refugadas.

Conclui-se, portanto, que os KPIs de qualidade, com destaque para os indicadores de refugo interno e externo, constituem ferramentas essenciais para a competitividade e sustentabilidade da indústria automobilística. A gestão eficaz desses parâmetros permite não apenas a prevenção de falhas e a otimização de processos, como também o fortalecimento da imagem institucional junto ao consumidor. Nesse sentido, é imprescindível que as empresas adotem uma abordagem sistemática, baseada em dados confiáveis e ações proativas, conforme preconizado pelas melhores práticas da gestão da qualidade industrial.

## **2.5 Equipamentos e dispositivos de controle da qualidade dimensional**

### **2.5.1 Máquina de medição por coordenadas**

As Máquinas de Medição por Coordenadas (CMM), do inglês *Coordinate Measuring Machines* conforme a figura 4 são equipamentos amplamente utilizados na indústria para realizar medições tridimensionais precisas de componentes mecânicos. Seu funcionamento baseia-se na movimentação de uma sonda ao longo de três eixos ortogonais (X, Y e Z), que registra pontos na superfície do objeto a ser inspecionado. Esses dados são então convertidos em dimensões geométricas que podem ser comparadas com as especificações do projeto. Segundo Góngora (2020), as CMMs podem operar com sondas de contato — que tocam fisicamente a peça — ou sondas óticas e por laser, utilizadas em medições sem contato, dependendo da aplicação e do material a ser analisado.

Figura 2 – MMC modelo Hexagon 09.015.08



Fonte: Catálogo técnico de máquinas de medição tridimensional. [Material não publicado]. Fornecido por representante comercial da Hexagon, 2024.

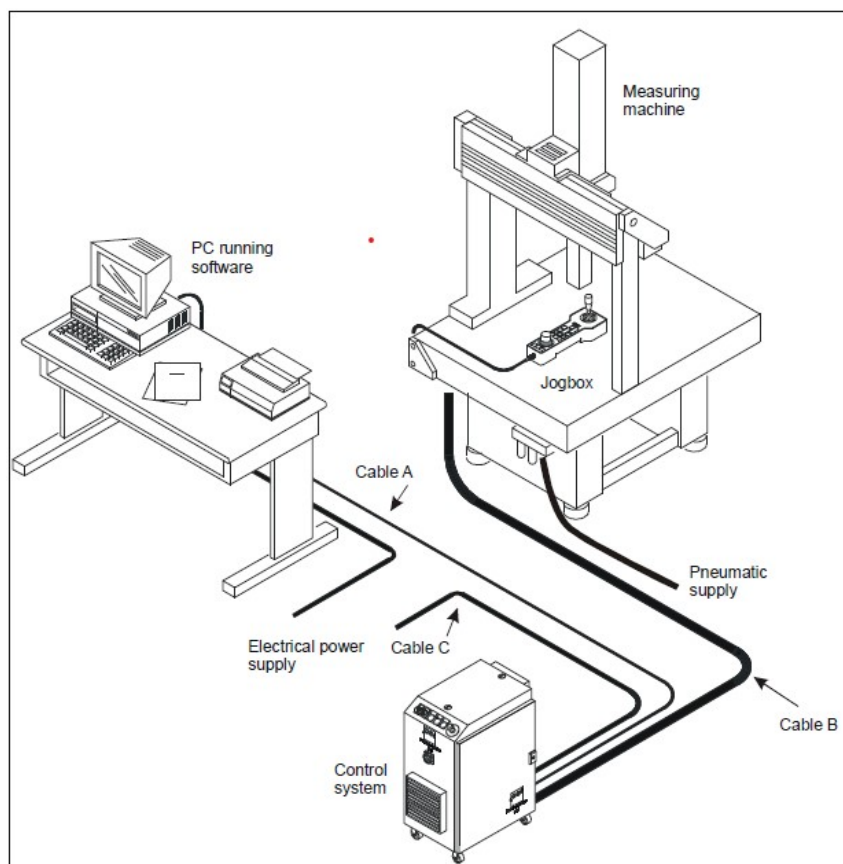
A precisão de uma CMM é altamente dependente das condições ambientais em que está instalada. Para garantir a confiabilidade metrológica, recomenda-se que essas máquinas sejam alocadas em ambientes climatizados, com controle rigoroso de temperatura, geralmente em torno de  $20 \pm 1$  °C, e com baixa vibração mecânica e umidade controlada (SCHAEFFER, 2006). A variação térmica pode causar dilatações nos materiais tanto da máquina quanto da peça medida, afetando os resultados. Além disso, pisos com estrutura antivibratória e iluminação difusa também são recomendados para evitar interferências durante o processo de medição (GIESECKE *et al.*, 2012).

Quanto à operação, as CMMs exigem mão de obra qualificada, tanto para o manuseio direto do equipamento quanto para a interpretação correta dos dados obtidos. Os operadores devem possuir conhecimentos em metrologia dimensional, leitura e interpretação de desenho

técnico e familiaridade com softwares de medição. A formação técnica ou de nível superior, aliada a treinamentos específicos fornecidos pelo fabricante, é essencial para garantir medições confiáveis e evitar erros sistemáticos (LUZZI, 2014). Além disso, o avanço das CMMs modernas, como as da marca Hexagon, integradas a sistemas digitais e automação, exige que o profissional também esteja capacitado para lidar com ambientes industriais digitalizados e orientados à Indústria 4.0 (HEXAGON, 2023).

Para a correta instalação de uma máquina de medição Inspector, é necessário que todos os demais componentes que compõem o sistema de medição da Hexagon Metrology também sejam devidamente montados. Esses componentes devem ser interligados entre si e conectados às redes elétrica e pneumática do local de instalação. A integração adequada desses sistemas é fundamental para garantir o pleno funcionamento da unidade de medição e a precisão dos resultados obtidos. Como exemplo, pode-se citar um sistema composto por uma máquina Inspector associada ao sistema de controle UMP360, onde diversos elementos — como o console de operação, unidade de controle, sensores e módulos auxiliares — trabalham de forma integrada. A configuração detalhada desses elementos, bem como os aspectos funcionais do sistema, está descrita no manual técnico correspondente ao sistema de controle utilizado, conforme a figura (??).

Figura 3 – Componentes de um sistema de medição baseado em uma máquina de medição Inspector e em um sistema de controle UMP360.

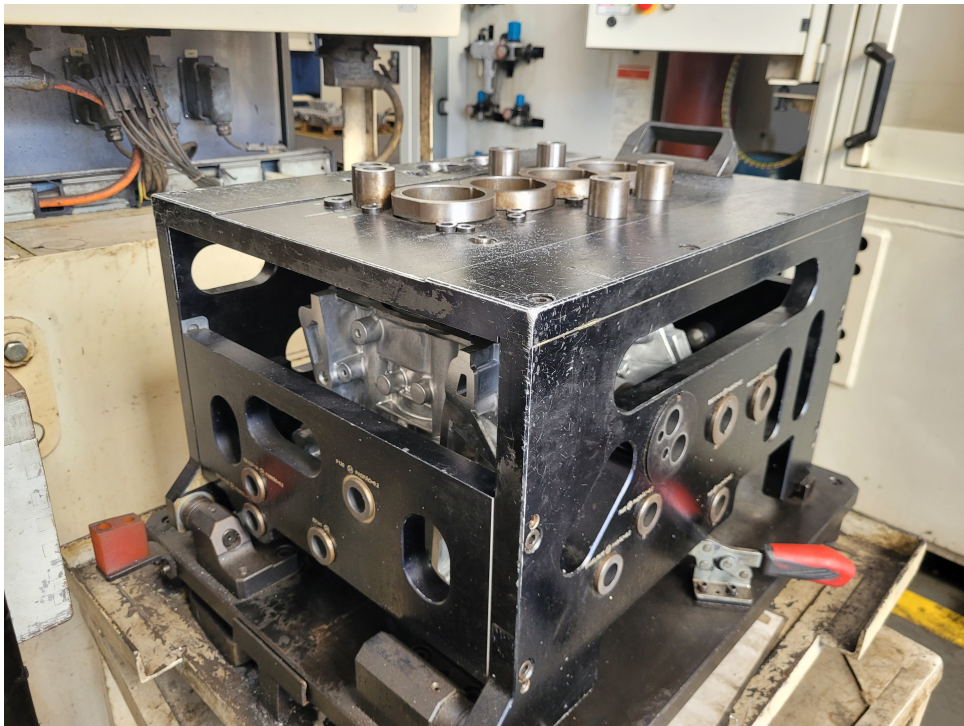


Fonte: Catálogo técnico de máquinas de medição tridimensional. Fornecido por representante comercial da Hexagon, 2024.

### 2.5.2 Máscara de controle dimensional manual

Máscaras de controle dimensional são dispositivos manuais de controle dimensional de um produto. Seu princípio de funcionamento se baseia em uma máscara onde será alojado o produto de forma que suas referências de usinagem X, Y e Z da máquina em que o produto foi usinado estejam conforme o desenho técnico. Em seguida, usam-se os tampões do tipo "passa/não passa" nos furos usinados conforme o desenho técnico a fim de atestar a correta posição, profundidade e diâmetro.

Figura 4 – Máscara de controle de deslocamento de usinagem Bloco Turbo.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Temos os tampões apresentados na figura 5 para garantir a posição dos furos conforme as especificações do cliente. Estes tampões têm seu diâmetro calculado através da diferença da posição absoluta do furo pela tolerância de posição e do diâmetro do furo especificado no desenho técnico do produto da seguinte maneira:

Figura 5 – Tampões "passa/não passa" da máscara de controle de deslocamento de usinagem Bloco Turbo.



Fonte: Próprio autor, 2025.

$$\text{Diâmetro do tampão} = (D_{\text{absoluto}}) - D - PR$$

$(D_{\text{absoluto}})$  - Diâmetro do furo no desenho do produto; D - tolerância de posição; PR - tolerância do diâmetro;

Através do desenho técnico do bloco, conseguimos extrair o diâmetro absoluto do furo, juntamente com a tolerância do diâmetro e a tolerância da posição do furo.

Abaixo temos a tabela 1 com as coordenadas dos eixos Y e Z do furo e as tolerâncias do diâmetro(D) e a tolerância de erro de posição(PR):

Tabela 1 – Tolerâncias de dimensão e posição da coordenada do furo 622

Eixo	Descrição	Nominal	desvio máximo	desvio mínimo
Y	coord 622	81,000	0,105	-0,105
Z	coord 622	-142,000	0,105	-0,105
D	coord 622	19,000	0,100	-0,100
PR	Posição 622	0,000	0,300	0,000

Após o cálculo, temos um tampão que encaixará no produto dentro da máscara se a posição estiver aprovada e o tampão não encaixará se a posição estiver não conforme.

$$\text{Diâmetro do tampão(mm)} = 19,00 \text{ mm} - 0,100 \text{ mm} - 0,300 \text{ mm} = 18,6 \text{ mm}$$

### 3 METODOLOGIA

Este estudo utiliza uma metodologia dedutiva, combinando técnicas quantitativas e exploratórias para avaliar o efeito de um dispositivo de controle dimensional na usinagem de blocos de motor em alumínio. Segundo (LAKATOS; MARCONI, 2017), a pesquisa dedutiva inicia com generalizações abrangentes e avança para conclusões mais precisas, possibilitando a verificação de hipóteses formuladas com base em teorias já estabelecidas. Portanto, o estudo analisa a efetividade da máscara dimensional como um instrumento de inspeção, buscando mensurar seu impacto na diminuição do índice de refugo externo e no tempo necessário para a verificação dimensional.

