

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL PONTAROLO KOPANSKI

MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS E CONTROLE DE  
PROCESSO PARA A FIXAÇÃO SEGURA DE COMPONENTES ROSCADOS  
(PARAFUSAMENTO)

CURITIBA

'2025

GABRIEL PONTAROLO KOPANSKI

MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS E CONTROLE DE PROCESSO  
PARA A FIXAÇÃO SEGURA DE COMPONENTES ROSCADOS  
(PARAFUSAMENTO)

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia de Manufatura, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Fontana Catapan  
Coorientadores: Marcos Augusto Mendes Marques,  
Anderson Catapan.

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Kopanski, Gabriel Pontarolo

Método para avaliação de parâmetros e controle de processo para a fixação segura de componentes roscados (parafusamento). / Gabriel Pontarolo Kopanski. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Fontana Catapan

Coorientadores: Marcos Augusto Mendes Marques, Anderson Catapan.

1. Parafusos (Torque e ângulo de aperto). 2. Estatística - Análise. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura. III. Catapan, Márcio Fontana. IV. Marques, Marcos Augusto Mendes. V. Catapan, Anderson. VI. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
MANUFATURA - 40001016171P2

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE MANUFATURA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de GABRIEL PONTAROLO KOPANSKI, intitulada: **MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS E CONTROLE DE PROCESSO PARA A FIXAÇÃO SEGURA DE COMPONENTES ROSCADOS (PARAFUSAMENTO)**, sob orientação do Prof. Dr. MARCIO FONTANA CATAPAN, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 27 de Março de 2025.

Assinatura Eletrônica  
23/04/2025 20:05:25.0  
MARCIO FONTANA CATAPAN  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
26/05/2025 19:59:11.0  
FERNANDO DESCHAMPS  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
23/04/2025 20:06:11.0  
ALESSANDRO MARQUES  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
23/04/2025 20:06:25.0  
CASSIUS TADEU SCARPIN  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
19/05/2025 22:54:43.0  
ANDERSON CATAPAN  
Coorientador(a) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
24/04/2025 07:23:26.0  
MARCOS AUGUSTO MENDES MARQUES  
Coorientador(a) (DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
- UFPR)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor e orientador Márcio Fontana Catapan e ao coorientador Marcos Augusto Mendes Marques, pela orientação, confiança, atenção e disposição dispensadas neste trabalho.

Aos professores Fernando Deschamps, Flavio Issao Kubota, Pablo Deivid Valle, Maria Lucia Leite Ribeiro Okimoto pela inspiração para entrar no curso e conselhos na elaboração deste trabalho.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Manufatura da Universidade Federal do Paraná, pelo apoio coletivo e mútuo.

## RESUMO

Este estudo teve como objetivo desenvolver um método robusto e preciso para a avaliação de conexões roscadas, com foco na segurança, confiabilidade e qualidade das junções parafusadas. Considerando a criticidade dessas conexões na indústria, onde falhas podem comprometer a integridade estrutural e a segurança de produtos e sistemas, propõe-se um modelo baseado na correlação entre torque e ângulo de aperto. A metodologia adotada fundamentou-se na coleta e análise estatística de dados históricos de montagens industriais, permitindo a identificação de padrões, tendências e anomalias associadas ao processo de fixação. A definição precisa dos limites de aceitação foi realizada por meio de abordagens estatísticas, incluindo o controle estatístico de processo e a aplicação dos métodos  $\pm 3$  SIGMA e QUANTIS, conforme a distribuição dos dados. A implementação deste modelo possibilitou uma avaliação criteriosa das conexões roscadas, garantindo a detecção de variações atípicas e aprimorando a confiabilidade do aperto. Os resultados desta pesquisa incluem a redução de falhas e retrabalho, o aumento da segurança e durabilidade das fixações e aperfeiçoamento dos processos industriais, contribuindo para a melhoria da qualidade em diferentes setores da manufatura.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Parafusamento, controle estatístico do processo, correlação torque e ângulo de aperto, confiabilidade em fixações.*

## **ABSTRACT**

*This study aimed to develop a robust and accurate method for assessing threaded connections, with a focus on the safety, reliability, and quality of bolted joints. Given the critical nature of these connections in industry, where failures can compromise the structural integrity and safety of products and systems, a model based on the correlation between tightening torque and angle was proposed. The adopted methodology was grounded on the collection and statistical analysis of historical data from industrial assemblies, enabling the identification of patterns, trends, and anomalies associated with the fastening process. Precise acceptance limits were defined through statistical approaches, including statistical process control and the application of  $\pm 3$  SIGMA and QUANTILE methods, depending on data distribution. The implementation of this model allowed a thorough evaluation of threaded connections, ensuring the detection of atypical variations and enhancing fastening reliability. The results of this research included reduced failures and rework, improved safety and durability of fastenings, and improvement of industrial processes, thereby contributing to quality improvement in various manufacturing sectors.*

**KEYWORDS:** *Fastening, statistical process control, torque-angle correlation, fastening reliability.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo da localização dos fixadores em um carro. ....	11
Figura 2 - Fases do processo de aperto.....	14
Figura 3 - Definições dos elementos da rosca .....	15
Figura 4 - Forças internas em conexões roscadas.....	15
Figura 5 - Diferença entre torque e força de aperto.....	16
Figura 6 - Gráfico de exemplo de comportamento de juntas duras e flexíveis .....	18
Figura 7 - Gráfico torque / ângulo e as fases do aperto até a falha.....	19
Figura 8 - Fatores que influenciam no resultado de aperto e pré-carga.....	20
Figura 9 - Gráfico torque / ângulo e as variações no ângulo de aperto.....	22
Figura 10 - Gráfico de distribuição de probabilidade da função normal.....	23
Figura 11 - Método Recomendado Por Dresch; Lacerda; Antunes (2015).....	27
Figura 12 - Método DSR.....	28
Figura 13 - Correlação entre o método proposto e de Dresch; Lacerda e Antunes ..	29
Figura 14 - Lógica para a construção das classes de problema .....	30
Figura 15 - Distribuição normal.....	40
Figura 16 - Distribuição não normal.....	41
Figura 17 - Modelo de distribuição dependente do tempo.....	43
Figura 18 - Fluxograma do método proposto .....	44
Figura 19 - Pontos de controle dos parâmetros para a estratégia de aperto.....	46
Figura 20 - Gráfico de dispersão dos ângulos medidos na produção em série. ....	48
Figura 21 - Histograma de ângulos de aperto e a curva gaussiana ideal.....	49
Figura 22 - Representação de 50 curvas reais sobrepostas mostrando o comportamento da junta.....	50
Figura 23 - Ilustração de apertos com comportamentos diferentes e suas curvas perante a janela de aceitação .....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumos de objetivos e conclusões de estudos relacionados.....	34
---------------------------------------------------------------------------	----

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

<i>CAPES</i>	<i>Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior</i>
<i>CEP</i>	<i>Controle Estatístico do Processo</i>
<i>DSR</i>	<i>Design Science Research</i>
<i>IATF</i>	<i>International Automotive Task Force (Força-Tarefa Automotiva Internacional).</i>
<i>ISO</i>	<i>"International Organization for Standardization" (Organização Internacional para Padronização)</i>
<i>ML</i>	<i>Machine Learning – Aprendizagem de máquina</i>
<i>Nm</i>	<i>Newton-metro - No Sistema Internacional de Unidades, o torque é medido em Newton-metro</i>
<i>ProKnow-C</i>	<i>Processo de Conhecimento-Construtivista, uma metodologia para revisão bibliográfica sistemática.</i>
<i>RBS</i>	<i>Revisão Bibliográfica Sistemática</i>
<i>VDI</i>	<i>Verein Deutscher Ingenieure (Associação de Engenheiros Alemães)</i>
<i>VDE</i>	<i>Associação Alemã para Tecnologia Elétrica, Eletrônica e Informação.</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	11
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....	12
1.3	OBJETIVOS .....	13
1.4	DELIMITAÇÃO .....	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
2.1	UNIÃO DE ELEMENTOS ROSCADOS E APERTO .....	14
2.2	ÂNGULO FINAL DE APERTO .....	16
2.3	CONTROLE DO PROCESSO DE PARAFUSAMENTO .....	18
2.4	DISTRIBUIÇÃO DE DADOS E VALORES ATÍPICOS .....	22
2.5	GARANTIA DO PROCESSO DE APERTO, PADRÕES AUTOMOTIVOS .....	24
2.6	RESUMO DO CAPÍTULO .....	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>26</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA .....	26
3.2	DESIGN SCIENCE RESEARCH .....	27
3.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	32
<b>4</b>	<b>FASE DE EXPLORAÇÃO</b> .....	<b>33</b>
4.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA .....	33
4.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS) .....	33
4.3	IDENTIFICAÇÃO DE ARTEFATOS E CONFIGURAÇÃO DE CLASSES DE PROBLEMAS .....	34
4.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	37
<b>5</b>	<b>PROPOSIÇÃO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO ÂNGULO DE APERTO</b>	<b>38</b>
5.1	PROPOSIÇÃO DE ALTERNATIVA .....	38
5.2	DISTRIBUIÇÃO DE DADOS E VALORES ATÍPICOS .....	39
5.3	OS ÂNGULOS DE APERTO EM DISTRIBUIÇÕES NÃO-NORMAIS .....	42
5.4	PROJETO DO ARTEFATO .....	43
5.5	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS .....	45
5.6	O ÂNGULO DE APERTO NO PROCESSO DE PRODUÇÃO .....	47
5.7	DEFINIÇÃO DOS LIMITES DOS ÂNGULOS DE APERTO .....	50
5.8	RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS .....	51
5.9	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	53

<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
6.1	INOVAÇÕES ENCONTRADAS NOS RESULTADOS .....	56
6.2	LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	56
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÃO FINAIS DO MESTRADO.....</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A fixação segura de componentes roscados constitui uma preocupação crítica em diversos setores industriais, abrangendo desde a montagem automotiva até a indústria aeroespacial e de engenharia civil. A confiabilidade dessas conexões desempenha um papel fundamental para a segurança estrutural e o desempenho dos produtos finais. O propósito essencial das juntas parafusadas é unir duas ou mais partes para que funcionem como uma unidade única, integração essa alcançada mediante um aperto controlado de parafusos ou porcas. A montagem geralmente é um dos processos finais da manufatura, tendo influência direta sobre a qualidade e a vida útil do produto (LEE et al., 2005).

Entretanto, alcançar uma fixação segura mostrou-se uma tarefa complexa, exigindo um profundo entendimento dos princípios mecânicos das conexões roscadas, das propriedades dos materiais envolvidos e do controle rigoroso do processo de aperto e um monitoramento eficaz é fundamental para garantir que as conexões atendam às especificações técnicas e mantenham sua integridade ao longo do tempo.

Neste estudo, adotou-se uma estratégia de fixação baseada no controle do torque, com monitoramento do ângulo de aperto. Neste contexto, o torque final foi estabelecido como alvo do processo, enquanto o ângulo de aperto foi monitorado como um indicador sensível do comportamento real das conexões. Foi investigado o processo de fixação ou aperto (parafusamento), aplicando métodos estatísticos para controle e avaliação da qualidade do aperto. Foram analisados os princípios físicos relacionados à deformação elástica dos materiais e ao papel determinante do torque e do ângulo de aperto na qualidade das conexões roscadas. Além disso, avaliou-se a eficácia das práticas industriais atuais para controle de processos, que incluem medições em tempo real do torque e ângulo durante o aperto, complementadas por ferramentas estatísticas para identificar e corrigir variações significativas.

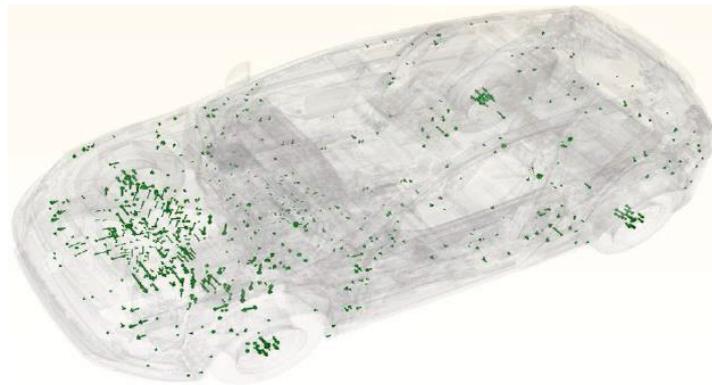
Nesse sentido, a variabilidade de processos mostrou-se uma questão essencial para a qualidade final das conexões roscadas. A redução da variabilidade garante que o produto final atinja consistentemente o valor alvo definido em projeto, reduzindo falhas prematuras e melhorando a segurança e durabilidade das juntas. Conforme MONTGOMERY (2017), a qualidade é inversamente proporcional à

variabilidade, e, segundo TAGUCHI et al. (1990), variações funcionais podem gerar prejuízos sociais significativos, especialmente em produtos diretamente relacionados à segurança do consumidor.

### 1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Um automóvel possui, aproximadamente 1.850 fixadores segundo FERREIRA (2018), conforme ilustrado na FIGURA 1. Caso um fixador crítico falhe ou se solte, a integridade estrutural do veículo pode ser comprometida, resultando na perda de controle, acidentes ou até mesmo em ferimentos graves aos ocupantes.

*Figura 1 - Exemplo da localização dos fixadores em um carro.*



*FONTE: Aplicação de Fixadores – Área Automotiva (FERREIRA, 2018).*

A correta definição dos controles para apertos de segurança em carros é crucial devido à sua influência direta na integridade funcional ou estrutural dos veículos. Quando os parâmetros não são bem definidos, isso pode resultar em várias consequências graves. Além disso, a falha em estabelecer corretamente os padrões de torque e monitoramento de ângulo pode resultar em desgaste prematuro dos componentes, afetando a durabilidade e a vida útil do veículo. Também pode desencadear problemas de funcionamento, vazamentos de fluidos ou, em casos extremos, a separação de peças essenciais, representando riscos significativos para a segurança dos ocupantes e outros usuários das vias. Os custos gerados por produtos que atendam às especificações, mas que possuam uma grande variação funcional (não uniformidade com relação à algumas características funcionais) serão detectados somente quando o produto estiver nas mãos do consumidor, gerando custos de acionamento de garantia, reparo do produto, descontentamento do

consumidor, diminuição da qualidade percebida sendo ainda mais agravante no caso que envolva componentes de veículos no que concerne à segurança veicular. Sendo assim, a melhoria da qualidade é proporcional a redução da variabilidade de processos e serviços, segundo MONTGOMERY (2017).

Existem várias maneiras de fixar partes e componentes uns aos outros, como, por exemplo, colagem, rebiteagem, soldagem e solda. Contudo, o método mais comum de união de componentes é usar um parafuso para prender os membros da junta com uma porca ou diretamente em um furo roscado em um dos componentes. As vantagens desse método são a simplicidade de design e montagem, fácil desmontagem, produtividade e, no final, o custo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Diante do exposto, justifica-se o presente estudo que visa a previsão e posterior classificação de falhas em componentes veiculares, a fim de minimizar custos/tempo/desperdícios para a companhia, e principalmente tornar mais seguro o produto final para o consumidor e diminuir custos de não qualidade nas linhas de produção. Sendo assim, pretende-se desenvolver um método para aplicação de parâmetros de controle de processo apropriado para o emprego em fábricas do setor automotivo, para a produção de veículos mais seguros e com menor incidência de não conformidades.

Atualmente, o que faz as empresas buscarem continuamente a melhoria é a competição de mercado, o que as obriga sempre estar inovando e lançando produtos e/ou serviços com menor custo, em tempo hábil e que satisfaçam o cliente. Um dos primordiais fatores para alcançá-la é a qualidade. Em vista disso, as empresas estão cada vez mais interessadas em aperfeiçoar dos seus processos por meio da redução de falhas e defeitos, do gerenciamento dos recursos e riscos e do controle de custos e cronogramas. Em consequência, as metodologias que garantem a qualidade em um processo estão sendo, cada vez mais, introduzidas em seus departamentos segundo FIGUEIREDO (2006); FINAMORE JR (2008) e SHROTRIYA (2009).

### 1.3 OBJETIVOS

O principal propósito desta pesquisa constituiu em desenvolver um método para avaliar a correlação entre o torque de aperto e o ângulo de aperto em conexões roscadas. O ângulo de aperto foi analisado e utilizado como uma métrica sensível para identificar todas as variações no processo de aperto, possibilitando uma análise mais abrangente da qualidade da junta. O objetivo essencial deste método é aprimorar a capacidade de determinar se uma junta está adequadamente apertada e estabelecer limites de aceitação fundamentados em dados históricos e análises estatísticas.

### 1.4 DELIMITAÇÃO

Este estudo apresentou algumas limitações, principalmente relacionadas à qualidade e quantidade dos dados históricos disponíveis, essenciais para a eficácia das análises estatísticas realizadas. Ademais, reconheceu-se que a generalização dos limites de aceitação pode variar em função das especificidades técnicas e das condições operacionais de cada processo produtivo, indicando a importância de ajustes contínuos conforme os cenários industriais específicos.

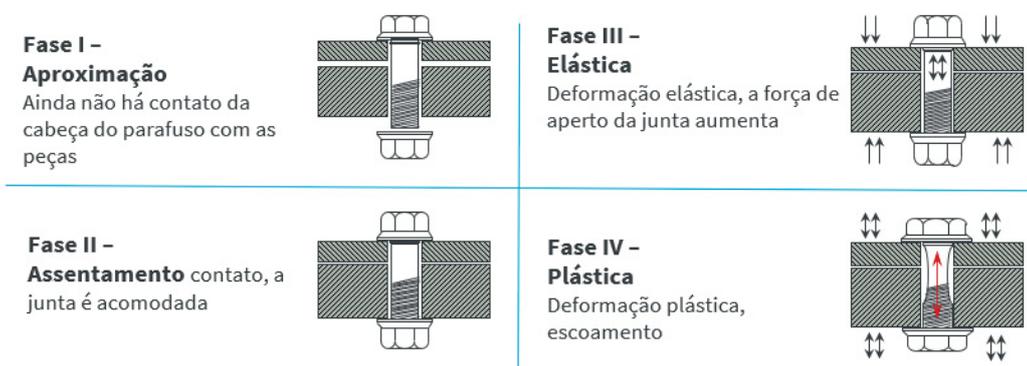
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O torque representa a força rotacional aplicada durante o aperto, enquanto o ângulo corresponde ao deslocamento angular do fixador durante este processo. O controle adequado do ângulo é essencial para evitar apertos anômalos, garantindo uma distribuição uniforme da pré-carga e prevenindo falhas prematuras nas conexões roscadas. Neste contexto, esta dissertação abordará conceitos fundamentais como torque e ângulo de aperto, pré-carga, comportamento elástico das juntas segundo a norma ISSO e VDI, ferramenta de Ishikawa (6M), análises estatísticas (média, desvio padrão, método  $\pm 3$  sigma, percentis e quantis), detecção de valores atípicos (outliers) e padrões automotivos relevantes.

### 2.1 UNIÃO DE ELEMENTOS ROSCADOS E APERTO.

Durante o processo de aperto, o parafuso se alonga e as partes entre a rosca e a cabeça do parafuso são pressionadas juntas conforme a FIGURA 2. Isso resulta em pré-carga (força de fixação) entre as partes. Essa força de fixação, em combinação com o atrito estático dentro da montagem, que é uma condição de superfície, resiste às forças externas durante a vida útil da peça.

Figura 2 - Fases do processo de aperto

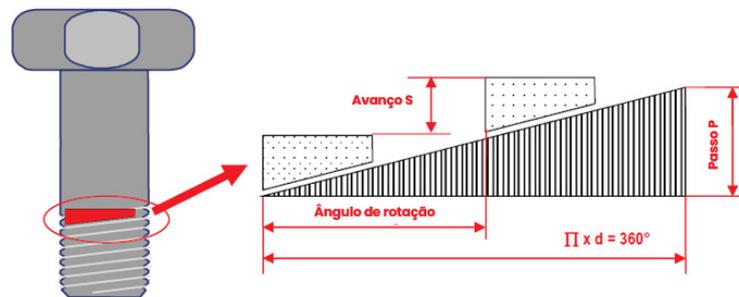


FONTE -Adaptado de Atlas Copco Tightening Training

O que faz o parafuso se alongar e as partes serem comprimidas são roscas desenvolvidas que assemelham a uma rampa. O torque é o equivalente rotacional da força linear, ele gera a força para montar peças sem destruição e está relacionado

à fricção e à tensão, o ângulo é a medida do deslocamento angular pelo qual um fixador é girado. Ao girar a porca ou o parafuso, o elemento rosqueado se move para cima ou para baixo, dependendo da direção de rotação. Uma volta completa ( $360^\circ$ ) move o parafuso exatamente uma passada. Enquanto a cabeça do parafuso não entra em contato com a superfície da peça, essa rotação de aproximação (chamada de "run down") ocorre com baixo torque.

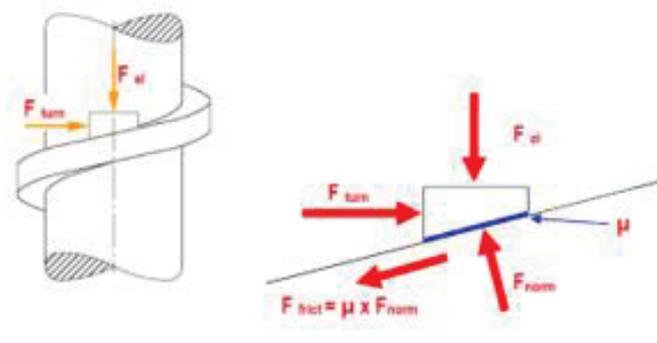
Figura 3 - Definições dos elementos da rosca



FONTE: O Autor (2025), adaptado de Norton capítulo 15

Após os componentes entrarem em contato, o torque aumenta rapidamente, o parafuso se alonga e as peças são cada vez mais comprimidas, se o parafuso continuar a ser girado. Portanto, o deslocamento é o elemento pelo qual o parafuso se alonga conforme FIGURA 4, o eixo do parafuso funciona como uma mola dinâmica.

Figura 4 - Forças internas em conexões rosçadas.



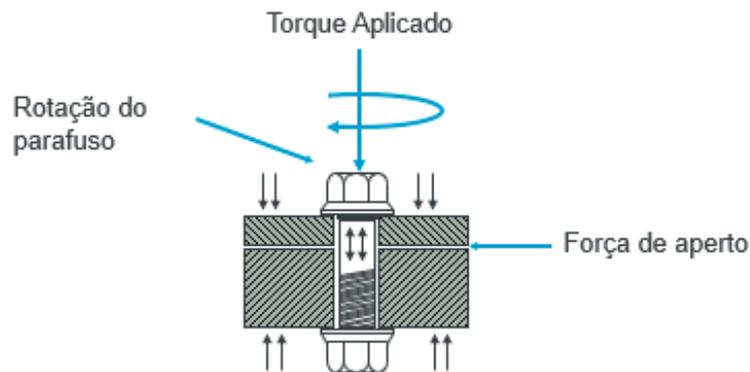
FONTE: O Autor (2025) Adaptado de Norton capítulo 15

Ao girar o parafuso/porca, as roscas deslizam uma dentro da outra. Após o início do alongamento do parafuso, a força aumenta e, com a ajuda do coeficiente

de atrito, os parafusos resistem à rotação adicional. É necessário aumentar o torque para girar mais o parafuso. Se o coeficiente de atrito for conhecido, o torque aplicado ao parafuso resultará em uma força de fixação ou força de aperto conhecida.

BICKFORD (2008) apresenta uma literatura voltada especificamente ao estudo do projeto e comportamento de juntas unidas por fixadores roscados. Esta obra descreve inclusive a principal teoria por trás da montagem de uma junta pela aplicação de torque. Ele descreve que ao se aplicar torque em um fixador, ocorre o deslocamento angular em torno do eixo central deste promovendo ao mesmo tempo o deslocamento linear axial, em função do perfil helicoidal das roscas, que devido à restrição física de movimento imposta pela junta, transforma este deslocamento em alongamento axial do fixador. Este alongamento é o produto da carga de tensionamento do fixador (também conhecido como pré-carga).

*Figura 5 - Diferença entre torque e força de aperto*



*Fonte: Adaptado de Atlas Copco Tightening Training*

A estratégia proposta para o processo de fixação é a "controle do torque (final) e monitoramento do ângulo (de aperto)". Nesse contexto, o torque final representa o objetivo do processo, enquanto o ângulo de aperto representa a compressão dos elementos da fixação.

## 2.2 ÂNGULO FINAL DE APERTO

Comparado com a norma internacional, ISO 5393, existem dois tipos principais diferentes de juntas: junta rígida e junta flexível. Essa diferenciação é necessária para entender o comportamento das conexões apertadas. O ângulo final dessas conexões diferentes está entre 30° e 720°. Essa definição destina-se a

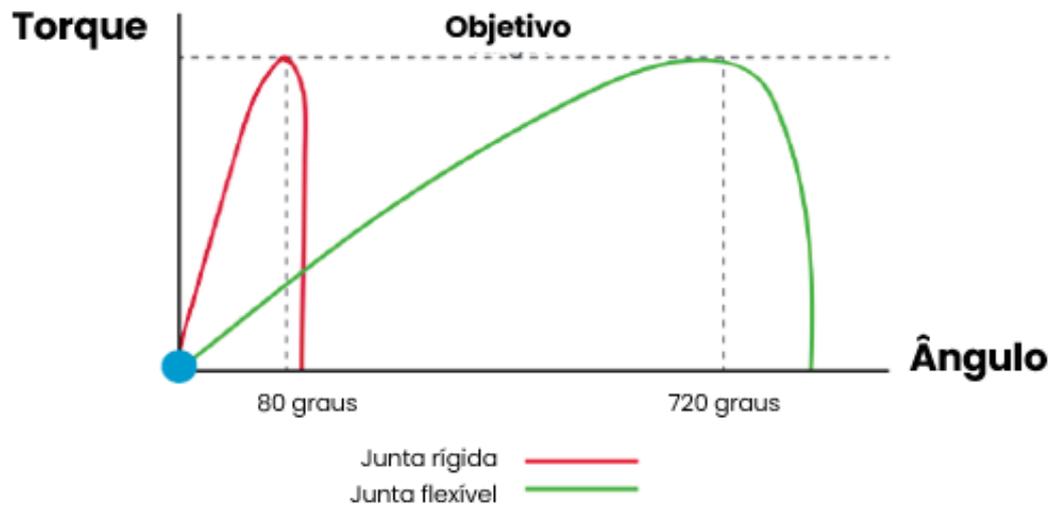
distinguir apenas entre os diferentes tipos de conexões, não para controle de processo, porém é amplamente confundida com os limites de aceitação para a programação dos limites de aceitação do processo, gerando falsas aprovações e aceitando comportamentos de junta dentro desses limites, porém atípicos relacionados ao comportamento da junta, tornando a parametrização perigosa.

A norma ISO 5393 prevê que sejam realizados testes em dois tipos de juntas: uma rígida e outra flexível. Junta rígida é definida como o tipo de junta na qual o torque final é alcançado após uma rotação de uma fração de volta a partir do encosto da cabeça do parafuso. Já uma junta flexível pode ser caracterizada por requerer um ângulo de rotação muito maior, geralmente de mais de uma volta completa, até atingir o torque final. É também uma característica deste tipo de junta, a compressão de outros elementos como arruelas e espaçadores, segundo MILANI; HAMEDI (2008). A norma ISO 5393 também distingue entre 4 faixas principais padrão de ângulo final, dependendo dos componentes a serem conectados:

- |                                                            |                                  |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| a) Junta rígida de peças de metal para metal:              | mín. $\leq x \leq 80^\circ$      |
| b) Junta média de peças de metal para flexível (plástico): | mín. $\leq x \leq 180^\circ$     |
| c) Junta média flexível para metal ou de plásticos:        | mín. $\leq x \leq 270^\circ$     |
| d) Junta flexível de plástico para plástico:               | mín. $\leq x \leq 300-600^\circ$ |

Essas faixas descrevem a maioria das aplicações, cujos exemplos são representados na FIGURA 6, porém, na realidade temos muito mais variações, dependendo dos componentes da junta.

Figura 6 - Gráfico de exemplo de comportamento de juntas duras e flexíveis



FONTE: Adaptado da definição da ISO5393

Ambos os valores mínimo e máximo podem ser determinados por análise estatística usando resultados armazenados nos controladores de aperto, o qual foi desenvolvido o método nesse trabalho. Embora essas faixas sejam amplamente aplicáveis, a dependência exclusiva dessa classificação para controle de qualidade pode ser arriscada. A correta parametrização do processo de aperto considerou a distribuição real dos ângulos medidos, evitando a aceitação de apertos anômalos apenas por estarem dentro de limites genéricos. Isso reforçou a necessidade de um método baseado em estatística para definir os limites de aceitação de ângulo, garantindo um controle mais preciso e confiável do processo de fixação.

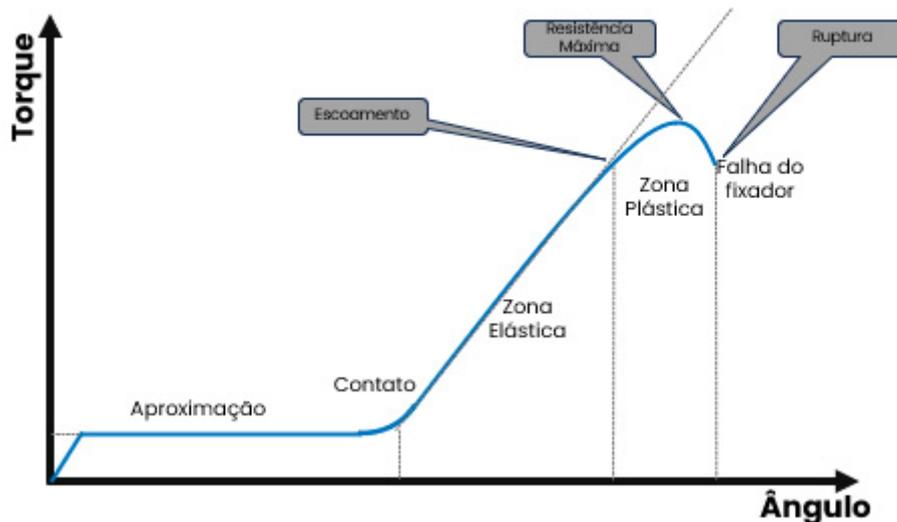
### 2.3 CONTROLE DO PROCESSO DE PARAFUSAMENTO

O processo de aperto em conexões parafusadas envolve diversos fatores essenciais para assegurar a fixação adequada. Essas conexões, baseadas em encaixe por força, dependem do alongamento do parafuso e da compressão das peças unidas para gerar a força de aperto necessária. Conforme recomendado pela norma VDI 2862 para conexões de segurança, o processo exige a medição sincronizada de duas variáveis: uma de controle e outra de monitoramento, ambas obtidas diretamente. Normalmente, em aplicações automotivas, o torque é utilizado como variável de controle, enquanto o ângulo de aperto, também chamado de

ângulo final, é monitorado para garantir a qualidade da fixação. Para atender a esses requisitos, todas as ferramentas de montagem aplicadas em fixações críticas são equipadas com transdutores integrados, permitindo a medição precisa e simultânea do torque e do ângulo.

A parte mais relevante da medição do ângulo de aperto começa depois que todas as peças estão pressionadas juntas, as folgas foram eliminadas e o torque aumenta conforme indicado do gráfico da FIGURA 7, o aperto passa por várias fases distintas, ao longo das fases de aperto, escoamento até ruptura, oferece uma representação visual detalhada do comportamento de uma junta durante o processo de fixação. Na fase de aperto, o torque aumenta de maneira elástica à medida que o parafuso é apertado, gerando uma pré-carga que mantém a integridade da junta. Quando o torque atinge um ponto crítico, a fase de escoamento se inicia, onde ocorre uma deformação plástica no fixador, refletindo a capacidade da junta de suportar forças adicionais sem falhar. Finalmente, na fase de ruptura, o torque continua a aumentar até que a junta ou o fixador falhe.

Figura 7 - Gráfico torque / ângulo e as fases do aperto até a falha.



FONTE: O autor (2025)

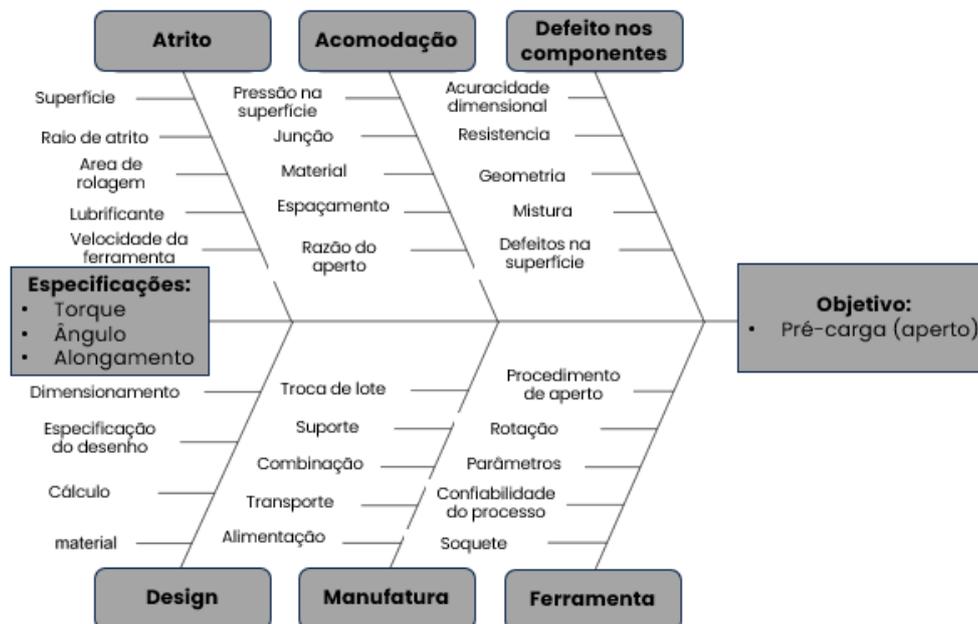
No gráfico da FIGURA 7, o ângulo de aperto abrange a faixa de elasticidade de todos os componentes envolvidos:

- Compressão de componentes fixados.

- Aplanamento de componentes curvados.
- Elongação do eixo do parafuso.
- Deformação elástica das cabeças dos parafusos.
- Deformação elástica das roscas - deformação elástica das porcas.

Além do projeto teórico de uniões parafusadas, o processo de aperto na produção é determinado por uma ampla variedade de parâmetros. Além disso, muitos fatores diferentes, sistemáticos e/ou aleatórios, influenciam o processo de aperto. Esses fatores influentes podem ser classificados de acordo com diagrama de Ishikawa (6M), que considera mão de obra, máquina, método, material, meio ambiente e meios de medição. A FIGURA 8 demonstra alguns fatores influentes na pré-carga alvo de aperto de acordo com a norma VDI/VDE 2637 Parte 1.

Figura 8 - Fatores que influenciam no resultado de aperto e pré-carga.



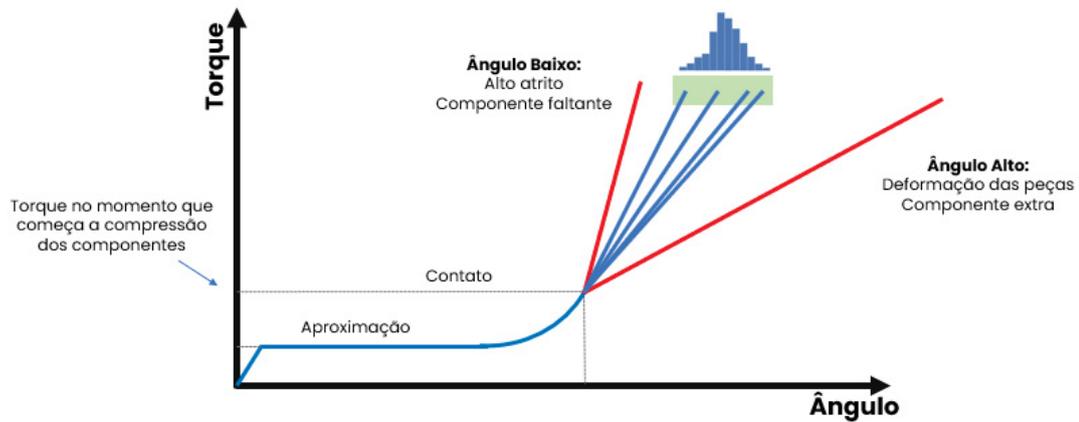
Fonte: Adaptado de VDI 2637

Essa característica do ângulo de aperto o torna tão importante para o controle do processo de aperto, tornando possível monitorar todo o processo de aperto. Existem vários fatores que podem influenciar a relação entre torque e ângulo, incluindo:

- Propriedades dos materiais: A relação entre torque e ângulo pode variar dependendo das propriedades dos materiais dos objetos em questão, como dureza, elasticidade e coeficiente de atrito.
- Geometria do objeto: A geometria do objeto, incluindo sua forma, tamanho e superfície de contato, pode afetar a relação entre torque e ângulo.
- Condições de lubrificação ou atrito: A presença ou ausência de lubrificação pode afetar a relação entre torque e ângulo, já que a lubrificação pode reduzir o atrito e, portanto, afetar a quantidade de torque necessária para girar o objeto.
- Método de aplicação de torque: O método usado para aplicar torque, como uma chave de torque ou uma chave de fenda, pode afetar a relação entre torque e ângulo.
- Precisão do equipamento de medição: A precisão do equipamento de medição usado para medir torque e ângulo pode afetar a relação entre essas duas quantidades.

Em resumo, a relação entre torque e ângulo pode ser influenciada por diversos fatores, conforme demonstrado na FIGURA 9 e é importante levar esses fatores em consideração ao projetar e conduzir experimentos que envolvam a medição de torque e ângulo. Este gráfico é fundamental para entender como diferentes fatores, como propriedades dos materiais, geometria do objeto, condições de lubrificação e método de aplicação de torque, podem influenciar a relação entre torque e ângulo. A visualização dessas variações permite identificar comportamentos atípicos e ajustar os parâmetros de controle para garantir a qualidade e a segurança das conexões roscadas.

Figura 9 - Gráfico torque / ângulo e as variações no ângulo de aperto.



FONTE: Adaptado de Atlas Copco Tightening Training

Existem variações aceitáveis no processo de aperto de componentes roscados, que podem ser influenciadas por fatores como lotes de produção, manufatura dos componentes e condições operacionais. Essas variações são esperadas e podem ser controladas dentro dos limites de aceitação estabelecidos. No entanto, variações atípicas que demonstram algum comportamento anormal, como falha na resistência, espanamento, falta de componentes ou deformação plástica, devem ser rejeitadas ou declaradas como suspeitas quando extrapolam os limites de aceitação baseados no comportamento histórico das curvas. Essas anomalias indicam problemas potenciais na integridade das conexões roscadas e precisam ser investigadas para garantir a segurança e a confiabilidade do produto.

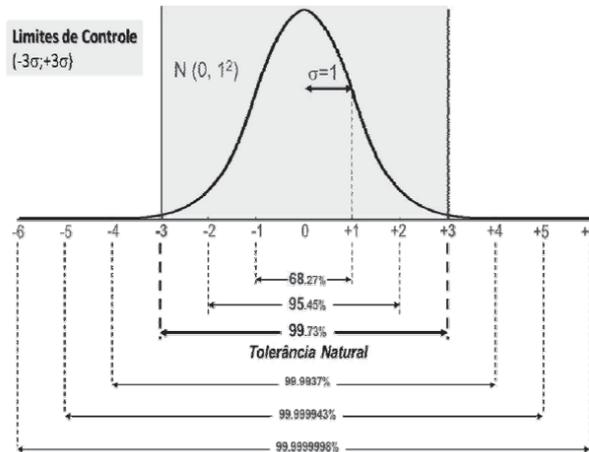
## 2.4 DISTRIBUIÇÃO DE DADOS E VALORES ATÍPICOS

A análise estatística dos dados de aperto pode ser feita rapidamente por meio de um histograma, uma representação gráfica de dados numéricos que mostra com que frequência determinados valores ocorrem. Em um histograma de dados de ângulo, por exemplo, o eixo X mostra a faixa de valores de ângulo, enquanto o eixo Y mostra com que frequência cada valor foi registrado.

Segundo ROTONDARO et al. (2008), “o termo sigma mede a capacidade do processo em trabalhar livre de falhas”. Comumente, o comportamento de processos pode ser avaliado estatisticamente e representado por uma curva normal que é definida por dois parâmetros estatísticos: a média e o desvio padrão ( $\sigma$ ), que

evidencia o quanto o processo está variando em torno desta média. Quanto menor o valor do desvio padrão, melhor o processo segundo DANTAS JUNIOR (2015).

Figura 10 - Gráfico de distribuição de probabilidade da função normal



Fonte: Figueiredo (2006)

No histograma, a área sob a curva que está dentro de um desvio padrão da média representa 68,27% de todas as leituras de torque no conjunto de dados. A área dentro de dois desvios padrão representa 95,45% de todas as leituras e a área dentro de três desvios padrão representa 99,73% de todas as leituras.

A escala sigma é utilizada para medir o nível de qualidade associado a um processo. Quanto maior o valor alcançado na escala sigma, melhor. O processo é definido como tendo desempenho Seis Sigma quando estiver com a média da população centrada no valor nominal da especificação, e os limites de especificação estiverem distantes seis desvios padrões da média da população. Estatisticamente, em um processo classificado como  $6\sigma$ , não se espera obter mais do que 3,4 produtos defeituosos por milhão de unidades produzidas segundo HILSDORF (2002).

Da mesma forma, os dados podem ser revisados se uma observação estiver a uma distância anormal de outros valores em uma população. Esses dados anormais podem ser conhecidos como "VALORES ATÍPICOS". Obviamente, antes que observações anormais possam ser isoladas, é necessário caracterizar observações normais. Duas técnicas gráficas para identificar valores atípicos, "gráficos de dispersão" e "gráficos de caixa", juntamente com um procedimento analítico, podem ser usadas para detectar valores atípicos quando a distribuição é

normal. Os valores atípicos nem sempre representam erros ou falhas de coleta; frequentemente, eles indicam causas especiais que devem ser investigadas para garantir estabilidade e qualidade do processo.

## 2.5 GARANTIA DO PROCESSO DE APERTO, PADRÕES AUTOMOTIVOS

O Padrão do Sistema de Gestão da Qualidade Automotiva IATF 16949 "define os requisitos fundamentais dos sistemas de gestão da qualidade para organizações de produção automotiva e peças de serviço relevantes". (IATF 16949 1ª Edição, 1 de outubro de 2016: Prefácio - Padrão de Sistema de Gestão da Qualidade Automotiva). Este padrão automotivo está fortemente vinculado ao padrão ISO 9001. De acordo com o IATF 16949, a organização deve garantir a conformidade de todos os produtos e processos.

A VDI/VDE 2645 PARTE 2 define que para criar uma conexão entre todos os padrões internacionais e processos e ferramentas de aperto, a VDI (Verein Deutscher Ingenieure; Comunidade de Engenheiros Alemães) desenvolveu um conjunto de regras diferentes. Uma dessas regras, VDI/VDE 2645 parte 2, trata do teste de capacidade de máquinas de aperto. Este documento é a melhor referência sobre as regras da execução do Teste de Capacidade de Máquinas (MCT) na produção em série, descrevendo um método de teste padronizado. O método de teste é baseado na análise estatística das leituras medidas das ferramentas de aperto.

Embora existam normas consolidadas, que tratam da garantia de torques e do controle de máquinas de aperto, não há, até o momento, normas ou métodos amplamente reconhecidos e estabelecidos para o controle de ângulos durante o processo de aperto. Essas normas asseguram a conformidade e qualidade do torque aplicado, mas o ângulo de aperto, que é um parâmetro monitorado em conjunto com o torque, ainda carece de uma padronização específica. A combinação desses dois parâmetros, torque e ângulo, é essencial para garantir a qualidade do aperto e a integridade das conexões roscadas, sendo fundamental que métodos robustos sejam desenvolvidos para definir limites e assegurar a conformidade do processo de aperto, melhorando a qualidade final das conexões.

## 2.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou os principais conceitos relacionados à fixação segura em conexões roscadas, enfatizando a importância do monitoramento integrado do torque e do ângulo de aperto para garantir conexões eficazes e confiáveis. Durante o aperto, o torque aplicado gera um alongamento axial do fixador, resultando em pré-carga, cuja distribuição uniforme depende diretamente do controle adequado do ângulo de aperto. A norma ISO 5393 classifica conexões quanto ao comportamento elástico em juntas rígidas ou flexíveis, destacando a necessidade de uma análise estatística detalhada para definição precisa dos limites de aceitação. Através da ferramenta de Ishikawa (6M), são considerados diversos fatores influentes no processo, como materiais, métodos e medições. A análise estatística por histogramas e gráficos torque-ângulo permite identificar valores atípicos (*outliers*), garantindo maior eficácia no controle. Conceitos estatísticos fundamentais, como média, desvio padrão, são essenciais para este monitoramento, assim como as normas automotivas IATF 16949 e VDI/VDE 2645, que reforçam a importância de padronizar o controle integrado de torque e ângulo para aumentar a segurança e qualidade das conexões roscadas.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A metodologia proposta conduziu primeiramente uma revisão sistemática da literatura sobre o controle de processo em conexões roscadas parte de uma motivação intrínseca em abordar questões fundamentais nesse campo de pesquisa. O escopo da revisão é direcionado para identificar os principais problemas, desafios e avanços relacionados a essas questões, reconhecendo tanto a necessidade teórica quanto a importância prática de seu estudo.

A abordagem metodológica busca evitar a mera justificção baseada na existência de uma lacuna na literatura, priorizando a identificação de estudos e artigos que ofereçam insights relevantes e soluções práticas. O processo de revisão envolverá a pesquisa sistemática em bases de dados acadêmicas, usando ferramentas de pesquisa como *Scopus*, *Engineering Village*, e Periódicos do Capes, utilizando palavras-chave específicas relacionadas ao controle de torque e monitoramento de ângulo em conexões parafusadas.

A análise dos estudos selecionados foi realizada de forma crítica, identificando tendências, lacunas e contribuições significativas para a compreensão e aplicação desses conceitos.

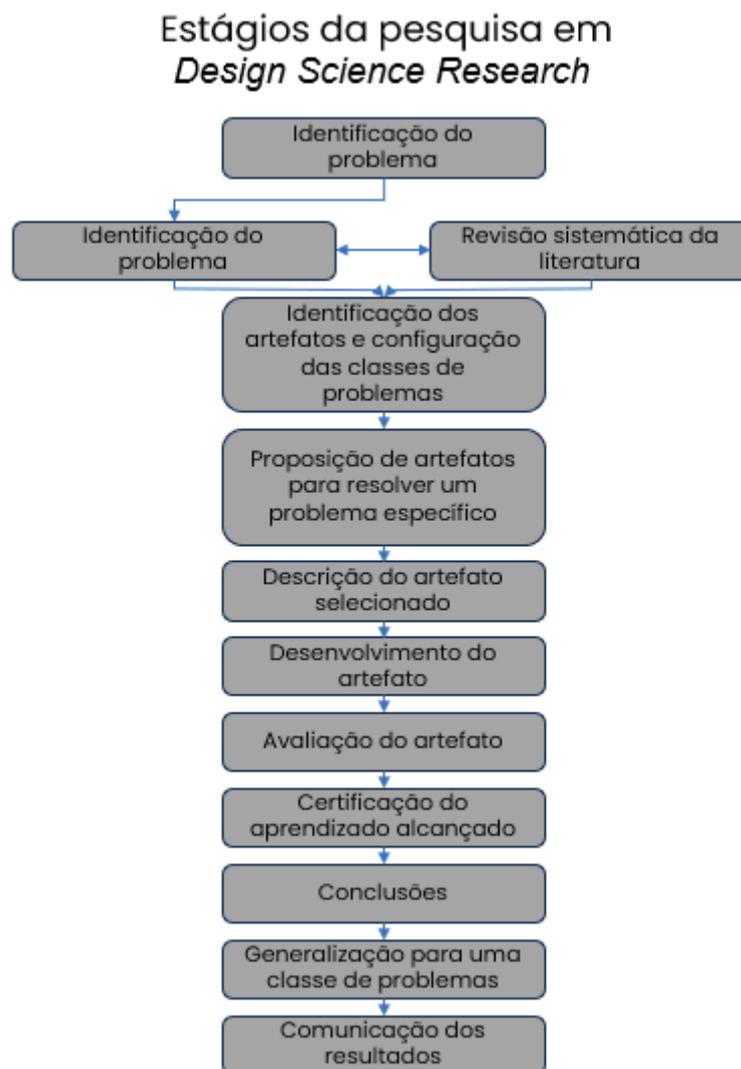
Após a obtenção dos resultados da pesquisa, foram aplicados critérios de inclusão e exclusão para selecionar os artigos mais pertinentes ao nosso tópico de pesquisa. Os critérios incluíram a relevância do título e resumo, a abordagem metodológica, a relação direta com o controle de torque e de ângulo em conexões roscadas e a disponibilidade do texto completo.

Uma vez selecionados os artigos, foi realizada uma leitura detalhada de cada um deles para extrair informações essenciais, como principais descobertas, métodos utilizados, desafios abordados e tendências identificadas. Essas informações foram então organizadas em uma tabela que permitirá uma visão geral das contribuições de cada estudo para o nosso campo de pesquisa.

### 3.2 DESIGN SCIENCE RESEARCH

O método de pesquisa adotado para desenvolver o artefato é baseado no modelo proposto por DRESCH; LACERDA E ANTUNES (2015) denominado *Design Science Research (DSR)* ilustrado na FIGURA 11.

Figura 11 - Método Recomendado Por Dresch; Lacerda; Antunes (2015)

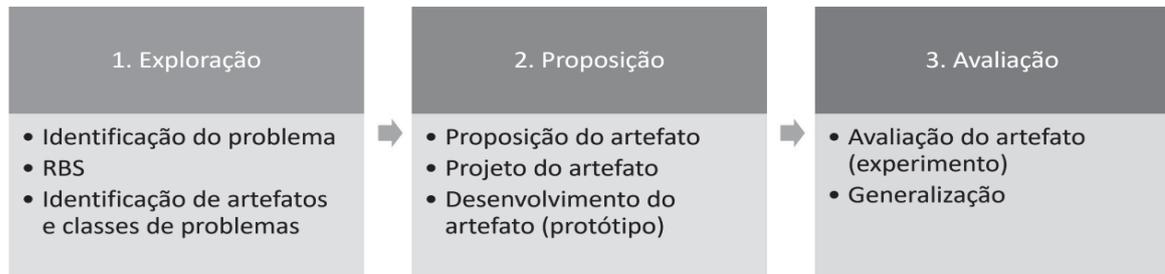


FONTE: adaptado de Dresch; Lacerda E Antunes (2015)

O *DSR* é um método que busca a resolução de um problema prático através de uma solução satisfatória (artefato) alguns conceitos importantes da *DSR* são a busca por soluções satisfatórias, e não a melhor, para problemas relevantes e práticos, através de um projeto com o rigor de pesquisa científica; a generalização para uma classe de problemas; e a sua validade pragmática, ou seja, orientado a

soluções viáveis. Para o presente artigo, algumas etapas relevantes do foram selecionadas e organizadas em três fases, como sugerido por SIERRA (2022) conforme ilustrado na FIGURA 12.

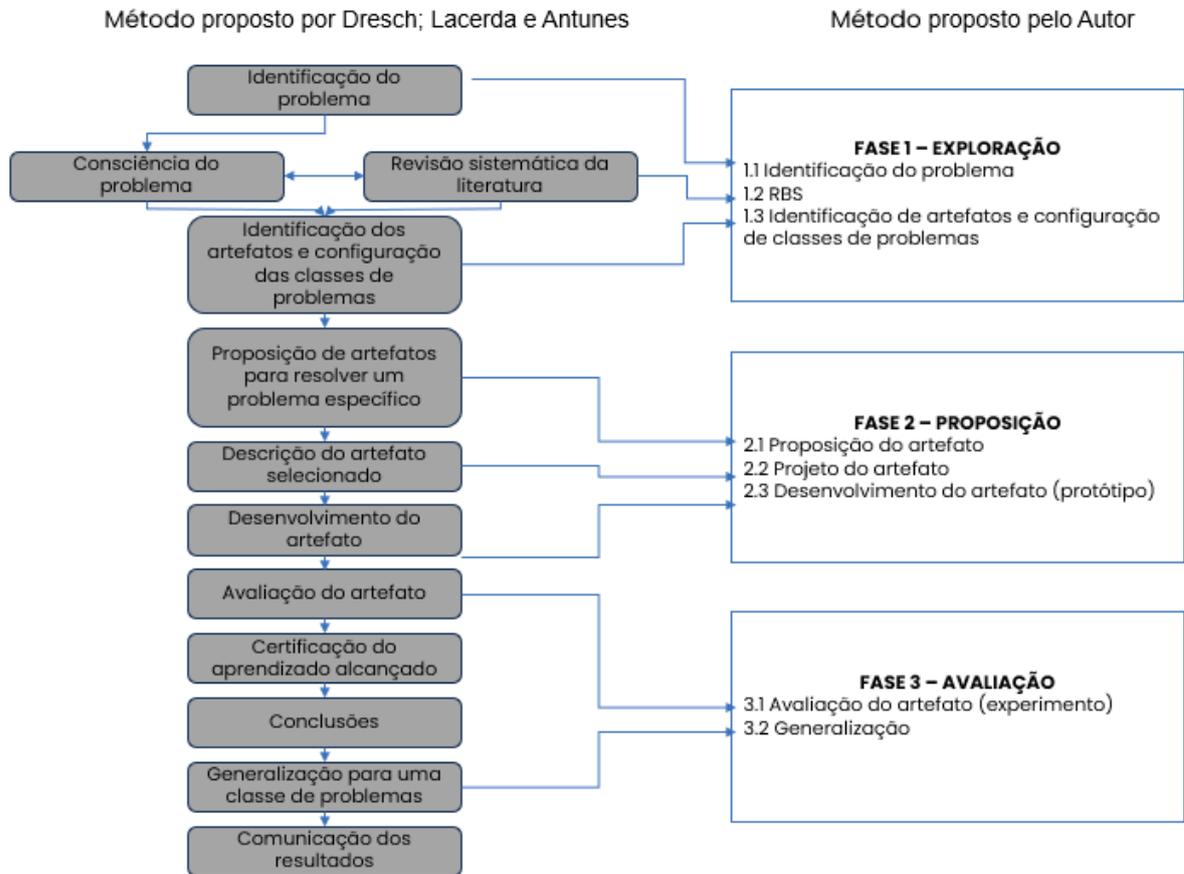
*Figura 12 - Método DSR*



*FONTE: Elaborado pelo autor, adaptado de Sierra (2022) e Dresch; Lacerda e Antunes (2015)*

As três fases - exploração, proposição e avaliação – correspondem de determinadas etapas do método de DRESCH; LACERDA e ANTUNES (2015), e apenas as agrupam em módulos para uma melhor organização conforme FIGURA 13.

Figura 13 - Correlação entre o método proposto e de Dresch; Lacerda e Antunes



FONTE: Elaborado pelo autor, adaptado de Sierra (2022) e Dresch; Lacerda e Antunes (2015)

Na primeira fase, de exploração, o objetivo foi entender em profundidade o problema levantado, partindo de áreas abrangentes do conhecimento até o estreitamento e delimitação do seu entorno. Iniciou-se com a identificação do problema, que surgiu do interesse desta pesquisa em levantar uma solução para um problema prático e relevante (ou classe de problemas). Além disso, é necessário que haja uma conscientização do problema, em termos de suas características e limites, através de uma pesquisa sistemática em bases do conhecimento científico.

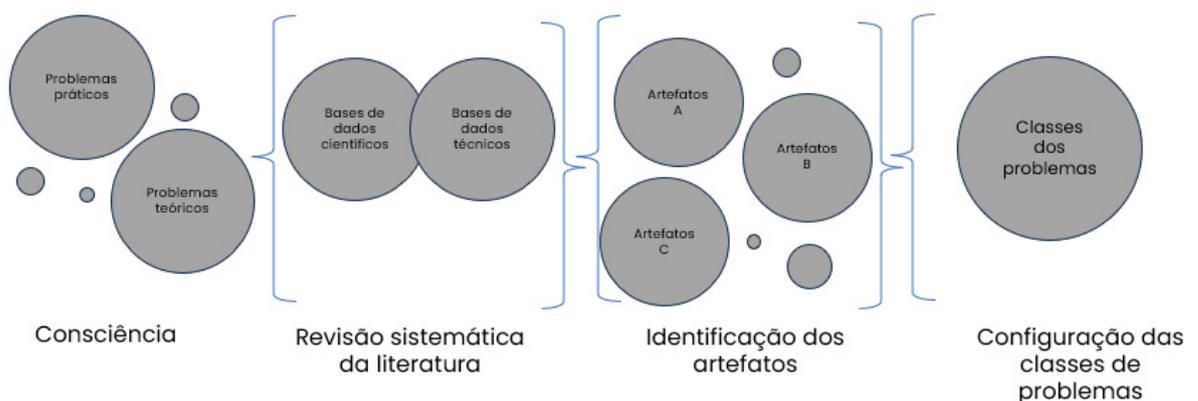
Neste trabalho, essa pesquisa foi realizada por meio de uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), e o método adotado foi o *Knowledge Development Process-Constructivist (ProKnow-C)*. A escolha dessa ferramenta se deve ao seu estudo nas disciplinas de mestrado no Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Manufatura (PPGEM) da UFPR.

O *ProKnow-C* caracteriza-se por sua simplicidade de uso e por seu roteiro bem definido. Inclui duas atividades principais: a seleção de portfólio bibliográfico; e

a análise bibliométrica. Na primeira, a partir da definição dos eixos de pesquisa, buscam-se os artigos em bases de dados confiáveis e aceitas pela comunidade científica. Os artigos coletados são filtrados segundo seu alinhamento do tema ao título e resumo, reconhecimento científico e redundância. Na segunda etapa, dados bibliométricos são considerados como critérios de exclusão, tais como a data de publicação e relevância do autor. Ao longo desse processo, repositórios são criados, divididos e associados de acordo com os parâmetros de filtragem. Ao fim, o repositório final deve conter os artigos relevantes a serem integralmente lidos e analisados. Por meio de um processo iterativo de leitura e análise dos artigos, um conjunto de parâmetros em comum observados nos métodos é definido.

Ainda na primeira fase, artefatos encontrados na literatura são identificados e parâmetros em comum são definidos, como o método de controle de processo aplicado (ex.: *TORQUE*). Outra saída importante é a configuração das classes de problemas, que podem ser definidas como organizações, ou agrupamentos, de problemas gerais e em comum que orientam a trajetória de conhecimento no contexto das ciências do artificial segundo DRESCH; LACERDA e ANTUNES (2015). As classes de problemas são configuradas a partir da identificação dos artefatos que são levantados na RBS conforme ilustrado na FIGURA 14.

Figura 14 - Lógica para a construção das classes de problema



FONTE: Adaptado de Dresch; Lacerda e Antunes (2015), baseado em Lacerda et al. (2013)

Na segunda fase, de proposição, o objetivo foi propor criativamente uma solução que atenda aos requisitos elicitados a partir da exploração. Este processo científico, conhecido como abdução, permite prescrever e projetar artefatos autorais

com potencial de resolver os problemas práticos levantados (ou atender classes de problemas). Trata-se de uma atividade criativa durante a qual é possível conceber soluções inovadoras e realizáveis, ou artefatos, para o problema levantado. Portanto, cabe aqui fazer o uso de técnicas de aplicação conceitual, como o design vernacular, que possibilita ao pesquisador a geração livre e iterativa de alternativas preliminares para a solução de um problema. A partir da análise dos métodos envolvidos nos artigos da RBS, a proposta final considera características e oportunidades para se chegar em um artefato melhorado em relação aos existentes.

A seguir, no projeto do artefato, necessita-se que os aspectos internos e externos sejam identificados e que todos os procedimentos a serem adotados para sua construção sejam descritos. Além disso, os requisitos de desempenho devem ser levantados para que seja possível verificar, na fase de avaliação, se o artefato é satisfatório ou não como solução ao problema apontado. O desenvolvimento desse artefato se refere à sua materialização em forma de protótipo funcional e à própria heurística construtiva.

Por fim, na terceira fase, de avaliação, o artefato anteriormente desenvolvido deve ser avaliado quanto ao atendimento dos requisitos delineados, por meio da observação e medições do comportamento do protótipo. Importante ressaltar que existe a possibilidade do insucesso da experimentação, o que deve ser esclarecido e formalizado como lições aprendidas. Realiza-se também a generalização do desenvolvimento desse artefato para as classes de problemas envolvidas, processo conhecido como Indução, que aponta e lança o caso pesquisado em particular para campos mais abrangentes do conhecimento, característica importante para providenciar valor científico ao projeto e colaborar à evolução do tema.

### 3.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, buscou-se a definição do método científico a ser utilizado para o desenvolvimento da pesquisa. A adoção do *Design Science Research* se deve à necessidade de se resolver um problema prático da indústria de automobilística por meio de um artefato, ou seja, um produto artificial. No entanto, o método do DSR sugerido por DRESCH; LACERDA e ANTUNES (2015) foi adaptado neste trabalho, com inclusão de etapas chaves que se encaixam na agenda de um mestrado profissional. O DSR se demonstra bem adaptado às demandas de cunho técnico científico que a indústria apresenta, e sua similaridade com modelos corporativos de projeto de produtos facilita seu entendimento por profissionais.

O próximo capítulo apresenta a primeira fase do DSR, o de exploração do tema, que tem o objetivo de se buscar o melhor entendimento e conscientização do problema. Seu alicerce é a revisão bibliográfica sistemática (RBS), que fundamenta e organiza o conhecimento científico produzido mais relevante e aceito na área.

## 4 FASE DE EXPLORAÇÃO

### 4.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Tradicionalmente, a avaliação da qualidade de uma conexão roscada tem se baseado principalmente no torque de aperto. Entretanto, a relação entre torque e tensão de aperto nem sempre é linear, devido a variáveis complexas, como fricção, geometria e as características dos materiais envolvidos. A introdução do ângulo de aperto como uma medida adicional oferece uma abordagem mais precisa e sensível para avaliar a qualidade da junta. Contudo, a definição dos limites para aceitação da variação dos ângulos não é clara, muitas vezes resultando em limites demasiadamente amplos que podem aprovar uma grande parte da variação anormal ou excessivamente restritivos, levando a um aumento de rejeições. Antecipa-se, portanto, um notável aprimoramento nos processos, além da garantia de qualidade das juntas.

### 4.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS)

As pesquisas foram executadas entre 05/6/23 e 01/10/23 no [www.scopus.com](http://www.scopus.com). Os eixos de pesquisa definidos foram: CONTROLES DE PROCESSO e TORQUE e ÂNGULO e os termos de busca definidos foram: “PROCESS CONTROL” AND “TORQUE” AND “ANGLE”. As bases de artigos selecionadas foram a *Scopus*, *Google Academics* e *Web of Science*, acessadas através do portal CAPES, pois ambas têm amplo reconhecimento e uso pela comunidade científica, foram encontrados 1.011 artigos contendo esses tópicos, e selecionados os mais relevantes com o propósito deste estudo.

### 4.3 IDENTIFICAÇÃO DE ARTEFATOS E CONFIGURAÇÃO DE CLASSES DE PROBLEMAS

Após a leitura e análise dos artigos encontrados, foram selecionados 10 artigos relevantes listados como resultado da RBS, artefatos foram identificados e parâmetros em comum foram observados, como listados a seguir (TABELA 1):

*Tabela 1 - Resumos de objetivos e conclusões de estudos relacionados.*

<b>Título, autor e ano</b>	<b>Resumo do objetivo</b>	<b>Resumo da conclusão</b>
<p><i>Quality assured tightening of screw joints</i></p> <p>Thomas O Hermansson. 2015</p>	<p>O estudo destaca a importância da garantia de qualidade em conexões roscadas críticas, como em cintos de segurança e volantes. A combinação de monitoramento de ângulo, vigilância de processo e parafusos especializados assegura a integridade dessas conexões. Um sistema sofisticado previne erros de montagem, melhorando eficiência e segurança na Volvo Cars.</p>	<p>A análise estatística do monitoramento de ângulo pode identificar apertos inadequados em conexões críticas, detectando a ausência de componentes como suportes de cinto de segurança.</p>
<p><i>Identification of Pre-Tightening Torque Dependent parameters for Empirical Modeling of Bolted Joints.</i></p> <p>Yu Tian, Hui Qian, Shifu Cao, Dahai Zhang and Dong Jiang. 2021</p>	<p>O artigo propõe um método para identificar os parâmetros de rigidez dependentes do torque de pré-aperto em conexões parafusadas. A interface da junta é modelada como uma camada fina isotrópica, e seus parâmetros são ajustados com base em dados experimentais. A relação entre esses parâmetros e o torque é determinada por ajuste de curva, aprimorando a modelagem e refletindo melhor as características dinâmicas da estrutura.</p>	<p>O artigo propõe um método para simular a rigidez da superfície de junção em conexões parafusadas, considerando a variabilidade do torque de pré-aperto. Validado por testes, o método utiliza ajuste de curva para modelagem precisa e um elemento fino com relação constitutiva linear para eficiência na identificação de parâmetros. Ele reflete com precisão o desempenho do contato na junta e auxilia em análises numéricas, tendo grande importância prática.</p>
<p><i>Investigation of the fastening behavior of self-tapping plastic joints with various supporting ribs.</i></p> <p>Juhyun Nam, Dongwon Kim, Je Hoon Oh. 2022 *</p>	<p>Este estudo investiga o comportamento de fixação de juntas parafusadas autoperfurantes em aberturas plásticas com nervuras de suporte, utilizando FEA e experimentos. Diferente de juntas plásticas convencionais, as nervuras suportam a carga axial do parafuso, influenciando o desempenho da fixação. A rigidez normalizada das nervuras foi analisada para compreender seu impacto na junta.</p>	<p>A rigidez das nervuras da abertura influencia o desempenho das juntas parafusadas autoperfurantes. Se for insuficiente, pode ocorrer contato deficiente, comprometendo a fixação. O aperto com controle de torque é recomendado para garantir força uniforme. Reforçar as nervuras não aumenta a carga de pré-carga, exceto quando há contato deficiente. O projeto eficiente de juntas plásticas deve considerar esses fatores.</p>

Título, autor e ano	Resumo do objetivo	Resumo da conclusão
<p><i>Friction behavior and preload relaxation of fastening systems with composite structures.</i></p> <p>C. Friedrich, H. Hubert.</p> <p>2013</p>	<p>Os materiais compostos estão substituindo os convencionais, exigindo fixação mecânica com fixadores roscados. A fricção afeta a carga inicial e sua relaxação ao longo do tempo. Este estudo investiga coeficientes de fricção em materiais compostos, analisando diferentes combinações de materiais, velocidade de aperto e variações no sistema, com implicações para o aprimoramento de produtos.</p>	<p>O estudo comparou os coeficientes de fricção entre parafusos de aço e diferentes materiais de apoio, incluindo CFRP, plástico e metais. A fricção variou conforme a lubrificação, sendo sensível ao reaperto. Laminados de CFRP apresentam relaxação crítica da carga, especialmente em altas temperaturas. Recomenda-se evitar o reaperto e adotar margens de segurança elevadas em sistemas de fixação com CFRP.</p>
<p><i>The Automated Threaded Fastening Based on On-line Identification.</i></p> <p>Mongkorn Klingajay, Nicolas Ivan Giannoccaro.</p> <p>2004</p>	<p>Os autores propõem uma metodologia online para estimar, durante a inserção do parafuso, parâmetros difíceis de medir no modelo analítico de torque, com validação experimental do procedimento.</p>	<p>Os testes experimentais validaram os parâmetros estimados com dados do experimento. Os resultados dos testes demonstraram que até quatro parâmetros puderam ser identificados com sucesso neste experimento.</p>
<p><i>Methods of increasing the efficiency of tightening monitoring of threaded connections (survey of published studies).</i></p> <p>M. M. Matlin, V. A. Kazankin, and E. N. Kazankina.</p> <p>2020</p>	<p>É apresentada uma pesquisa sobre métodos de monitoramento da firmeza de conexões roscadas que podem ser utilizados na montagem, operação e reparo de equipamentos nas indústrias química e de petróleo e gás.</p>	<p>O artigo destaca que a precisão na determinação da força de aperto em conexões roscadas essenciais para a indústria e depende de parâmetros como diâmetro e resistência do parafuso, mas é limitada pelo coeficiente de atrito. Para melhorar a confiabilidade, são propostos métodos de calibração baseados em deformações radiais e técnicas de monitoramento, para medições precisas.</p>
<p><i>Analysis on Yield Tightening of Threaded Fasteners.</i></p> <p>Sayed A. Nassar, Xianjie Yang and Saravanan Ganeshmuthy.</p> <p>2008</p>	<p>O artigo apresenta um modelo não linear que combina tensões axiais e torção para prever a deformação em juntas parafusadas, propõe uma nova abordagem para aperto em materiais plásticos e avalia a influência dos coeficientes de atrito, com validação experimental.</p>	<p>O estudo propõe uma nova abordagem de aperto para prever a carga, considerando atrito, rosca e área de apoio, com alta precisão. Nova abordagem elasto-plástica prevê com precisão a carga de aperto e torque-ângulo, se coeficientes de atrito forem iguais, validada experimentalmente.</p>
<p><i>Process curve analysis with machine learning on the example of screw fastening and press-in processes.</i></p> <p>Moritz Meiners, Andreas Mayr, Jörg Franke.</p> <p>2020</p>	<p>O artigo explora o uso de aprendizado de máquina para monitorar processos de fixação por parafusos, detectar erros e reduzir custos. O artigo revisa abordagens convencionais e machine learning para monitoramento de torque, detectando erros e interações, visando reduzir custos na manufatura.</p>	<p>O machine learning aprimora o monitoramento de curva de torque, detectando erros em fixação e prensagem, com potencial expansão para outros processos</p>

<i>Título, autor e ano</i>	<i>Resumo do objetivo</i>	<i>Resumo da conclusão</i>
<p><i>Nut Fastening with a Humanoid Robot.</i>  <i>Kai Pfeiffer, Adrien Escande and Abderrahmane Kheddar1</i>            2017</p>	<p>O estudo analisa o robô HRP-2Kai realizando tarefas de alta precisão na produção de aeronaves, utilizando integração de módulos. O estudo analisa o robô realizando tarefas de aperto preciso, integrando módulos com controlador de Programação Quadrática.</p>	<p>Estudo confirma que o robô, com controlador Quadrático integrado, utiliza servo controle visual e detecção autônoma para apertar parafusos com precisão em aeronaves.</p>
<p><i>Data-Driven Classification of Screwdriving Operations.</i>  <i>Reuben M. Aronson, Ankit Bhatia, Zhenzhong Jia, Mathieu Guillame-Bert, David Bourne, Artur Dubrawski, and Matthew T. Maso</i>            2017</p>	<p>Estudo revela falhas e estágios do aperto de parafusos com dados rotulados e técnicas de aprendizado de máquina em séries temporais. Robô coleta 1862 execuções de aperto, rotula estágios, identifica falhas e aplica machine learning para classificação automática na produção eletrônica.</p>	<p>Pesquisa mostra precisão na classificação de falhas em aperto de parafusos, melhorando sistemas de detecção e recuperação industriais.</p>

*Fonte: O Autor (2025)*

Após a leitura e resumo dos artigos encontrados, algumas conclusões puderam ser retiradas, baseado na recorrência dos tópicos e na necessidade de um método robusto e padronizado para determinar os limites de aceitação da qualidade das juntas:

1. Ênfase na Automação: Muitos dos artigos abordam a automação de processos industriais, especialmente em relação a apertos de parafusos e conexões. Isso destaca a importância da automação na indústria moderna para melhorar a eficiência e a precisão.

2. Importância do monitoramento: Vários artigos discutem a monitorização de processos de aperto e conexão, enfatizando a necessidade de detectar falhas e garantir a qualidade do produto final.

3. Tecnologia de Aprendizado de Máquina: Alguns estudos exploram o uso de algoritmos de aprendizado de máquina para melhorar a monitorização de processos e a detecção de falhas. Isso demonstra a crescente relevância da inteligência artificial na indústria.

4. Variabilidade nos Processos: A variabilidade nos processos de aperto e conexão é uma preocupação constante, e os pesquisadores estão buscando maneiras de lidar com essa variabilidade para garantir a qualidade.

5. Ergonomia e Eficiência: Vários artigos destacam a importância da ergonomia e da redução da carga física sobre os operadores em processos industriais, o que pode melhorar a eficiência e a segurança.

6. Controle e Precisão: Os estudos enfatizam a importância do controle preciso em processos industriais, especialmente em relação ao aperto de parafusos e conexões, onde a precisão é crítica.

7. Melhorias Futuras: Muitos artigos sugerem a necessidade de mais pesquisas e desenvolvimentos para aprimorar ainda mais os processos industriais, incluindo o uso de tecnologias avançadas e abordagens inovadoras.

Os artigos refletem os desafios e avanços na automação e monitorização de processos industriais, com foco na melhoria da qualidade, eficiência e segurança. Eles também destacam a importância de abordagens interdisciplinares e o uso de tecnologias emergentes para enfrentar esses desafios.

#### 4.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Em conclusão, a análise sistemática da literatura revelou a crescente importância da automação e do controle de processos na indústria, com foco específico no controle de torque e monitoramento de ângulo em aplicações como aperto de parafusos e conexões. No entanto, ficou evidente a lacuna quanto à existência de um método robusto e padronizado para adoção generalizada pela indústria, especialmente na definição precisa dos limites aceitáveis para torque e ângulo. Portanto, destacamos a necessidade premente de desenvolver e implementar um método abrangente que possa atender aos requisitos da indústria moderna, promovendo a qualidade, a eficiência e a segurança em processos de fabricação. Esse esforço conjunto de pesquisa e desenvolvimento desempenhará um papel fundamental na evolução contínua da automação industrial e na redução de riscos associados a falhas nos processos.

## 5 PROPOSIÇÃO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO ÂNGULO DE APERTO

Na fase de proposição deste método para o controle de processo de parafusamento, busca-se estabelecer uma abordagem que vá além das práticas convencionais, incorporando de maneira integral a análise estatística como elemento central para a definição dos padrões de aceitação de juntas, com o controle de torque e monitoramento de ângulo.

### 5.1 PROPOSIÇÃO DE ALTERNATIVA

Definiu-se um método para parametrizar o controle de processo de fixação segura de componentes roscados e definição dos limites de aceitação com base em análise estatística. Este método visou parametrizar o controle de processo utilizando uma abordagem estatística que considera a dispersão dos ângulos finais, calculando a média, o desvio padrão e quantis e estabelecendo limites normais de variação baseado em dados históricos.

Com base nos resultados reais de apertos (por exemplo, 45Nm), uma análise estatística foi realizada. O desvio padrão foi calculado para a dispersão dos ângulos finais. Os limites normais de variação são estabelecidos como -3 sigmas e +3 sigmas da média, ou seja, 3 desvios padrão da média. Isso define uma faixa aceitável de variação do ângulo de aperto, amplamente utilizado na indústria, conhecido como a metodologia “ $\pm 3$  SIGMA” ou “ $\pm 3 \sigma$ ”.

O método amplamente utilizado no controle estatístico de processos, conhecido como “ $\pm 3$  Sigma”, estabelece um intervalo de referência que abrange três desvios padrão, ou seja, aproximadamente 99,73% dos valores individuais de um processo em controle estatístico. Essa abordagem é frequentemente associada ao conceito do Seis Sigma (6 Sigma), que busca reduzir a variabilidade e defeitos nos processos produtivo, porém “6 Sigma” é diferente de “ $\pm 3$  Sigma”.

- “ $\pm 3$  Sigma” refere-se ao conceito estatístico de um intervalo que contém 99,73% dos dados em uma distribuição normal padrão.
- “6 Sigma” (seis sigma) é uma metodologia para melhoria de processos, que busca reduzir a variação e atingir um nível de qualidade em que haja no máximo 3,4 defeitos por milhão de oportunidades. Ele considera  $\pm 6$  sigma como um critério para processos extremamente bem controlados.

Resultados e garantia de qualidade: os valores fora dessa faixa foram considerados potencialmente suspeitos e rejeitados para proteção do cliente. Este método proporcionou uma abordagem estatisticamente fundamentada para garantir conexões seguras, contribuindo para a qualidade e segurança em diversas aplicações industriais.

O controle estatístico de processo (CEP) consiste no uso sistemático de métodos estatísticos para monitorar, analisar e manter um processo sob controle. Quando aplicado ao monitoramento de ângulos em operações de fixação, o CEP auxiliou na definição de limites superior e inferior que definem faixas de variação aceitáveis para os ângulos.

Para implementar o CEP para limites de ângulo, um plano de coleta de dados foi elaborado, capturando medidas de ângulo final de aperto durante o processo de fixação. Técnicas de análise estatística, como média, desvio padrão e gráficos de controle, foram então aplicadas aos dados coletados. Gráficos de controle, como os gráficos X-barra e R, permitem que os visualizar a variação do processo e determinam os limites de controle apropriados para os ângulos.

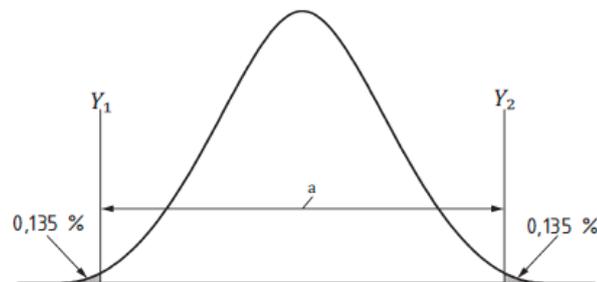
A incorporação do CEP nos processos de fixação oferece vários benefícios e aplicações, pois, forneceu uma abordagem sistemática para identificar e lidar com variações nas medidas de ângulo. O CEP possibilitou a detecção de desvios e tendências no processo, permitindo ajustes e intervenções oportunos para manter o controle sobre o processo de fixação.

## 5.2 DISTRIBUIÇÃO DE DADOS E VALORES ATÍPICOS

A ISO 22514 descreve que o objetivo da análise de processos é obter conhecimento sobre um processo. Esse conhecimento é necessário para controlar o processo de forma eficiente e eficaz, garantindo que os produtos resultantes atendam aos requisitos de qualidade. As ferramentas foram parametrizadas com alguns parâmetros básicos e padronizados, para análise de processo ser realizada e para que melhorias subsequentes foram implementadas. O comportamento de uma característica em análise, neste caso os ângulos finais, pode ser descrito pela distribuição, localização, dispersão e forma, parâmetros estes que, em geral, são funções dependentes do tempo. Existem diferentes modelos para essas

distribuições resultantes, cujos parâmetros variam com o tempo; para verificar se um modelo de distribuição dependente do tempo se ajusta, podem ser empregados métodos estatísticos, incluindo ferramentas gráficas (por exemplo, gráficos de probabilidade e gráficos de controle). O método amplamente utilizado, “ $\pm 3$  SIGMA”, adota o intervalo de referência que descreve 99,73% dos valores individuais de um processo em controle estatístico, com os 0,135% restantes em cada extremidade, conforme mostrado na FIGURA 15. Isso se aplica se a população de valores individuais estiver normalmente distribuída. Para uma distribuição normal, esse intervalo de processo é representado  $\pm 3$  Sigmas, totalizando seis desvios padrão.

Figura 15 - Distribuição normal



FONTE: ISO22514\_2 (2017)

De acordo com a ISO 22514-2:2017, muitos padrões foram criados por organismos internacionais, regionais e nacionais, bem como pela indústria, concernentes à capacidade/desempenho de qualidade dos processos. Todos eles assumem que o processo está em estado de controle estatístico, com processos estacionários e normalmente distribuídos. No entanto, uma análise abrangente dos processos de produção mostra que, ao longo do tempo, é muito raro que os processos permaneçam nesse estado.

Quando a distribuição dos dados não é normal, é inadequado usar a distribuição gaussiana e três desvios padrão “ $\pm 3$  SIGMA” para estabelecer limites para valores atípicos (*outliers*). Nesses casos, o uso de quantis é uma alternativa viável, os quantis dividem os dados em intervalos com probabilidades iguais, permitindo definir limites que representem melhor a distribuição real dos dados.

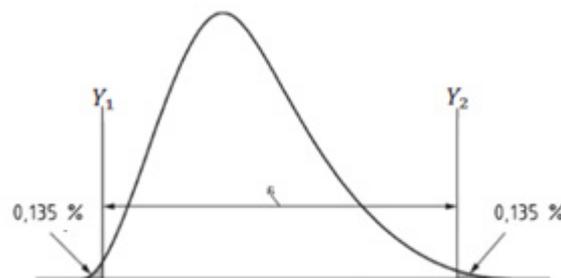
Os quantis são medidas estatísticas que dividem um conjunto de dados em intervalos de tamanho igual, auxiliando na compreensão da distribuição dos dados.

Por exemplo, os quartis dividem os dados em quatro partes: o primeiro quartil (Q1) é a mediana da metade inferior dos dados, o segundo quartil (Q2) é a mediana geral, e o terceiro quartil (Q3) é a mediana da metade superior. Ao identificar esses pontos, os quantis permitem determinar a dispersão e a tendência central dos dados, além de ajudar na detecção de outliers, verificando se os pontos de dados caem significativamente fora desses intervalos.

Para usar os quantis, foram calculados os quantis apropriados para seus dados. As escolhas comuns são o 1º e o 99º percentil para identificar outliers extremos, ou o 5º e o 95º percentil para outliers mais moderados. Utilizados os quantis calculados para estabelecer os limites inferior e superior dos seus dados. Pontos que caírem abaixo do limite inferior ou acima do limite superior foram considerados *outliers*. Esse método não assumiu uma distribuição específica para os dados, tornando-o adequado para vários tipos de distribuições. O

Se a distribuição não for normal, pode haver pontos fora da curva, causas especiais que fazem o teste de normalidade falhar; nesses casos, a causa raiz deve ser investigada e eliminada. Após isso, se a distribuição dos valores individuais não formar uma distribuição normal, o intervalo de referência poderá aparecer como na FIGURA 16. Utilizando o mesmo intervalo da abordagem “ $\pm 3$  SIGMA”, o intervalo de referência é definido como o intervalo entre os limites inferior e superior de referência, que são, respectivamente, definidos como os percentis de 0,135% e 99,865% da distribuição que descreveu a saída da característica do processo, escritos como  $X_{0,135\%}$  e  $X_{99,865\%}$ .

Figura 16 - Distribuição não normal



FONTE: Adaptado de ISO22514\_2 (2017)

Se a distribuição dos valores individuais não formar uma distribuição normal, mas for assimétrica, então o intervalo de referência pode aparecer conforme

ilustrado na FIGURA 16. Os valores Y1 e Y2, que geralmente são os percentis de 0,135% e 99,865%, segundo a ISO 22514-2:2017, os três procedimentos que podem ser utilizados para estimar os X0,135% e X99,865% são os seguintes:

a) Ajustar uma distribuição ao conjunto de dados combinado e estimá-los a partir da distribuição ajustada resultante.

b) Estimá-los diretamente a partir do conjunto de dados combinado. Para obter uma estimativa confiável de X0,135% e X99,865% neste procedimento, o tamanho do conjunto de dados deve ser grande. Por exemplo, para amostras combinadas de 1.000, X0,135% e X99,865% são considerados como o valor mínimo e o valor máximo do conjunto de dados.

c) Estimá-los a partir de um gráfico de probabilidade conforme descrito na ISO 5479. Caso os dados não apresentem uma distribuição normal, poderá ser necessário utilizar um procedimento alternativo.

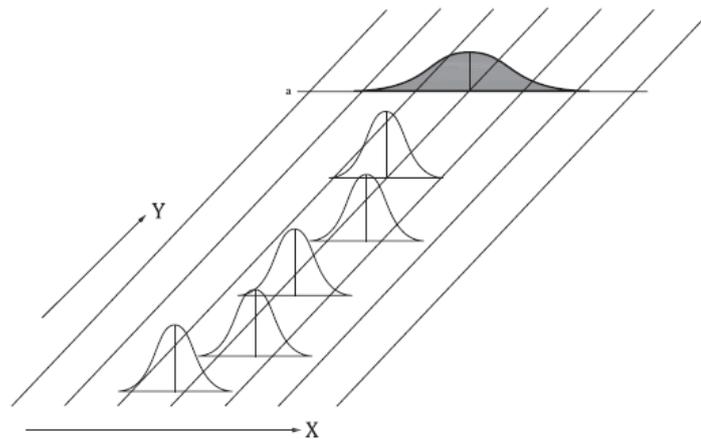
### 5.3 . OS ÂNGULOS DE APERTO EM DISTRIBUIÇÕES NÃO-NORMAIS

Ambos os métodos, “ $\pm 3$  SIGMA” e “QUANTIS”, mencionados anteriormente, têm seu lugar no controle de processos. O método dos quantis oferece uma abordagem mais flexível e precisa para dados não normais, mas requer mais amostras, enquanto o método “ $\pm 3$  SIGMA” fornece uma forma rápida e padronizada de definir limites de controle para dados normalmente distribuídos. Ao compreender e aplicar ambos os métodos de forma adequada, é possível garantir uma avaliação robusta e confiável do torque e ângulo de aperto em conexões roscadas, melhorando a qualidade e segurança dos produtos. Na prática, uma abordagem combinada pode ser benéfica; assim, a recomendação deste estudo é:

- Avaliação Inicial: Utilize o método “ $\pm 3$  SIGMA” para uma compreensão preliminar do processo e para identificar valores atípicos, *outliers*, evidentes.
- Análise Detalhada, após 1.000 ou mais amostras: Aplique o método dos “QUANTIS” para uma avaliação mais detalhada e precisa, especialmente quando os dados se desviam da normalidade, garantindo que os limites de controle estejam ajustados à distribuição real dos dados.

O ângulo de aperto é dependente do tempo, influenciado por diversas tendências e flutuações durante o processo de fixação. Como ilustrado na FIGURA 17, essas variações podem levar a distribuições não normais.

Figura 17 - Modelo de distribuição dependente do tempo



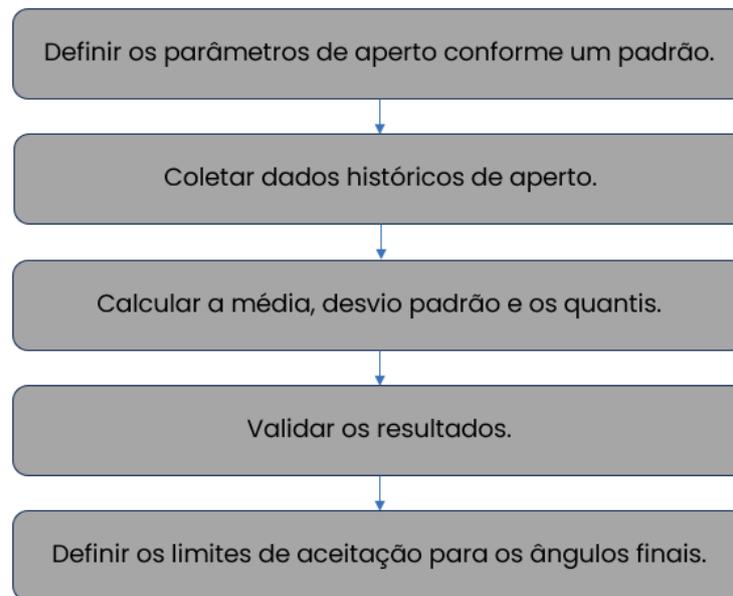
FONTE: ISO22514\_2 (2017)

Vale ressaltar que, ao adotar o critério " $\pm 3$  SIGMA" e o método dos "QUANTIS" utilizam nessa proposta a mesma faixa de aceitação, aproximadamente 0,27% dos valores podem ser classificados como rejeitos, o que equivale a cerca de 2,7 rejeições a cada 1.000 ciclos de aperto. Caso a taxa de rejeição precise ser ajustada, é possível reavaliar os intervalos de confiança, adaptando-os conforme as necessidades específicas de cada processo.

#### 5.4 PROJETO DO ARTEFATO

A fase de projeto do artefato teve o objetivo de definir e descrever o desenvolvimento do método para definição dos limites de aceitação para o processo de parafusamento e o levantamento de soluções que atendam ao problema levantado no DSR, foi proposto a seguinte metodologia detalhada, conforme ilustrado na FIGURA 18:

Figura 18 - Fluxograma do método proposto



FONTE: (o Autor, 2025)

O método proposto para avaliação do ângulo de aperto seguiu um processo estruturado em cinco etapas, garantindo padronização, controle estatístico e confiabilidade na definição dos limites de aceitação.

1. Definição dos parâmetros iniciais: Padronizou-se as configurações do dispositivo de aperto, mantendo estratégia, velocidades e pontos de transição, garantindo comparabilidade nos resultados.

2. Coleta de dados: Iniciou-se a produção com torque pré-definido e registrar os valores do ângulo de aperto. Para novos programas, foram necessárias pelo menos 30 medições; já para aplicação posterior do método dos QUANTIS, são exigidas pelo menos 1.000 medições.

3. Cálculo estatístico: Determinou-se média, desvio padrão,  $\pm 3$  SIGMA (ou 3 desvios padrão para limite inferior e superior) e quantis ( $X_{0,135\%}$  e  $X_{99,865\%}$ ), observou-se também a estabilidade do processo, a normalidade dos dados e suas variações dentro do processo.

4. Validação dos resultados: Analisou-se a dispersão gráfica dos dados, verificando tendências, estabilidade do processo e a taxa de rejeição, garantindo que os limites propostos sejam coerentes com a realidade da produção.

5. Definição dos limites de aceitação, conforme quantidade de dados disponíveis:

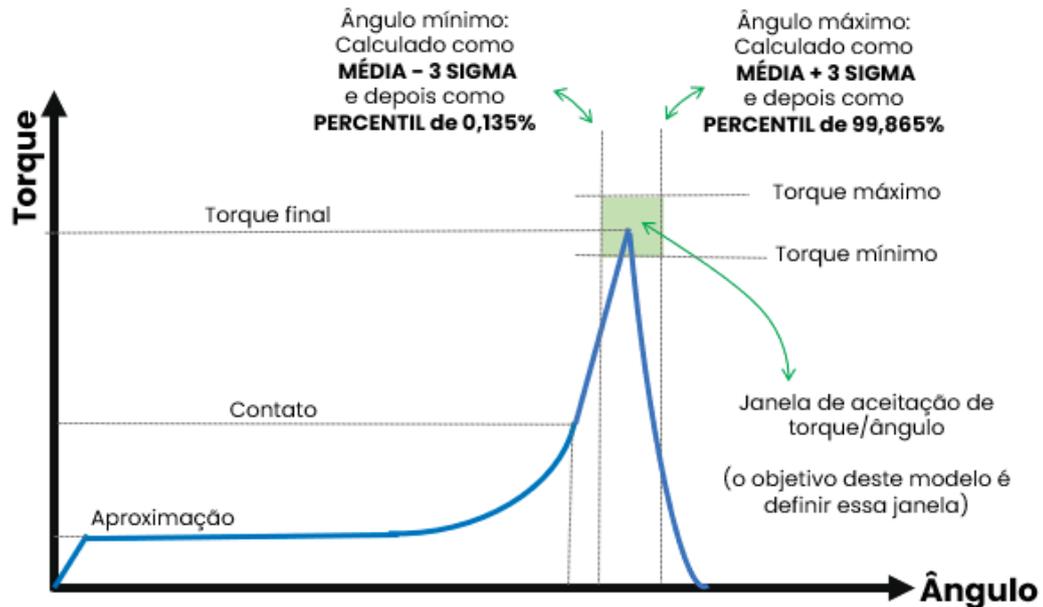
- Para o método  $\pm 3$  SIGMA (quando existiam poucos dados disponíveis): Limites definidos como média  $-3\sigma$  (inferior) e média  $+3\sigma$  (superior).
- Para o método dos QUANTIS (quando já existiam mais de 1.000 dados disponíveis e a distribuição de dados não era normal): Limites estabelecidos entre  $X_{0,135\%}$  (inferior) e  $X_{99,865\%}$  (superior).

Este procedimento permitiu a detecção de variações no processo, definindo valores calculados com base em um método estatístico para definição dos limites de aceitação para ângulos finais de aperto, aumentando a confiabilidade das conexões roscadas.

## 5.5 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS

A padronização dos parâmetros foi fundamental para obter dados consistentes e observar o comportamento das juntas nos testes de aperto de parafusos sempre utilizando o mesmo método de aperto. Essa padronização permitiu estabelecer valores consistentes de torque, velocidade e pontos para ter a mesma medição de ângulo de aperto, possibilitando uma análise precisa do desempenho do processo. Através da coleta e análise desses dados após as etapas de aperto padronizadas, tornou-se viável calcular a dispersão dos ângulos de aperto. Deve-se entender a variabilidade do processo de aperto, identificar padrões de comportamento e estabelecer faixas de aceitação, contribuindo para a melhoria contínua e garantindo a consistência na qualidade dos produtos e por ter sempre a mesma base, os dados de várias juntas são comparáveis. Para tal, para esse estudo estabeleceu-se os valores para os parâmetros iniciais de aperto, conforme indicado na FIGURA 19:

Figura 19 - Pontos de controle dos parâmetros para a estratégia de aperto



Fonte: O Autor (2025)

Foram considerados os seguintes parâmetros para padronizar o programa de aperto:

- Estratégia de torque controlado e ângulo monitorado.
- Duas velocidades, aproximação antes e após o “*torque de contato*”, ou seja, o momento em que o parafuso ou porca toca a superfície a ser apertada, sendo:
  - Velocidade de inicialização é uma velocidade rápida para alcançar o torque de contato, quanto maior o torque de contato, mais lenta deve ser a velocidade.
  - Velocidade final é uma velocidade baixa para alcançar o torque final dentro das tolerâncias, essa velocidade deve ser ajustada conforme o resultado da capacidade do processo.
- Início do ciclo é necessário para a detecção de uma força mínima, definido em até 5% valor do torque nominal. Depende do tamanho da ferramenta, é onde começamos a contar as voltas ou ângulo de aproximação.
- Objetivo inicial (“*torque de contato*”), ou seja, o primeiro valor do torque a ser alcançado (torque inicial), para garantir que todas as peças estão em contato, permite uma aproximação rápida do parafuso ou porca até que a cabeça se ajuste à superfície, velocidade deve ser controlada manualmente para evitar ultrapassar o

torque-alvo nesta fase (pode-se observar o ponto de parada no gráfico torque por ângulo ou torque por tempo), deve ser de 30% a 60% do valor do torque final, definido como ponto onde o parafuso ou porca já encostou na junta.

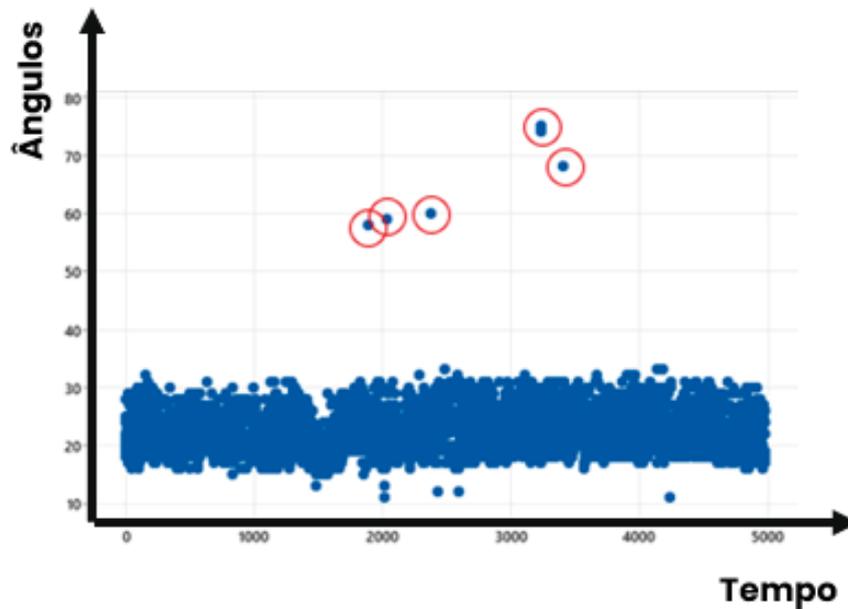
- Início da medição do ângulo final será no mesmo ponto do objetivo inicial ou “*torque de contato*”, o valor do torque que determina o início da contagem do ângulo da fase de aperto, sendo a parte de aperto final da junta.

- Torque final (Nm) é o requisito de desenho com tolerâncias (mínimo; máximo) em Nm (Newton por metro), com uma tolerância definida também em desenho ou especificação do produto.

## 5.6 O ÂNGULO DE APERTO NO PROCESSO DE PRODUÇÃO

Para este estudo, um total de 4.982 apertos foram realizados em uma estrutura metálica a 45 Nm, com controle de torque e monitoramento do ângulo. Os torques foram definidos, e os ângulos correspondentes foram plotados em um gráfico de dispersão. A análise desse gráfico revela claramente uma concentração de pontos de dados representando valores com resultado aprovados pelo controlador, com um agrupamento distinto em torno da média do ângulo de aperto. Além disso, o gráfico de dispersão destacou-se de forma eficaz a presença de valores atípicos, mostrados nos círculos vermelhos na FIGURA 20, que se desviam significativamente do intervalo normal. Essa visualização auxiliou na identificação de possíveis anomalias no processo de aperto, permitindo uma avaliação mais precisa da qualidade e consistência das conexões roscadas.

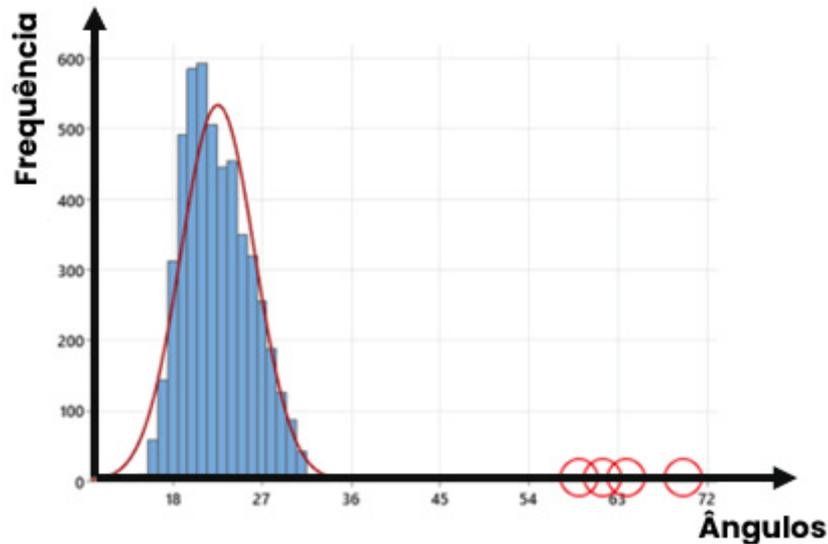
Figura 20 - Gráfico de dispersão dos ângulos medidos na produção em série.



FONTE: O Autor (2025)

A curva vermelha na FIGURA 21 representa a distribuição normal ideal. A dispersão da curva é determinada pelo desvio padrão, que mediu a variabilidade dos dados. Já os retângulos azuis são baseados na distribuição dos mesmos 4.982 resultados reais de aperto (45 Nm), obtidos por meio de um controlador de aperto que aplica torque e monitora o ângulo, onde o resultado plotado é o ângulo final. Neste exemplo, fica evidente que a maioria dos ângulos de aperto está no intervalo entre 13 e 33 graus. Qualquer resultado acima de 33 graus foi considerado anormal ou suspeito e poderia resultar em conexões problemáticas, conforme mostrado na FIGURA 20, eles não estão agrupados junto com os outros resultados. Os círculos vermelhos são os mesmos da FIGURA 20 e FIGURA 21 mostrando que estão completamente fora da curva vermelha e distantes dos retângulos azuis, sendo nomeados como VALORES ATÍPICOS ou "OUTLIERS".

Figura 21 - Histograma de ângulos de aperto e a curva gaussiana ideal



FONTE: O Autor (2025)

A visualização dos dados de ângulo foi feita por meio de um histograma, como mostrado na FIGURA 21. Um histograma é uma representação gráfica de dados numéricos, onde um gráfico de barras indica a frequência com que determinados valores ocorrem. Em um histograma de dados de ângulos de aperto, por exemplo, o eixo X mostra a faixa de valores de ângulo, enquanto o eixo Y indica a frequência com que cada valor foi registrado.

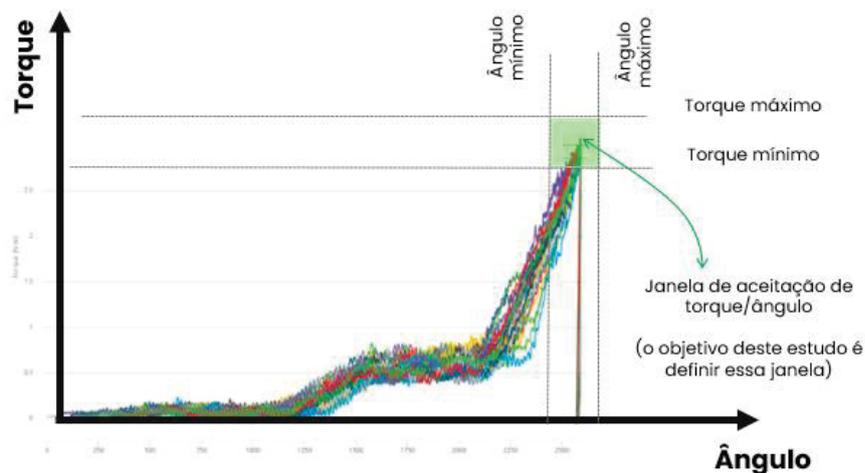
Conexões problemáticas podem ser causadas por diversos fatores, como parafusos/porcas não totalmente apertados, respingos de solda entre as cabeças dos parafusos/porcas e os componentes apertados, danos na rosca, entre outros. Todos esses fatores são refletidos na curva de aperto. Para garantir processos de aperto seguros e conexões bem-sucedidas, foi crucial rejeitar todos os resultados que estejam abaixo do limite inferior ou acima do limite superior do ângulo de aperto, pois podem representar riscos potenciais para o cliente.

## 5.7 DEFINIÇÃO DOS LIMITES DOS ÂNGULOS DE APERTO

O comportamento típico de uma junta durante o processo de aperto gerou um padrão previsível de curvas que representam a relação entre torque e ângulo de aperto. Essas curvas foram fundamentais para avaliar a conformidade de cada montagem com os padrões estabelecidos. Quando as montagens foram realizadas corretamente, sob condições ideais, suas curvas de torque e ângulo se sobrepuseram ou seguiam de perto um padrão comum, refletindo o comportamento esperado da junta. Qualquer desvio significativo deste padrão sugeriu uma anomalia no processo de aperto, como uma falha no material ou um erro na aplicação do torque, resultando em uma curva atípica. Portanto, a comparação das curvas individuais de montagem com o padrão de curvas estabelecido serviu como um meio eficaz de detectar valores atípicos e garantir a integridade e confiabilidade das conexões roscadas.

A FIGURA 22 demonstra que as 50 curvas consecutivas seguiam um padrão para a junta, ou seja, um caminho com pequenas variações, este método proposto envolveu definir limites de tolerância superior e inferior para o torque final e o valor do ângulo a partir de um torque limiar de encosto do fixador na peça.

Figura 22 - Representação de 50 curvas reais sobrepostas mostrando o comportamento da junta

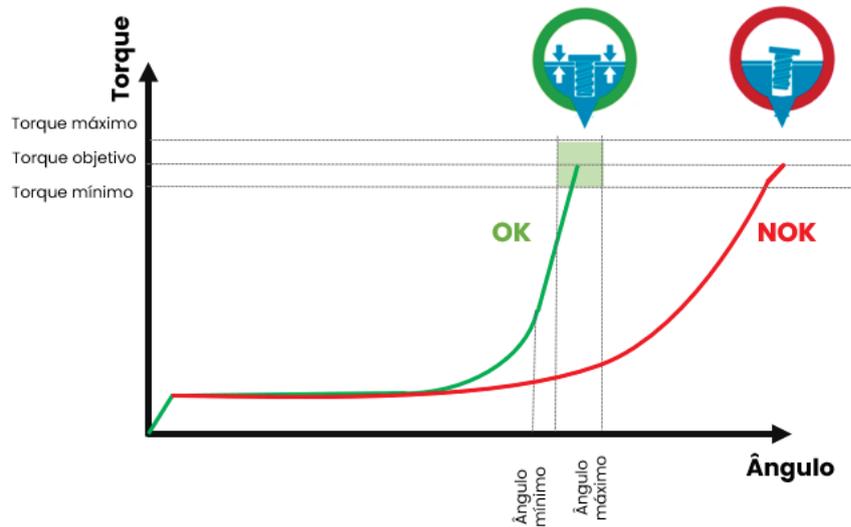


FONTE: O Autor (2025): coleta de dados no software TOOLSNET8 da Atlas Copco.

A ultrapassagem do limite superior do ângulo pode indicar parafusos ou porcas submetidos a estresse excessivo, enquanto o não atingimento do limite inferior do ângulo pode sinalizar fixação dupla ou desalinhamento, conforme

demonstrado na FIGURA 23, para o mesmo torque, temos diferentes ângulos, demonstrando um comportamento atípico da junta, que deve ser rejeitada.

Figura 23 - Ilustração de apertos com comportamentos diferentes e suas curvas perante a janela de aceitação



FONTE: Adaptado de Atlas Copco - Tecnologia de aperto.2022

Além disso, o exceder do limite superior de ângulo também pode revelar fixadores com rosca danificada, desalinhada, problemas com atrito ou dimensionais, essas capacidades de detecção garantem a integridade das conexões roscadas, reduzindo o risco de falhas e melhorando a segurança e a confiabilidade do produto.

## 5.8 RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS

O experimento realizado envolveu o monitoramento de 24 controladores de aperto distribuídos em quatro plantas industriais, resultando na coleta de 94.147 medições de torque e ângulo final de aperto. A partir dessa base de dados, foram calculados os limites de controle superior e inferior para o monitoramento do ângulo final, possibilitando um acompanhamento preciso da variabilidade do processo. A aplicação de métodos estatísticos avançados permitiu uma análise robusta, aprimorando a detecção de anomalias, a padronização dos parâmetros de aperto e a garantia da qualidade das conexões roscadas.

A comparação entre os métodos de controle estatístico demonstrou os benefícios específicos de cada abordagem. O método dos quantis apresentou

vantagens significativas para a análise de longo prazo, quando há uma grande quantidade de amostras disponíveis e maior variação entre lotes. Inicialmente, a aplicação do método tradicional de  $\pm 3$  SIGMA resultou em 828 rejeições, enquanto a adoção do método dos quantis reduziu esse número para 154, representando uma redução de 72% na quantidade de peças rejeitadas e a necessidade de retrabalho. Isso ocorreu porque os quantis são medidas estatísticas que dividem uma distribuição em intervalos definidos por percentuais, não exigindo a suposição de estabilidade ou normalidade da distribuição. Assim, os quantis são mais adequados para representar distribuições resultantes em processos reais, especialmente nos casos dos modelos nos quais há mudanças na localização (média) e/ou na dispersão ao longo do tempo. Portanto, enquanto o  $\pm 3$  SIGMA requer estabilidade do processo para ser interpretado com precisão, enquanto os quantis, permitem uma análise prática e flexível mesmo em processos instáveis ou com parâmetros variáveis ao longo do tempo.

Essa mudança nos limites proporcionou um controle mais eficiente da qualidade, garantindo que apenas conexões realmente problemáticas fossem identificadas e corrigidas, minimizando desperdícios. Dessa forma, o método dos quantis mostrou-se ideal para processos contínuos, onde não há normalidade na distribuição de dado e nos quais a análise estatística pode ser refinada ao longo do tempo com a alternância de lotes, operadores e outras variáveis produtivas ao longo do tempo.

Por outro lado, o método de  $\pm 3$  SIGMA demonstrou ser uma ferramenta para a adaptação imediata dos limites de aceitação em situações de mudança no processo, como a introdução de novos lotes de peças. Por exemplo, durante a execução do experimento, um lote atualizado de componentes foi recebido, apresentando um comportamento distinto das juntas em relação aos lotes anteriores, quando os limites de aceitação previamente estabelecidos foram aplicados, a taxa de rejeição foi de 12,8%, indicando um alto índice de peças rejeitadas, resultando em retrabalho e desperdício de material, devido ao fato do comportamento estabelecido por normal ser diferente do comportamento com o novo lote, mudando a curva de torque, embora com outro comportamento, as condições de aperto foram mantidas dentro do especificado, porém as peças foram rejeitadas pela sutil mudança na curva e conseqüentemente no ângulo final de aperto.

Diante desse desafio, foi aplicada a metodologia de  $\pm 3$  SIGMA para recalcular os limites de aceitação, com um lote de 30 peças, utilizando dados coletados diretamente do novo lote no próprio dia de produção. Esse ajuste estatisticamente fundamentado refletiu com precisão o comportamento real das peças recém-chegadas, reduzindo drasticamente a taxa de rejeição para 1,1%, levando a uma redução de 91% nos rejeitos no novo lote. Essa redução demonstrou que grande parte das peças inicialmente descartadas estava, na verdade, dentro dos padrões esperados para o novo lote, mas eram erroneamente rejeitadas devido aos limites anteriores, que não consideravam a variação natural das novas peças. Portanto, ajustar continuamente os parâmetros de controle é fundamental para garantir que a análise estatística acompanhe fielmente as variações reais do processo, assegurando eficiência e precisão no controle de qualidade.

Os resultados confirmam que ambos os métodos possuem aplicações estratégicas complementares, o método dos QUANTIS se mostrou mais eficaz para análises estatísticas em longo prazo, proporcionando um controle de qualidade contínuos ao longo do tempo, tomando em conta toda a variabilidade. Já o método de  $\pm 3$  SIGMA revelou-se adequado para ajustes imediatos em mudanças de engenharia e variações inesperadas na produção, garantindo uma resposta rápida para minimizar rejeições indevidas. Dessa forma, a implementação combinada dessas duas abordagens permite um controle estatístico adaptativo e eficiente, maximizando a qualidade das conexões roscadas e a produtividade do processo.

## 5.9 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Para melhorar a montagem de conexões parafusadas, este método iniciou-se com a coleta de dados históricos sobre montagens anteriores, incluindo valores de torque e ângulos de aperto, além de informações sobre as condições do processo. Posteriormente, realizou-se uma análise estatística detalhada para identificar padrões e correlações nos dados, permitindo compreender a relação entre torque e ângulo de aperto e a variabilidade do processo. Com base nessa análise, foram definidos limites de aceitação que refletem os padrões de qualidade baseados em evidências. O próximo passo foi o desenvolvimento de um sistema de avaliação capaz de aplicar tais limites em tempo real durante a montagem, fornecendo feedback imediato sobre a conformidade com os padrões de qualidade.

O comportamento típico de uma junta durante o processo de aperto gerou um padrão previsível de curvas representando a relação entre torque e ângulo de aperto. Essas curvas foram essenciais para avaliar a conformidade de cada montagem com os padrões estabelecidos. Quando as montagens foram realizadas corretamente, sob condições ideais, suas curvas de torque e ângulo se sobrepuseram ou seguiam de perto um padrão comum, refletindo o comportamento esperado da junta. Qualquer desvio significativo desse padrão sugeriu uma anomalia no processo de aperto, como uma falha no material ou um erro na aplicação do torque, resultando em uma curva atípica. Dessa forma, a comparação das curvas individuais de montagem com o padrão de curvas estabelecido serve como um meio eficaz de detectar valores atípicos e garantir a integridade e confiabilidade das conexões roscadas.

Demonstrou-se que as curvas seguiam um padrão para a junta, apresentando um caminho com pequenas variações. Esse método proposto envolveu definir limites de tolerância superior e inferior para o torque final e o valor do ângulo a partir de um torque limiar. Para o mesmo torque, apresentam-se diferentes ângulos, demonstrando um comportamento atípico da junta, que deve ser rejeitada ou considerada suspeita.

Além disso, exceder o limite superior de ângulo também pode revelar fixadores com rosca danificada, desalinhada, problemas com atrito ou dimensionais. Essas capacidades de detecção garantem a integridade das conexões roscadas, reduzindo o risco de falhas e melhorando a segurança e a confiabilidade do produto.

## 6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo desenvolver um método para avaliação e controle do processo de fixação de componentes roscados, com foco na segurança, confiabilidade e qualidade das junções parafusadas. A metodologia proposta incorporou a análise estatística dos parâmetros de torque e ângulo de aperto, permitindo a definição de limites de aceitação adequados para cada tipo de junta, reduzindo variabilidades e prevenindo falhas no processo de aperto.

A implementação deste método demonstrou que o monitoramento conjunto de torque e ângulo de aperto proporcionou um controle mais preciso da fixação, permitindo a detecção de anomalias e prevenindo defeitos. A abordagem adotada mostrou-se eficaz na minimização de retrabalhos, na redução de custos industriais e no aumento da confiabilidade dos produtos, tornando-se uma alternativa robusta para o setor industrial, especialmente na indústria automotiva, onde a qualidade e segurança são fundamentais. Os principais resultados alcançados pelo estudo incluem:

- Desenvolvimento de um método baseado em análise estatística: A aplicação de técnicas estatísticas permitiu definir limites confiáveis de aceitação do ângulo de aperto, reduzindo falhas e retrabalho nas linhas de produção.
- Validação da abordagem  $\pm 3$  Sigma e Quantis: O estudo confirmou que a metodologia  $\pm 3$  Sigma é eficaz para distribuições normais, enquanto a abordagem baseada em quantis se mostrou mais adequada para distribuições não normais, permitindo um ajuste mais preciso dos limites de controle.
- