

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

MARCUS CÉSAR MACHADO DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE CORREÇÃO DE
DIÂMETRO DE PEÇA CILÍNDRICA EM RETÍFICA DE ACABAMENTO

Joinville

2024

MARCUS CÉSAR MACHADO DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE CORREÇÃO DE
DIÂMETRO DE PEÇA CILÍNDRICA EM RETÍFICA DE ACABAMENTO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. James Schipmann Eger

Joinville

2024

MARCUS CÉSAR MACHADO DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE CORREÇÃO DE
DIÂMETRO DE PEÇA CILÍNDRICA EM RETÍFICA DE ACABAMENTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 25 de junho de 2024.

Banca Examinadora:

Dr. James Schipmann Eger
Orientador(a)/Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Luis Fernando Peres Calil
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Erick Cardoso Costa
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e minha irmã, Linder e Maria Eduarda, minha família, pelo amor e apoio incondicional que me foram fundamentais, e me deram a certeza de que jamais estive sozinho.

À Sueli Ferronato, que me acolheu e me apoiou como um filho desde o meu primeiro dia em Joinville.

Ao meu orientador professor James Eger, por todo o apoio, disponibilidade e paciência na realização deste trabalho.

À célula de usinagem da Nidec Global Appliance onde estagiei, pela oportunidade e todo o conhecimento adquirido, em especial ao meu supervisor Carlos Barbado que tanto me ensinou sobre a vida profissional.

Aos meus amigos, por todo o apoio emocional, companhia e momentos de descontração, que de perto ou de longe, renovaram minhas energias.

À minha namorada, Amabille, por me permitir amar e ser amado e me mostrar o verdadeiro significado dessas palavras, me inspirando a seguir em frente e ser uma pessoa cada vez melhor.

À todos que de alguma forma me impactaram nessa caminhada, muito obrigado.

“Well, you know how they say ‘It’s been a pleasure’? It hasn’t.”
(Mike Ehrmantraut, em *Breaking Bad*, de Vince Gilligan).

RESUMO

Os esforços de uma empresa em fabricar produtos funcionais e eficientes fazem parte dos custos da qualidade. A qualidade dos componentes individuais afeta a qualidade do produto final, mas também afeta a empresa como um todo, suas vendas e sua imagem. Porém a falta de qualidade também acarreta em custos como retrabalho e reprocesso, portanto o controle da qualidade é fundamental em qualquer ambiente fabril. Para tal, ferramentas como o Controle Estatístico de Processo podem auxiliar neste balanceamento, garantindo que os produtos sigam suas especificações, e alertando quando um processo encontra-se fora de controle e tendendo a fabricar produtos não conformes. Fundamental para saber se um produto está conforme ou não, é necessário medir suas características com um instrumento de medição adequado e utilizando técnicas corretas para classificá-lo como dentro ou fora de seus Limites de Especificação. Neste trabalho é descrita a metodologia utilizada na elaboração de um sistema de correção automático em uma retífica cilíndrica, com objetivo de testar a robustez do sistema e a possibilidade de expandi-lo para outras retíficas, incluindo retíficas *centerless*. O desenvolvimento do sistema demandou conhecimento do processo de retificação, da rotina de trabalho do operador e do funcionamento do instrumento de medição. O sistema recebe como entrada dados de diâmetros de peças recém saídas da retífica, e toma a decisão de afastar ou aproximar a ferramenta de acordo. A ocorrência de situações acíclicas demandou o estabelecimento de regras no funcionamento do sistema para evitar que um acúmulo de erros leve o processo à uma situação fora de controle. Ao final do desenvolvimento o sistema foi testado em diferentes condições, exibindo um aumento significativo nos índices de capacidade de processo em relação à situação atual da máquina.

Palavras-chave: Qualidade. Diâmetro. Sistema de Correção. *Air gauge*.

ABSTRACT

A company's efforts in manufacturing functional and efficient products are a part of the quality costs. The quality of the individual components affect the quality of the final product, but also the company as a whole, its sales and its image. But the lack of quality comes with costs like rework and reprocess, and as such, quality control is fundamental in any industrial environment. As such, tools like Statistical Process Control can help in balancing these costs, guaranteeing that products are according to specification, and alerting when a process is in an out-of-control situation and prone to fabricating non-conforming products. To know if a product is conforming or not, it's fundamental to correctly measure its characteristics with a proper measuring instrument and techniques to classify if it is conforming to its Specification Limits. This work describes the methodology used in the development of an automatic diameter correction system in a cylindrical grinder, aiming to test its robustness and the possibility to expand it to other grinders, including centerless grinders. The development demanded knowledge of the grinding process, the operator's work routine and the operation of the measuring instrument. The system receives the diameter of parts recently finished in the grinder as input, and adjusts the grinding wheel accordingly. The occurrence of acyclical situations demanded for rules to be established for the system, to avoid an accumulation of errors driving the process to an out-of-control situation. At the end, the system was tested under different conditions, and the results displayed a significant increase in the Process Capability Ratios in comparison to the machine's current working conditions.

Keywords: Quality. Diameter. Correction system. Air gauge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre C_p e C_{pk}	21
Figura 2 - Paquímetro	23
Figura 3 - Micrômetro	23
Figura 4 - Relógio Comparador	24
Figura 5 – MMC Zeiss Accura	24
Figura 6 - Transdutor Opto-eletrônico MT 60	25
Figura 7 - Sistema <i>flapper/nozzle</i>	26
Figura 8 - <i>Air Gauge</i> de pressão	26
Figura 9 - Dressagem.....	29
Figura 10 - Efeito do desgaste do rebolo em peças usinadas.....	30
Figura 11 - Retíficas Cilíndricas	31
Figura 12 - Eixo Excêntrico	32
Figura 13 - Compressor Hermético	33
Figura 14 - Cadeia de processos do eixo	34
Figura 15 - <i>Air Gauge</i>	36
Figura 16 - Mangueiras pneumáticas no <i>air gauge</i>	36
Figura 17 - Interface computadorizada.....	37
Figura 18 - Padrões de ajuste	37
Figura 19 - Seções para medição do diâmetro no eixo	38
Figura 20 - Circularidade na seção S1	38
Figura 21 - Circularidade na seção S2	38
Figura 22 - Interação entre retífica, instrumento de medição e sistema.....	39
Figura 23 - Primeira versão do software	41
Figura 24 - Teste da primeira versão	44
Figura 25 - Cartas I-AM para diâmetro S1	44
Figura 26 - Peças produzidas.....	46
Figura 27 - Posicionador	47
Figura 28 – Segunda versão do <i>software</i>	50
Figura 29 - Lote com correção manual.....	54
Figura 30 - Lote com janela de 6 amostras e 80% de correção	54
Figura 31 - Lote com janela de 6 amostras e 100% de correção	55

Figura 32 - Lote com janela de 6 peças e 120% de correção	56
Figura 33 - Lote com janela de 10 peças e 80% de correção	56
Figura 34 - Lote com janela de 10 peças e 100% de correção	57
Figura 35 - Lote com janela de 10 peças e 120% de correção	58
Figura 36 - Lote com janela de 12 peças e 80% de correção	58
Figura 37 - Lote com janela de 12 peças e 100% de correção	59
Figura 38 - Lote com janela de 12 peças e 120% de correção	60
Figura 39 - <i>Boxplot</i> dos lotes.....	60
Figura 40 - Produção com janela de 6 peças e 120% de correção	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo dos Instrumentos de Medição	27
Quadro 2 - Seleção do instrumento de medição	35
Quadro 3 - Parâmetros dos lotes	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AM – Amplitude Móvel

CEP – Controle Estatístico de Processo

IHM – Interface Homem-Máquina

IM – Incerteza de Medição

KLT – *Klein Lagerung Und Transport*

LED – *Light Emitting Diode*

LIA – Limite Inferior de Aceitação

LIC – Limite Inferior de Controle

LIE – Limite Inferior de Especificação

LIR – Limite Inferior de Rejeição

LSA – Limite Superior de Aceitação

LSC – Limite Superior de Controle

LSE – Limite Superior de Especificação

LSR – Limite Superior de Rejeição

MMC – Máquina de Medição por Coordenadas

PCR – *Process Capability Ratio*

LISTA DE SÍMBOLOS

LIA	Limite inferior de aceitação
LIE	Limite inferior de especificação
IM	Incerteza de medição
LSA	Limite superior de aceitação
LSE	Limite superior de especificação
LIR	Limite inferior de rejeição
LSR	Limite superior de rejeição
n	Número de observações
AM	Amplitude móvel
\overline{AM}	Amplitude móvel média
x	Valor da observação
m	Número de subgrupos
\bar{x}	Valor médio da observação
d_2	Constante para cartas de controle
D_4	Constante para cartas de controle
D_3	Constante para cartas de controle
C_p	Índice de capacidade de processo
σ	Desvio padrão
P	Inverso do índice de capacidade de processo
C_{pk}	Índice de capacidade de processos descentralizados
C_{ps}	Índice de capacidade de processo unilateral superior
C_{pi}	Índice de capacidade de processo unilateral inferior
μ	Média do processo
s	Deslocamento entre superfície <i>nozzle</i> e <i>flapper</i>
P_k	Contrapressão na câmara de medição
S_d	Passo da ferramenta dressadora
v_d	Velocidade do avanço transversal do dressador
v_s	Velocidade do rebolo
d_s	Diâmetro do rebolo
α_d	Ângulo de arraste
a_d	Profundidade de camada removida

a_e Profundidade real de corte
 a_p Profundidade de corte programada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. CONTROLE DE QUALIDADE	17
2.1.1 Controle estatístico de processo	18
2.1.2 Índices de capacidade de processo	20
2.2. SISTEMAS DE MEDIÇÃO	22
2.2.1 Instrumentos convencionais	22
2.2.2 Máquina de medição por coordenadas (MMC)	24
2.2.3 Transdutores optoeletrônicos	25
2.2.4 Air Gauge	25
2.2.5 Sumário dos sistemas de medição	27
2.3. PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	28
2.3.1 Retífica Cilíndrica	30
3. ESTUDO DE CAMPO	32
3.1. IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO E CADEIA DE PROCESSOS	32
3.2. IDENTIFICAÇÃO DA MÁQUINA E SISTEMA DE MEDIÇÃO	34
3.3. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA	39
3.4. MAPEAMENTO DE ATIVIDADES DO OPERADOR	40
3.5. ELABORAÇÃO DAS REGRAS DE FUNCIONAMENTO	41
3.6. RESULTADOS	43
3.6.1 Primeira versão	43
3.6.2 Regras de funcionamento	47
3.6.3 Segunda versão	50
3.6.4 Teste de parâmetros	52
3.6.5 Teste em produção	61
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
5. CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

A qualidade, segundo Borrow (2009), possui significados diferentes para diferentes pessoas e diferentes situações. No contexto industrial de uma linha de produção, a qualidade pode ser definida de forma resumida como a conformidade com especificações (Crosby, 1979 apud Borrow, 2009). A produção com qualidade é fomentada através do ramo da metrologia conhecido como metrologia industrial (Fernandes; Costa Neto; Silva, 2009).

O primeiro e mais importante passo para o controle de qualidade neste contexto é a seleção de um sistema de medição adequado. Esta seleção consiste de um processo desclassificatório, onde possíveis sistemas de medição são levantados de acordo com critérios técnicos, logísticos e econômicos, e então escolhidos de forma eliminatória conforme esses critérios não sejam atendidos, ou não possuam o desempenho adequado. Em seguida, Borrow (2009) explicita os passos seguintes para um sistema de gerenciamento da qualidade, sendo eles o planejamento estratégico, implementação da estratégia, e seu monitoramento.

O escopo deste trabalho contempla a metodologia para o desenvolvimento de um sistema automático de correção de diâmetro de peças de uma linha de usinagem de uma empresa de compressores. Neste processo, todas as peças têm seu diâmetro verificado antes de serem liberadas para a próxima etapa da linha, pois a conformidade com o diâmetro especificado, a qualidade da peça, é diretamente proporcional à eficiência do produto final, o compressor.

A tarefa de medição trata-se da medição do diâmetro de peças cilíndricas para controle e aprovação em uma linha de produção. Para atender às especificações de tempo de ciclo da linha e tolerâncias do produto, o instrumento de medição selecionado foi um *air gauge*. O sistema de correção deve identificar variações no diâmetro das peças usinadas e movimentar a ferramenta para trazer as dimensões o mais próximo possível das nominais do produto, aumentando a estabilidade do processo e reduzindo a probabilidade de fabricação de uma peça não-conforme.

1.1. OBJETIVOS

Para que o sistema desenvolvido seja robusto e possa atender à linha de produção, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia para implementação de um sistema de correção automático de diâmetro de peças em retíficas de acabamento. A metodologia deve ser aplicável às diferentes retíficas de acabamento da empresa, atendendo ao ciclo da linha e às especificações de qualidade do produto.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Justificar o uso do sistema de medição adequado à tarefa;
- Descrever os princípios físicos de funcionamento do sistema de medição utilizado;
- Descrever o processo de retificação de peças e os ganhos que o sistema de correção automático pode trazer à produção;
- Propor regras e condições para o funcionamento do sistema, cumprindo os requisitos de tempo e qualidade da linha;
- Testar o comportamento do sistema com as regras implantadas, em diferentes condições;
- Validar a metodologia proposta através de um estudo de caso em uma retífica cilíndrica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é apresentada uma revisão de literatura sobre fundamentos relevantes para o escopo deste trabalho.

2.1. CONTROLE DE QUALIDADE

Albertazzi (2008) define o controle de qualidade como o conjunto de operações desenhadas para assegurar que produtos atendam plenamente as especificações técnicas. A não-qualidade gera custos assim como a qualidade, e a soma de ambos compõem os custos totais da qualidade, que devem ser minimizados.

Segundo Borrow (2009), espera-se que componentes produzidos possuam seus desenhos técnicos, evidenciando em suas cotas as dimensões detalhadas, tamanhos e formas do produto. Porém, também espera-se que essas dimensões possuam uma variação aceitável, uma vez que produzir um componente com dimensões exatas é impossível. Assim surge o conceito de tolerância, definido por Albertazzi (2008) como a faixa de variação aceitável para uma característica de um produto, de forma a garantir a qualidade com que ele realiza a função para a qual foi desenhado.

Conforme Fernandes et al. (2009), a definição das tolerâncias busca um equilíbrio técnico-econômico, uma vez que elas são definidas de forma a serem as maiores possíveis, mas sem comprometer a qualidade do produto. Sendo assim, quanto mais apertadas as tolerâncias, maior a qualidade do produto, e por sua vez mais caros e rigorosos os processos de produção e inspeção (Borrow, 2009).

As duas classes principais do controle de qualidade são o controle por atributos, na qual verifica-se a presença ou ausência de certas características do produto, e o controle por variáveis, na qual o valor numérico de uma característica do produto é comparado com os limites definidos pela tolerância, chamados de Limites de Especificação (Albertazzi, 2008).

Os Limites Superior de Especificação (LSE) e Limite Inferior de Especificação (LIE) compõem a faixa de valores conhecida como Zona de Conformidade, dentro da qual um produto deve ser aprovado. Porém, a impossibilidade de realizar uma medição sem cometer erros significa que sempre

haverá uma dúvida relacionada ao valor verdadeiro do mensurando. Define-se assim o conceito de incerteza de medição (IM) como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando com base nas informações utilizadas (VIM, 2012).

Assim, considerando a IM, Albertazzi (2008) define outras faixas de valores para a tomada de decisões no controle de qualidade. A Zona de Aceitação, faixa na qual o resultado-base de um mensurando indica que o produto é aprovado, é definida pelo Limite Inferior de Aceitação (LIA) e Limite Superior de Aceitação (LSA) conforme as Equações 1 e 2.

$$LIA = LIE + IM \quad (1)$$

$$LSA = LIE - IM \quad (2)$$

A outra faixa definida por Albertazzi tratam-se da Zonas de Rejeição, faixas compostas pelo Limite Inferior de Rejeição (LIR) e Limite Superior de Rejeição (LSR), e nas quais não há dúvidas de que o produto não obedece às tolerâncias. São definidas pelas Equações 3 e 4

$$LIR = LIE - IM \quad (3)$$

$$LSR = LIE + IM \quad (4)$$

2.1.1 Controle estatístico de processo

Para que um produto possa atender ou superar as expectativas do cliente, seu processo de produção deve operar de forma estável, com pouca variabilidade ao redor das dimensões nominais. O Controle Estatístico de Processos (CEP) é um conjunto de ferramentas para resolução de problemas muito útil para redução dessa variabilidade e avaliação da performance de um processo (Montgomery, 2012).

Borrow (2009) especifica que todo processo é suscetível a variações, e separa as variações presentes em processos em duas classes: as variações de causa comum são variações inerentes ao processo e não controladas pelo operador, sendo que tentativas de corrigi-las podem levar a maior variação ao invés de menor; já as variações de causa especial são variações maiores devido a eventos

incomuns, como ajustes errôneos ou matéria-prima defeituosa, e a falha do operador em responder a essas variações pode causar ainda mais variação no processo.

Segundo Montgomery (2012) um processo sujeito apenas a variações de causa comum está sob controle estatístico, de forma que a maior parte da produção estará dentro dos Limites de Especificação. Quando o processo estiver sujeito a variações especiais, ele estará fora de controle e uma proporção maior de peças estará fora dos limites de especificação.

O controle estatístico de processos tem como objetivo detectar as causas especiais para que as ações apropriadas possam ser tomadas de maneira rápida, evitando a produção de grande volume de peças não conformes. Para isso, as Cartas de Controle podem ser utilizadas, que são técnicas de monitoramento de processos em linha, permitindo estimar parâmetros de processo que podem ser utilizados para determinar a capacidade do processo (Montgomery, 2012).

As cartas de controle tratam-se de uma representação gráfica que inclui em um eixo uma característica da qualidade medida, e em outro eixo o número ou tempo de medições realizadas. Segundo Montgomery (2012), as cartas de controle devem conter uma Linha Central horizontal representando o valor médio da característica medida em um estado sob controle, e dois limites horizontais, superior e inferior, chamados de Limites de Controle. As cartas de controle utilizadas neste trabalho tratam-se das Cartas I-AM, Cartas de Valor Individual e Cartas de Amplitude Móvel.

Segundo Borrow (2009), as Cartas de Valor Individual são cartas onde cada subgrupo é formado por apenas uma observação ($n = 1$), e utilizam a amplitude móvel de dois subgrupos sucessivos para estimar a variabilidade do processo. A amplitude móvel e sua média são definidas pelas Equações 5 e 6

$$AM_i = |x_i - x_{i-1}| \quad (5)$$

$$\overline{AM} = \frac{\sum_{i=2}^m AM_i}{(m - 1)} \quad (6)$$

onde m é o número de subgrupos, e a divisão é feita por $m - 1$ pois não há amplitude móvel para o primeiro subgrupo. Assim, a Carta de Valor Individual pode ser construída através das Equações 7, 8 e 9

$$\text{Linha central} = \bar{x} \quad (7)$$

$$LSC = \bar{x} + \frac{3\overline{AM}}{d_2} \quad (8)$$

$$LIC = \bar{x} - \frac{3\overline{AM}}{d_2} \quad (9)$$

onde \bar{x} é a média dos valores da amostra, e d_2 é uma constante que depende do número de observações usadas no cálculo da amplitude móvel (no caso, para $n = 2$ têm-se $d_2 = 1,128$). Também é possível construir uma Carta de Amplitude Móvel através das Equações 10, 11 e 12

$$\text{Linha central} = \overline{AM} \quad (10)$$

$$LSC = D_4\overline{AM} \quad (11)$$

$$LIC = D_3\overline{AM} \quad (12)$$

onde $D_3 = 0$ e $D_4 = 3,267$, novamente constantes dependentes do número de observações (Borrow, 2009).

2.1.2 Índices de capacidade de processo

As cartas de controle apresentam um meio gráfico de analisar a capacidade do processo, porém segundo Borrow (2009), vários índices foram desenvolvidos para quantificar a capacidade de processo em valores numéricos. Um desses índices é a Taxa de Capacidade de Processo (PRC - *Process Capability Ratio*) C_p , definido conforme a Equação 13 para um processo com especificações bilaterais:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (13)$$

onde σ é o desvio padrão da amostra.

Uma maneira mais simples de entender o índice C_p é dada por Montgomery (2012) definindo uma quantidade P segundo a Equação 14

$$P = \left(\frac{1}{C_p} \right) 100\% \quad (14)$$

onde P representa a porcentagem da faixa de especificação que o processo utiliza. Assim, um valor de $C_p > 1$ indica que o processo utilizaria abaixo de 100% do valor da faixa de especificação do produto, reduzindo a chance de produção de um componente fora de especificação.

Porém, como explicado por Montgomery (2012), o índice C_p não leva em consideração onde está a média do processo em relação às especificações. Sendo assim, a utilização de um outro PCR se faz necessária para processos descentralizados, sendo μ a média do processo, o índice C_{pk} é definido pelas equações 15, 16 e 17

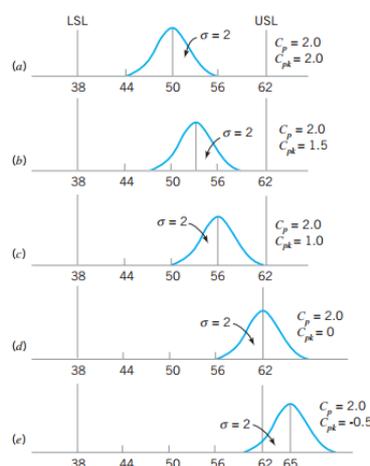
$$C_{pk} = \min(C_{ps}, C_{pi}) \quad (15)$$

$$C_{ps} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad (16)$$

$$C_{pi} = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \quad (17)$$

Os valores de C_{ps} e C_{pi} definidos nas Equações 16 e 17 são o valor do índice C_p para um processo com especificações unilaterais, de forma que o índice C_{pk} é o PCR unilateral para o limite de especificação mais próximo da média do processo. Uma visualização dos significados de C_p e C_{pk} pode ser vista na Figura 1:

Figura 1 - Relação entre C_p e C_{pk}



Fonte: Montgomery (2012, p. 366).

Montgomery (2012) explica que a magnitude do valor do C_{pk} em relação ao C_p é uma medida do quão descentralizado o processo está operando. Quando $C_p = C_{pk}$, o processo está centralizado no ponto médio entre as especificações, e quando $C_p > C_{pk}$, o processo encontra-se descentralizado.

2.2. SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Sistemas de medição são definidos como o conjunto de um ou mais instrumentos de medição e outros dispositivos, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos (VIM, 2012). Eles indicam o número de vezes que a unidade de medição está contida dentro do mensurando (Albertazzi, 2008);

A seleção de um sistema de medição para a realização de determinada tarefa de medição deve se iniciar, segundo Albertazzi (2008), pela clara definição dos aspectos técnicos da tarefa. Os sistemas de medição cogitados devem passar por um processo de eliminação, conforme seu desempenho em relação ao que será medido, quando será medido, onde será medido, sua velocidade de medição, faixa de medição, incerteza de medição e demais aspectos técnicos. Os aspectos logísticos e econômicos também devem ser observados, e a seleção final deve ser feita observando os três aspectos de forma conjunta e pontuando sua importância de acordo com a tarefa de medição.

A seguir, é apresentada uma breve revisão de alguns sistemas de medição tradicionalmente utilizados para medição de diâmetros.

2.2.1 Instrumentos convencionais

- **Paquímetro**

Trata-se de uma régua graduada com encosto fixo, sobre a qual desliza um cursor de escala móvel, chamado nônio ou Vernier, como mostrado na Figura 2. Sua resolução é dada dividindo-se a unidade da escala fixa pelo número de divisões da escala móvel (Silva Neto, 2012).

Figura 2 - Paquímetro



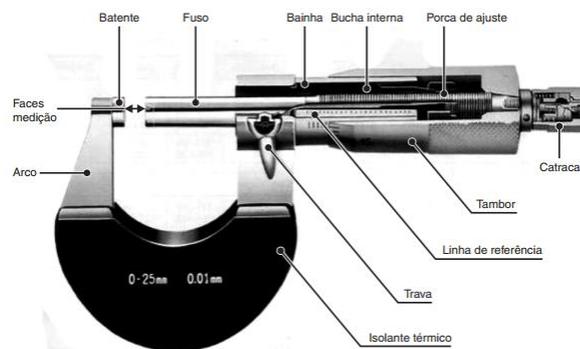
Fonte: Silva Neto (2012, p. 41).

A leitura é realizada lendo-se os milímetros na escala fixa até antes do zero do Vernier. Depois, contam-se os traços do Vernier até um traço que coincida com a escala fixa, e somam-se os valores encontrados (Silva Neto, 2012).

- **Micrômetro**

Utilizado para medições mais exatas e com resoluções de até 0,001mm, o micrômetro se baseia no deslocamento gradual de um parafuso no sentido longitudinal, quando girado em uma porca (Silva Neto, 2012). Um exemplo de micrômetro para medições externas pode ser visto na Figura 3:

Figura 3 - Micrômetro



Fonte: Silva Neto (2012, p. 49).

- **Relógio comparador**

Instrumento composto por uma escala e um ponteiro ligados a uma ponta de contato. A ponta de contato percebe as diferenças nas dimensões e as amplifica mecanicamente, movendo o ponteiro rotativo na escala para a leitura. Os relógios

comparadores mais comuns possuem resolução de até 0,01mm (Silva Neto, 2012). Um relógio comparador do tipo apalpador pode ser visto na Figura 4:

Figura 4 - Relógio Comparador

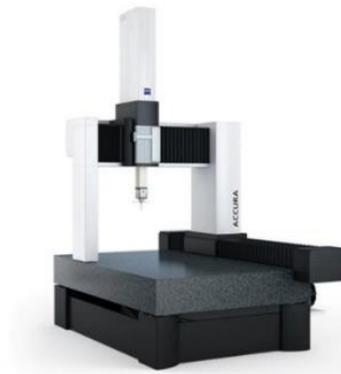


Fonte: Silva Neto (2012, p. 60).

2.2.2 Máquina de medição por coordenadas (MMC)

As MMC são máquinas com sensores de contato eletrônicos e apalpadores, com movimentação nos três eixos X, Y e Z. Através dela determinam-se as coordenadas de certos pontos sobre a peça, que são processados pelo computador associado, exibindo assim os parâmetros geométricos desejados da peça. São previstos pela ABNT dez tipos de MMC, que variam de acordo com suas aplicações específicas (Silva Neto, 2012). Na Figura 5, está representada uma MMC convencional.

Figura 5 – MMC Zeiss Accura



Fonte: Intermetal (2021).

2.2.3 Transdutores optoeletrônicos

Os transdutores opto-eletrônicos são instrumentos de medição versáteis, precisos, e de alta tecnologia. Eles se baseiam no princípio de varredura fotoeletrônica, no qual uma fonte de luz, um *light emitting diode* (LED) emite um feixe luminoso através de uma escala graduada por linhas finas. Esse feixe é modulado pela escala graduada e capturado por um sensor fotoelétrico, que converte essas variações de luz em sinais elétricos, esses que por sua vez são processados para exibir o resultado da medição. Estes equipamentos possuem resoluções de até 0,05 μm , dependendo o modelo (Heidenhain, 2021). Um exemplo de transdutor opto-eletrônico pode ser visto na Figura 6:

Figura 6 - Transdutor Opto-eletrônico MT 60



Fonte: Heidenhain (2021).

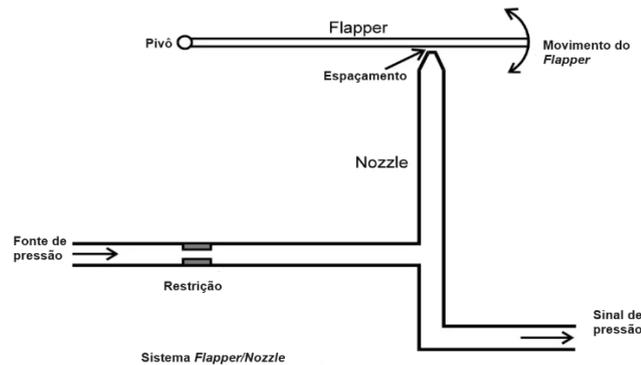
2.2.4 Air Gauge

Air gauges são sistemas de medição baseados nas propriedades do escoamento de ar pressurizado, tipicamente a velocidade ou pressão do mesmo, cujo valor é lido por um transdutor e transformado na dimensão resultante da medição (Rucki; Barisic; Varga, 2010). São altamente úteis para medições automáticas, sistemas de seleção, e sistemas de controle em processo (Jermak et al., 2016).

Segundo Rucki (2007), os *air gauges* por pressão de ar funcionam como uma válvula *flapper-nozzle*. As válvulas *flapper-nozzle*, como a vista na Figura 7 são

mecanismos de conversão de sinal de pressão, em movimento mecânico (Instrumentation Tools, 2024).

Figura 7 - Sistema *flapper/nozzle*



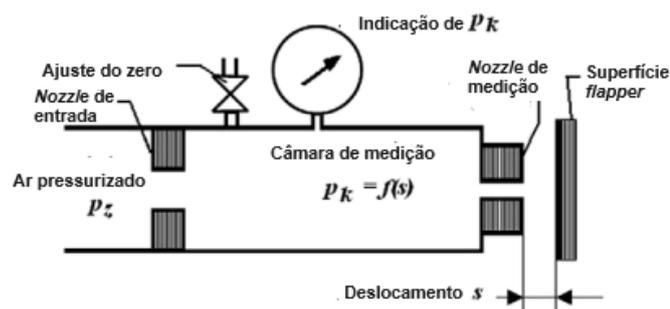
Fonte: Instrumentation Tools (2024, tradução nossa).

No sistema acima, uma fonte de pressão alimenta o sistema através da restrição, de forma que o ar pressurizado escapa através do *nozzle*. Caso a superfície *flapper* se feche, o ar não irá mais vazar pelo *nozzle*, de forma que a leitura de pressão no *output* de pressão se iguala ao *input*, ou seja, a pressão de entrada é a mesma pressão lida na saída. (Instrumentation Tools, 2024).

Por outro lado, caso a superfície *flapper* se mova para longe do *nozzle*, o ar irá vazar pelo *nozzle*, causando uma queda de pressão no *output*, que aumentará conforme mais ar vaza, ou seja, quanto maior o deslocamento do *flapper*. (Instrumentation Tools, 2024).

No caso do *air gauge*, a superfície *flapper* se trata da própria dimensão a ser medida, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - *Air Gauge* de pressão



Fonte: Rucki, Barisic, Varga (2010, p. 84, tradução nossa).

Nota-se que a contrapressão na câmara de medição, P_k , é uma função do deslocamento s , a distância entre o *nozzle* e a superfície *flapper*. Essa contrapressão é lida por um transdutor de pressão, cujo elemento elástico (diafragma) apresenta uma deformação devido à pressão sofrida, e um segundo elemento transdutor transforma essa deformação em um sinal mecânico (movimento de um ponteiro de relógio) ou em um sinal elétrico (tensão), que por sua vez pode ser lido por um computador para indicar a dimensão medida. (Rucki et al., 2010).

Entre as vantagens da utilização de um *air gauge*, estão a medição sem contato, sem partes móveis, são autolimpantes, versáteis e adaptáveis a vários tipos de medições, sendo um dos principais instrumentos de medição utilizado para controle de processos (Rucki, 2007). Dependendo da aplicação, *air gauges* podem alcançar níveis de precisão abaixo de 1 μm (Jermak et al., 2016).

2.2.5 Sumário dos sistemas de medição

Quadro 1 - Resumo dos Instrumentos de Medição

Sistema de Medição	Faixas de medição Típicas	Erros Máximos Típicos	Velocidade de Medição
Paquímetro	até 300mm	$\pm 0,02\text{mm}$	lenta
Micrômetro	até 150mm	$\pm 0,001\text{mm}$	lenta
Relógio Comparador	até 50mm	$\pm 0,002\text{mm}$	lenta
MMC	até 2000mm	$\pm 0,005\text{mm}$	lenta
Transdutor Opto-eletrônico	até 100 mm	$\pm 0,001\text{mm}$	rápida
<i>Air Gauge</i>	até 100mm	$\pm 0,001\text{mm}$	rápida

Fonte: Autor (2024).

2.3. PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Segundo Walker (2000), retificação é um processo que remove material de uma peça através da rotação de um rebolo ou cinto abrasivo na peça. Trata-se de uma operação de corte que utiliza uma ferramenta com milhares de faces cortantes, uma vez que cada partícula abrasiva é uma face cortante.

A retificação trata-se de um procedimento industrial altamente utilizado. Malkin e Guo (2008) quantificam que em países industrializados a retificação corresponde de 20% a 25% das despesas totais em operações de usinagem, desde a usinagem pesada para remoção de grandes quantidades de material em pouco tempo, até a usinagem final de peças com acabamento superficial fino e tolerâncias apertadas.

A retificação como processo de acabamento é geralmente mais caro do que outros processos de usinagem, em relação à quantidade de material removido. Porém o desenvolvimento de métodos que permitam a fundição e forja de peças já próximas à configuração final viabilizam a retificação como sendo um processo único, sem necessidade de desbaste ou torneamento (Malkin; Guo, 2008).

Nas máquinas em questão, a ferramenta utilizada trata-se de um rebolo, o qual é uma ferramenta constituída de grãos abrasivos duros, responsáveis pelo corte, unidos por uma matriz ligante de material mais fraco. Suas propriedades e sua performance dependem do tamanho e material dos grãos, das propriedades do grão e do material ligante, e da porosidade do rebolo (Malkin; Guo, 2008).

Segundo Jackson e Davim (2011), um rebolo de alta performance deve manter-se afiado e ser capaz de absorver um grande volume de cavaco, portanto, deve ser poroso e as propriedades dos grãos e do material ligante devem ser capazes de resistir às altas forças exercidas em sua camada interfacial. Walker (2000) especifica que o rebolo ideal deve ter o desgaste do material ligante lento o suficiente para aumentar a vida útil do rebolo, porém rápido o bastante para permitir a substituição de grãos afiados em sua superfície exposta.

Na retificação de precisão, cada grão abrasivo do rebolo remove uma quantidade ínfima de material. O rebolo deve ser alinhado para corrigir sua concentricidade, circularidade e eliminar rachaduras. À medida que o rebolo corta material, o cavaco do metal cega os grãos abrasivos e desgasta o material ligante,

sendo necessária a dressagem do rebolo para evitar o empastamento do mesmo, reduzindo sua capacidade de corte (Walker, 2000).

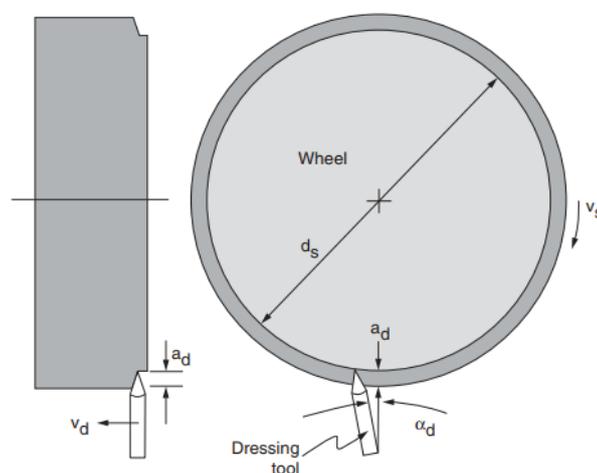
A dressagem é descrita por Malkin e Guo (2008) como o processo de condicionamento da superfície do rebolo para obtenção de um certo comportamento. Rowe (2014) descreve que os aspectos da dressagem incluem: a normalização para eliminar desvios de forma, a obtenção de uma superfície de corte afiada com uma distribuição uniforme de arestas de corte, o condicionamento para remover material ligante dos grãos abrasivos e obter uma superfície de rebolo mais aberta, e a limpeza e remoção de camadas de material abrasivo que esteja carregada de cavaco.

As ferramentas utilizadas para dressagem são geralmente feitas de uma ponta simples de diamante natural, ou ferramentas com várias pontas com camadas de diamante incrustado em um ligante metálico. O avanço axial, ou passo, de uma ferramenta dressadora (S_d) por revolução do rebolo é dado pela Equação 18

$$S_d = \frac{\pi d_s v_d}{v_s} \quad (18)$$

onde v_d é a velocidade de avanço transversal do dressador no sentido longitudinal do rebolo, v_s é a velocidade do rebolo, e d_s o diâmetro do rebolo (Malkin; Guo, 2008). Um esquema representando a dressagem com uma diamante de ponta única pode ser visto na Figura 9:

Figura 9 - Dressagem

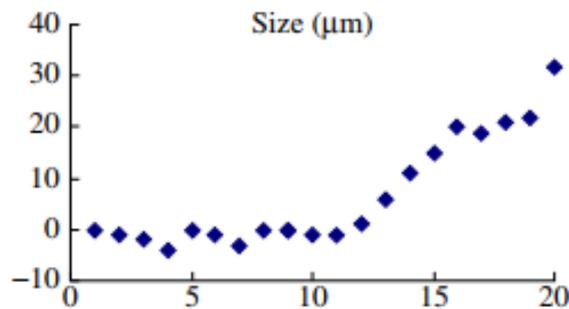


Fonte: Malkin e Guo (2008, p. 82).

Na figura, além dos parâmetros descritos na Equação 18, pode-se observar também o ângulo de arraste α_d , que é o ângulo de inclinação entre a ferramenta e o rebolo (geralmente 10 à 15°), e a camada de profundidade a_d removida a cada passada do dressador sobre a superfície do rebolo (Malkin; Guo, 2008).

Segundo Rowe (2014) o desgaste do rebolo de corte é uma fonte de variação no processo de retificação, pois conforme o rebolo desgasta, ele diminui de tamanho, aumentando o tamanho da peça usinada. Outro efeito é a perda da afiação do rebolo, que altera as forças exercidas pelo rebolo sobre a peça. Quando essa força diminui, a deflexão do rebolo sobre a peça também diminui, o que auxilia na remoção de material e diminui o tamanho da peça usinada. A Figura 10 mostra o efeito destes fenômenos na dimensão das peças retificadas: nas primeiras peças usinadas, os efeitos do desgaste do rebolo e da perda de afiação balanceiam um ao outro. Porém, conforme mais peças são retificadas o efeito do desgaste do rebolo tende a prevalecer, fazendo com que o tamanho das peças seja maior (Rowe, 2014).

Figura 10 - Efeito do desgaste do rebolo em peças usinadas



Fonte: Rowe (2014, p. 229).

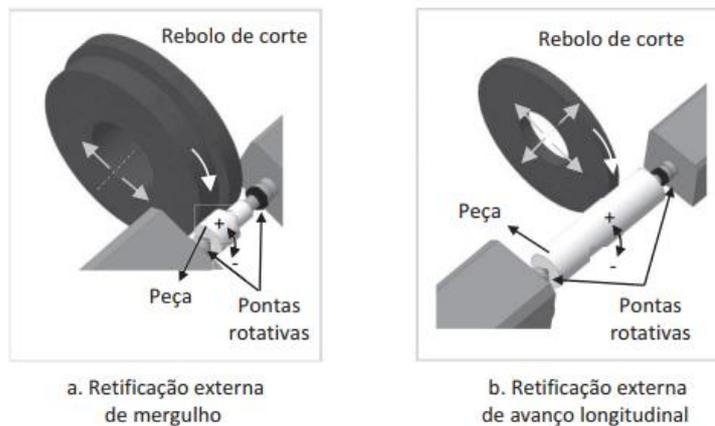
Dentre as várias formas e máquinas utilizadas para operações de retificação, o foco deste trabalho está em dois tipos de máquinas específicas: as retíficas *centerless* e retíficas cilíndricas.

2.3.1 Retífica Cilíndrica

Em uma retífica cilíndrica, a peça usinada é apoiada entre pontas rotativas, que podem girar em sentido concordante ou discordante do rebolo de corte. A

retificação por sua vez pode ser feita por mergulho quando a área a ser usinada não é maior que o rebolo, ou por avanço longitudinal do rebolo ao longo da peça (Gonçalves Neto, 2023). Walker (2000) descreve que através deste processo, é economicamente viável usinar peças com tolerâncias de até $0,2\mu\text{m}$ com um acabamento superficial extremamente fino. Ambos os tipos de operação podem ser vistos na Figura 11:

Figura 11 - Retílicas Cilíndricas



Fonte: Gonçalves Neto (2023, p. 23).

O parâmetro mais básico na retificação de mergulho trata-se da profundidade de corte real a_e , que é geralmente $\frac{1}{4}$ da profundidade de corte programada a_p . A profundidade de corte programada trata-se do avanço do rebolo por revolução da peça trabalhada. A profundidade real depende também de fatores como dureza da peça, afiação do rebolo, velocidade do rebolo, entre outros. O desgaste do rebolo, por exemplo, reduz a profundidade real de corte, enquanto que a expansão dos elementos da máquina devido a efeitos térmicos aumenta essa profundidade (Rowe, 2014).

3. ESTUDO DE CAMPO

O desenvolvimento do sistema de correção proposto trata-se de uma melhoria de processo a ser implementada em uma linha já existente. O sistema deve auxiliar no controle estatístico do processo de acabamento, reduzindo a variabilidade nas peças produzidas, e eliminando a necessidade de correção manual por parte do operador da retífica.

Para tanto, é necessário entender o funcionamento da linha, o produto, o equipamento utilizado, as condições de trabalho e demais particularidades do processo. O mapeamento desses fatores será utilizado para prever condições acíclicas e permitir que o sistema responda corretamente, não sendo necessária a intervenção ou tomada de decisão por parte do operador. Convém neste ponto definir e diferenciar três termos que serão utilizados extensivamente neste capítulo para representar os equipamentos utilizados neste trabalho:

- **Máquina:** A retífica cilíndrica na qual é feita o acabamento das peças;
- **Instrumento/meio de medição:** O instrumento de medição posicionado na saída da retífica para medição do diâmetro das peças produzidas;
- **Sistema:** O sistema de correção objeto deste estudo, conectado ao meio de medição e à máquina.

3.1. IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO E CADEIA DE PROCESSOS

O produto em questão trata-se de um eixo excêntrico, como o representado na Figura 12:

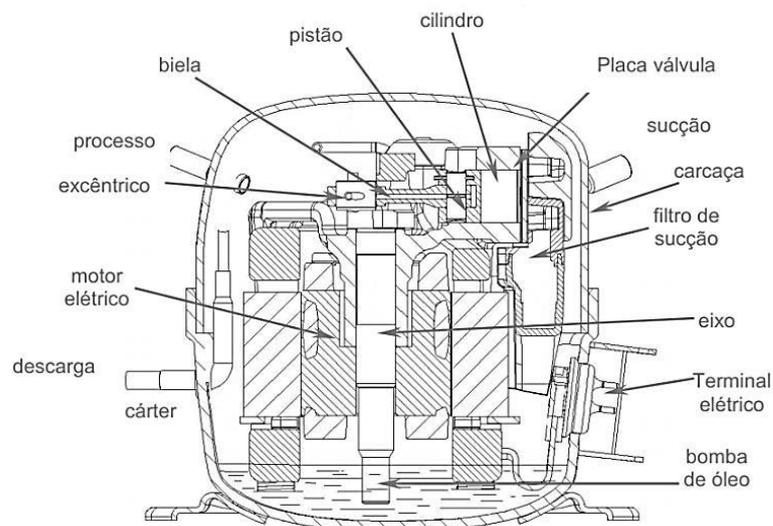
Figura 12 - Eixo Excêntrico



Fonte: Autor (2024).

O eixo é parte do conjunto mecânico do compressor hermético, no qual ele é acoplado pelo seu excêntrico a um pistão através de uma biela. Desta forma, a rotação do eixo é transformada no movimento de avanço do pistão, fazendo assim a compressão e expulsão do gás refrigerante através do cilindro. A montagem e posicionamento do eixo podem ser vistos na Figura 13:

Figura 13 - Compressor Hermético

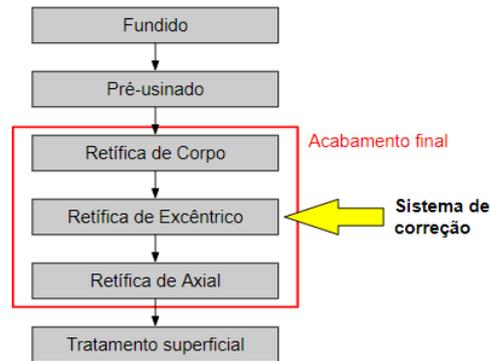


Fonte: Aguiar (2016, p. 30).

A eficiência do compressor está diretamente ligada à qualidade de seus componentes. No kit mecânico por exemplo, eixos com diâmetros acima do especificado podem causar travamento do compressor, enquanto eixos com diâmetro abaixo do especificado resultam em perda de eficiência devido à folga entre os componentes.

Como observado na Figura 13, o eixo é composto por três partes principais: o corpo, o excêntrico e o axial. Cada parte possui suas tolerâncias e especificações de rugosidade, e cada uma é retificada em uma máquina diferente. O fluxo da produção do eixo se dá conforme a Figura 14:

Figura 14 - Cadeia de processos do eixo



Fonte: Autor (2024).

O eixo bruto é produzido a partir do ferro fundido nodular pelo processo de fundição. Esse bruto é então enviado a um fornecedor externo que realiza o desbaste, furação e usinagem dos canais, deixando o produto com forma já definida e dimensões próximas às dimensões finais, chamado de pré-usinado. Este pré-usinado é então entregue no começo da linha de acabamento final, onde as retíficas retiram o sobremetal na ordem de centésimo de milímetro ($10^{-5}m$), atingindo uma precisão da ordem de micrometros ($10^{-6}m$).

As características controladas nas retíficas são: diâmetro, circularidade, cilíndricidade e rugosidade da superfície. O trabalho proposto consiste em atuar apenas na correção do diâmetro final da peça, pois essa é a característica medida 100% na saída do processo. As características geométricas e de acabamento superficial são medidas em um ambiente separado de forma acíclica, demorando mais tempo para obtenção dos resultados. Isso inviabiliza a medição de 100% dessas características e impossibilita uma resposta rápida a eventuais distúrbios no processo.

3.2. IDENTIFICAÇÃO DA MÁQUINA E SISTEMA DE MEDIÇÃO

Conforme indicado na Figura 15, o sistema está instalado em uma retífica de acabamento de excêntrico, sendo esta uma retífica cilíndrica de mergulho. A peça é colocada em posição através de uma garra e mantida fixa pela extremidade do corpo em uma placa rotativa, enquanto o rebolo abrasivo avança até o excêntrico.

Seguindo o procedimento proposto por Albertazzi (2008), utiliza-se o Quadro 2 para caracterização dos parâmetros da tarefa de medição:

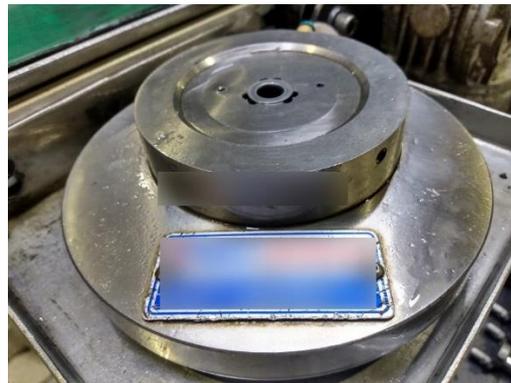
Quadro 2 - Seleção do instrumento de medição

O que medir	Diâmetro do excêntrico dos eixos, em duas alturas determinadas
Por que medir	Para realização do Controle Estatístico do Processo e validação do Sistema de Correção Automático
Onde medir	Na fábrica, logo na saída de peças da retífica
Como medir	Na mesma sequência em que as peças saem da retífica, e na mesma orientação para evitar erros devido à circularidade
Faixa de medição	Até 100mm
Incerteza de medição	Combinação da incerteza do <i>air gauge</i> e padrões de ajuste
Resolução	0,1 micrometro
Velocidade de medição	5s
Taxa de medição	1 peça a cada 12s
Condições de medição	Peças saem da retifica oleadas, sem tempo hábil para limpeza das mesmas
Nível de automação	Medição exibida em tela com esquema de cores (aprovado/reprovado) e valores armazenados em documento de texto
Recursos de processamento	Exibição dos valores das medições em interface computadorizada, com indicação clara se peça foi aprovada ou reprovada; Armazenamento em memória
Outros requisitos	Baixa necessidade de manutenção; Operação fácil e intuitiva; rápido ajuste; Ocupar pouco espaço

Fonte: Autor (2024).

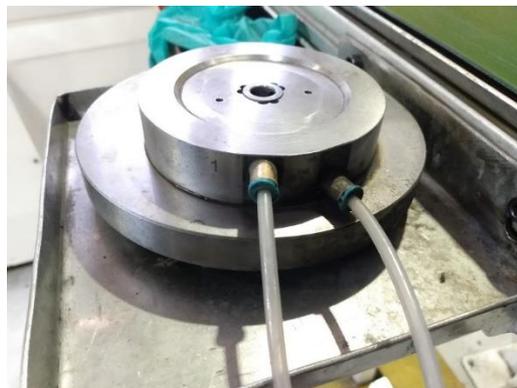
Baseado no Quadro 2, justifica-se a utilização do *air gauge* como instrumento de medição para essa tarefa, atendendo à resolução e velocidade de medição necessárias. Possui característica autolimpante, devido ao fluxo de ar contínuo por suas mangueiras pneumáticas, amenizando o acúmulo de óleo e sujeira provenientes do ambiente fabril, principal vantagem em relação a outros instrumentos de medição com velocidade alta. Possui também uma interface computadorizada e um módulo que armazena os valores medidos e sistema de seleção, mostrando claramente se a peça medida foi aprovada ou não através de um sistema de cores. O *air gauge* é de fácil utilização e de rápido ajuste, que pode ser feito em questão de segundos com a utilização de padrões de ajuste. O *air gauge*, a interface computadorizada e os padrões de ajuste podem ser visto nas Figuras 15, 16, 17 e 18:

Figura 15 - *Air Gauge*



Fonte: Autor (2024).

Figura 16 - Mangueiras pneumáticas no *air gauge*



Fonte: Autor (2024).

Figura 17 - Interface computadorizada



Fonte: Autor (2024).

Figura 18 - Padrões de ajuste



Fonte: Autor (2024).

O controle de qualidade do diâmetro dos eixos é feito com base em duas seções de medição: seções S1 e S2. Em cada seção há três sopradores de ar, e o diâmetro da seção é dado pela média dos três valores medidos. Embora o diâmetro entre as seções tipicamente não seja muito diferente, é necessária a verificação de ambos para satisfazer à especificação de conicidade do produto, ou seja, a seção S1 não pode ser uma quantidade x de unidades de medida maior ou menor que a seção S2. As seções de medição são definidas no desenho do produto, e o *air gauge* é construído de forma que seus sopradores de ar estão nessas mesmas alturas. As seções de controle podem ser vistas na Figura 19:

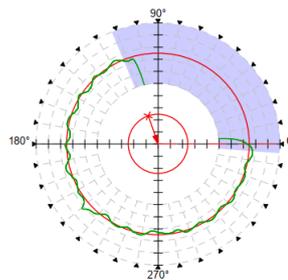
Figura 19 - Seções para medição do diâmetro no eixo



Fonte: Autor (2024).

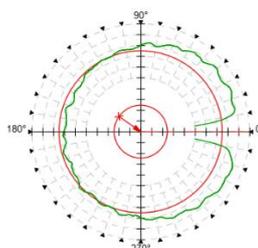
Devido ao fato de ser uma peça cilíndrica, o excêntrico do eixo pode ser inserido em várias orientações no *air gauge*, o que pode resultar em medições equivocadas devido à circularidade da peça. A circularidade é uma tolerância de forma, e representa o desvio que a peça apresenta em relação à sua forma geométrica ideal (Silva Neto, 2012). A circularidade é medida através de um circularímetro, que varre o perfil da peça em uma determinada altura definida conforme especificações, gerando gráficos como os das Figuras 20 e 21:

Figura 20 - Circularidade na seção S1



Fonte: Autor (2024).

Figura 21 - Circularidade na seção S2



Fonte: Autor (2024).

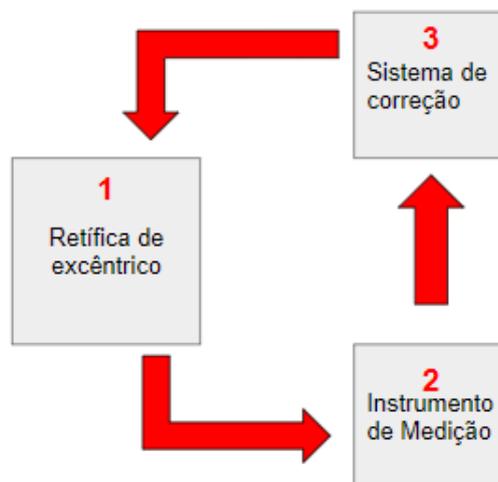
Na altura S1, a parte em azul representa a porção do perfil do excêntrico que é atravessada pelo canal usinado. Já na altura S2, a medição é feita muito próxima ao final do canal, de forma que a medição de circularidade é impactada neste ponto, mostrando uma queda do perfil e um aumento na circularidade na região próxima ao canal. Esse aumento se dá devido à formação de um lóbulo no rebolo na parte em que este entra em contato com o canal, pois a peça possui menos material neste ponto, e portanto, o rebolo também exerce menor esforço.

São vários os fatores intrínsecos ao processo que afetam a circularidade da peça, desde parâmetros de processo (velocidade de avanço do rebolo, altura da peça) até características do produto (posição do furo e canal). Portanto, foi definido como procedimento e repassado como instrução ao operador medir a peça sempre na mesma orientação, garantindo que o diâmetro será medido no mesmo ponto em todas as peças. Posteriormente, foi desenvolvido um posicionador de nylon para ser anexado no *air gauge* e auxiliar o operador a medir a peça na orientação correta.

3.3. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

A interação entre retífica, instrumento de medição e sistema de correção é esquematizada na Figura 22:

Figura 22 - Interação entre retífica, instrumento de medição e sistema



Fonte: Autor (2024).

- 1) A **retífica** produz peças conforme preparação e ajustes;
- 2) As peças são medidas pelo operador no **instrumento de medição** com interface computadorizada, que registra esses valores e os envia ao sistema de correção;
- 3) O **sistema de correção** recebe os dados da medição das peças e avalia, de acordo com seus parâmetros, se as peças estão dentro dos limites de aceitação.
 - a) Caso as peças estejam acima do limite de aceitação, o sistema envia um sinal para que a máquina aproxime o rebolo da peça, diminuindo o diâmetro das próximas a serem peças usinadas;
 - b) Caso as peças estejam abaixo do limite, o sinal é enviado para que a máquina afaste o rebolo, aumentando o diâmetro das próximas peças a serem usinadas;
 - c) Caso as peças estejam dentro dos limites, o rebolo permanece na posição atual.

O objetivo é que o sistema consiga manter o processo sob controle, com o mínimo possível de variação.

3.4. MAPEAMENTO DE ATIVIDADES DO OPERADOR

O operador designado para trabalho na retífica de acabamento de excêntrico desenvolve as seguintes atividades em sua rotina:

- Alimentação da máquina: o operador retira peças não-retificadas de uma caixa *Klein Lagerung Und Transport* (KLT) e posiciona uma em cada berço do alimentador da máquina;
- Medição de peças: todas as peças que saem da retífica são medidas no *air gauge* pelo operador, e então colocadas em caixas KLT em um carrinho próximo. O operador é instruído a inserir as peças no *air gauge* com uma orientação específica, para evitar que o furo do produto coincida com o bocal de medição do *air gauge*, causando uma medição errada;
- Verificação do sistema de medição: a cada 30 minutos o operador deve ajustar o *air gauge* com padrões de ajuste situados próximo ao posto de trabalho;

- Reabastecimento: Quando o carrinho de peças não-retificadas do operador esvazia, ele busca um novo carrinho com caixas KLT vindas do processo anterior para retificação do excêntrico. Nesse período, a retífica continua produzindo peças;
- Correção manual: O operador deve inserir correções manuais na máquina através da Interface Homem-Máquina (IHM), quando notar peças fora do diâmetro, ou muito próximas dos limites de aceitação. O valor da correção manual é parte da tomada de decisão do operador, baseado no valor das últimas peças medidas;
- Dressagem: A máquina dressa o rebolo automaticamente a cada 250 peças. Após a dressagem, o operador faz uma peça, mede essa peça com um micrômetro, e realiza uma correção manual baseado no quão maior essa peça está.

3.5. ELABORAÇÃO DAS REGRAS DE FUNCIONAMENTO

Após a observação das atividades e do funcionamento da máquina, foram realizados testes com uma primeira versão do *software* do sistema de correção, para analisar o comportamento do mesmo. Esta versão conta com os parâmetros de entrada da Figura 23, definidos pelo usuário:

Figura 23 - Primeira versão do software

A imagem mostra a interface de configuração do software, intitulada "Configuração". Ela contém os seguintes campos e controles:

- Canal 1:** Nominal 1 (mm) com um slider e uma barra de escala; Tolerância (um) com um campo de entrada.
- Canal 2:** Nominal 2 (mm) com um slider e uma barra de escala; Numero de médias: 12.
- Tolerância de concidade (um):** 3,0
- Fator de ajuste (%):** 60
- Erro na janela de verificação:** 3,0
- Janela de verificação:** 12,0
- Conversão para tensão:** Valor inferior (um) -10 -> 0 V; Valor superior (um) 10 -> 5 V.
- Arquivo de log:** C:\Use... \Documents\teste.csv
- IP Datasocket:** 192.168.15.1
- Botões "Salvar" e "Fechar" na base da interface.

Fonte: Autor (2024).

- Nominal dos canais S1 e S2: o valor nominal do produto que será medido pelo *air gauge* nas alturas S1 e S2;
- Tolerância: a faixa de tolerância do sistema nas alturas S1 e S2. Não se trata da tolerância do produto, mas sim da tolerância acima da qual o sistema irá aplicar correção;
- Tolerância de conicidade: a tolerância para a conicidade do produto, definida por $S1 - S2$;
- Número de médias: valor aberto definido pelo usuário para aplicação do ajuste. O ajuste será aplicado baseado na média aritmética do erro das últimas peças medidas;
- Fator de ajuste (%): o ajuste aplicado será uma porcentagem do valor da média definida anteriormente;
- Janela de verificação: intervalo após o qual o sistema irá verificar se a média das peças medidas está dentro dos limites ou não.

Utilizando como exemplo os parâmetros da Figura 24, o sistema funciona da seguinte forma: a cada 12 peças (Janela de Verificação) o sistema verifica a próxima peça medida. Caso ela esteja fora dos limites de aceitação do sistema ($Nominal \pm Tolerância$), ele irá calcular a média aritmética do desvio em relação à nominal das últimas 12 peças (Número de Médias). Calculada essa média, 60% desse valor (Fator de ajuste) será o ajuste aplicado pelo sistema, ou seja, será a distância que o rebolo irá se afastar/aproximar da peça.

Uma vez mapeadas as atividades do operador e definidos os parâmetros que regem o funcionamento do sistema, este foi testado na produção a fim de observar situações que possam causar distúrbios no sistema e sugerir melhorias que contornam essas situações, deixando-o mais robusto. Para realização dos testes, os operadores da máquina receberam as seguintes instruções:

- Medir todas as peças na mesma orientação dentro do *air gauge*;
- Somente realizar correção manual em casos extremos, e comunicar ao especialista;
- Medir as peças na ordem em que estas saem da retífica, sem pular peças ou medir fora de ordem;
- Realizar demais atividades (calibração, alimentação da máquina, buscar peças) normalmente.

Os resultados destes testes foram observados de forma qualitativa e quantitativa. Os gráficos dos diâmetros das peças resultantes foram construídos para observar picos e vales nas medições, entender o que causou esses extremos e como o sistema reagiu, para assim desenvolver soluções que possam ser implantadas para evitar esses extremos, ou retirar a necessidade de interferência externa, causando o mínimo possível de peças perdidas.

3.6. RESULTADOS

A primeira versão do *software* serviu como primeiro contato com o funcionamento do mesmo e identificação de situações acíclicas. Com os dados obtidos observando o processo e com as lições aprendidas com a primeira versão, as regras para o funcionamento da segunda versão foram definidas, e esta versão foi então testada em lotes com diferentes parâmetros.

3.6.1 Primeira versão

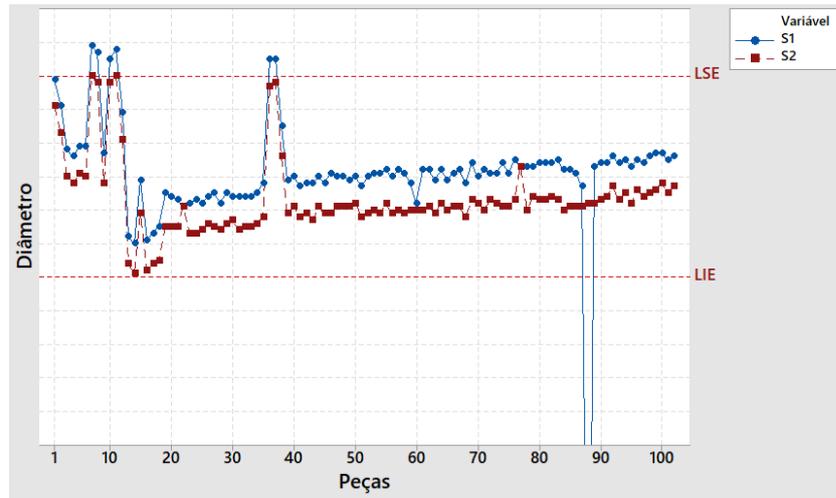
O primeiro teste foi realizado com um lote de aproximadamente 100 peças, para observar a resposta inicial do sistema e entender seu funcionamento. Para este teste, as peças foram produzidas com os seguintes parâmetros:

- Tolerância de $2,5\mu\text{m}$ para o sistema de correção;
- Fator de ajuste 60%;
- Janela de verificação de 3 peças, média de 1 peça.

Esses parâmetros foram escolhidos arbitrariamente para familiarização com o funcionamento do sistema e a influência de cada um na estabilização do processo, na magnitude da correção e sua frequência.

A Figura 24 representa o gráfico dos diâmetros das peças obtidas durante o teste, construído no *software Minitab*:

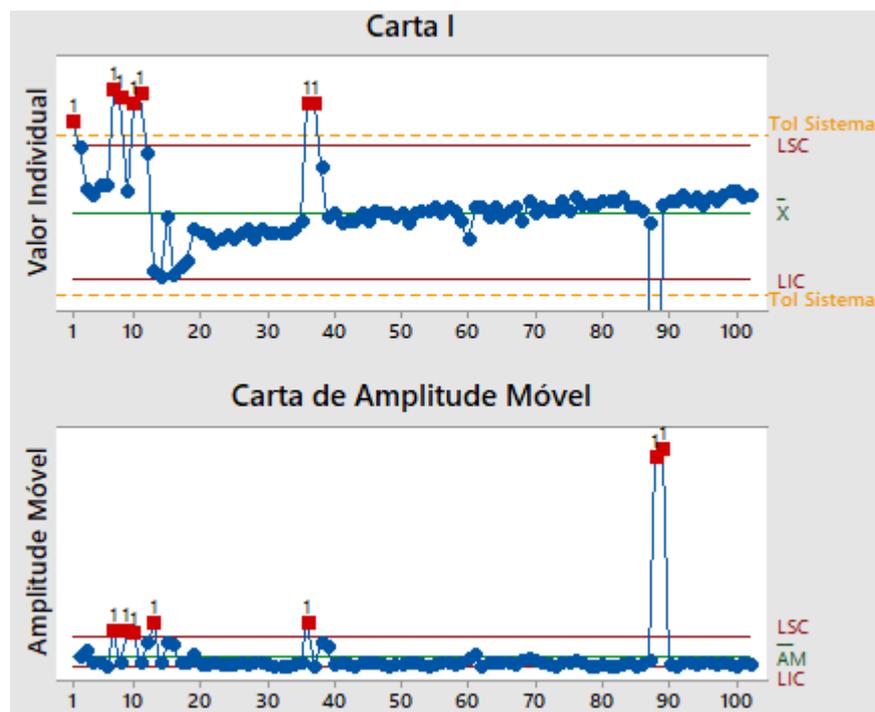
Figura 24 - Teste da primeira versão



Fonte: Autor (2024).

A correção nessa versão foi realizada pelo diâmetro S1. Nota-se que a seção S2 é sistematicamente menor que S1, porém ainda dentro da especificação do produto, uma vez que essa diferença é da ordem de décimo de micrometro. As Cartas I-AM para o diâmetro S1, juntamente com os Limites de Controle e a tolerância programado no sistema de correção podem ser vistos na Figura 25:

Figura 25 - Cartas I-AM para diâmetro S1



Fonte: Autor (2024).

A primeira observação a ser feita é a grande variação no diâmetro das peças logo no início da produção. Essa variação se deve ao fato do operador não ter sido instruído a não realizar correção manual, assim a presença de uma peça de diâmetro maior causou a correção por parte do sistema, mas também foi corrigida pelo operador, resultando em uma queda vertiginosa do diâmetro das peças. A estabilização ocorreu aproximadamente na peça 16. Esse comportamento evidencia a necessidade de minimizar a interferência do operador na correção por meio de regras gerenciais, e também de programar o sistema para que correções feitas manualmente pelo operador sejam registradas a fim de investigar eventuais distúrbios. A partir desse ponto, o processo se comportou como o esperado em uma retífica, com uma pequena variação entre peças, porém uma tendência de crescimento do diâmetro das peças conforme o rebolo é gasto.

Outros pontos de destaque no gráfico são as peças 36 e 37, apontadas no gráfico com diâmetro acima do especificado devido à erro de matéria prima. O sistema aplicou ajuste, porém o operador também aplicou ajuste manual, o que trouxe os diâmetros novamente para próximo da nominal do produto. Em seguida as peças seguem a tendência de aumento gradual de diâmetro.

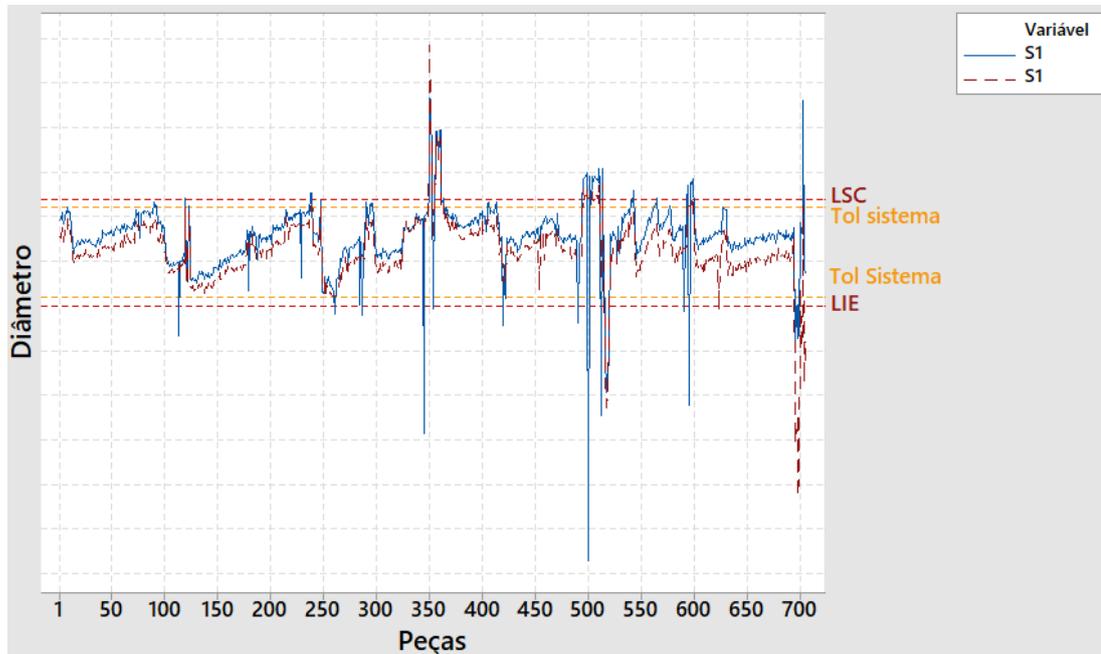
A queda brusca representada no canal S1 da peça 88 indica um erro de medição, pois o produto possui um furo nessa altura. A inserção do excêntrico no *air gauge* com este furo próximo ao soprador de ar causa uma queda de pressão, o que é interpretado pelo instrumento de medição como um diâmetro menor.

Notou-se durante os testes também a necessidade do aumento da janela de verificação. Três peças mostrou-se um número baixo para o cálculo da média e subsequente correção, pois qualquer erro de medição tem uma influência muito grande nessa média, e portanto, na correção, o que auxilia no efeito de acúmulo de erros citado anteriormente. É recomendado que a janela seja de no mínimo 6 peças para amenizar este efeito, pois quanto mais peças utilizadas na média, mais este erro será diluído.

O segundo teste realizado foi o acompanhamento da produção com utilização do sistema. A máquina operou durante cerca de 4h com o sistema configurado com os mesmos parâmetros do teste anterior, e os operadores foram instruídos a evitar correção manual, exceto quando estritamente necessário, como

após dressagem ou em caso de correção equivocada devido à medição errada. O gráfico com os diâmetros obtidos encontra-se na Figura 26:

Figura 26 - Peças produzidas



Fonte: Autor (2024).

Embora a dressagem ocorra a cada 250 peças, é possível notar que o diâmetro dos produtos chega perto do Limite Superior de Controle antes disso, aproximadamente na peça 90. Trata-se do comportamento natural da retífica devido à perda de afiação do rebolo, conforme apresentado no capítulo 2.3. Já os picos e vales espontâneos podem ocorrer devido à:

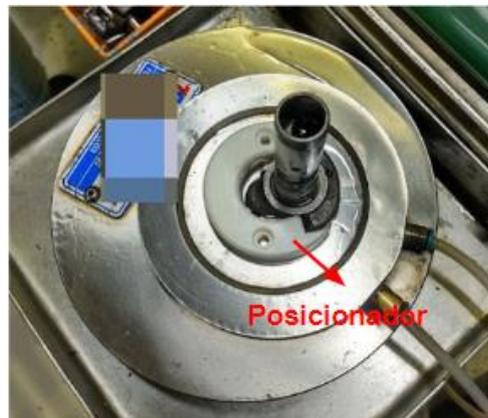
- Erro de medição: operador posiciona a peça com o canal próximo ao soprador de ar, causando leitura de diâmetro menor;
- Erro de medição: operador rotaciona a peça dentro do *air gauge* tentando aprová-la, o que pode causar várias leituras em uma mesma peça, inclusive em seções com erros de forma (circularidade), causando leitura de diâmetro maior;
- Medição fora de ordem: operador não mede as peças na mesma ordem em que elas saem da retifica, fazendo com que o gráfico do diâmetro das peças não siga o comportamento esperado de crescimento gradual;

- Erro de matéria prima: pré-usinado com diâmetro maior ou menor, ou excentricidade errada;

Observando o gráfico, é possível identificar a maior causa de erros de medição. A maioria dos erros de medição ocorrem no canal S1, pois é o canal que mede o produto na altura onde está o furo, sendo assim existe mais possibilidade de o operador posicionar a peça com a orientação errada no *air gauge*. Também nota-se que a maioria das medições equivocadas ocorrem no sentido do diâmetro menor, nos vales do gráfico.

Durante a realização dos testes, a primeira dificuldade observada foi a influência do operador na medição. Apesar da instrução de medir a peça sempre na mesma orientação, muitas vezes o operador insere a peça numa posição incorreta e a rotaciona, procurando a posição certa. Isso pode causar uma leitura em uma posição incorreta, o que afetará a próxima correção. Para diminuir esse efeito, foi projetado um posicionador de nylon, que é fixado no *air gauge* por parafusos, limitando a posição de inserção do mesmo e impedindo a rotação. O posicionador é mostrado na Figura 27:

Figura 27 - Posicionador



Fonte: Autor (2024).

3.6.2 Regras de funcionamento

Após a realização dos testes e análise dos resultados, foram identificadas possíveis condições acíclicas e que podem levar o sistema a um acúmulo de erros, onde uma medição errada resulta em um ajuste errado, que por sua vez levará a mais peças fora dos limites, e assim sucessivamente. Para evitar essas situações e

proporcionar robustez ao sistema, foi criada uma série de regras para funcionamento no *software* do mesmo, baseadas na observação dos experimentos iniciais e no conhecimento do processo.

- Regra 1 - Ignorar sequência de peças: Uma quantidade de peças (parâmetro programável na interface do sistema) após a dressagem deve ser ignorada nos cálculos de correção e na janela de verificação. Essas peças devem constar na IHM, porém destacadas em outra cor ou outro indicativo;

A criação dessa regra se dá devido à grande variação no diâmetro das primeiras peças após a dressagem. A redução no tamanho do rebolo faz com que as peças sejam produzidas com um diâmetro significativamente maior, e aguardar a estabilização unicamente pelos ajustes do sistema pode ser de alto risco, pois várias peças de diâmetro maior podem seguir para o procedimento seguinte. Após a dressagem, o operador deve medir a primeira peça e corrigir manualmente a máquina, e a criação de um parâmetro para isso permite a adaptação para diferentes operadores, visto que operadores mais experientes ajustam corretamente a máquina em menos peças.

- Regra 2 - Definição da referência de correção, canal S2: A correção deve ser realizada com referência nos valores de S2

Essa alteração visa minimizar os erros de medição devido ao furo do excêntrico, localizado próximo à altura S1 do produto;

- Regra 3 - Parada de retifica por erro de conicidade: Se a conicidade for maior ou igual a um limite de conicidade, a máquina deve parar após um número de peças (parâmetro programável na tela);

A conicidade da peça trata-se da diferença entre os valores de S1 e S2 e possui uma tolerância definida. A ocorrência de muitas peças com conicidade fora da tolerância pode indicar um lote de peças defeituoso (como erro de paralelismo ou peças com inclusão, por exemplo), ou um algum erro dentro da máquina (superaquecimento devido à refrigeração irregular, garra de apoio torta, rebolo mal dressado). Neste caso, a máquina deve parar a produção e deve ser acionada a cadeia de apoio da linha para intervenção no processo e identificação da causa raiz do problema.

- Regra 4 - Parada de retífica devido à sequência fora de especificação: Parâmetro programável na tela que representa o máximo de peças fora da especificação de diâmetro permitidos em sequência. Caso o limite seja excedido, a máquina deve parar.

Similar à regra anterior, porém para o quesito diâmetro. Essa regra visa evitar o e acúmulo de erros citado anteriormente

- Regra 5 - Limite máximo de correção: Parâmetro programável na interface que define um valor máximo medido, para cima ou para baixo da nominal, que será considerado para que a correção seja realizada. Valores acima desse limite não serão corrigidos, mas devem ser contabilizados para ativação da Regra 4;

Essa regra estabelece que haverá um valor máximo que o sistema pode corrigir na máquina. Essa regra evita que ocorram oscilações de grande amplitude no diâmetro, por exemplo uma medição muito abaixo da nominal que cause um grande ajuste para acima da nominal, que por sua vez causa novamente um grande ajuste para baixo da nominal e assim sucessivamente até a estabilização. Serve também como mecanismo de segurança, evitando que uma medição errada cause um ajuste muito grande na máquina, o que pode causar a colisão da ferramenta dentro da peça, danificando-a.

- Regra 6 - Zeramento de correções após Setup: O sistema de correção deve zerar os cálculos de valores medidos e solicitações de correção após setup da máquina ou troca de modelo da mesma;

Essa regra visa retirar a necessidade de reset manual do sistema por parte do operador. Uma troca de modelo na máquina pode significar uma troca de diâmetro produzido, portanto os cálculos anteriormente executados não são válidos para o novo produto.

- Regra 7 - Peças produzidas sem medição ou controle: Parâmetro programável na interface do sistema que representa uma quantidade máxima de peças que forem produzidas na máquina, mas não forem medidas no instrumento de medição. Após essas peças, a máquina deve parar.

Essa regra foi criada para evitar correção defasada devido ao acúmulo de peças na esteira de saída. Quando o operador sai do posto de trabalho, a retífica continua produzindo peças. Ao retornar e prosseguir com a medição de peças, quando o operador medir a quantidade de peças especificada no parâmetro “Janela de Verificação”, o sistema irá aplicar um ajuste, porém será um ajuste defasado, visto que as peças que deveriam ser corrigidas já foram produzidas. Essa regra visa impedir esse efeito colocando a máquina em fim de ciclo até o operador medir todas as peças acumuladas na esteira, e então reiniciar o ciclo.

Além das regras, foram solicitadas alterações facilitadoras no *software*, como a exibição dos limites de especificação na tela da interface, e a obtenção dos valores nominais de diâmetros e tolerâncias diretamente do módulo do *air gauge*, a fim de evitar discrepância de modelos de produto entre o sistema de correção e o instrumento de medição.

3.6.3 Segunda versão

Seguindo as regras da seção 3.6.2, o *software* do sistema de correção foi atualizado pelo fornecedor. A nova tela de parâmetros de processo pode ser vista na Figura 28:

Figura 28 – Segunda versão do *software*

PARÂMETROS PROCESSO		Friday, 14 de June de 2024, 16:06:23				
AJUSTE DIAMETRO	ALERTA CONICIDADE	DRESSAGEM	SEQUENCIA	AJUSTE DIAMETRO	SETUP	FALTA DE MEDICAO
TIPO CALCULO	LIMITE MAXIMO	NUMERO DE PECAS	NUMERO DE PECAS	LIMITE MAXIMO	NUMERO DE PECAS	NUMERO DE PECAS
MEDIA		5	9		1	12
		Apos dressagem ignorar X pecas	Parada de maquina por sequencia de pecas fora da especificacao (diam./conicidade)		Apos SETUP ignorar X pecas	Parar maq. se produzir X pecas sem medicao
AMOSTRAS	AMOSTRAS					
3	5					
FATOR AJUSTE	EVENTOS					
120.00	7					
	Acima do maximo parar maquina					
TOLERANCIA SISTEMA						
33.33						
GRAVAR			VOLTAR			

Fonte: Autor (2024).

Convém neste ponto separar os parâmetros da Figura 28 em dois grupos, os parâmetros de segurança, e os parâmetros de ajuste.

- **Parâmetros de ajuste:** são os parâmetros que irão definir a magnitude e frequência da correção nas peças, influenciando ativamente na variabilidade.

- a) Botão para definição se o ajuste será feito pela média das últimas peças, ou pelo valor da última peça medida;

- b) Janela de verificação e quantidade de peças para cálculo da média;

- c) Porcentagem aplicada sobre o valor da média do item b) para correção;

- d) Porcentagem da tolerância do produto que será utilizada.

- **Parâmetros de segurança:** são parâmetros para controle de situações acíclicas, como dressagem e setup, ou para parada de máquina em caso de sequência de peças fora da especificação;

- a) Valor máximo de conicidade permitido nas peças medidas;

- b) Janela de verificação para o item e);

- c) Limite de peças com conicidade acima do item e) para parada da máquina;

- d) Número de peças ignoradas após a dressagem;

- e) Número máximo de peças fora da especificação antes de parar a máquina;

- f) Limite de ajuste do sistema;

- g) Número de peças ignoradas após setup;

- h) Número máximo de peças produzidas sem medição antes de parar a máquina.

O funcionamento de todas as regras foi verificado antes da instalação do sistema na máquina, simulando peças via input manual, e depois instalado na máquina com testes utilizando peças reais.

Após a instalação e ajuste, as seguintes constatações foram feitas:

- O alerta de conicidade do item e) está sendo exibido na primeira peça medida com conicidade fora do limite, causando fim de ciclo na máquina. Para evitar paradas repetidas da máquina, foi colocado o valor de 1000mm neste parâmetro;

- Foi implementada uma alteração para que caso o operador corrija a máquina manualmente, essa correção sobrescreve a correção automática e zera a janela de verificação, reiniciando a contagem até a correção automática;
- As demais regras funcionaram corretamente após ajustes.

3.6.4 Teste de parâmetros

O próximo passo trata-se do teste dos parâmetros de funcionamento do sistema. Os parâmetros de segurança podem ser definidos conforme experiência do operador, e considerando uma margem de peças fabricadas antes de ser necessária intervenção externa.

Para a definição dos parâmetros de ajuste, foram escolhidos valores considerados razoáveis baseados na observação do processo:

- Mínimo de 6 peças para a média do ajuste, considerando a quantidade de peças por vez na esteira de saída, e máximo de 12 peças para evitar demora na correção;
- Mínimo de 80% de correção sobre a média, visando retornar mais rapidamente ao valor nominal, e máximo de 120% para evitar correção exagerada;
- Tolerância do sistema de correção fixa como $\frac{1}{3}$ da tolerância do produto.

Foram retirados lotes com 60 amostras para cada configuração acima. Para todos os lotes, os valores de C_p e C_{pk} encontrados foram maiores nos casos em que o sistema foi utilizado no lugar da correção manual do operador.

Também foram construídas as Cartas I-AM para todas as configurações, a fim de acompanhar a variabilidade dos lotes. Qualquer destaque na Carta AM é confrontado com a Carta I, para analisar os padrões das peças próximas em busca de indícios se a variação foi um *outlier*, um distúrbio no processo ou uma correção feita pelo sistema.

Os lotes retirados para testes podem ser vistos no Quadro 3:

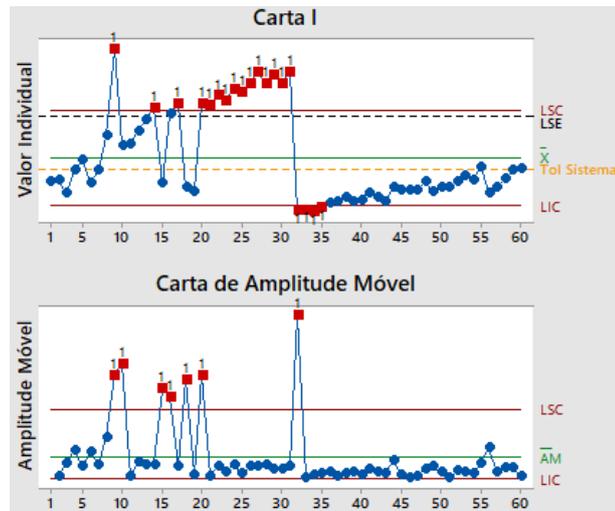
Quadro 3 - Parâmetros dos lotes

Janela de verificação	Porcentagem de correção
6	80%
	100%
	120%
10	80%
	100%
	120%
12	80%
	100%
	120%
Correção manual (sistema desligado)	N/A

Fonte: Autor (2024).

Como base para a comparação, foi retirado também um lote de peças com o sistema desligado, ou seja, com o operador corrigindo manualmente as peças quando necessário. O lote foi selecionado propositalmente em momento onde houve correção manual, pois não se trata do comportamento da máquina em estabilidade, mas sim do comportamento das diferentes correções, feitas pelo operador ou sistema. Esse lote pode ser visto na Figura 29, onde a linha pontilhada laranja representa a tolerância do sistema de correção, que neste caso em específico não é utilizada:

Figura 29 - Lote com correção manual

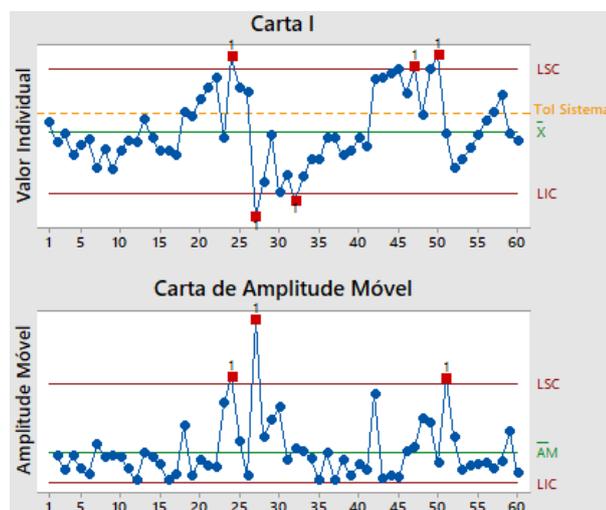


Fonte: Autor (2024).

Neste lote, houve a produção de peças acima do limite de especificação, o que ocorreu em apenas uma das situações com o sistema ligado. Nota-se também que a média do processo está acima da tolerância do sistema de correção, pois houve muitas peças produzidas com diâmetro alto antes da realização da correção. Essa situação só aconteceu com duas configurações quando o sistema foi ligado.

Iniciando os lotes retirados com o sistema ligado, na Figura 30 encontram-se as Cartas I-AM para o lote com janela de verificação de 6 peças, aplicando-se 80% de correção:

Figura 30 - Lote com janela de 6 amostras e 80% de correção

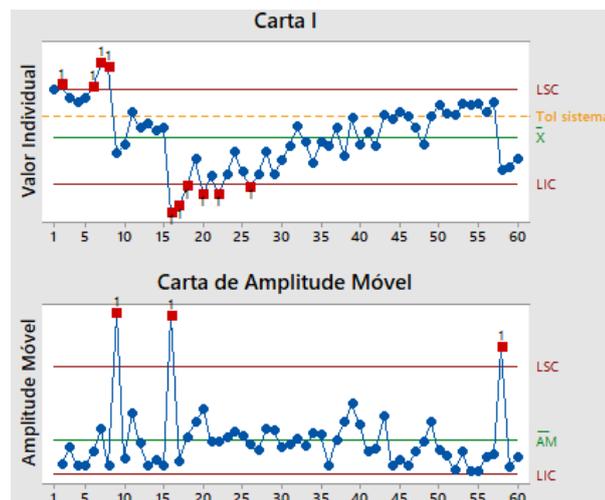


Fonte: Autor (2024).

A linha amarela na Carta I representa a tolerância do sistema de correção, ou seja, se a média da janela de verificação estiver acima desta linha, a correção será aplicada. Dos três pontos fora de controle na Carta AM, dois foram causados pela correção do sistema: uma correção na peça 27 aplicada após a verificação na peça 24, e outra correção na peça 51 após verificação na peça 48. O processo com estes parâmetros mostrou-se capaz com valores de C_p e C_{pk} acima dos valores típicos da máquina quando corrigida manualmente, e não excedendo 50% da tolerância superior do produto.

Na Figura 31, encontram-se as cartas para o lote com janela de verificação de 6 peças e 100% de correção:

Figura 31 - Lote com janela de 6 amostras e 100% de correção

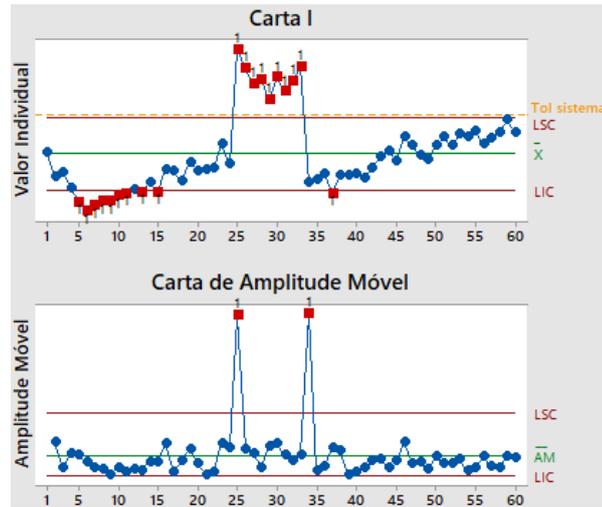


Fonte: Autor (2024).

Na Carta AM, todos os 3 pontos fora de controle são resultados da correção do sistema. As correções foram realizadas: na peça 9 após verificação da peça 6; na peça 16 após verificação da peça 12; e na peça 58 após verificação da peça 54. Este lote partiu de uma medição com as primeiras peças já acima do limite de correção do sistema, o que causou duas correções em sequência. Apesar disso, o processo com esses parâmetros mostrou valores de C_p e C_{pk} acima de valores típicos da máquina sob condições normais.

Na Figura 32, encontram-se as Cartas para o lote com janela de verificação de 6 peças e correção de 120%:

Figura 32 - Lote com janela de 6 peças e 120% de correção

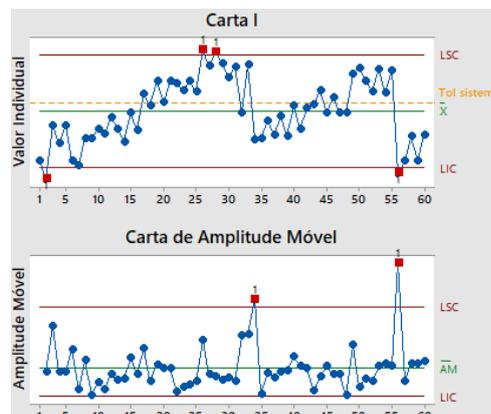


Fonte: Autor (2024).

O primeiro ponto fora de controle não foi causado pelo sistema de correção, mas por um distúrbio no processo que aumentou o diâmetro das peças produzidas. A causa do distúrbio não foi investigada, porém a hipótese é de que tenha sido causado por uma peça cujo pré-usinado possuía diâmetro ou excentricidade acima do especificado, o que causa um desgaste maior no rebolo durante a usinagem. O sistema realizou uma correção na peça 34 após leitura da peça 30, trazendo o processo novamente para uma situação de controle. Com estes parâmetros, o processo apresentou valores de C_p e C_{pk} maiores que os valores típicos da máquina sem o sistema, e utilizando cerca de 66% da tolerância superior da peça.

A Figura 33 mostra as cartas para o sistema com janela de verificação de 10 peças e correção de 80%:

Figura 33 - Lote com janela de 10 peças e 80% de correção

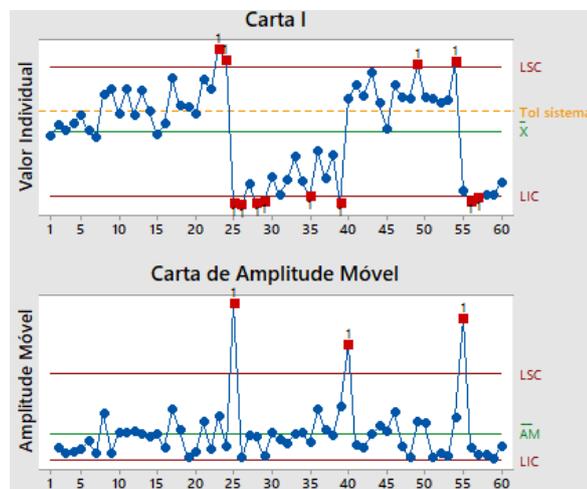


Fonte: Autor (2024).

Ambos os pontos fora de controle na Carta AM indicam correções realizadas pelo sistema, na peça 34 após verificação da peça 30, e na peça 50 após verificação na peça 50. Esses parâmetros resultaram em valores de C_p e C_{pk} levemente maiores que os valores normais de operação da máquina.

Na Figura 34, encontram as cartas para janela de 10 peças e 100% de correção:

Figura 34 - Lote com janela de 10 peças e 100% de correção

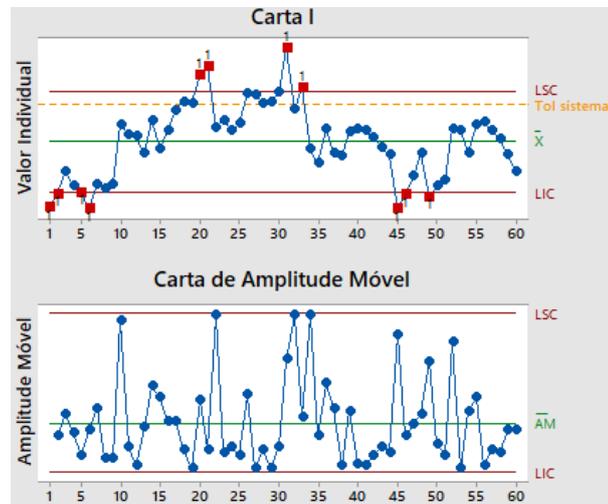


Fonte: Autor (2024).

O primeiro e último pontos fora de controle na carta AM foram causados pelo sistema, aplicando correções nas peças 25 e 55 após verificação nas peças 20 e 50, respectivamente. O segundo ponto trata-se de algum distúrbio não identificado que aumentou o diâmetro das peças. Apesar disso, esses parâmetros resultaram em valores de C_p e C_{pk} maiores que os normais da máquina e utilizando no máximo 50% da tolerância superior do produto.

Na Figura 35 estão as cartas para o lote com janela de verificação de 10 peças e 120% de correção:

Figura 35 - Lote com janela de 10 peças e 120% de correção

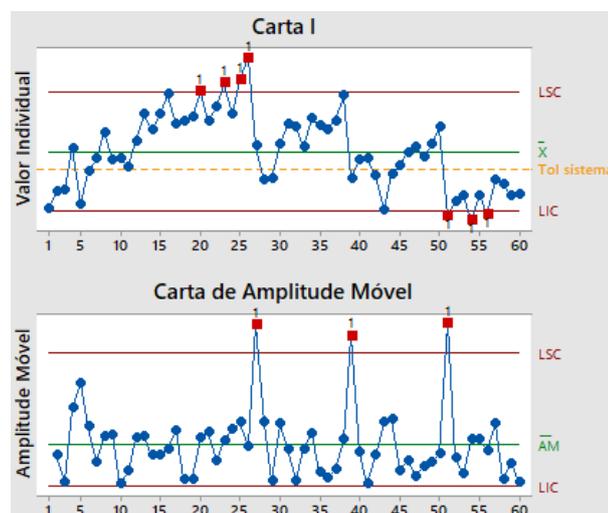


Fonte: Autor (2024).

Essa combinação de parâmetros resultou nos maiores valores C_p e C_{pk} entre todos os lotes testados, com valores até duas vezes maiores que o normal da máquina. Embora nenhum ponto da carta AM esteja fora de controle, as correções foram realizadas na peça 32 após verificação na peça 30, com 50% da tolerância superior utilizada.

Na Figura 36 estão as cartas para o lote com janela de 12 peças e 80% de correção:

Figura 36 - Lote com janela de 12 peças e 80% de correção

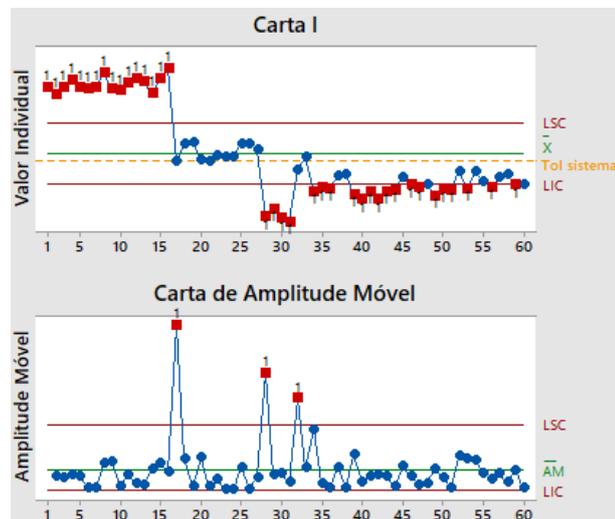


Fonte: Autor (2024).

Todos os pontos fora de controle na carta AM são devidos à correção do sistema: na peça 27 após verificação na peça 24; na peça 39 após verificação na 36; e na peça 51 após verificação na 48. Esses parâmetros apresentaram valores de C_p e C_{pk} levemente superiores aos valores da máquina sob situação manual. Mesmo com este lote tendo se iniciado próximo à medida nominal do produto, a média do processo ficou acima da tolerância do sistema (linha verde acima da linha amarela).

Na Figura 37 estão as cartas para a janela de verificação de 12 peças com 100% de correção:

Figura 37 - Lote com janela de 12 peças e 100% de correção

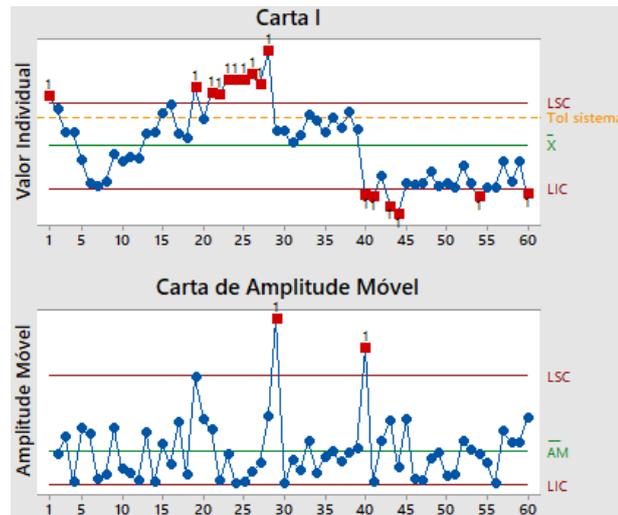


Fonte: Autor (2024).

Os dois primeiros pontos fora de controle na Carta AM foram causados por correção do sistema, na peça 17 após verificação na peça 12, e na peça 28 após verificação na 24. Este lote se iniciou com peças de alto diâmetro, de forma que a média do processo novamente ficou acima da tolerância do sistema. Essa combinação de parâmetros apresentou os valores mais baixos C_p e C_{pk} entre os lotes, porém este valor é muito próximo às condições normais da máquina.

Por fim, a Figura 38 retrata as cartas para o lote com verificação a cada 12 peças e correção de 120%:

Figura 38 - Lote com janela de 12 peças e 120% de correção

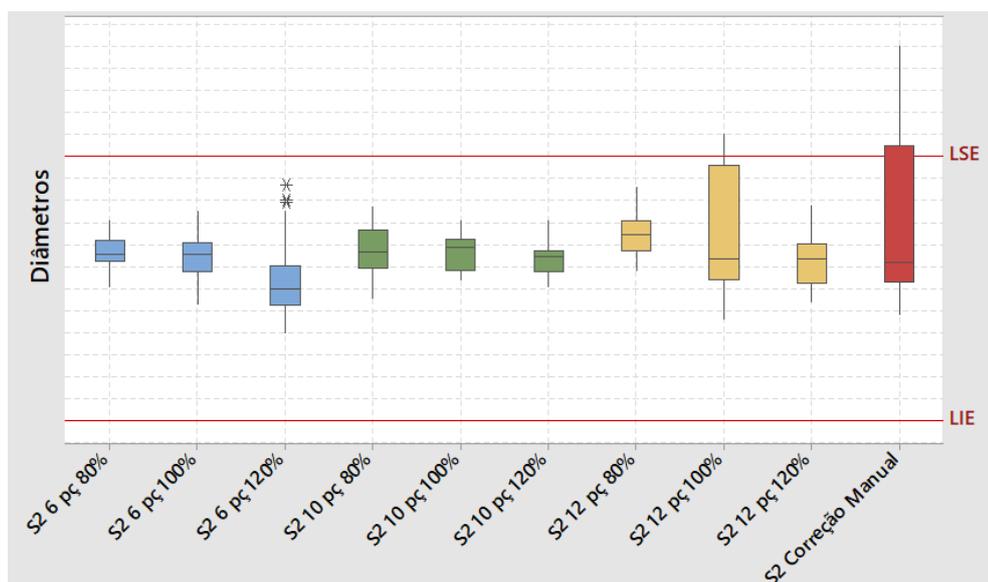


Fonte: Autor (2024).

Ambos os pontos fora de controle são resultado de correções do sistema, nas peças 29 e 40 após verificação nas peças 24 e 36. Este lote apresentou altos valores de C_p e C_{pk} , e foi o único lote com janela de 12 peças no qual a média do processo ficou abaixo da tolerância do sistema (linha amarela acima da linha verde).

Para melhor visualização da distribuição dos diâmetros de cada lote, foi elaborado um *boxplot* para cada combinação de parâmetros, que pode ser visto na Figura 39:

Figura 39 - *Boxplot* dos lotes



Fonte: Autor (2024).

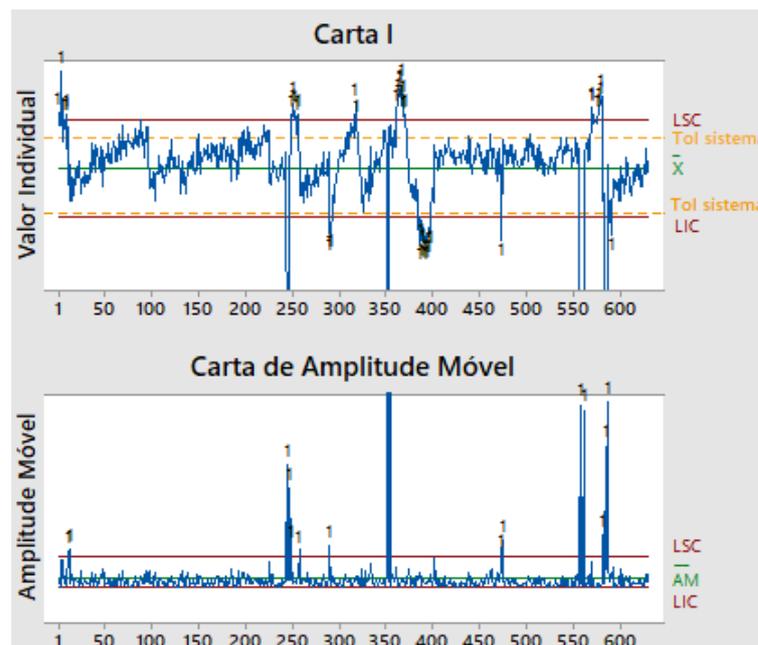
3.6.5 Teste em produção

Para ilustrar o comportamento do sistema em uma situação real, foi feito um teste em produção por cerca de 2h. O operador foi instruído a trabalhar normalmente, realizando correção manual caso necessário, e os parâmetros escolhidos foram:

- janela de verificação de 6 peças;
- 120% de correção;
- 5 peças ignoradas após a dressagem;
- Parada de máquina após 10 peças fora da especificação em sequência;
- 1 peça ignorada após *setup*;
- Parada de máquina após 12 peças produzidas sem medição.

Os parâmetros de ajuste escolhidos não são os que apresentaram os maiores valores de C_p e C_{pk} nos testes anteriores, pois se trata apenas de um teste geral para avaliar os parâmetros de segurança. As Cartas I-AM para esse teste podem ser vistas na Figura 40:

Figura 40 - Produção com janela de 6 peças e 120% de correção



Fonte: Autor (2024).

Somente duas correções manuais foram feitas pelo operador, nas peças 395 e 687, ambas realizadas após dressagem. Todas as outras correções foram realizadas pelo sistema. Neste teste houve a presença de situações acíclicas, como acúmulo de peças na esteira quando o operador saiu para buscar peças, parada de máquina devido a travamento de peças na placa, peças com erro de medição e a própria dressagem. Em todas as situações, o sistema respondeu positivamente, sem causar o acúmulo de erros citado na seção 4.1.

A média do processo para esse teste ficou muito próxima ao valor nominal da peça, e os valores de C_p e C_{pk} foram satisfatórios, embora menores do que os testes com lotes menores. Essa diferença se dá devido à presença dos erros de medição, os vales de diâmetro baixo no gráfico.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o sistema já instalado na retífica, o seguinte pôde ser concluído:

- O sistema respondeu positivamente aos testes de parâmetros e de produção, sendo capaz de manter o processo dentro dos limites de especificação mesmo em situações acíclicas, com correção manual sendo feita pelo operador somente na primeira peça após a dressagem;
- A resposta adequada do sistema depende da escolha correta dos parâmetros de segurança e ajuste;
- A escolha dos parâmetros de segurança varia de operador para operador, e caberá ao preparador da linha a definição dos mesmos baseado na experiência do operador;
- As regras definidas na seção 4.2 funcionaram para proporcionar robustez ao sistema, mesmo com algumas delas não implementadas;
- Nenhuma das regras é exclusiva para essa retífica, o que permite a replicação do conceito em outras máquinas;
- Embora o sistema reduza a interferência do operador no processo, o comando do operador deve sobrescrever o do sistema em caso de conflito, para evitar conflito de comandos;
- Como o sistema é alimentado pelas medições das peças saídas da máquina, é necessário eliminar o máximo possível de fontes de erros de medição;
- A automatização do processo de correção recebeu feedback positivo dos operadores por ser de fácil utilização e treinamento;
- A máquina na qual o sistema foi instalado é uma máquina altamente estável, e embora o sistema auxilie reduzindo a dispersão do diâmetro das peças, o ganho mais substancial da empresa é em outras máquinas que apresentam maior variação.

5. CONCLUSÕES

Ao fim deste trabalho, os objetivos previstos no Capítulo 1 foram cumpridos e o sistema encontra-se instalado na retífica e pronto para funcionamento. O conceito do sistema funciona, é replicável para as outras retíficas, e atende às especificações de qualidade e tempo de ciclo necessárias, além de proporcionar significativa melhoria na variabilidade das peças.

A utilização do *air gauge* como instrumento de medição foi justificada pelas características do mesmo, principalmente tempo de medição e adaptação ao ambiente fabril. Porém, pelo conceito de funcionamento do sistema, qualquer instrumento de medição que possa enviar os dados das peças medidas para a interface do sistema pode ser utilizado, sendo restringido apenas pelo tempo de medição.

Os ganhos imediatos do sistema podem ser resumidos como menor produção de sucatas e maior homogeneização no diâmetro das peças produzidas. Porém, como citado no Capítulo 4, a máquina na qual o sistema está atualmente instalado já é uma máquina estável, e portanto, foi escolhida para teste do conceito do sistema. O maior ganho para a empresa se dá na utilização do sistema para corrigir outras máquinas, que apresentem menor estabilidade.

As regras estabelecidas para o funcionamento do sistema foram suficientes para manter a estabilidade do mesmo. Embora algumas das regras não tenham sido implementadas corretamente conforme citado na seção 3.6.4, isso não impactou no desempenho do sistema. Com o conceito validado e os parâmetros de ajuste funcionando, novos parâmetros de segurança podem ser implementados sem comprometer o funcionamento do sistema.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se a flexibilização do sistema para uma retífica *centerless* de passagem na qual os produtos não são medidos 100%, o que implica em mudança no conceito de funcionamento já que o sistema não será constantemente alimentado com dados de medições.

Propõe-se também uma metodologia para a correção automática através da curva de desgaste do rebolo, estabelecendo uma relação que descreva o desgaste ao longo do tempo para diferentes tipos de rebolo, e utilize essa informação para corrigir a máquina automaticamente sem necessitar da retroalimentação das medições.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, G. M. **Desenvolvimento de um modelo numérico para simulação de ciclos de compressão a vapor em refrigeradores domésticos operando com R134a e R600a**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A.R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri: Manole, 2008.
- BORROW, C. M. **The certified quality engineer handbook**. 3. ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2009.
- FERNANDES, W. D.; COSTA NETO, P. L. O.; SILVA, J. R. Metrologia e qualidade - sua importância como fatores de competitividade nos processos produtivos. *In: XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*. Salvador, 6 a 9 de outubro de 2009. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STO_091_615_13247.pdf. Acesso em: 24 de junho de 2024.
- FLAPPER NOZZLE. **Instrumentation tools**. Disponível em: <https://instrumentationtools.com/flapper-nozzle-system/>. Acesso em: 24 de jun. de 2024.
- GONÇALVES NETO, L. M. **Fundamentos da retificação centerless**. São Paulo: Blucher, 2023.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **VIM 2012**. Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. 1. ed. Rio de Janeiro: INMETRO 2012.
- JACKSON, M. J.; DAVIM, J. P. **Machining with abrasives**. New York: Springer, 2011.
- JERMAK, C. J. *et al.* Air gauge characteristics linearity improvement. **Journal of control science and engineering**. abr 2016.
- MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives**. 2. ed. New York: Industrial Press, 2008.
- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 7. ed. Arizona: Wiley, 2012.
- MT 60. **Heidenhain (2024)**. Disponível em: <https://www.heidenhain.com.br/products/length-gauges/metro>. Acesso em: 24 de jun. de 2024.

ROWE, W. B. **Principles of modern grinding technology**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2014.

RUCKI, M. Air gauge adjustment Uncertainty Reduction. *In*: International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement. Trento, 16 a 18 de julho de 2007. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4362563>. Acesso em: 24 jun. 2024.

RUCKI, M.; BARISIC, B.; VARGA, G. Air gauges as a part of the dimensional inspection system. **Measurement**. v. 43, n. 1, p. 83-91, jan 2010.

SILVA NETO, J.C. **Metrologia e controle dimensional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

WALKER, J. R. **Machining fundamentals: from basic to advanced techniques**. 6. ed. Tinley Park: The Goodheart-Willcox Company, 2000.

ZEISS Accura. **Intermetal (2021)**. Disponível em: <https://www.intermetal.pt/Artigos/355519-Maquinas-de-medicao-por-coordenadas-de-grandes-dimensoes.html>. Acesso em: 24 de jun. 2024.