A pesquisa é categorizada como quantitativa, pois os dados a serem recolhidos na MMC serão numéricos, possibilitando uma análise estatística imparcial das medidas dimensionais das peças usinadas. Teremos também uma pesquisa categorizada como qualitativa, pois as medições da máscara dimensional são visuais e táteis. (GIL, 2019) sustenta que métodos quantitativos são fundamentais para avaliar fenômenos industriais, uma vez que é possível estabelecer comparações diretas entre duas ou mais condições operacionais distintas. O método de estudo se baseia em 10 peças usinadas de um único centro de usinagem, que serão separadas para assegurar a uniformidade das amostras, minimizando a possibilidade de fatores externos influenciarem os resultados. Conforme destaca (JÚNIOR, 2011), as medições qualitativas são amplamente utilizadas em ambientes de produção por possibilitarem decisões rápidas quanto à aceitação ou rejeição de peças, contribuindo para a manutenção do fluxo produtivo e a redução de retrabalho e desperdícios. Apesar de não fornecerem valores numéricos precisos, essas medições têm papel essencial no controle da qualidade, sobretudo quando realizadas por profissionais capacitados e com base em padrões estabelecidos.

A pesquisa também tem um caráter exploratório, com o objetivo de analisar os efeitos da implementação do novo dispositivo de controle dimensional no processo de usinagem e suas consequências nos indicadores de qualidade interno e externo do produto. Conforme (VERGARA, 2021), estudos exploratórios são eficazes em situações em que se faz necessário compreender melhor um fenômeno pouco documentado, criando a fundação para estudos mais aprofundados no futuro. Assim, ao analisar a efetividade da verificação da máscara na detecção de deslocamento de usinagem.

A primeira coleta de dados ocorrerá por meio de um escaneamento tridimensional de um conjunto de blocos de motor com uma cabeça de sonda de indexação motorizada modelo PH10M PLUS mostrada na figura 7 acoplada a uma máquina de medição por coordenadas (MMC) modelo Hexagon Global Performance 09.15.08 2013 conforme figura 6 no laboratório dimensional, onde será gerado um relatório com as dimensões registradas pela MMC das cotas programadas a serem medidas do produto via *software*. Conforme observado por (LIMA, 2023), a utilização de aparelhos tridimensionais permite a realização de medições extremamente precisas, reduzindo, dessa forma, o nível de subjetividade nas análises dimensionais.

Figura 6 – máquina de medição por coordenadas(MMC) modelo Hexagon Global Performance 09.15.08 2013.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 7 – cabeça de sonda de indexação motorizada modelo PH10M PLUS.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Para a realização do escaneamento, serão realizados os seguintes passos:

O operador da linha de produção levará as peças até o laboratório dimensional, realizará a cronometragem desse deslocamento e registrará em uma tabela;

O operador do laboratório posicionará o berço na mesa do tridimensional conforme a figura 8;

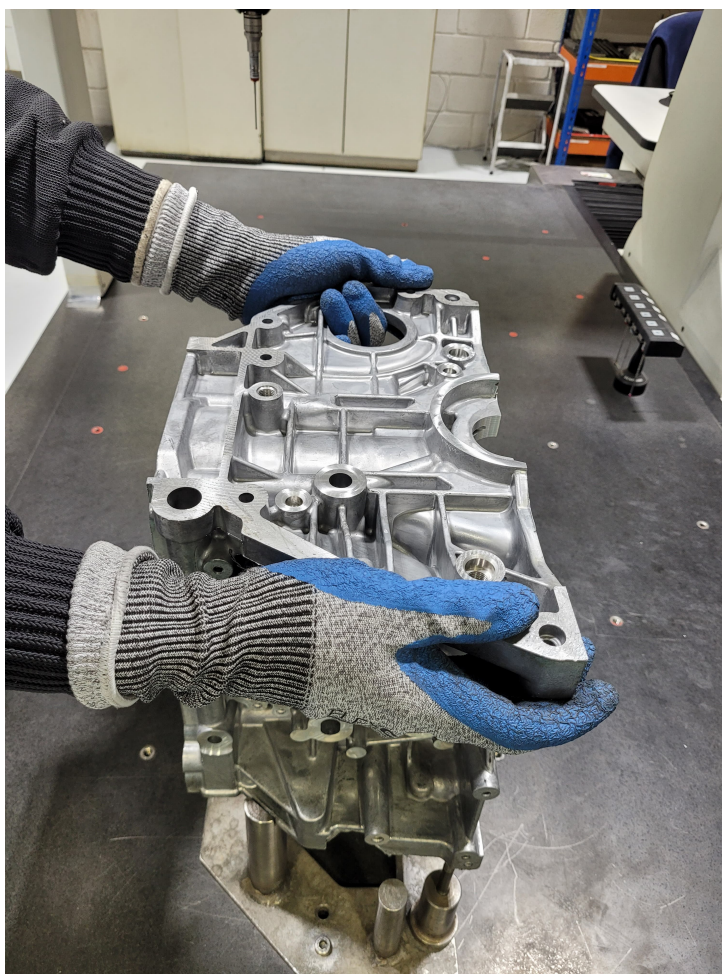
Figura 8 – Berço de apoio do bloco turbo.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Em seguida, o operador posicionará o bloco na máquina de medição por coordenadas(MMC) conforme figura 9;

Figura 9 – Posicionamento do bloco na máquina de medição por coordenadas(MMC).



Fonte: Próprio autor, 2025.

O operador então irá ao computador para iniciar a varredura com o software PCDIMIS e com a programação de escaneamento do modelo, no caso, bloco turbo 3 cilindros.

A máquina de medição por coordenadas(MMC) iniciará a varredura. Juntamente com o início da varredura via *software* será feita a cronometragem do tempo de varredura para cada peça, a fim de obter o tempo médio de controle da máquina de medição por coordenadas(MMC). Os valores de tempo medidos serão registrados em uma tabela.

Ao fim da varredura, a máquina de medição por coordenadas(MMC) irá gerar um relatório dimensional no formato .xlsx (planilha em Excel) que contemplará as dimensões do desenho técnico do produto e indicará quantitativamente quais cotas de diâmetro e posição dos furos do bloco estão conformes ou não conformes, além de apontar o desvio entre o valor de referência da cota e o valor medido. Segue a tabela 2 um trecho do relatório com as respectivas informações geradas:

Tabela 2 – Relatório dimensional gerado pelo software da máquina de medição tridimensional: colunas e informações registradas.

Eixo	Descrição	Nominal	+Tol	-Tol	Medido	Desvio
Z	REFERÊNCIA VERT Z1	0,000	0,050	-0,050	0,000	0,000
Z	REFERÊNCIA VERT Z2	0,000	0,050	-0,050	0,002	0,002

Fonte: Próprio autor, 2025.

No relatório gerado pela máquina de medição por coordenadas(MMC), teremos as seguintes colunas:

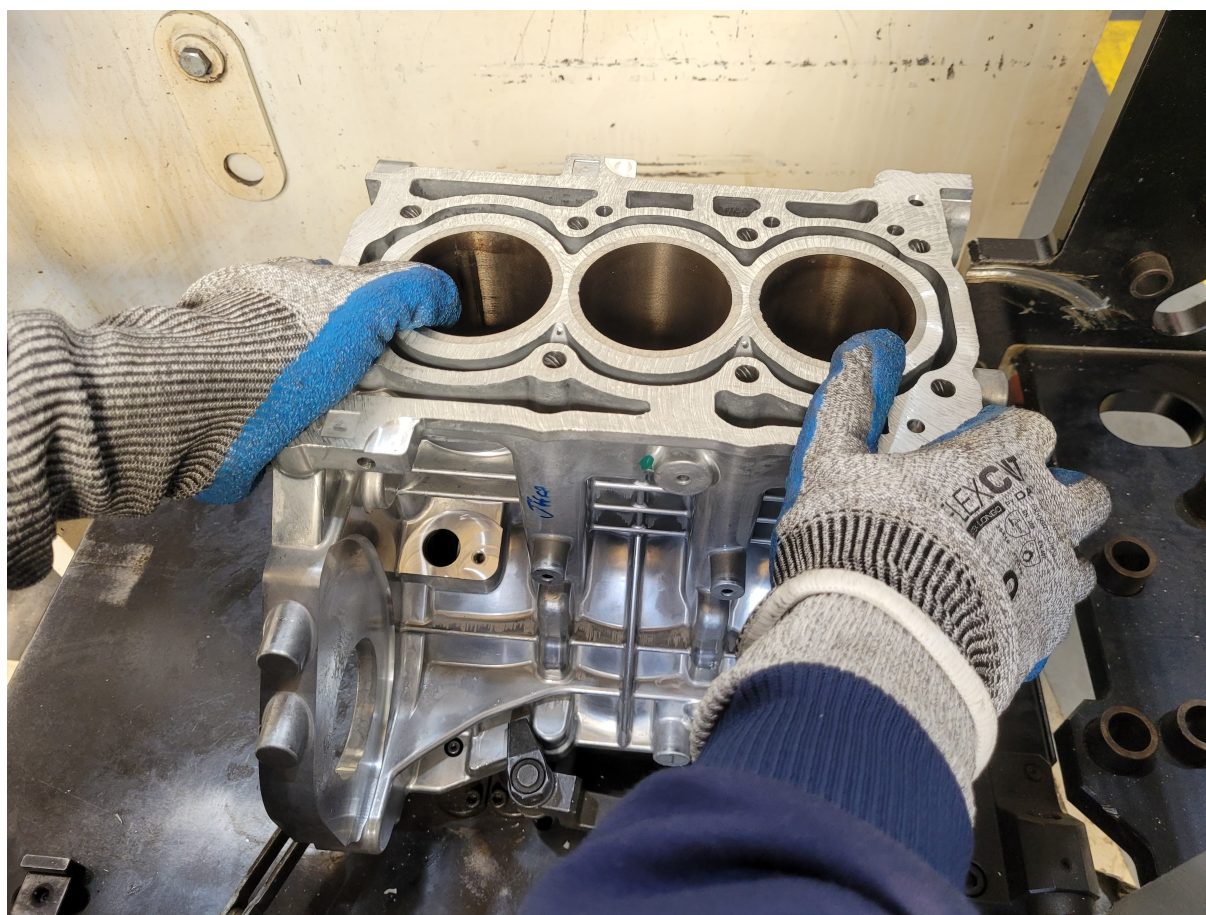
- **Eixo** – Nesta coluna temos as coordenadas do furo e da face medidas (X, Y, Z) no relatório. Também constam o diâmetro dos furos (D) e o erro de posição dos furos (PR).
- **Descrição** – Indica a nomenclatura das regiões medidas no bloco, como faces, furos e referências.
- **Nominal** – Apresenta o valor absoluto de posição, coordenada ou diâmetro conforme os eixos definidos no desenho técnico do bloco. Os valores estão em milímetros (mm).
- **+Tol** e **-Tol** – Representam, respectivamente, as tolerâncias máximas e mínimas de desvio permitidas durante a medição do bloco na Máquina de Medição por Coordenadas (MMC). Os valores estão em milímetros (mm).
- **Medido** – Valor registrado pela Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) durante a verificação dimensional. Os valores estão em milímetros (mm).

