

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id7149>

ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 04/08/2022

APROVADO 25/10/2022

PUBLICADO ON-LINE 24/11/2022

PUBLICADO 10/07/2024

EDITORES ASSOCIADOS

Koje Daniel Vasconcelos Mishina,
Marcelo Cavalcanti Rodrigues
e José Carlos Lima Júnior

Implantação da metodologia Seis Sigma aplicada no método de controle da rugosidade superficial em assento de rolamentos

 William José Borges ^{[1]*}

 Jean Felipe
Rodrigues Pozzer ^[2]

 Cassiano Rodrigues Moura ^[3]

[1] williamjoseborges@gmail.com
Instituto Federal do Paraná (IFPR),
Pinhais, Paraná, Brasil

[2] tabletenis_jean@hotmail.com
[3] cassiano.moura@ifsc.edu.br
Departamento de Mecânica, Instituto Federal
de Santa Catarina (IFSC), Jaraguá do Sul,
Santa Catarina, Brasil

RESUMO: Este estudo teve como objetivo corrigir algumas lacunas, ainda existentes, no processo de aferição da rugosidade do assento do rolamento em tampas para motores elétricos, utilizando uma das metodologias mais assertivas atualmente, o Seis Sigma. A pesquisa focou a análise da robustez da medição do componente, a verificação da frequência de sua inspeção e a identificação dos fatores que poderiam influenciar a sua variação. Para isso utilizou-se ferramentas associadas ao Seis Sigma, buscando realizar um mapa de processo coerente, uma matriz de decisão que considerasse os principais fatores de variação e, posteriormente, uma árvore de processos robusta para permitir análises corretas. Com o estudo, garantiu-se que os componentes estavam chegando para os clientes finais com a devida qualidade designada no projeto inicial e eliminou-se a incerteza em relação ao método com o qual essa aferição era realizada, melhorando a assertividade das medições e tornando o processo mais confiável para os clientes e auditores externos.

Palavras-chave: assento do rolamento; motor elétrico; rugosidade superficial; Seis Sigma.

Implementation of the Six Sigma methodology applied in the method of controlling surface roughness in bearing seats

ABSTRACT: This study aimed to correct some gaps that still exist in the process of measuring the roughness of the bearing seat in covers for electric motors, using one of the most assertive methodologies currently used, which is Six Sigma. The research focused on the analysis of how robust the measurement of the component is, on the verification of the frequency of its inspection, and also on identifying which factors could influence its variation.

*Autor para correspondência.

For this, tools linked to Six Sigma were used, seeking to create a coherent process map, a decision matrix that takes into account the main factors of variation, and later a robust process tree so that correct analyses can be made. With the study, it was ensured that the components were arriving to their final customer with the proper quality designated in the initial project, and the uncertainty that existed concerning the method in which this measurement was performed was eliminated, improving the assertiveness of the measurements and making the most reliable process for customers and external auditors.

Keywords: bearing seat; electric motor; Six Sigma; surface roughness.

1 Introdução

O processo competitivo global tem induzido um comportamento adaptativo das empresas, obrigando-as a atualizarem continuamente seus processos produtivos. Esse fenômeno tem sido analisado e discutido em diferentes áreas, oferecendo múltiplas perspectivas de mensuração e criando oportunidades para a implementação de novas técnicas e ferramentas de gestão que auxiliam na avaliação abrangente das informações ao longo da cadeia produtiva (Daleaste; Favretto; Bernardy, 2020).

No Brasil, a administração da produção (Slack; Chambers; Johnston, 2009) tem contribuído no fortalecimento e na atualização dos processos produtivos, atendendo às demandas das empresas por melhorias contínuas. Dessa forma, muitas metodologias são constantemente disponibilizadas e aperfeiçoadas pelas organizações que procuram se manter competitivas no mercado, buscando alternativas para minimizar custos e melhorar a produtividade de seus processos (Gerônimo *et al.*, 2018).

Para este estudo, foi escolhida a análise e implantação de metodologias de qualidade visando à definição do processo e da frequência de medição da rugosidade superficial de um componente específico de motores elétricos. Muitos aspectos são mensurados e acompanhados durante o processo produtivo para assegurar que o produto final atenda às necessidades do cliente (Paladini, 2012).

De acordo com Kikukawa *et al.* (2019), a qualidade dos processos de usinagem está diretamente relacionada ao acabamento superficial da peça, mensurável por meio do parâmetro de rugosidade. Esse parâmetro é influenciado pelo processo de usinagem e seus diversos fatores, embora sua previsão direta possa ser complexa (Gerônimo *et al.*, 2018). A rugosidade superficial da peça é uma característica técnica essencial para o bom funcionamento de um motor elétrico, pois assegura o deslizamento adequado das partes girantes, além de manter uma lubrificação e vedação contra agentes externos (Garrido; Leventini; Martini, 2021). Isso garante a qualidade dos componentes ao longo da linha de produção.

Quando se considera a administração da produção no contexto da usinagem da tampa de fixação do motor, objeto deste estudo, percebe-se a necessidade de garantir que a peça atenda às especificações de projeto de Engenharia. A tampa de fixação do motor exige uma usinagem precisa da área destinada ao rolamento, com um alto grau de acabamento, dimensões rigorosamente controladas e baixa rugosidade superficial, conforme as especificações do fabricante do rolamento.

Atualmente, a dimensão e a superfície são verificadas periodicamente pelo controle de qualidade da fábrica. No entanto, não há especificações ou validações estabelecidas

para o método de medição e sua frequência. Assim, pergunta-se: como a ausência de um procedimento padronizado poderia influenciar o correto funcionamento dos motores? Essa falta poderia causar problemas para o cliente final, não conformidades em auditorias, desperdício de materiais e tempo com retrabalhos?

Diante desse contexto, esta pesquisa tem como objetivo desenvolver um método de controle e medição da rugosidade superficial no processo de mandrilamento do assento do rolamento em tampas de ferro fundido cinzento para motores elétricos. Adicionalmente, será estabelecido um método de frequência e controle da medição da rugosidade, utilizando a metodologia Seis Sigma e a ferramenta de análise estatística Ppk.

Nas próximas seções, são apresentados o referencial teórico que fundamenta as atividades realizadas neste trabalho (seção 2) e a discussão dos materiais e métodos, descrevendo a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa (seção 3). Na seção 4, discute-se a metodologia de análise e avaliação do processo produtivo empregado, enquanto na seção 5 são apresentados os resultados e suas discussões. Finalmente, na seção 6, são apresentadas as conclusões deste estudo.

2 Referencial teórico

Nesta seção, são apresentadas informações pertinentes sobre a gestão da qualidade, conceituando a metodologia Seis Sigma, bem como os índices de performance dos processos Pp e Ppk, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Gestão da qualidade

A existência das indústrias no mundo corporativo, bem como o ambiente competitivo em que se inserem, induz a um comportamento voltado para a eficiência do sistema produtivo. Com recursos finitos, as empresas necessitam constantemente buscar o aperfeiçoamento de toda a cadeia produtiva, elevando os resultados e tornando-se mais competitivas. Novas abordagens, desenvolvidas na academia (Di Gregorio, 2013), visam identificar e aplicar valores em seus produtos.

A ausência de defeitos nos produtos, item relevante para a gestão da qualidade, permite que as empresas reduzam indicadores de erros, retrabalhos e desperdícios, o que, conseqüentemente, diminui os custos com acionamentos de garantias devido a falhas (Juran, 1997).

Existem estratégias e formas de otimizar a competitividade no meio empresarial. Uma que se destaca é a de diferenciação, concentrando esforços em características dos produtos altamente relevantes para os clientes, sem desconsiderar os custos produtivos e de venda. Nessa estratégia, investe-se diretamente em uma qualidade superior do produto final, fortalecendo o patrimônio, oferecem-se prazos de entrega melhores que os dos concorrentes e uma variedade de produtos (Tubino, 2015).

O surgimento de novas tecnologias e novos hábitos humanos recebe a atenção da gestão da qualidade (Juran, 1997). Os produtos precisam estar adaptados às mudanças nos usos e técnicas, ajustando-se ao longo de sua trajetória tecnológica. Portanto, quando se fala em qualidade no meio produtivo, busca-se frequentemente a ausência de defeitos, promovendo-se continuamente o melhoramento do produto.

Dentro do segmento da gestão da qualidade, existem inúmeras ferramentas que auxiliam na busca por melhorias. Segundo Paladini (2012), essas ferramentas possuem características próprias, de acordo com as pessoas que as utilizam ou com o objetivo a que se destinam. Podem ser divididas em três grupos: tradicionais, derivadas e direcionadas.

As ferramentas tradicionais tendem a ser opções criadas há mais tempo ou importadas de outras áreas da ciência, como histogramas, gráficos de controle, *check-lists* ou diagramas de causa-efeito. As metodologias derivadas, como o modelo *just-in-time* que teve origem no Japão em 1954, baseiam-se no zero desperdício, utilizando técnicas como *Kanban* e TPM (*Total Productive Maintenance*), com o objetivo principal de uma produção contínua e organizada. As ferramentas direcionadas concentram esforços no atendimento do cliente, melhorando seu processo de forma sofisticada, utilizando matrizes e diagramas elaborados (Paladini, 2012).

Seguindo esse entendimento e a intenção de cumprir com o objetivo proposto, apresenta-se uma das metodologias Seis Sigma, desenvolvida ao longo dos anos. Criada no início dos anos 1980, essa metodologia utiliza técnicas de análises estatísticas para a resolução de problemas e avaliação de processos, sendo uma ótima opção para análise de robustez do processo e definição de padrões a serem seguidos (Paladini, 2012).

2.2 Seis Sigma

O Seis Sigma pode ser definido como uma metodologia que busca identificar e eliminar defeitos em processos produtivos, focando as características de desempenho do processo. É uma estratégia gerencial altamente quantitativa, com o objetivo de aumentar o desempenho, a lucratividade das empresas e a satisfação dos clientes (Antony, 2008; Silva; Oliveira; Silva, 2017; Werkema, 2012).

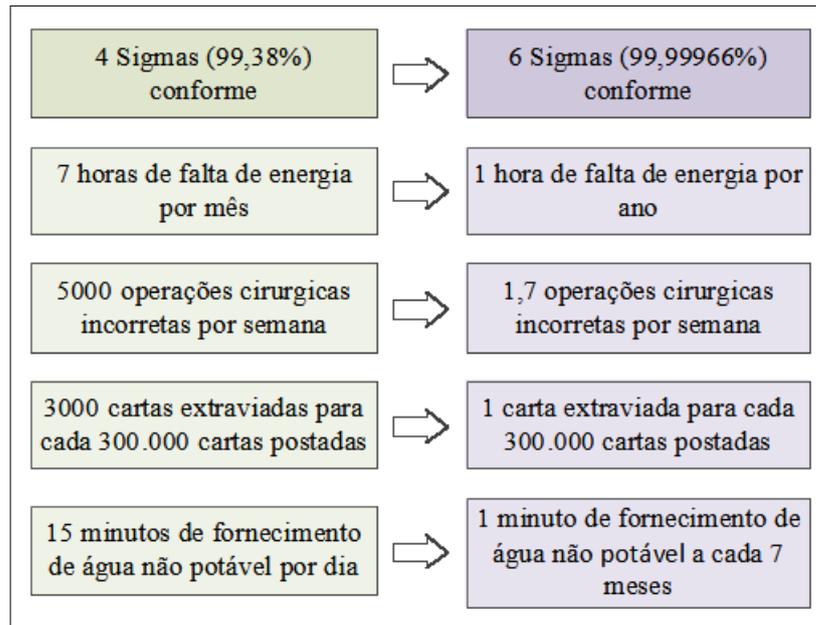
Amplamente adotada no meio empresarial, a metodologia Seis Sigma identifica as principais perdas produtivas, eliminando desperdícios e promovendo a melhoria contínua da qualidade (Chiroli; Biazetto; Glavam, 2019; Sakumoto, Chiroli; Dzulinski, 2019). No Brasil, as empresas têm adotado essa metodologia para expandir seus negócios e aumentar a competitividade nos grandes mercados globais. A primeira empresa brasileira a implantar o Seis Sigma foi a Whirlpool, em 1999, obtendo um lucro de cerca de 20 milhões de reais a partir desses projetos (Werkema, 2012).

Werkema (2012) descreve a integração do *Lean Manufacturing* à metodologia Seis Sigma, resultando no *Lean Six Sigma*. Essa abordagem pode ser utilizada em novas ideias de produtos e processos, antes mesmo de serem implantadas, sendo uma estratégia e metodologia de negócios para aumentar o desempenho do processo, melhorando os resultados (Snee, 2010).

A meta da *Lean Six Sigma* é buscar o zero desperdício, ou o mais próximo disso possível. Empresas que adotam essa metodologia conseguem gerar quinze reais de lucro para cada real investido. A aceitação de defeito na aplicação do Seis Sigma é de 3,4 ppm (partes por milhão), resultando em um percentual de assertividade de 99,99966%, superior ao do padrão Quatro Sigma, que é de 99,38% (Werkema, 2012). A comparação entre Quatro Sigma e Seis Sigma torna a diferença perceptível (Figura 1).

Figura 1 ▶

Comparação entre Quatro Sigma e Seis Sigma.
Fonte: adaptado de Werkema (2012)



O Seis Sigma possui outros fundamentos importantes para a sua aplicação, como o foco no cliente final, criando melhorias nos aspectos críticos da qualidade do produto e estreitando a relação cliente-empresa. Busca-se constantemente a diminuição da variação do processo, tornando-o mais confiável e estável. A metodologia distingue-se pela infraestrutura criada ao seu redor, que deve ser estudada e executada por pessoas capacitadas e conectadas com a empresa (Werkema, 2012).

A implantação da estratégia Seis Sigma é realizada por uma equipe de especialistas nos processos, capacitados a analisá-los e encontrar soluções para as causas dos problemas. A equipe incentiva a mudança na empresa, implantando e impulsionando o uso de ferramentas da qualidade. As equipes Seis Sigma devem ter tempo para aprofundar-se na metodologia e trabalhar no projeto, além de suas atividades normais (Peña, 2006).

Segundo Pyzdek (2003), os integrantes da equipe geralmente adotam as seguintes funções:

- 1) Líder executivo: responsável por proporcionar os meios para alcançar o objetivo do trabalho;
- 2) *Champion*: pessoa que compreende o Seis Sigma e dá o suporte necessário;
- 3) *Sponsor*: responsável pela parte estratégica da empresa;
- 4) *Master Black Belt*: responsável por dar suporte técnico e fornecer conhecimento estatístico;
- 5) *Black Belt*: líder da equipe com boas habilidades analíticas;
- 6) *Green Belt*: capaz de liderar os projetos, mas necessita da supervisão do *Black Belt*;
- 7) *Yellow Belt*: responsável por gerir e executar os projetos de melhoria simples.

O Seis Sigma evolui constantemente em seus métodos. Um exemplo é a substituição do MAIC (*Measure, Analyze, Improve, Control*) pelo DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*), modelo composto por cinco fases que guiam as atividades do Seis Sigma (Shahin, 2008).

De acordo com Mast e Lokkerbol (2012), o método DMAIC é frequentemente utilizado junto ao Seis Sigma para a resolução de problemas, sendo um aliado na melhoria da qualidade, aplicada na produção ou no produto (Fernandes *et al.*, 2021). O método DMAIC promove a melhoria do processo através de cinco etapas bem definidas (Carpinetti, 2016):

Etapa D (*Define*): compreensão do problema a ser resolvido e dos procedimentos adotados para o seu desenvolvimento;

- Etapa M (*Measure*): coleta de dados quantitativos referentes ao problema, gerando uma melhor visão das oportunidades de melhorias no processo;
- Etapa A (*Analyze*): separação das variáveis críticas para determinar o problema a ser solucionado e sua prioridade;
- Etapa I (*Improve*): aplicação das ações possíveis para corrigir os problemas;
- Etapa C (*Control*): definição dos procedimentos de inspeção para garantir o sucesso e a conservação da melhoria.

2.3 Índices de performance do processo Pp e Ppk

As ferramentas de análise estatística têm como objetivo avaliar a capacidade e desempenho do processo atual, verificando a constância de suas variações por meio de fórmulas matemáticas. A ideia central é observar se essas variações interferem na qualidade do produto de acordo com as especificações dos clientes.

Há um alinhamento entre as especificações detalhadas do produto e o acompanhamento estatístico dos elementos, para sinalizar se os atributos espaciais e físicos estão sendo atendidos no processo produtivo. O índice Pp mostra a capacidade do processo em produzir peças conforme especificado, utilizando indicadores objetivos. Já o índice Ppk verifica a proximidade dos valores dos limites superiores e inferiores do processo, garantindo que esteja dentro dos limites, mas com um valor próximo à média alvo (Sheehy *et al.*, 2002).

A combinação dos índices Pp e Ppk avalia a variação do processo em relação aos limites superiores e inferiores, buscando-se valores menores de variabilidade, indicando um processo estável. Quanto maiores os índices Pp e Ppk, maior a estabilidade do processo, pois o desvio padrão total é utilizado como base e margem de segurança. De acordo com Sheehy *et al.* (2002), para calcular os índices de desempenho do processo, utilizam-se as Equações 1 e 2.

$$Pp = \frac{USL - LSL}{6 \times \sigma_{geral}} \quad (1)$$

$$Ppk = \min (Ppi; Ppu) \quad (2)$$

em que *USL* e *LSL* são os limites superior e inferior especificados, respectivamente; σ_{geral} é o desvio padrão global; e *Ppi* e *Ppu* são os valores dos índices em relação aos limites superior e inferior.

Com a apresentação dos dados e a validação dos índices de processo Pp e Ppk, garantindo um processo estável, torna-se possível enviar relatórios aos clientes atuais e

divulgar os dados abertamente aos possíveis compradores. Isso comprova a estabilidade futura do processo ao longo do tempo e confirma que o processo executado atualmente está livre de falhas que possam comprometer a funcionalidade do produto.

3 Materiais e métodos

Na presente pesquisa, foram utilizados três tipos de máquinas de usinagem: dois tornos verticais e uma mandriladora, todos localizados no mesmo parque fabril, em ambiente com temperatura variável, uma vez que o espaço não possui climatização. Um dos tornos verticais é da marca Okuma, modelo V40R. Durante a usinagem das amostras, adotou-se uma velocidade de corte de 300 mm/min para desbaste e acabamento, com avanços de 0,35 mm/rot para o desbaste e 0,1 mm/rot para o acabamento. O segundo torno é da marca Doosan, modelo Puma Lathe, com as condições de corte sendo mantidas iguais para ambos os tornos, com a utilização do inserto WNMG 08 04 04.

A mandriladora utilizada é um equipamento de fabricação própria da empresa, com sistema de fixação por prensa e localização da peça determinada por um anel escalonado. Esse anel é inserido na tampa do motor elétrico pelo seu encaixe usinado, com interferência, garantindo a concentricidade entre o encaixe usinado e o diâmetro do rolamento a ser usinado. As condições de corte utilizadas foram um avanço de 0,15 mm/rot e uma velocidade de corte de 200 mm/min, utilizando o inserto CPMT 06 02 04.

Os instrumentos utilizados para realizar as medições foram dois rugosímetros: um da marca Mitutoyo, modelo SJ-210, e outro da marca Mahr, modelo M1. Ambos abrangem uma faixa de medição de 0 a 100 micrômetros. Os equipamentos empregam o método de medição da rugosidade média Ra , com um comprimento de medição de 17,5 mm e um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 2,5 mm no modelo da marca Mahr e de 0,8 mm no modelo da marca Mitutoyo. É importante ressaltar que nenhuma aferição garante 100% de assertividade; considerando isso, todo equipamento possui uma incerteza, que é uma grandeza mensurável, definindo a dispersão do resultado real da medição. Os dados relativos aos cálculos de incerteza dos instrumentos, provenientes da calibração interna da empresa, são apresentados na Tabela 1. Observa-se que, para o parâmetro de rugosidade Ra , a incerteza de ambos os instrumentos é de 0,098 μm .

Tabela 1 ►

Dados de calibração dos instrumentos de medição.

Fonte: dados da pesquisa

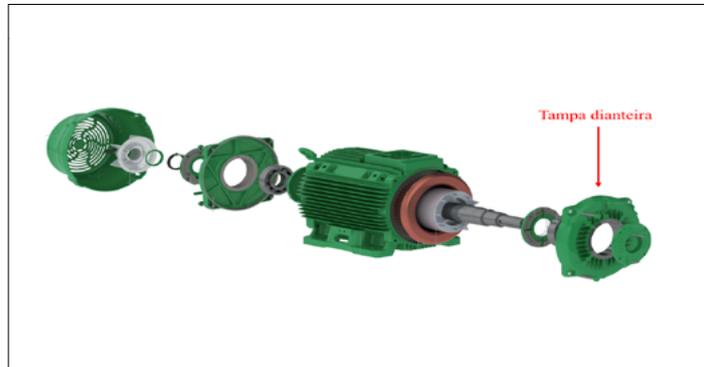
| Rugosímetro Mitutoyo | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|------|
| Faixa de medição (μm) | Tendência (μm) | Incerteza (μm) | V_{eff} | k |
| Ra | 0,006 | 0,098 | ∞ | 2,00 |
| Rz | 0,710 | 0,330 | ∞ | 2,00 |
| Rm | 1,840 | 0,390 | 29 | 2,09 |
| Rugosímetro Mahr | | | | |
| Faixa de medição (μm) | Tendência (μm) | Incerteza (μm) | V_{eff} | k |
| Ra | -0,012 | 0,098 | ∞ | 2,00 |
| Rz | -0,060 | 0,320 | ∞ | 2,00 |
| Rm | 0,030 | 0,330 | ∞ | 2,00 |

V_{eff} = graus de liberdade efetivos

k = fator de abrangência

O componente analisado neste trabalho é o assento do rolamento da tampa dianteira de um motor elétrico, onde será acomodado o rolamento, conforme indicado na Figura 2. A tampa é um componente que geralmente fica exposto no motor elétrico, com a função de vedar o invólucro contra impurezas externas e de suportar cargas radiais no eixo.

Figura 2 ►
Motor explodido e detalhe da tampa dianteira.
Fonte: adaptado de WEG (2022)



4 Metodologia de análise e avaliação do processo produtivo

A resolução dos problemas encontrados nos parques fabris acompanha a evolução de áreas como a administração e a gestão da qualidade. Ao longo do tempo, houve um aprimoramento do processo produtivo e, conseqüentemente, a ciência também evoluiu, apresentando novas formas de analisar e otimizar todo o processo.

O estudo apresentado neste artigo baseou-se integralmente em uma pesquisa quantitativa, com o objetivo de analisar dados oriundos do processo produtivo e do sistema de medição atual. Além disso, a proposta comparou estatisticamente os diversos fatores que podem influenciar, tanto positiva quanto negativamente, os resultados desejados. Como resultado dessa comparação estatística, foram obtidos os primeiros dados que garantiram um novo processo estável de inspeção da qualidade do componente (tampa do motor), objeto deste estudo.

Os componentes em análise foram tampas para motores elétricos da empresa WEG S.A., parte imprescindível para o funcionamento desses motores. Essas tampas são fabricadas internamente, porém em outro parque fabril, denominado metalúrgico, responsável por fundir o ferro e moldar o formato primário do produto. Posteriormente, a usinagem realiza o acabamento desse produto, transformando-o da forma bruta para a usinada, com dimensões mais precisas e rugosidades controladas.

O material utilizado na fabricação das tampas é o ferro fundido cinzento FC200, que possui características físicas ideais para o bom desempenho do motor elétrico, favorecendo a absorção de vibrações, mantendo a própria robustez e dureza, aumentando assim a durabilidade e confiança na aplicação em diversas áreas do mercado.

Os dados foram coletados seguindo a lógica de análise do Seis Sigma. Dessa forma, utilizou-se inicialmente o ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), planejando a caracterização do problema para entender e estipular as possíveis causas de variação, considerando aspectos que inicialmente apresentavam risco de variação nos resultados das medições.

Os dados foram adquiridos realizando a medição das peças em bancada, registrando os valores da rugosidade por meio de dois rugosímetros, ambos calibrados em laboratório, com os dados sendo utilizados no software JMP versão 14 para realização

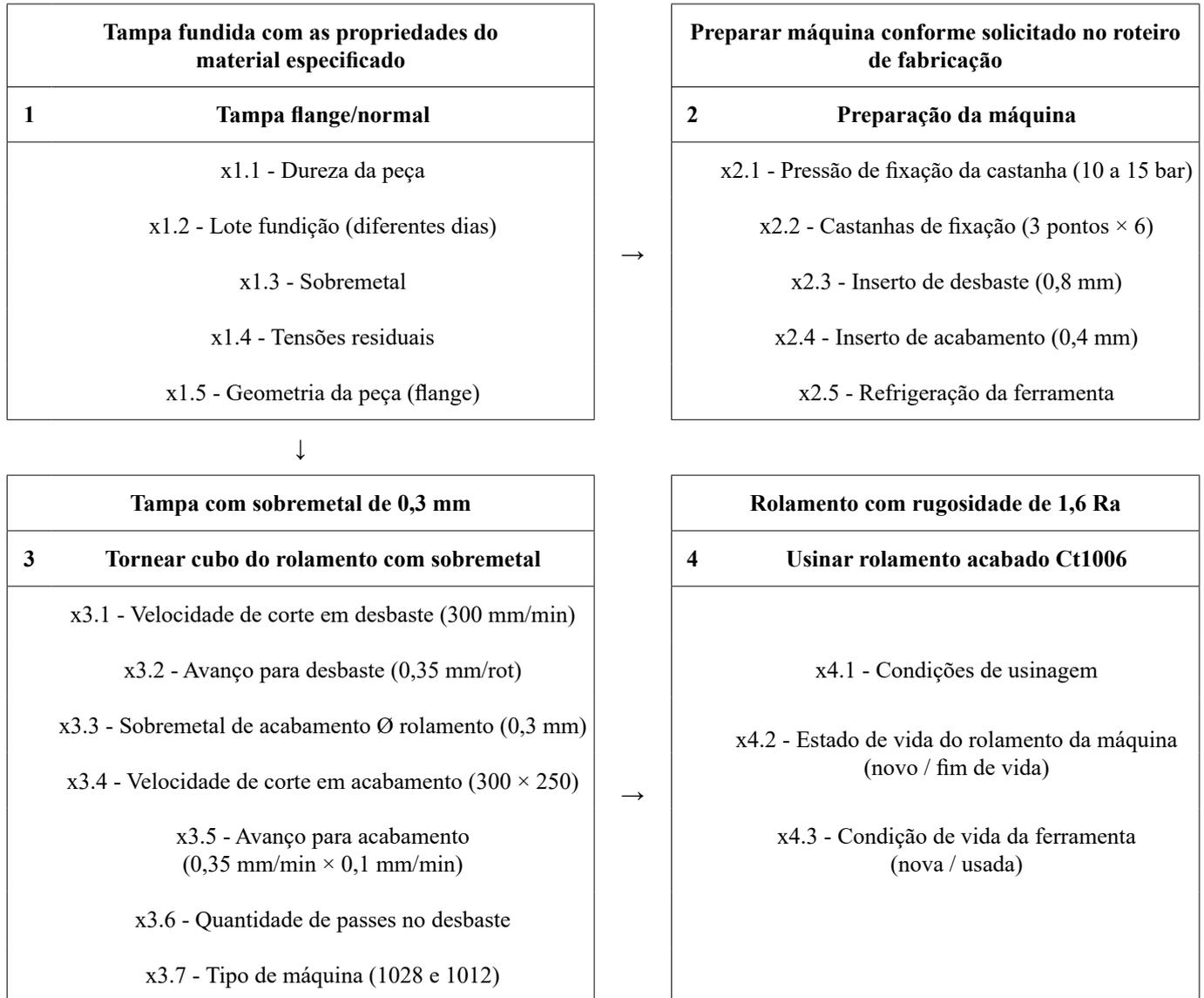
da validação do MSE (*Measurement System Evaluation*). O mesmo software foi utilizado para a avaliação do Ppk, porém para apenas um tipo de peça, com uma amostragem de 30 componentes, seguindo o procedimento com maior assertividade, validado pelo MSE.

Quadro 1 ▼

Mapa de processo do primeiro teste aplicado.

Fonte: dados da pesquisa

Para a resolução do problema proposto no Seis Sigma, foi elaborado um mapa de processo do primeiro teste, considerando todas as etapas produtivas do componente em análise. Com as etapas bem definidas, foi montado o mapa de processo, indicado no Quadro 1.



Ø: diâmetro

Na primeira etapa do mapa de processo, identificaram-se duas possíveis fontes de variação: os lotes de fundição em dias alternados e a geometria das peças, variando entre tampas dianteiras e flangeadas. Na segunda e terceira etapas, praticamente todos os pontos previamente levantados poderiam causar variações no resultado; porém, na etapa seguinte, decidiu-se manter constantes esses padrões conforme normas internas. Na terceira etapa, foram utilizados tornos verticais para fazer o desbaste do componente no rolamento, deixando ainda 0,3 mm para realizar o acabamento na mandriladora.

Na quarta etapa do mapa de processo, foi utilizada uma máquina de mandrilamento de fabricação própria da empresa, ilustrada na Figura 3 (próxima página), respeitando as condições de corte descritas em normas internas, com um avanço de 0,1 mm por rotação e 250 m/min de velocidade de corte.

Figura 3 ►

Mandriladora: a) Placa de fixação e detalhe do inserto. b) Mandriladora após fixação da tampa do motor.
 Fonte: arquivo dos autores



Quadro 2 ▼

Matriz de decisão para definição das variáveis do processo a manter constante/controlar.
 Fonte: dados da pesquisa

Foram utilizados também insertos com arestas novas (Figura 3a), para se obter maior estabilidade no processo e verificar se houve variação devido ao seu desgaste. O modo de orientação do componente é através de anel escalonado, localizado com interferência entre o encaixe da tampa e o dispositivo, garantindo a concentricidade entre o encaixe e o rolamento (Figura 3b).

Com o mapa de processo descrito, foi montada a matriz de decisão, como mostra o Quadro 2, indicando quais variáveis seriam mantidas constantes e as que poderiam ser avaliadas durante o processo.

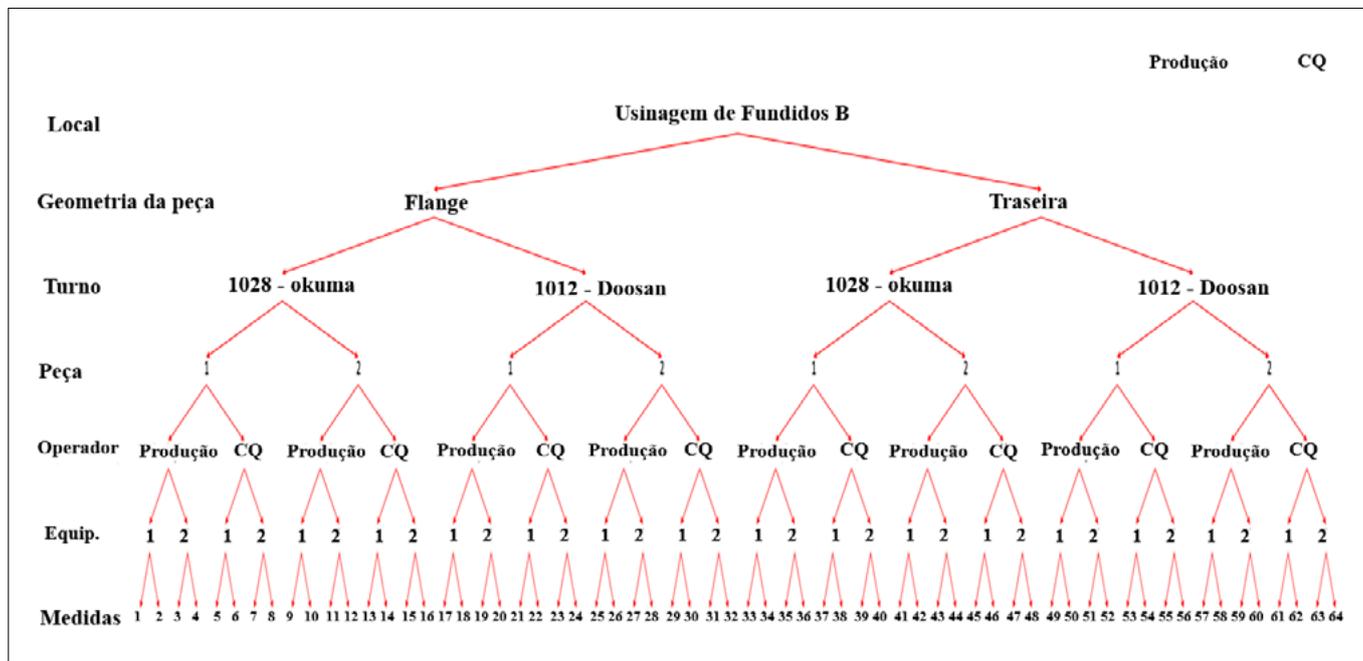
| Fonte de variação / Variável | Preciso aprender? | Habilidade de controle | Decisão | Experimento |
|--|-------------------|------------------------|------------------|-------------|
| Lote fundição (diferentes dias) | Não | Alta | Manter constante | – |
| Geometria da peça (flange × normal) | Sim | Alta | Controlar | COV |
| Castanhas de fixação (3 pontos × 6) | Não | Alta | Manter constante | – |
| Velocidade de corte em desbaste (300 mm/min) | Sim | Alta | Controlar | – |
| Avanço para desbaste (0,35 mm/rot) | Sim | Alta | Controlar | – |
| Sobremetal de acabamento. Ø rolamento (0,3 mm) | Sim | Alta | Controlar | – |
| Velocidade de corte em acabamento (300 × 250 mm/min) | Sim | Alta | Controlar | – |
| Avanço para acabamento (0,35 × 0,1 mm/min) | Sim | Alta | Manter constante | – |
| Tipo de máquina (1028 e 1012) | Sim | Alta | Controlar | COV |
| Operador de medição (CQ e fábrica) | Sim | Alta | Controlar | COV |
| Marca do rugosímetro (Mitutoyo e Mahr) | Sim | Alta | Controlar | – |

Ø: diâmetro

Figura 4 ▼

Árvore de processos. Estratégia de amostragem utilizando dois pontos de medição em cada equipamento de medição. Fonte: dados da pesquisa

Estruturou-se então a árvore de processos apresentada na Figura 4, abrangendo todos os itens do mapa de processo previamente julgados necessários, e foi realizada a análise de Capacidade Operacional e Variabilidade (COV) para verificar o comportamento dos parâmetros mencionados no Quadro 2. Com os resultados obtidos, optou-se por avaliar também, através do MSE, o modo como mais pontos de medições no componente interferem na assertividade da aferição.



Uma nova árvore de processos foi montada e será apresentada na análise dos resultados, considerando a medição da rugosidade no torno e na mandriladora, com três peças em cada máquina. A avaliação da medição foi realizada com duas pessoas verificando, considerando medições em um, três e cinco pontos, sendo três medições em cada ponto. Obteve-se um resultado positivo para as medições em três e cinco pontos, porém as medições em apenas um ponto tiveram variações acima do desejado.

5 Análise e discussão dos resultados

A empresa objeto de estudo é a WEG S.A., uma multinacional brasileira de grande destaque no setor de energia sustentável, oferecendo uma ampla gama de soluções tecnológicas completas para seus clientes. Dentro do vasto portfólio de produtos e processos da WEG S.A., optou-se por estudar a usinagem de fundidos. O parque fabril está localizado na cidade de Jaraguá do Sul, no estado de Santa Catarina.

A usinagem de fundidos, como o nome sugere, se dedica principalmente à usinagem de componentes para motores elétricos em ferro fundido cinzento FC200. Um dos componentes produzidos nesse parque fabril é o objeto de análise deste estudo – a tampa para motores elétricos –, que é usinada em diversas formas e dimensões, variando principalmente entre tampa dianteira, traseira e flangeada.

No processo de usinagem das tampas, a rugosidade do assento do rolamento é uma métrica crítica a ser acompanhada, e, o momento, não havia um processo documentado e

Constatou-se que a medida é o principal fator que causa variação, utilizando 90,4% do campo de tolerância, indicando que o método de medição atual não é confiável (ver Figura 7, retirada do software de análise estatística JMP). Outros fatores apresentaram baixa variação, validando que o tipo de torno, a geometria da peça e o operador da medição não interferem significativamente no resultado.

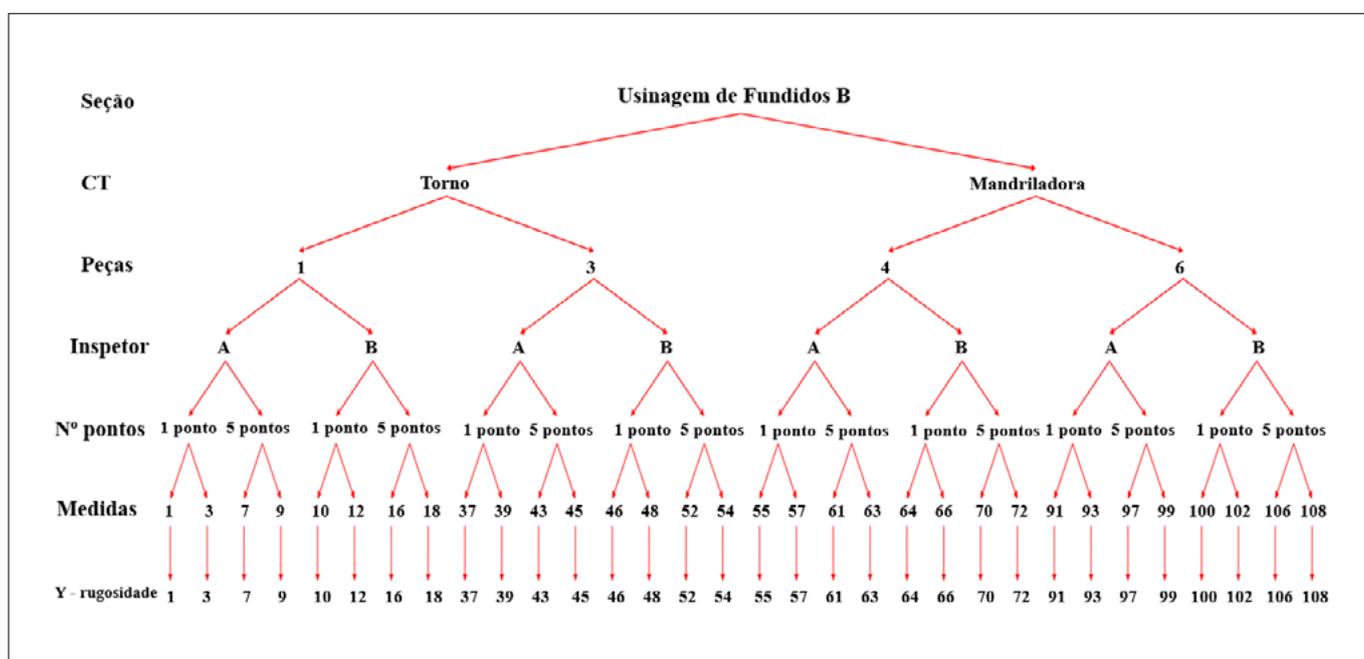
Figura 7 ►
Análise estatística das variações de medição.
Fonte: dados da pesquisa

| REML Variance Component Estimates | | | | | | | |
|-----------------------------------|------------|------------|----|----|----|----|----------------|
| Variance Components | | | | | | | |
| Component | Var | % of Total | 20 | 40 | 60 | 80 | Sqrt(Var Comp) |
| Total | 0,04916053 | 100,0 | | | | | 0,22172 |
| Medida | 0,04444538 | 90,4 | | | | | 0,21082 |
| Torno de 1º lado | 0,00317861 | 6,5 | | | | | 0,05638 |
| Operador de medição | 0,00111806 | 2,3 | | | | | 0,03344 |
| Temperatura do óleo da mini | 0,00041848 | 0,8513 | | | | | 0,02046 |
| Geometria da peça | 0,00000000 | 0,0 | | | | | 0,00000 |
| Peça | 0,00000000 | 0,0 | | | | | 0,00000 |
| Marca do rugosímetro | 0,00000000 | 0,0 | | | | | 0,00000 |
| Within | 0,00000000 | 0,0 | | | | | 0,00000 |

Dada a variação significativa na medida, optou-se por fazer o MSE considerando três medições em cada ponto, variando a quantidade de pontos entre um, três e cinco. Utilizaram-se apenas as tampas dianteiras, pois a geometria da peça não interferia no resultado. Como o operador de medição contribuiu com 2,3% da variação total, mantiveram-se dois operadores para realizar as medições novamente.

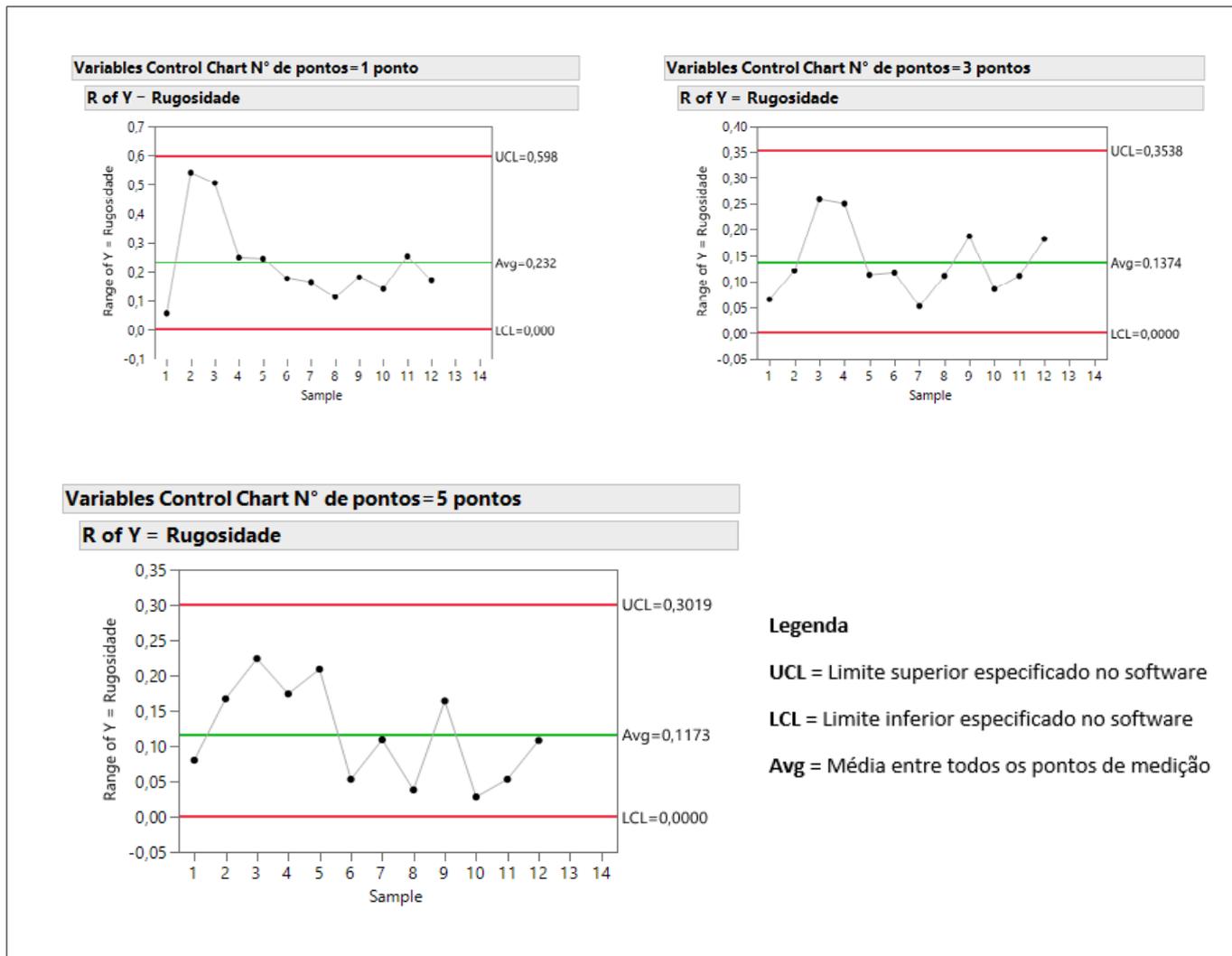
Figura 8 ▼
Árvore de processos e estratégia de amostragem com diferentes pontos de medição.
Fonte: dados da pesquisa

A novidade nessa etapa foi o uso da mandriladora e do torno como objetos de estudos, incluindo essa máquina para alcançar uma assertividade superior na influência de mais ou menos pontos de medição no resultado, visto que o torneamento não atinge níveis de rugosidade tão baixos quanto o processo de mandrilamento. Estruturou-se a árvore de amostragem (Peña, 2006), levando em consideração os pontos mencionados, para compreender as causas de maior variação no COV anterior, conforme ilustrado na Figura 8.



Primeiramente, avaliou-se a estabilidade do processo, verificando-se desvios temporais nas medidas durante as aferições em um, três ou cinco pontos. Como exposto, essa análise é necessária para identificar variações além das zonas limitantes (Harry; Schroeder, 2000). Caso haja variações além das zonas limitantes, deve-se corrigir o método de medição antes de realizar uma nova coleta de dados. A carta R do software JMP, na Figura 9, mostrou que as variações são consistentes nos três métodos, todos dentro das zonas limitantes de 1,6 micron e 0 micron. Assim, os três métodos estão aprovados em estabilidade, embora o método de medição com um ponto tenha apresentado maior variação.

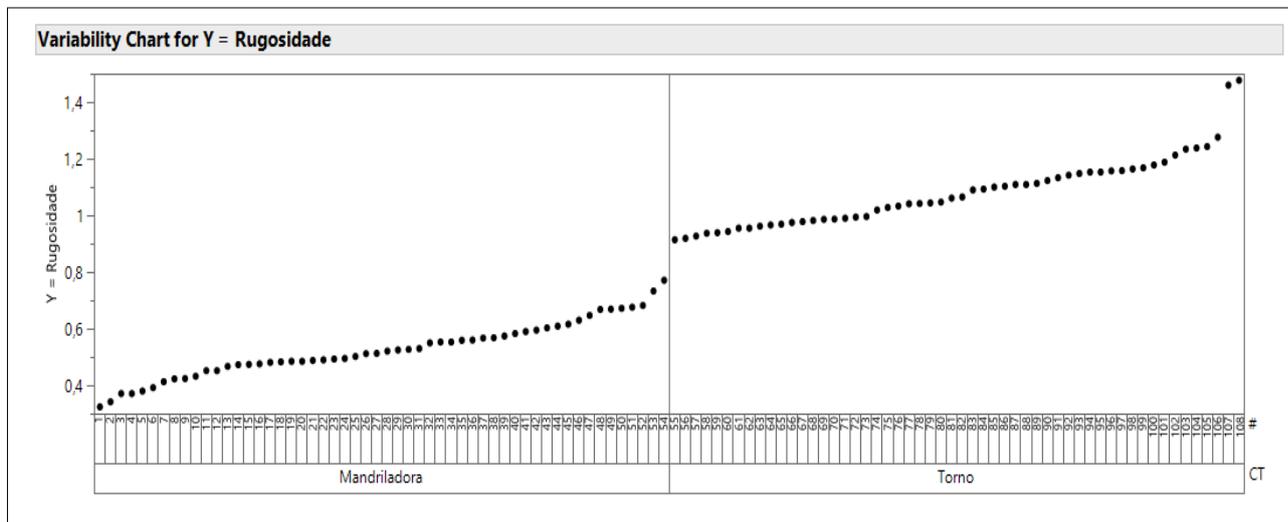
Figura 9 ▼
Avaliação da estabilidade do processo em 1, 3 e 5 pontos.
Fonte: dados da pesquisa



Como não foram observados desvios temporais relevantes, validaram-se os três métodos em estabilidade. A análise identificou dois *outliers*, destacados na Figura 10, obtidos no processo de torneamento e tiveram valores próximos a 1,6 micrômetros, indicando que o método de medição com apenas um ponto está reprovado em estabilidade. Os métodos com três e cinco pontos foram aprovados, apresentando menor variação.

Figura 10 ▼

Estabilidade do processo:
desvios de rugosidade
nos equipamentos
mandriladora e torno.
Fonte: dados da pesquisa



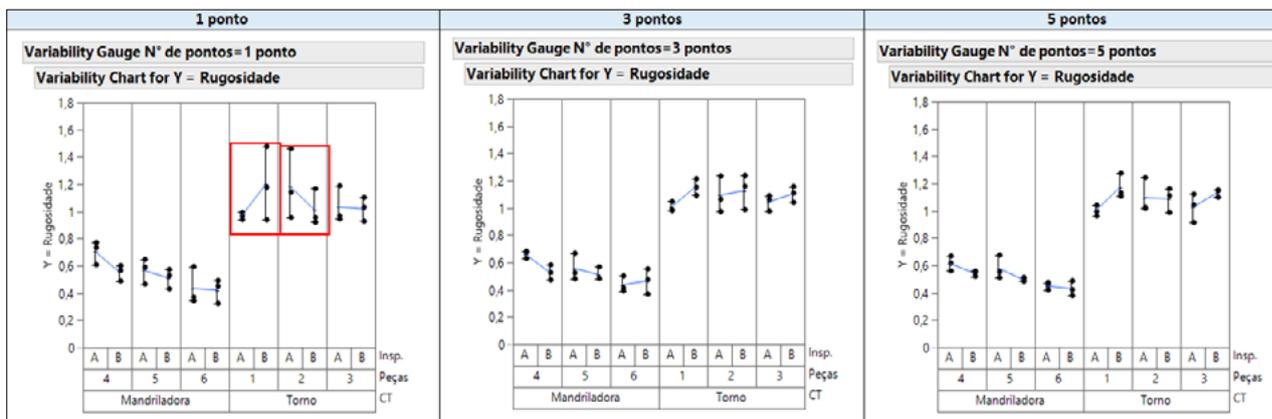
Passou-se então a avaliar a discriminação, verificando se a resolução do instrumento de medição atendia às necessidades. Conforme Figura 9, é preciso atingir ao menos quatro patamares no eixo Y para uma correta medição do componente, deduzindo-se que o instrumento consegue medir além da resolução de 1,6 micron, a tolerância de processo.

Todos os métodos atingiram ao menos quatro patamares, permitindo avaliar as variações de forma assertiva, garantindo que o instrumento de medição captura uma boa variação entre as medidas. Assim, todos os métodos foram aprovados em discriminação, conforme a literatura sugere (Pyzdek, 2003), sendo possível verificar a reprodutibilidade.

Figura 11 ▼

Reprodutibilidade
do processo em
diferentes operadores.
Fonte: dados da pesquisa

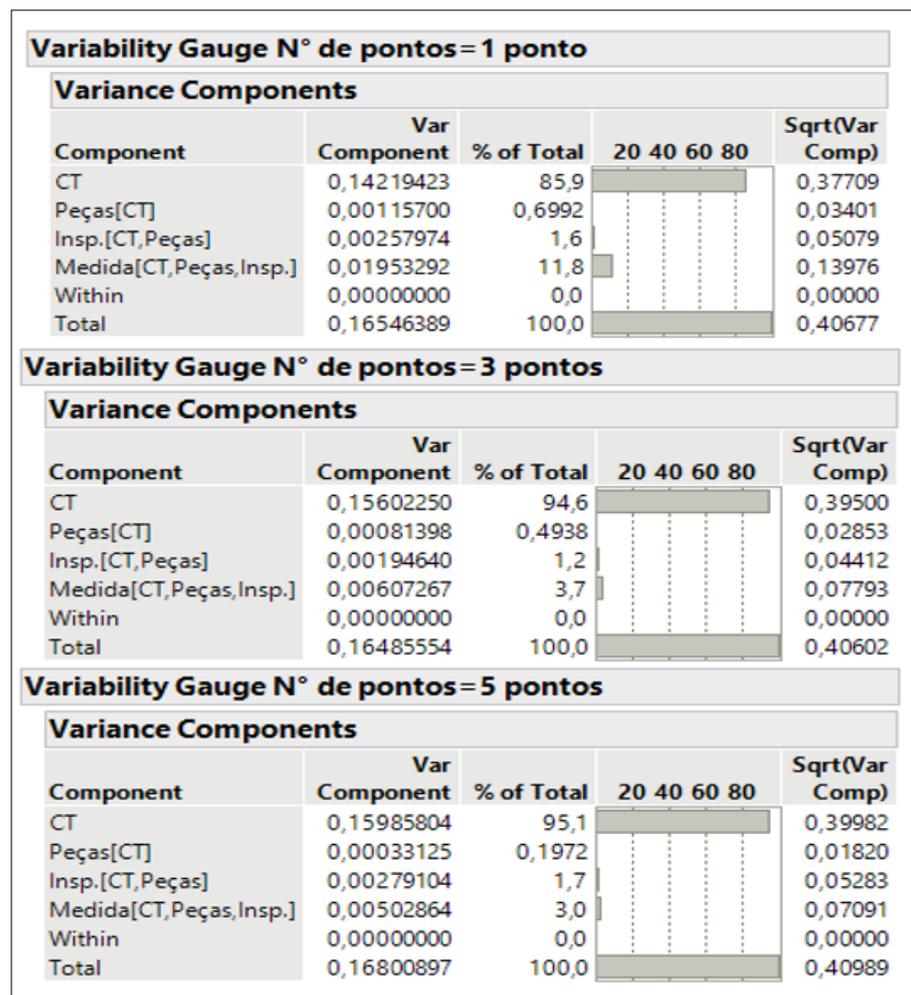
Em seguida, a análise focou a reprodutibilidade, procedendo-se à mensuração dos dados para verificar se a média das variações era consistente, ou seja, se as variações das medidas entre os operadores não ultrapassavam 10% do total do campo de tolerância. A Figura 11, gerada pelo software de análise estatística JMP, apresenta a reprodutibilidade entre os três métodos de medição.



A análise de reprodutibilidade mostrou que os métodos de três e cinco pontos tiveram pouca variação entre os operadores na mesma peça, enquanto o método com um ponto de medição apresentou variação de até 40% do campo de tolerância, invalidando-o para medições confiáveis.

Por fim, a avaliação da repetibilidade, conforme a Figura 12, evidenciou a variabilidade entre os pontos em estudo. A maior variação foi entre centros de trabalho, mas focou-se a variação entre peças, operadores e medidas. Observou-se que a variação entre peças e operadores foi baixa em todos os métodos, mas a variação entre medidas no método de um ponto foi de 11,8%, excedendo o limite de 10% do campo de tolerância. Portanto, os métodos de três e cinco pontos foram aprovados, enquanto o método de um ponto foi reprovado.

Figura 12 ►
Análise da repetibilidade do processo.
Fonte: dados da pesquisa



Com base nessas análises, conclui-se que os métodos de três pontos e cinco pontos são adequados para a aferição da rugosidade do rolamento em tampas fundidas, enquanto o método de apenas um ponto não é confiável. Com o método definido, verificou-se a frequência de medição do componente, atualmente não especificada em norma ou documentos internos da empresa.

Paladini (2012) afirma que a metodologia Seis Sigma, com técnicas de análises estatísticas para resolução de problemas e avaliação de processos, é uma ótima opção para análise de robustez do processo e definição de padrões.

A definição da frequência de medição foi realizada através da avaliação do método Ppk, com amostragem de trinta peças, todas tampas dianteiras, usando o método de três medições validados pelo MSE, considerando a média e três pontos distintos a 120°. A avaliação foi via software JMP gerou um Ppk de 2,614, indicando uma confiabilidade acima de 99,9999998% e uma taxa de rejeição abaixo de 0,002 ppm (peças por milhão), cumprindo os objetivos iniciais do trabalho e garantindo a correção do processo.

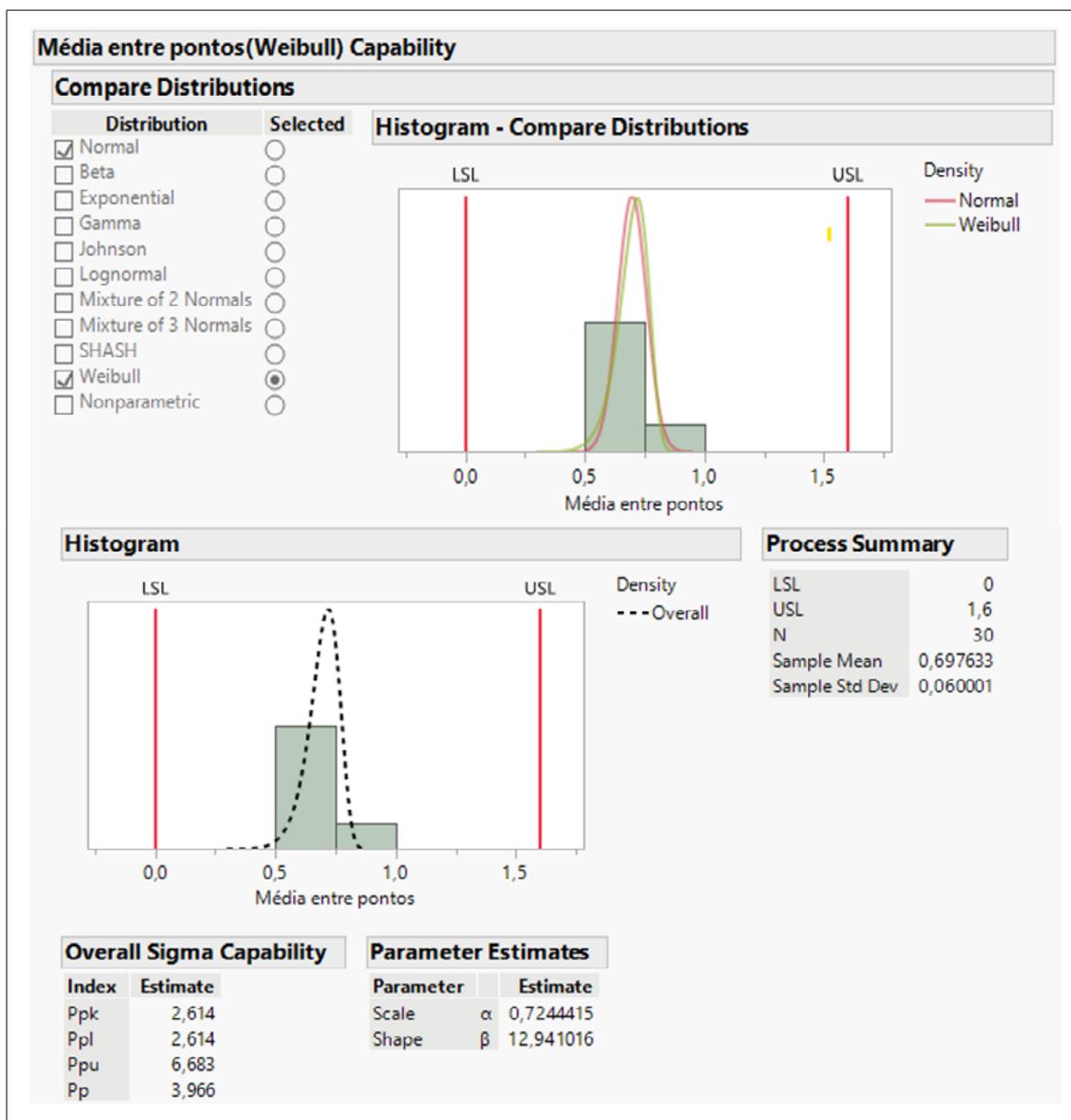
De acordo com Werkema (2012), a aceitação de defeito na metodologia Seis Sigma é de 3,4 ppm (partes por milhão), com assertividade de 99,99966%, superior ao Quatro Sigma, com 99,38%. Isso demonstra que o processo atual está dentro da zona de seis sigma, garantindo a confiabilidade e estabilidade.

Figura 13 ▼

Resultados Pp e Ppk do processo avaliado.

Fonte: dados da pesquisa

Na Figura 13, o índice Ppk foi de 2,614 e o Pp, de 3,966, indicando que as medições estão corretas e confiáveis, permitindo à WEG S.A. garantir a qualidade do produto entregue ao cliente.



Desenvolveu-se um método confiável de medição da rugosidade do assento do rolamento em tampas de ferro fundido cinzento FC200, estipulando uma frequência de medição baseada na metodologia Seis Sigma, utilizando o Ppk para definição da frequência. O método de aferição definido consiste em medir a peça em três ou cinco pontos distintos (em 120° para três pontos e 70° para cinco pontos), eliminando a medição em um único ponto por não ser confiável. A frequência de medição foi estipulada em uma vez por turno, com resultados acima do esperado, sem necessidade de uma maior frequência, permitindo designar essa tarefa ao controle de qualidade da fábrica.

6 Considerações finais

O desenvolvimento do processo de controle da aferição da rugosidade, assim como a atualização de seu método, foi realizado. Como resultado imediato, obteve-se um entendimento sobre qual processo é o mais assertivo e qual frequência mínima de controle da rugosidade do assento do rolamento seria mais adequada em um processo de mandrilamento na indústria WEG.

Após a realização dos testes práticos e das análises gráficas dos dados coletados, foi constatado que o processo estava robusto. No entanto, o método de aferição sem um padrão definido gerava dúvidas sobre as medições dos componentes, afetando a qualidade destas. Com o estudo, foi possível eliminar essa lacuna, garantindo um menor índice de defeitos futuros para os clientes finais e reduzindo também as não conformidades em auditorias internas e externas.

O método mais eficaz foi medir o assento do rolamento em cinco pontos distintos, intercalando-os a 70° e realizando a média de três medições em cada ponto. Contudo, o método de três pontos a 120° com a média de três medições em cada ponto também se mostrou eficaz, atendendo perfeitamente às necessidades do projeto, considerando que a aferição do componente será realizada diariamente.

O estudo foi conduzido com apenas um rugosímetro, o que pode ser considerado uma limitação deste trabalho. Para aprimorar esses resultados, seria necessário o uso de pelo menos mais um instrumento de medição, a fim de compreender em profundidade o correto funcionamento do equipamento.

Observando-se que a rugosidade do assento do rolamento neste estudo ficou bem abaixo de sua tolerância máxima, abrem-se precedentes para estudos futuros visando à otimização do processo, tanto na etapa de desbaste do material quanto na de acabamento no mandrilamento. Essas otimizações poderiam ser realizadas nas condições de cortes, podendo, por exemplo, eliminar a ferramenta de acabamento na etapa de torneamento ou aumentar o avanço de corte do acabamento em ambas as etapas, já que há margem considerável para esses ajustes, resultando em ganhos organizacionais.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Nota

Os autores declaram que os resultados deste trabalho são oriundos do trabalho de conclusão de curso de Jean Felipe Rodrigues Pozzer, disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/2417>.

Referências

ANTONY, J. What is the role of academic institutions for the future development of Six Sigma? **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 57, n. 1, p. 107-110, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1108/17410400810841263>.

CARPINETTI, L. C. R. **Gestão da Qualidade: conceitos e técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

CHIROLI, D. M. G.; BIAZETTO, F.; GLAVAM, R. B. Prática da metodologia Seis Sigma para redução de perda na transferência da soja em uma unidade beneficiadora de grãos. **Exacta**, v. 17, n. 3, p. 35-60, 2019. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/8398>. Acesso em: 2 nov. 2022.

DALEASTE, J.; FAVRETTO, J.; BERNARDY, R. J. Fatores de competitividade das cooperativas de transporte de cargas do oeste Catarinense. **Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 15, n. 1, p. 273-299, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15675/gepros.v15i1.2328>.

DI GREGORIO, D. Value creation and value appropriation: an integrative, multi-level framework. **Journal of Applied Business and Economics**, v. 15, n. 1, p. 39-53, 2013. Disponível em: http://www.na-businesspress.com/JABE/DiGregorioD_Web15_1_.pdf. Acesso em: 29 out. 2022.

FERNANDES, C. H. A.; SILVA, A. C. G. C.; FERRAZ, A. V.; SANTOS, P. V. S. Aplicação da metodologia DMAIC para redução dos desperdícios em uma indústria de gesso do interior de Pernambuco, Brasil. **Navus – Revista de Gestão e Tecnologia**, v. 11, p. 1-19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22279/navus.2021.v11.p01-19.1622>.

GARRIDO, D. S.; LEVENTINI, S.; MARTINI, A. Effect of temperature and surface roughness on the tribological behavior of electric motor greases for hybrid bearing materials. **Lubricants**, v. 9, n. 6, 59, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants9060059>.

GERÔNIMO, M. S.; FERREIRA, E. M.; FERREIRA JÚNIOR, J. W.; OLIVEIRA, R. D. Gestão da inovação no planejamento de produção: um estudo de caso aplicado à minimização de custos industriais. **Exacta – EP**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 149-161, 2018. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/7139>. Acesso em: 2 nov. 2022.

HARRY, M.; SCHROEDER, R. **Six Sigma: the breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations**. New York: Doubleday, 2000.

JURAN, J. M. **A qualidade desde o projeto: novos passos para o planejamento da qualidade em produtos e serviços**. São Paulo: Cengage Learning, 1997.

KIKUKAWA, J. K.; HELENA, F. L.; SILVA, T. R.; LEITE, S. S. Análise do processo de torneamento em relação a rugosidade superficial do aço SAE 1010. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 4, n. 2, p. 96-113, 2019. Disponível em: <http://www.ojs.toledo.br/index.php/engenharias/article/view/3512>. Acesso em: 2 nov. 2022.

MAST, J.; LOKKERBOL, J. An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving. **International Journal of Production Economics**, v. 139, n. 2, p. 604-614, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.05.035>.

PALADINI, E. P. **Gestão da qualidade: teoria e prática**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

PEÑA, R. M. **Aplicação da metodologia Seis Sigma para melhorar a qualidade de um fornecedor**. 2006. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/10171>. Acesso em: 14 abr. 2022.

PYZDEK, T. **The Six Sigma handbook**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

SAKUMOTO, S. M.; CHIROLI, D. M. G; DZULINSKI, A. C. Using Lean Six Sigma to increase efficiency of a grain receipt process of a Brazilian agroindustry cooperative. **American Journal of Engineering and Applied Science**, v. 12, n. 2, p. 214-226, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2019.214.226>.

SHAHIN, A. Design for Six Sigma (DFSS): lessons learned from world-class companies. **International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage**, v. 4, n. 1, p. 48-59, 2008. Disponível em: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJSSCA.2008.01842>. Acesso em: 19 nov. 2022.

SHEEHY, P.; NAVARRO, D.; SILVERS, R; KEYES, V.; DIXON; D.; PICARD, D. **The black belt memory jogger: a pocket guide for Six Sigma success**. Salem: Goal/QPC, 2002.

SILVA, L. C.; OLIVEIRA, M. C.; SILVA, F. A. Implementação da metodologia Seis Sigma para melhoria de processos utilizando o ciclo DMAIC: um estudo de caso em uma indústria automotiva. **Exacta**, v. 15, n. 2, p. 222-232, 2017. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/6473>. Acesso em: 2 nov. 2022.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

SNEE, R. D. Lean Six Sigma: getting better all the time. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 1, n. 1, p. 9-29, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1108/20401461011033130>.

TUBINO, D. F. **Manufatura enxuta como estratégia de produção: a chave para a produtividade industrial**. São Paulo: Atlas, 2015.

WEG. **Motor trifásico W22**. 2022. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h08/h00/WEG-vista-explodida-do-motor-trifasico-w22-premium-efficiency-ie3-50036055-banner-spanish-web.pdf> . Acesso em: 19 de abril de 2022.

WERKEMA, C. **Criando a cultura Lean Seis Sigma**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.