- **Desvio** – Nesta coluna temos a diferença entre o valor medido e o valor nominal, permitindo avaliar se o desvio encontrado está dentro ou não dos limites aceitáveis previstos para o eixo verificado conforme desenho do produto.

Depois deste passo, as mesmas peças serão transportadas até a linha de produção e controladas utilizando uma máscara dimensional. Na operação, será realizado o controle do produto na máscara pelo operador do posto de trabalho a fim de atestar com calibradores passa/não passa se as dimensões aprovadas na Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) serão também aprovadas na máscara, e se as dimensões não aprovadas também serão reprovadas na máscara.

Para se realizar o controle da peça na máscara, temos os seguintes passos: Posicionar o bloco na máscara de medição visto na figura 10;

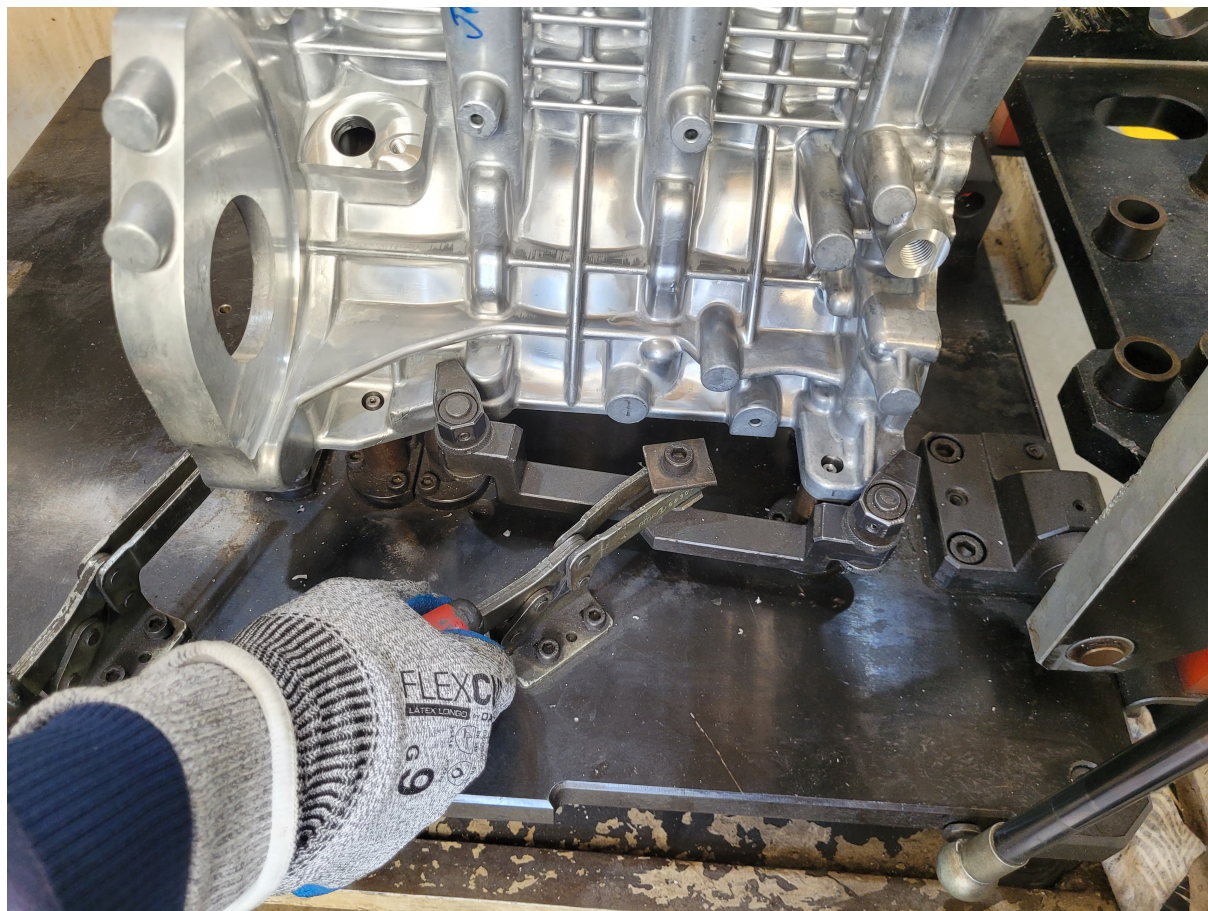
Figura 10 – Posicionamento do bloco na máscara.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Travar o bloco na máscara conforme indicado na figura 11;

Figura 11 – Fixação do bloco na máscara.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Realizar o fechamento da tampa móvel da máscara dimensional conforme figura 12;

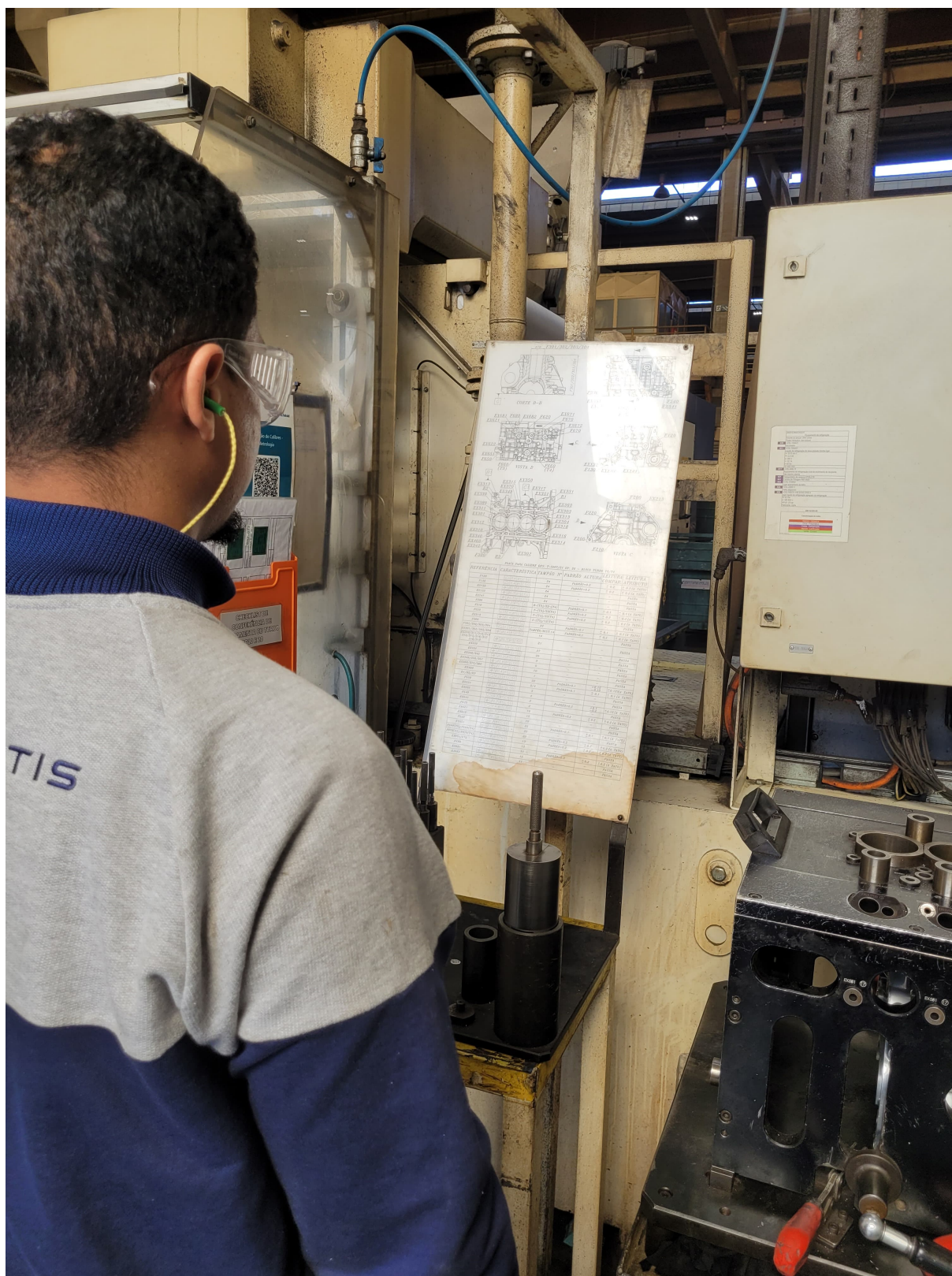
Figura 12 – Fechamento da máscara para controle manual.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Observar o furo no mapa de controle e a respectiva numeração do tampão conforme figura 13;

Figura 13 – Interpretação do mapa de controle do plano de usinagem da máscara.



Pegar o tampão e posicioná-lo no furo a ser controlado, vide figura 14;

Figura 14 – Controle manual feito pelo operador do posto.



Para cada controle realizado no passo a passo acima, será registrada uma foto do resultado do controle (aprovado caso o tampão encaixe até no plano limite da máscara ou reprovado caso o tampão não se encaixe até o plano limite da máscara) para comparação, em uma tabela, entre o relatório e a máscara. A tabela visa facilitar a comparação de medição qualitativa (visual e tátil) com uma medição quantitativa (valores numéricos).

Também será realizado o passo a passo de controle dimensional manual sem interrupção do operador para tirar as fotos para registrar, com um cronômetro, o tempo médio de controle pelo operador.

Para aprofundar a análise, será realizado um estudo extra para comparar a taxa de refugo externo e interno com o uso de máscara e sem a utilização de máscara. Este índice será calculado com base nos registros históricos da fábrica, comparando os dados recolhidos antes da introdução do novo dispositivo com aqueles recolhidos após a sua adoção no dashboard do *Power BI*. Será coletado do dashboard no software os gráficos de refugo mensalmente, comparando o período onde não era aplicada a máscara e após o início de seu uso na linha produtiva. Conforme destacado por (ISHIKAWA, 2019), a redução na taxa de rejeições está fortemente associada à efetividade das técnicas de inspeção empregadas e, conseqüentemente, representa um significativo indicador da qualidade do processo produtivo. Assim, o estudo tem como objetivo demonstrar dimensionalmente a influência da máscara no controle de qualidade e na diminuição de desperdícios no processo de usinagem.

Para avaliar a viabilidade técnica e econômica da implementação de uma máscara de controle manual em relação a uma MMC da marca Hexagon, serão considerados:

- **Custo de aquisição dos equipamentos:** valores médios de mercado de instrumentos manuais e da MMC modelo GLOBAL S da Hexagon;
- **Custo com mão de obra:** diferença salarial entre um operador de instrumentos manuais e um técnico especializado em metrologia tridimensional;
- **Custo de manutenção e calibração periódica dos equipamentos.**

A comparação dos custos de aquisição do equipamento, infraestrutura do ambiente e capacitação de mão de obra, que serão apresentados em uma tabela comparativa entre a máscara dimensional e a máquina tridimensional computadorizada (MMC).

No término do estudo, espera-se que os achados confirmem a hipótese de que a máscara dimensional é um instrumento de inspeção eficiente tanto quanto uma máquina tridimensional computadorizada, sendo necessário menor custo de implementação, justificando sua utilização como uma estratégia de uso em comparação às medições tridimensionais convencionais quando realizada em um processo contínuo. A metodologia empregada contribuirá para a obtenção de resultados exatos e reproduzíveis, contribuindo assim para a contínua melhoria da qualidade dos

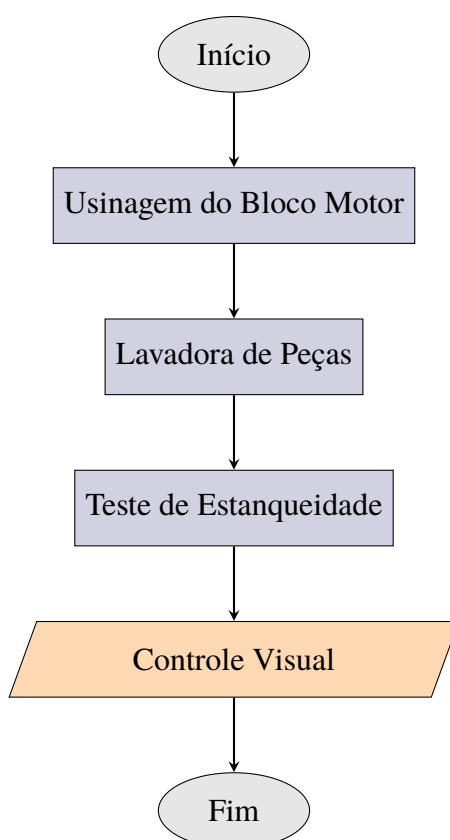
processos de usinagem. Isso implica que a pesquisa não só trará benefícios diretos para a indústria em análise, mas também servirá de base para outras empresas que buscam novas estratégias para o controle de qualidade dimensional e diminuição de custos de qualidade.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Cenário Atual da Empresa

Atualmente, a empresa em estudo conta com um setor de usinagem dedicado à fabricação do bloco turbo de alumínio, um componente-base para o funcionamento dos motores. A figura 15 visa facilitar o entendimento do setor e a sequência de teste e operação do bloco na linha de produção:

Figura 15 – Fluxograma do setor de usinagem do bloco motor



Fonte: Próprio autor, 2025.

O setor de usinagem é composto por cinco centros de usinagem CNC modelo G520, modelo bifuso, conforme figura 16.

Figura 16 – Máquina de usinagem modelo CNC GROB G520



Fonte: Grob Werke GmbH.

No início de cada um dos 3 turnos ou após manutenção preventiva ou corretiva, as primeiras peças produzidas pelas máquinas de usinagem seguem para inspeção dimensional no laboratório de metrologia, onde são verificadas por meio de MMC's( Máquina de Medição por Coordenadas tridimensionais), e a cada 2 horas decorridas do turno de produção, as peças seguem para o posto de controle dimensional, que possui dispositivos projetados para checar características dimensionais críticas através de controle manual. Este controle é realizado pelo laboratório dimensional( para a MMC) ou na linha de produção(para o dispositivo de medição dimensional).Esse controle é realizado para assegurar uma amostragem periódica que visa manter a estabilidade do processo e prevenir a produção em série de peças fora de especificação.

Caso a peça atenda aos critérios dimensionais estabelecidos, ela é então encaminhada para a etapa de lavagem industrial. A lavagem é realizada em lavadoras automáticas que utilizam

atos de água e detergentes para garantir a limpeza completa da superfície e dos canais internos das peças. Após a lavagem, a secagem é necessária para eliminar a umidade residual, evitando interferências nos testes subsequentes, como formação de bolhas ou variações de pressão falsas (GONÇALVES, 2015). Assim, a eficiência dessa etapa é determinante para assegurar a confiabilidade do teste de estanqueidade e a qualidade final do produto (GOMES; SILVA; NASCIMENTO, 2020).





Após a peça passar pelo processo de lavagem e secagem, de forma subsequente é realizado o teste de estanqueidade ou *leak test*, no qual será verificado se uma peça ou sistema é hermético, ou seja, se não apresenta vazamentos em seus compartimentos ou canais internos que comprometam seu funcionamento. Este tipo de ensaio é amplamente utilizado na indústria automotiva para verificar a integridade de componentes que devem manter vedação em seus compartimentos internos, como blocos de motor, cabeçotes e sistemas de arrefecimento. Entre os métodos mais utilizados destaca-se o teste por queda de pressão, em que a peça é preenchida com ar comprimido até uma pressão pré-definida e mantida em repouso por um tempo determinado. A eventual perda de pressão, medida por sensores de alta precisão, indica a existência de vazamentos. Esse método é bastante eficaz e amplamente adotado em linhas de produção automatizadas, devido à sua agilidade e confiabilidade (SILVA; OLIVEIRA; RODRIGUES, 2012).








Por fim, após a aprovação no teste de estanqueidade, a peça é submetida a uma inspeção visual final. O controle visual de qualidade é diferente de métodos destrutivos ou instrumentais; o controle visual é classificado como um ensaio não destrutivo (END) e pode ser realizado tanto por operadores treinados quanto por sistemas automatizados com câmeras e sensores ópticos (SILVA; OLIVEIRA; RODRIGUES, 2012). Ele é especialmente eficaz para detectar falhas como trincas aparentes, rebarbas, amassados, manchas, porosidades externas, falhas de usinagem e problemas de acabamento.






## **4.2 Tabela de comparação entre resultados quantitativo e qualitativos de medição**






Abaixo temos a tabela comparando a medição quantitativa do relatório dimensional da máquina de medição por coordenadas e a medição qualitativa no dispositivo de medição dimensional de 5 blocos de motor. Abaixo temos a tabela com a descrição do furo no qual foi realizada a medição do erro de posição, temos o erro nominal de posição, a tolerância máxima e mínima, o valor medido da máquina de medição por coordenadas (MMC) e o desvio de medição da máquina de medição por coordenadas (MMC). Todas as medidas nas quais a medição ficou fora do range da tolerância permitida pelo cliente estão com a célula na cor vermelha. Na última coluna temos o registro de imagem da medição qualitativa realizada no dispositivo de medição dimensional para cada um dos furos do bloco motor:





## 4.2.1 Resultados de medição dimensional Peça 1



Descrição	Nominal	+Tol	-Tol	Medido	Desvio	Medição na máscara
EX132	0,000	0,300	0,000	0,067	0,067	
EX133	0,000	0,300	0,000	0,085	0,085	
EX141	0,000	0,300	0,000	0,044	0,044	
EX213	0,000	0,400	0,000	0,833	0,833	
EX301	0,000	0,400	0,000	0,105	0,105	
EX302	0,000	0,400	0,000	0,120	0,120	
EX303	0,000	0,400	0,000	0,179	0,179	

EX310	0,000	0,300	0,000	1,035	1,035	
EX311	0,000	0,300	0,000	0,702	0,702	
EX312	0,000	0,300	0,000	1,068	1,068	
EX313	0,000	0,300	0,000	0,786	0,786	
EX314	0,000	0,300	0,000	1,153	1,153	
EX315	0,000	0,300	0,000	0,912	0,912	
EX316	0,000	0,300	0,000	1,277	1,277	







EX317	0,000	0,300	0,000	1,037	1,037	
EX320	0,000	0,300	0,000	0,947	0,947	NA
EX330	0,000	0,100	0,000	0,665	0,665	
EX331	0,000	0,070	0,000	1,071	1,071	
EX340	0,000	0,300	0,000	0,137	0,137	
EX342	0,000	0,300	0,000	0,266	0,266	
EX349	0,000	0,600	0,000	0,156	0,156	







EX350	0,000	0,600	0,000	0,138	0,138	
EX360	0,000	0,400	0,000	0,199	0,199	
EX370	0,000	0,400	0,000	0,306	0,306	
EX460	0,000	0,400	0,000	1,247	1,247	
EX531	0,000	0,300	0,000	0,719	0,719	






EX532	0,000	0,300	0,000	0,711	0,711	
EX541	0,000	0,300	0,000	0,515	0,515	
EX621	0,000	0,300	0,000	1,408	1,408	
EX622	0,000	0,300	0,000	0,397	0,397	







EX651	0,000	0,300	0,000	1,507	1,507	
EX671	0,000	0,300	0,000	1,354	1,354	
EX681	0,000	0,300	0,000	1,351	1,351	
EX682	0,000	0,300	0,000	1,124	1,124	





## 4.2.2 Resultados de medição dimensional Peça 2




Descrição	Nominal	+Tol	-Tol	Medido	Desvio	Medição na máscara
EX132	0,000	0,300	0,000	0,170	0,170	
EX133	0,000	0,300	0,000	0,159	0,159	
EX141	0,000	0,300	0,000	0,357	0,357	
EX213	247,700	0,200	-0,200	247,698	-0,002	
EX301	0,000	0,400	0,000	0,293	0,293	
EX302	0,000	0,400	0,000	0,071	0,071	

EX303	0,000	0,400	0,000	0,118	0,118	
EX310	0,000	0,300	0,000	0,112	0,112	
EX311	0,000	0,300	0,000	0,011	0,011	
EX312	0,000	0,300	0,000	0,170	0,170	
EX313	0,000	0,300	0,000	0,049	0,049	
EX314	0,000	0,300	0,000	0,173	0,173	

EX315	0,000	0,300	0,000	0,075	0,075	
EX316	0,000	0,300	0,000	0,217	0,217	
EX317	0,000	0,300	0,000	0,127	0,127	
EX320	0,000	0,300	0,000	0,101	0,101	NA
EX330	0,000	0,100	0,000	0,072	0,072	
EX331	0,000	0,070	0,000	0,161	0,161	

EX340	0,000	0,300	0,000	0,096	0,096	
EX342	0,000	0,300	0,000	0,274	0,274	
EX349	0,000	0,600	0,000	0,129	0,129	
EX350	0,000	0,600	0,000	0,101	0,101	
EX360	0,000	0,400	0,000	0,081	0,081	
EX370	0,000	0,400	0,000	0,142	0,142	







EX460	0,000	0,400	0,000	0,381	0,381	
EX531	0,000	0,300	0,000	0,225	0,225	
EX532	0,000	0,300	0,000	0,244	0,244	
EX541	0,000	0,300	0,000	0,240	0,240	






EX621	0,000	0,300	0,000	0,352	0,352	
EX622	0,000	0,300	0,000	0,156	0,156	
EX651	0,000	0,300	0,000	0,126	0,126	







EX671	0,000	0,300	0,000	0,130	0,130	
EX681	0,000	0,300	0,000	0,148	0,148	
EX682	0,000	0,300	0,000	0,114	0,114	





### 4.2.3 Resultados de medição dimensional Peça 3

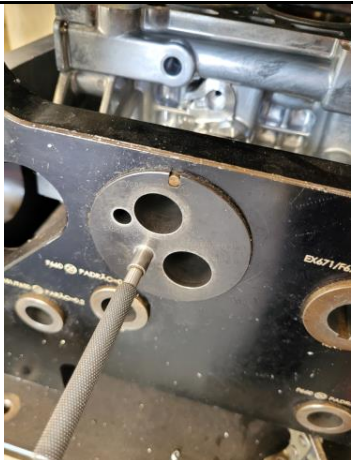


Descrição	Nominal	+Tol	-Tol	Medido	Desvio	Medição na máscara
EX132	0,000	0,300	0,000	0,186	0,186	
EX133	0,000	0,300	0,000	0,172	0,172	
EX141	0,000	0,300	0,000	0,315	0,315	
EX213	0,000	0,400	0,000	0,544	0,544	
EX301	0,000	0,400	0,000	0,083	0,083	
EX302	0,000	0,400	0,000	0,060	0,060	




EX303	0,000	0,400	0,000	0,239	0,239	
EX310	0,000	0,300	0,000	0,234	0,234	
EX311	0,000	0,300	0,000	0,220	0,220	
EX312	0,000	0,300	0,000	0,206	0,206	
EX313	0,000	0,300	0,000	0,192	0,192	
EX314	0,000	0,300	0,000	0,204	0,204	

EX315	0,000	0,300	0,000	0,201	0,201	
EX316	0,000	0,300	0,000	0,278	0,278	
EX317	0,000	0,300	0,000	0,285	0,285	
EX320	0,000	0,300	0,000	0,393	0,393	NA
EX330	0,000	0,100	0,000	0,097	0,097	
EX331	0,000	0,070	0,000	0,047	0,047	

EX340	0,000	0,300	0,000	0,213	0,213	
EX342	0,000	0,300	0,000	0,276	0,276	
EX349	0,000	0,600	0,000	0,239	0,239	
EX350	0,000	0,600	0,000	0,334	0,334	
EX360	0,000	0,400	0,000	0,396	0,396	
EX370	0,000	0,400	0,000	0,378	0,378	







EX460	0,000	0,400	0,000	0,884	0,884	
EX531	0,000	0,300	0,000	0,060	0,060	
EX532	0,000	0,300	0,000	0,056	0,056	
EX541	0,000	0,300	0,000	0,308	0,308	






EX621	0,000	0,300	0,000	0,357	0,357	
EX622	0,000	0,300	0,000	0,237	0,237	
EX651	0,000	0,300	0,000	0,291	0,291	







EX671	0,000	0,300	0,000	0,333	0,333	
EX681	0,000	0,300	0,000	0,171	0,171	
EX682	0,000	0,300	0,000	0,126	0,126	





## 4.2.4 Resultados de medição dimensional Peça 4




Descrição	Nominal	+Tol	-Tol	Medido	Desvio	Medição na máscara
EX132	0,000	0,300	0,000	0,112	0,112	
EX133	0,000	0,300	0,000	0,116	0,116	
EX141	0,000	0,300	0,000	0,306	0,306	
EX213	0,000	0,400	0,000	0,418	0,418	
EX301	0,000	0,400	0,000	0,188	0,188	
EX302	0,000	0,400	0,000	0,036	0,036	

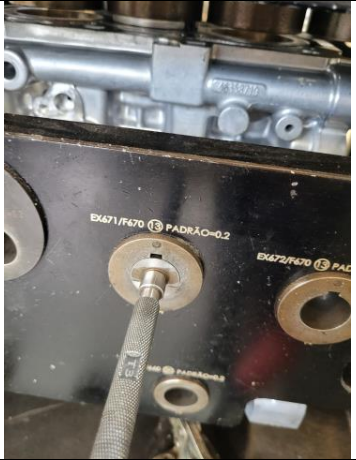


EX303	0,000	0,400	0,000	0,139	0,139	
EX310	0,000	0,300	0,000	0,028	0,028	
EX311	0,000	0,300	0,000	0,061	0,061	
EX312	0,000	0,300	0,000	0,112	0,112	
EX313	0,000	0,300	0,000	0,140	0,140	
EX314	0,000	0,300	0,000	0,134	0,134	

EX315	0,000	0,300	0,000	0,173	0,173	
EX316	0,000	0,300	0,000	0,222	0,222	
EX317	0,000	0,300	0,000	0,261	0,261	
EX320	0,000	0,300	0,000	0,068	0,068	NA
EX330	0,000	0,100	0,000	0,030	0,030	
EX331	0,000	0,070	0,000	0,021	0,021	

EX340	0,000	0,300	0,000	0,289	0,289	
EX342	0,000	0,300	0,000	0,265	0,265	
EX349	0,000	0,600	0,000	0,179	0,179	
EX350	0,000	0,600	0,000	0,216	0,216	
EX360	0,000	0,400	0,000	0,107	0,107	
EX370	0,000	0,400	0,000	0,088	0,088	

EX460	0,000	0,400	0,000	0,333	0,333	
EX531	0,000	0,300	0,000	0,136	0,136	
EX532	0,000	0,300	0,000	0,252	0,252	
EX541	0,000	0,300	0,000	0,117	0,117	






EX621	0,000	0,300	0,000	0,392	0,392	
EX622	0,000	0,300	0,000	0,389	0,389	
EX651	0,000	0,300	0,000	0,046	0,046	

EX671	0,000	0,300	0,000	0,089	0,089	
EX681	0,000	0,300	0,000	0,040	0,040	
EX682	0,000	0,300	0,000	0,104	0,104	





## 4.2.5 Resultados de medição dimensional Peça 5




Descrição	Nominal	+Tol	-Tol	Medido	Desvio	Medição na máscara
EX132	0,000	0,300	0,000	0,069	0,069	
EX133	0,000	0,300	0,000	0,027	0,027	
EX141	0,000	0,300	0,000	0,326	0,326	
EX213	0,000	0,400	0,000	0,499	0,499	
EX301	0,000	0,400	0,000	0,279	0,279	
EX302	0,000	0,400	0,000	0,105	0,105	




EX303	0,000	0,400	0,000	0,109	0,109	
EX310	0,000	0,300	0,000	0,144	0,144	
EX311	0,000	0,300	0,000	0,190	0,190	
EX312	0,000	0,300	0,000	0,111	0,111	
EX313	0,000	0,300	0,000	0,135	0,135	
EX314	0,000	0,300	0,000	0,090	0,090	

EX315	0,000	0,300	0,000	0,141	0,141	
EX316	0,000	0,300	0,000	0,138	0,138	
EX317	0,000	0,300	0,000	0,156	0,156	
EX320	0,000	0,300	0,000	0,148	0,148	NA
EX330	0,000	0,100	0,000	0,062	0,062	
EX331	0,000	0,070	0,000	0,046	0,046	

EX340	0,000	0,300	0,000	0,043	0,043	
EX342	0,000	0,300	0,000	0,076	0,076	
EX349	0,000	0,600	0,000	0,299	0,299	
EX350	0,000	0,600	0,000	0,321	0,321	
EX360	0,000	0,400	0,000	0,096	0,096	
EX370	0,000	0,400	0,000	0,136	0,136	

EX460	0,000	0,400	0,000	0,371	0,371	
EX531	0,000	0,300	0,000	0,164	0,164	
EX532	0,000	0,300	0,000	0,194	0,194	
EX541	0,000	0,300	0,000	0,161	0,161	

EX621	0,000	0,300	0,000	0,322	0,322	
EX622	0,000	0,300	0,000	0,288	0,288	
EX651	0,000	0,300	0,000	0,151	0,151	

EX671	0,000	0,300	0,000	0,167	0,167	
EX681	0,000	0,300	0,000	0,129	0,129	
EX682	0,000	0,300	0,000	0,183	0,183	

### 4.3 Análise dos relatórios

Para as 5 tabelas exibidas, podemos observar no comparativo entre o resultado quantitativo medido na máquina de medição por coordenadas e o resultado qualitativo do dispositivo de medição dimensional que o eixo "EX320" não foi medido no dispositivo de medição dimensional, pois esta é uma modificação ocorrida após a construção do dispositivo de medição dimensional. Outro ponto a se observar é a facilidade visual para detecção pelo operador treinado no posto, que se faz essencial para a redução de erro humano de detecção.

Fica a observação em relação ao controle do dispositivo de medição dimensional que, ao fim do controle, as cotas de eixos que apresentaram reprovação no teste prático necessitam ser corrigidas para que as próximas peças usinadas não apresentem o mesmo defeito de deslocamento de usinagem. Por isso, faz-se necessário, nesse caso, o uso imprescindível do controle na MMC devido a esta apresentar o erro de posição e, além disso, indicar o plano que se encontra o deslocamento de usinagem em relação à referência da máquina de usinagem.

Com o defeito identificado, o operador da CNC realiza os ajustes, buscando corrigir os desvios dimensionais dos planos reprovados no relatório. O bloco de motor possui, na máquina para dois planos (X e Y) duas referências chamadas de index. O deslocamento na posição do index, por ser a referência, acarreta deslocamento nos demais eixos do produto e por isso sua verificação é feita de forma preferencial.

O operador verifica o desvio no index da máquina no relatório conforme a tabela 3 e faz a correção quando os desvios seguem para um mesmo plano em vários eixos diferentes, mas também pode realizar correção individual no caso de o eixo específico estar deslocado em relação ao relatório dimensional.

Tabela 3 – Relatório dimensional com deslocamento de usinagem no index da peça

-	Ei	Descrição	Nomina	+Tol	-Tol	Medid	Desvi
X		POSIÇÃO CIR 401(B1) ÍNDEX	148,000	0,000	0,000	147,990	-0,010
Y		POSIÇÃO CIR 401(B1) ÍNDEX	-154,000	0,000	0,000	-154,134	0,134
PR		POSIÇÃO CIR 401(B1) ÍNDEX	0,000	0,200	0,000	0,268	0,268
Z		REF VERT P1	0,000	0,050	-0,050	-0,001	-0,001
Z		REF VERT P2	0,000	0,050	-0,050	0,001	0,001
Z		REF VERT P3	0,000	0,050	-0,050	0,001	0,001
X		POSIÇÃO CIR 402(C1) ÍNDEX	-20,000	0,000	0,000	-19,912	0,088
Y		POSIÇÃO CIR 402(C1) ÍNDEX	204,000	0,000	0,000	204,062	0,062
PR		POSIÇÃO CIR 402(C1) ÍNDEX	0,000	0,070	0,000	0,108	0,108
M		PERF SUP PLN 300	0,000	0,200	0,000	0,024	0,024
M		PLANIC PLN 300	0,000	0,100	0,000	0,011	0,011
X		COORD 310	-190,250	0,105	-0,105	-190,380	0,130
Y		COORD 310	0,000	0,105	-0,105	-0,501	-0,501
X		POSIÇÃO 310	-190,250	0,000	0,000	-190,380	0,130
Y		POSIÇÃO 310	0,000	0,000	0,000	-0,501	-0,501
PR		POSIÇÃO 310	0,000	0,300	0,000	1,035	1,035
X		COORD 311	-105,750	0,105	-0,105	-105,843	0,093
Y		COORD 311	0,000	0,105	-0,105	-0,338	-0,338
X		POSIÇÃO 311	-105,750	0,000	0,000	-105,843	0,093
Y		POSIÇÃO 311	0,000	0,000	0,000	-0,338	-0,338
PR		POSIÇÃO 311	0,000	0,300	0,000	0,702	0,702
X		COORD 312	-190,250	0,105	-0,105	-190,480	0,230
Y		COORD 312	77,000	0,105	-0,105	76,518	-0,482
X		POSIÇÃO 312	-190,250	0,000	0,000	-190,480	0,230
Y		POSIÇÃO 312	77,000	0,000	0,000	76,518	-0,482
PR		POSIÇÃO 312	0,000	0,300	0,000	1,068	1,068
X		COORD 313	-105,750	0,105	-0,105	-105,931	0,181
Y		COORD 313	77,000	0,105	-0,105	76,651	-0,349
X		POSIÇÃO 313	-105,750	0,000	0,000	-105,931	0,181
Y		POSIÇÃO 313	77,000	0,000	0,000	76,651	-0,349

Fonte: Próprio autor, 2025.

Quando temos o index com desvios dimensionais fora da tolerância do relatório, temos os casos de eixos deslocados que são corrigidos de forma individual conforme a tabela 4:

Tabela 4 – Relatório dimensional com deslocamento de usinagem no eixo EX340

-	Ei	Descrição	Nomina	+Tol	-Tol	Medid	Desvi
	X	POSIÇÃO CIR 401(B1) ÍNDEX	148,000	0,000	0,000	148,000	0,000
	Y	POSIÇÃO CIR 401(B1) ÍNDEX	-154,000	0,000	0,000	-153,990	-0,010
	PR	POSIÇÃO CIR 401(B1) ÍNDEX	0,000	0,200	0,000	0,119	0,081
	X	POSIÇÃO CIR 402(C1) ÍNDEX	-20,000	0,000	0,000	-20,001	0,001
	Y	POSIÇÃO CIR 402(C1) ÍNDEX	204,000	0,000	0,000	203,999	-0,001
	PR	POSIÇÃO CIR 402(C1) ÍNDEX	0,000	0,070	0,000	0,003	0,003
	X	POSIÇÃO 340	-200,000	0,000	0,000	-199,952	-0,048
	Y	POSIÇÃO 340	9,300	0,000	0,000	9,143	-0,157
	PR	POSIÇÃO 340	0,000	0,300	0,000	0,329	0,329

Fonte: Próprio autor, 2025.

Após o ajuste, a primeira peça usinada segue para o laboratório para verificação da eficácia da correção de cotas no programa da máquina de usinagem. Ao fim do controle, o operador observa o relatório e verifica se a correção da cota reprovada foi efetiva, assim, liberando a máquina CNC para a produção do bloco de motor. Caso a peça controlada ainda possua desvios dimensionais, repete-se então o processo de usinagem e controle dimensional da peça no laboratório até a correção de todas as cotas da peça.

A seguir temos a tabela 5 com registro dos resultados das medições do tempo de controle realizado nos 5 blocos na máquina de medição por coordenadas no laboratório. Temos os tempos divididos por etapa de execução (deslocamento até a máquina, carregamento e preparação de testes e controle dimensional) da atividade em ambos os dispositivos de medição e controle.

Tabela 5 – Tempos de deslocamento, carregamento e controle das peças para controle na máquina de medição por coordenadas

Peça	Tempo de deslocamento até o dispositivo	Tempo de carregamento e preparação	Tempo de controle	Tempo total de controle (s)
Peça 1	3min49s	26s	24min47s	29min2s
Peça 2	3min30s	29s	24min39s	28min38s
Peça 3	3min39s	26s	23min45s	27min50s
Peça 4	3min15s	23s	23min25s	27min3s
Peça 5	3min42s	25s	23min47s	27min54s

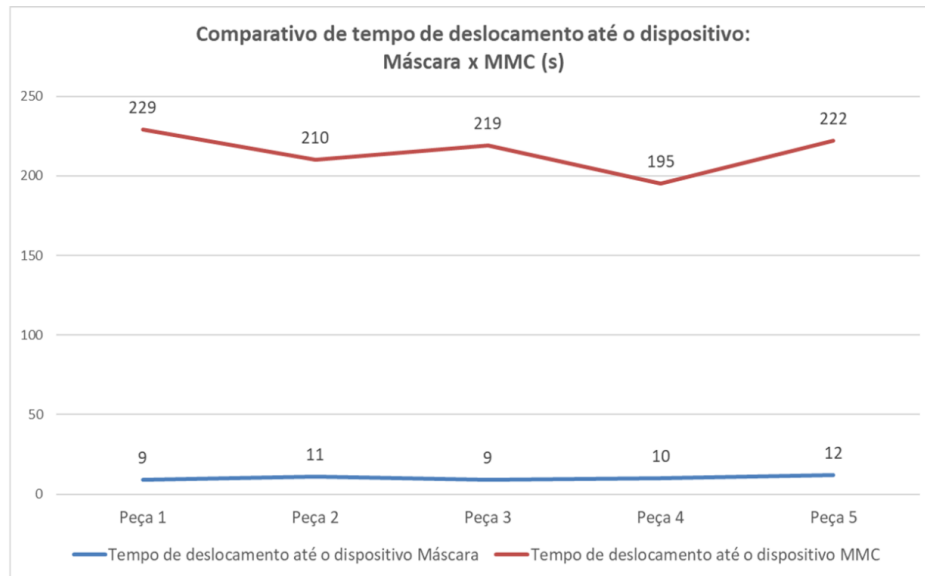
Abaixo temos a tabela 6 com os resultados das medições do tempo de controle dos 5 blocos no dispositivo de medição dimensional realizado por um operador treinado no posto de trabalho:

Tabela 6 – Tempos de deslocamento, carregamento e controle das peças para controle no dispositivo de medição dimensional

<b>Peça</b>	<b>Tempo de deslocamento até o dispositivo</b>	<b>Tempo de carregamento e preparação</b>	<b>Tempo de controle</b>	<b>Tempo total de controle (s)</b>
Peça 1	9s	12s	6min24s	6min45s
Peça 2	11s	14s	6min13s	6min38s
Peça 3	9s	14s	7min08s	7min31s
Peça 4	10s	16s	6min55s	7min21s
Peça 5	12s	12s	7min12s	7min36s

A título de comparação, seguem abaixo os gráficos comparativos para cada uma das etapas cronometradas nos dois dispositivos de medição (dispositivo de medição dimensional e máquina de medição por coordenadas) e o tempo total de controle:

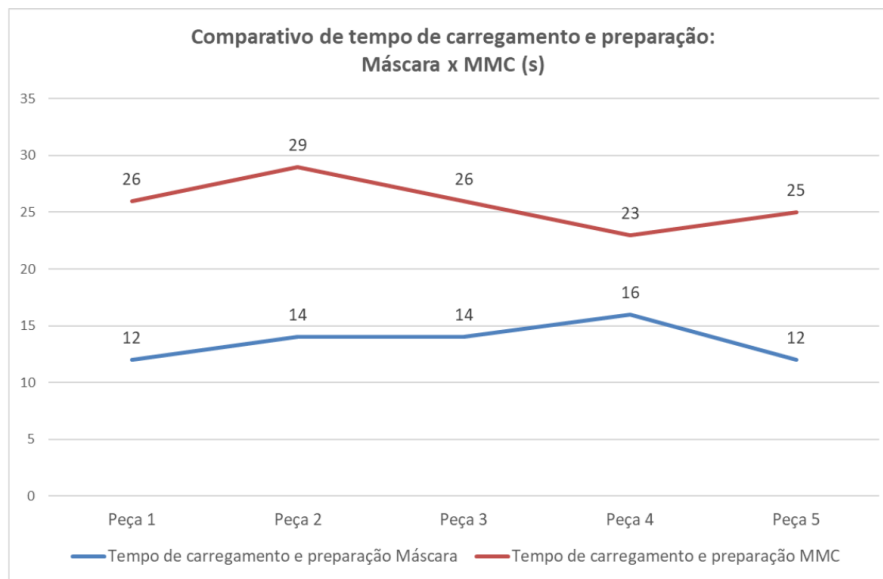
Figura 17 – Comparativo de tempo de deslocamento até o dispositivo: Dispositivo de medição dimensional x MMC (s)



Fonte: Adaptado pelo autor, 2025.

Podemos observar na figura 17 a grande diferença do tempo de deslocamento entre os dispositivos; isso se deve ao fato da distância de aproximadamente 238 metros entre o laboratório dimensional e a máquina de usinagem de onde são retirados os blocos. O posto de Controle do dispositivo de medição dimensional possui menor tempo de deslocamento devido ao fato de estar ao lado da máquina de usinagem.

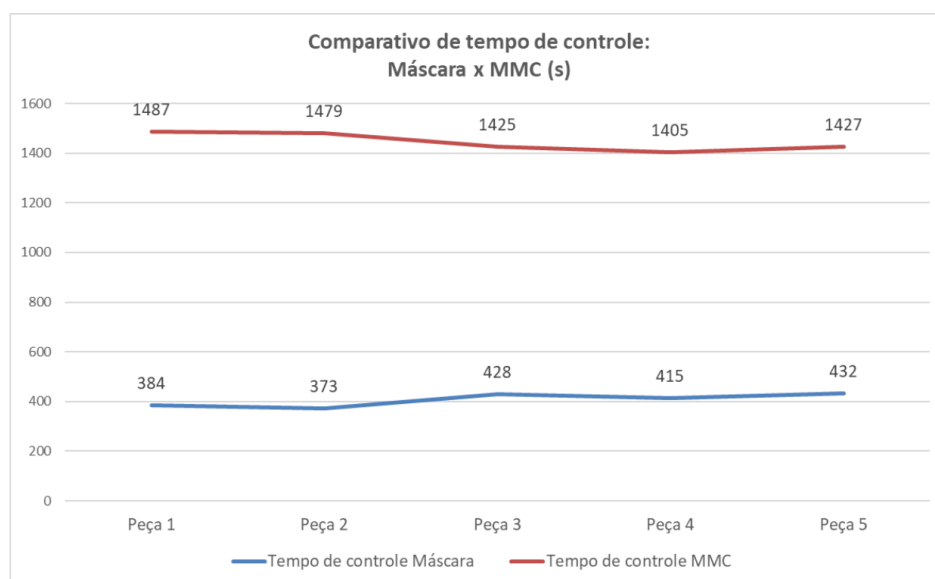
Figura 18 – Comparativo de tempo de carregamento e preparação: Dispositivo de medição dimensional x MMC (s)



Fonte: Adaptado pelo autor, 2025.

No comparativo de tempo de carregamento e preparação mostrado na Figura 18, podemos notar uma diferença menos acentuada; porém, ainda assim, o dispositivo de medição dimensional manual apresenta menor tempo, devido à sua etapa única de posicionamento da peça. Já na máquina de medição por coordenadas, são necessárias mais etapas, incluindo a instalação do berço, a deposição da peça, bem como o ajuste e a execução do software de varredura.

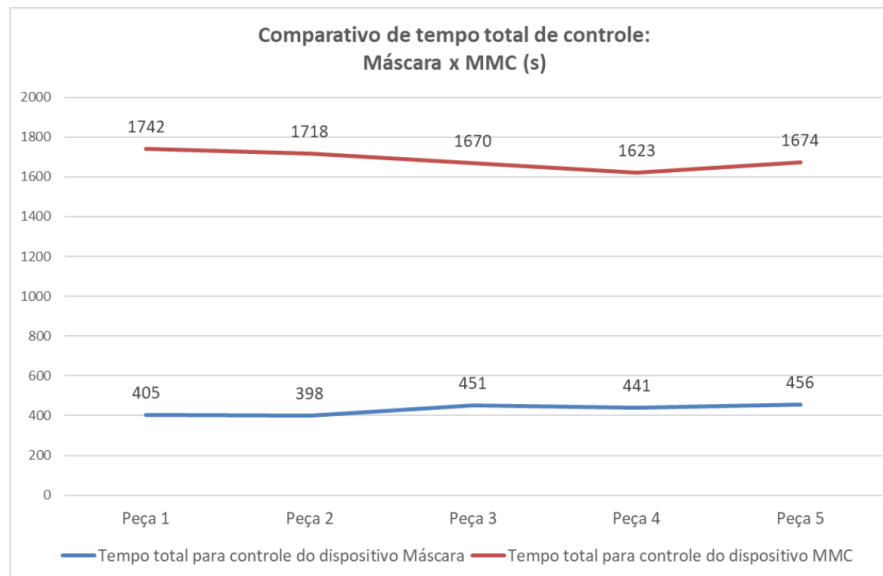
Figura 19 – Comparativo de tempo de controle: Dispositivo de medição dimensional x MMC (s)



Fonte: Adaptado pelo autor, 2025.

No tempo de controle registrado na figura 19 percebemos maior diferença entre o tempo de inspeção do dispositivo de medição dimensional manual em relação à máquina de medição tridimensional.

Figura 20 – Comparativo de tempo total de controle: Dispositivo de medição dimensional x MMC (s)

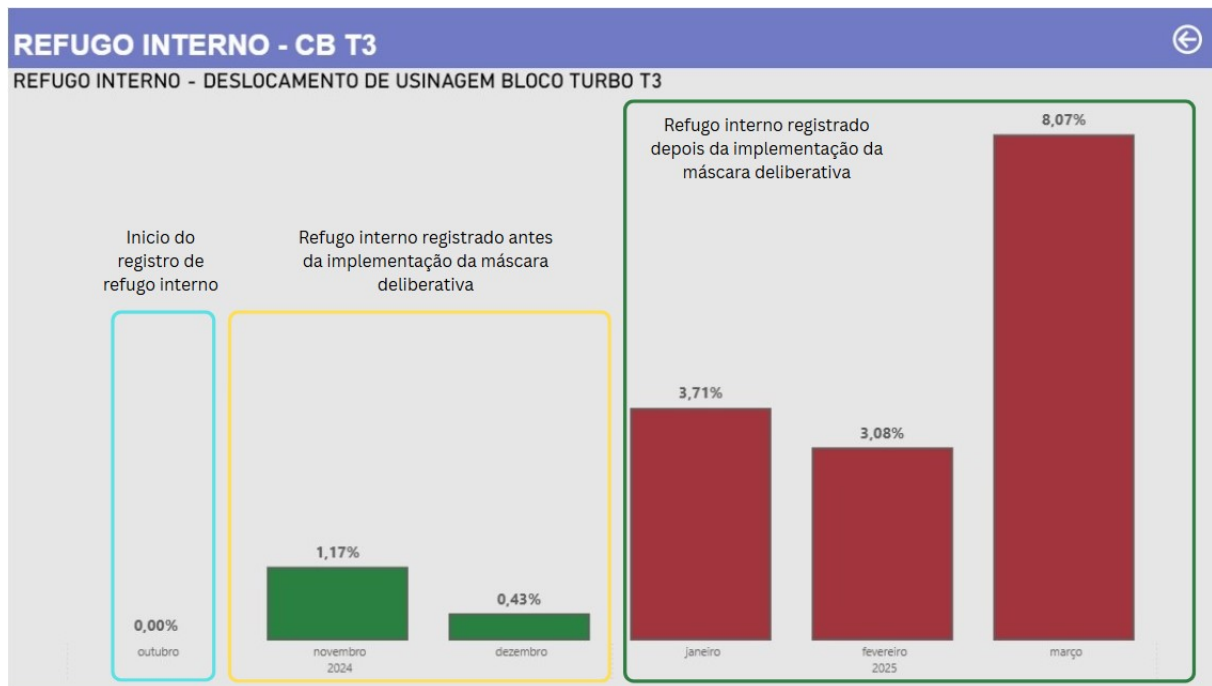


Fonte: Adaptado pelo autor, 2025.

O somatório do tempo total de controle evidenciado na figura 20 evidencia o custo de performance para alta precisão e rigor no controle dos eixos usinados. Apesar da diferença do tempo de controle entre os equipamentos, as atividades sem valor agregado corroboraram para a diferença de tempo de controle total entre os equipamentos.

Nesta etapa, temos os resultados obtidos para o refugo interno do Bloco turbo usinado do período antes e depois da implementação do dispositivo de medição dimensional como controle deliberativo de produção no início dos turnos da empresa de usinagem:

Figura 21 – Evolução mensal do refugo interno do produto Bloco Turbo



Fonte: Adaptada pelo autor, 2025.

Na Figura 21 podemos observar o aumento da identificação e retenção de blocos antes do envio ao cliente. O aumento percentual foi calculado conforme a Equação 4.1, conforme Silva(2014):

$$\text{Aumento Percentual} = \frac{|\text{Valor Final} - \text{Valor Inicial}|}{\text{Valor Inicial}} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:

- Valor final = média percentual de janeiro a Março de 2025
- Valor inicial = média percentual de Novembro e Dezembro de 2024

$$\text{Valor Final} = \frac{3,71\% + 3,08\% + 8,07\%}{3} = 4,95\% \quad (4.2)$$

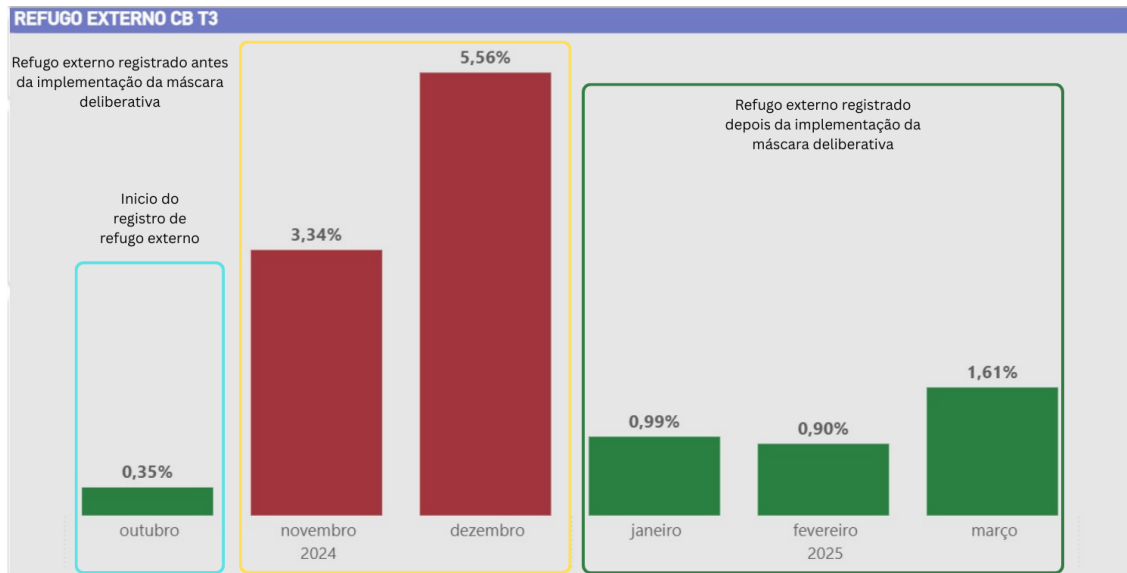
$$\text{Valor Inicial} = \frac{1,17\% + 0,43\%}{2} = 0,80\% \quad (4.3)$$

Assim temos:

$$\text{Aumento Percentual} = \frac{|4,95 - 0,80|}{0,80} \times 100 = 518,75\% \quad (4.4)$$

Isso significa que houve 518,75% mais blocos com deslocamento de usinagem retidos internamente.

Figura 22 – Evolução mensal do refugo externo do produto Bloco Turbo



Fonte: Adaptada pelo autor, 2025.

Em relação ao refugo externo visto na figura 22 temos a seguinte redução percentual:

- Valor final = média percentual de janeiro a Março de 2025
- Valor inicial = média percentual de Novembro e Dezembro de 2024

$$\text{Valor Final} = \frac{0,99\% + 0,90\% + 1,61\%}{3} = 1,17\% \quad (4.5)$$

$$\text{Valor Inicial} = \frac{3,34\% + 5,56\%}{2} = 4,45\% \quad (4.6)$$

Assim temos:

$$\text{Redução Percentual} = \frac{|1,17\% - 4,45\%|}{4,45\%} \times 100 = 73,71\% \quad (4.7)$$

Isso significa que houve 73,71% menos blocos com deslocamento de usinagem enviados para o cliente.

Note que, ao aumentar a frequência de controle devido ao uso do dispositivo de medição dimensional, temos por consequência aumento das peças retidas internamente na empresa (21)

de usinagem, e conseqüente redução de envio de peças defeituosas devido ao deslocamento de usinagem(22).

Temos na tabela 7 a média de valor comercial da máquina de medição por coordenadas(CMM) a fim de estipular a faixa de outros fornecedores com o fornecedor da empresa de usinagem.

Tabela 7 – Faixa de preços de máquinas CMM novas e usadas/retrofit (USD)

<b>Marca</b>	<b>Novas (USD)</b>	<b>Usadas/Retrofit (USD)</b>
Hexagon	60 000 – 100 000	60 000 – 100 000
Mitutoyo	45 000 – 100 000	3 500 – 45 000
Zeiss	60 000 – 150 000	30 000 – 60 000
Wenzel	50 000 – 150 000	20 000 – 50 000

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados comerciais coletados em 2025.

Abaixo temos o comparativo de preços da MMC Hexagon Global Performance 09.15.08 2013, seus componentes e custo de calibração (software de operação PCDIMIS e a cabeça de sonda de indexação motorizada modelo PH10M PLUS) com o dispositivo de medição dimensional.

- Cabeça de sonda de indexação motorizada modelo PH10M PLUS — R\$ 121.000,00
- Hexagon Global Performance 09.15.08 (2013) — R\$ 850.000,00
- Software PC-DMIS 2020 Release R1 — R\$ 5.000,00
- 2x Calibração semestral — R\$ 13.612,40

Total = R\$ 989.612,40.

- Dispositivo de medição Tridimensional com eixos e dimensão conforme desenho técnico — R\$ 101.000,00
- 26X Tampões de inspeção do dispositivo de medição dimensional com dimensão conforme desenho técnico — R\$ 46.800,00



Total = R\$ 147.000,00

Além do custo do equipamento em si, temos uma diferença dos componentes necessários para uso de cada um dos equipamentos de controle, onde a MMC possui dispositivos de maior valor devido à importação e tecnologia agregada, tornando-a mais cara em relação ao dispositivo

de medição dimensional. Temos a observação da calibração da Dispositivo de medição dimensional, pois esta é calibrada na própria empresa com uso da MMC no laboratório, por isso o dispositivo de medição dimensional não possui valor na calibração.

Abaixo segue a figura 23 com a comparação dos resultados analisados e registrados entre o dispositivo de medição dimensional e a máquina de medição por coordenadas computadorizada:

Figura 23 – Comparativo de resultados estudados entre o dispositivo de medição dimensional e a Máquina tridimensional computadorizada.

	VS	
<b>Máscara de medição manual</b>		<b>Máquina tridimensional computadorizada</b>
<b>Custo de implementação</b> <b>R\$147.000,00</b>		<b>Custo de implementação</b> <b>R\$989.612,40</b>
<b>Custo da mão de obra</b> <b>R\$35,18/hr</b>		<b>Custo da mão de obra</b> <b>R\$65,38/hr</b>
<b>Utilizável na área produtiva</b>		<b>Utilizável em laboratório climatizado</b>
<b>Tempo de controle</b> <b>430s</b>		<b>Tempo de controle</b> <b>1685s</b>
<b>Menor flexibilidade para modificação</b>		<b>Maior flexibilidade para modificação</b>
<b>Resultado de teste qualitativo</b>		<b>Resultado de teste quantitativo</b>
<b>exposta as intempéries do processo e dependente do cuidado operacional nos testes</b>		<b>Ambiente controlado e mão de obra técnica de calibração e manutenção</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

No contexto atual, a otimização dos processos produtivos tornou-se essencial para garantir a competitividade e a permanência das empresas no mercado, independentemente do setor em que atuem, visando à redução dos custos operacionais e ao aumento da produtividade na redução do tempo de operação e desperdícios.

Este trabalho teve como propósitos fundamentais a redução da quantidade de peças com deslocamento de usinagem identificadas no cliente, através da redução do tempo e periodicidade de inspeção de peças usinadas no setor, através da implementação do dispositivo de controle manual com maior acessibilidade de uso operacional na linha de produção.

A proposta desenvolvida neste trabalho atendeu aos objetivos específicos que consistiam na análise de impacto do refugo externo e interno no cliente antes e depois da implementação da máscara, comparação do tempo de controle entre máscara e o controle tridimensional computadorizado, além da viabilidade financeira da construção do dispositivo manual em relação a uma máquina de medição por coordenadas.

Os resultados evidenciam redução de 74,4% no tempo total de teste dimensional de um bloco de motor devido aos fatores de distância de deslocamento, tempo de inspeção/varredura e tempo de carregamento e preparação de testes. Em relação a quantidade de peças identificadas e refugadas no cliente, obtivemos uma redução de 73,71% a menos no indicador de refugo externo, e aumento na retenção de peças defeituosas internamente em 518,75%. Quanto menor a periodicidade, mais fácil é identificar os defeitos no produto e desvios do processo, agilizando a tomada de decisão, corroborando com a prevenção de defeitos e segregação de lotes já produzidos com defeito.

Os resultados encontrados nas comparações de medição qualitativa e quantitativa entre a máscara e a MMC evidenciam a deficiência de flexibilidade de alteração de produto do dispositivo implementado. É possível observar no controle do eixo EX320 das 5 peças controladas, pois este eixo possui somente o resultado do relatório da MMC e não possui o controle na máscara. Isso ocorreu devido ao eixo EX320 ter sido uma modificação de produto realizada após a construção da máscara, o que ocasiona deste não estar incluso no controle devido ao fato da necessidade da alteração do dispositivo e construção do tampão "passa/não passa". E este caso também reforça o uso do tridimensional devido à proteção do cliente em relação à qualidade do bloco até que a máscara seja modificada.

Conclui-se também que o controle dimensional manual pode reduzir a frequência de utilização da MMC aumentando sua vida útil pelo fato da máscara entregar a deliberação necessária para o controle de qualidade do bloco, porém ainda se faz válido o uso da MMC que apresenta resultados quantitativos que são utilizados para correção de cotas no programa de usinagem na máquina CNC, independentemente se o desvio de erro de posição dos eixos dos blocos foi encontrado na MMC ou na máscara.

Para futuros trabalhos, temos alguns gaps a analisar. A máscara, por estar exposta às intempéries do meio produtivo, está suscetível a danos e consequente redução de sua finalidade, além de que possui a deficiência no quesito quantitativo pelo fato de não possibilitar um histórico dimensional dos furos controlados para possíveis análises estatísticas de processo. Outro fator relevante fica por conta do controle manual possibilitar falhas humanas durante a operação, mesmo com treinamentos e auditoria mensal das habilidades do operador quanto ao equipamento e posto de trabalho. Para as variáveis apresentadas, Poderia ser implementado de um equipamento de controle automático no posto de trabalho que possibilitaria a mitigação das deficiências expostas.

## REFERÊNCIAS

- BUTTON, S. T.; AGOSTINHO, O. L.; VILELLA, R. C. **Processos de fabricação e planejamento de processos**. Campinas: Unicamp, 2004. <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/graduacao/EM335/apostila.pdf>>. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/sergio1/graduacao/EM335/apostila.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N. **Just in time, MRP II e OPT: um enfoque estratégico**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2014.
- COSTA, A. L. d.; BARBOSA, M. G.; DIAS, R. A. Acompanhamento de indicadores de refugo em linha de produção com uso de fmea. **Revista Gestão & Produção**, São Carlos, v. 25, n. 3, p. 482–493, 2018.
- CROSBY, P. B. **Qualidade é investimento: a arte de garantir qualidade sem aumentar custos**. São Paulo: Pioneira, 2020.
- DINIZ *et al.* **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2020.
- FALAVIGNA, D. **Análise da influência do uso de lubrificante na qualidade superficial de peças de alumínio torneadas**. 2024. Adicionar url. Acesso em: 17 fev. 2025.
- GIESECKE, F. E. *et al.* **Desenho técnico**. 14. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- GOMES, R. D.; SILVA, E. L.; NASCIMENTO, M. J. Importância da limpeza industrial na qualidade do produto final: estudo de caso em uma linha de usinagem automotiva. **Revista Gestão Industrial**, v. 16, n. 2, p. 53–65, 2020.
- GONÇALVES, C. A. **Testes de Estanqueidade: fundamentos, métodos e aplicações industriais**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2015.
- HEXAGON. **Hexagon launches next generation ultra-high accuracy CMMs**. 2023. <<https://hexagon.com/company/newsroom/press-releases/2023/hexagon-launches-next-generation-ultra-high-accuracy-cmms>>. Acesso em: 4 jun. 2025.
- HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988. (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering). ISBN 007028637X.
- ISHIKAWA, K. **Controle da qualidade total: métodos e ferramentas**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2019.
- ISO. **Sistemas de gestão da qualidade – Fundamentos e vocabulário**. 2015. <<https://www.iso.org/standard/45481.html>>. ISO 9000:2015. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/45481.html>>. Acesso em: 08 fev. 2025.
- JURAN, J. M.; GODFREY, A. B. **Juran's Quality Handbook**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.
- JÚNIOR, J. C. T. **Metrologia: fundamentos, técnicas e aplicações**. São Paulo: Érica, 2011.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. d. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

- LIMA, R. D. d. e. a. **Uso de scanner 3D para o controle dimensional de peças em produção**. 2023. <<https://bibliotecatede.uninove.br/bitstream/tede/3502/2/Renan%20Duarte%20de%20Lima.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- LUZZI, M. T. **Desenho técnico mecânico**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2014.
- MOREIRA, R. F. C. **Aplicação das ferramentas da qualidade na engenharia de desenvolvimento para análise de falha**. 2012. <<https://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/2906.pdf>>. Disponível em: <<https://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/2906.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2025.
- OLIVEIRA, F. R.; FIGUEIREDO, K. F. Aplicação da iso 9001 e do cep no controle de qualidade automotivo. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 17, n. 2, p. 602–622, 2017.
- PIRES, J. R. **Otimização das velocidades de corte para o atingimento do tempo objetivo ao mínimo custo total de usinagem**. 2024. <<https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=566984&tipoMidia=0>>. Trabalho de Conclusão de Curso. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=566984tipoMidia=0>>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- PRINCE, D.; JESUS; DE, B. B.; CONDE, G. R. G. Dimensionamento e processo de fabricação de um punção. **Revista de Gestão e Secretariado**, 2024. Disponível em: <<https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/4467>>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- SANTOS, E. F.; SARMENTO, G. H. Aplicação da metodologia fmea em um processo de usinagem. **Caderno de Estudos e Pesquisas em Administração**, 2024. Disponível em: <<https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/5117>>. Acesso em: 07 fev. 2025.
- SCHAEFFER, C. **Medição tridimensional**. 2006. <[https://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/3\\_Eletromecânica/Eleto\\_1\\_Metrologia/Metrologia/metr23.pdf](https://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/3_Eletromecânica/Eleto_1_Metrologia/Metrologia/metr23.pdf)>. Instituto Federal de Santa Catarina. Acesso em: 4 jun. 2025.
- SILVA, A. R. d.; SANTOS, L. M. d.; PEREIRA, R. T. Avaliação de indicadores de refugo no setor metalmeccânico: estudo de caso. **Revista Espacios**, Caracas, v. 37, n. 13, p. 1–13, 2016. Acesso em: 27 maio 2025.
- SILVA, F. J. G. d.; OLIVEIRA, J. R. d.; RODRIGUES, A. A. **Metrologia e Controle da Qualidade**. São Paulo: Érica, 2012.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- STANDARDIZATION, I. O. F. **ABNT NBR ISO 9001:2015 — Sistemas de gestão da qualidade: requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=361208>>. Acesso em: 6 jun. 2025.
- VERGARA, S. C. **Métodos de pesquisa em administração**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2021.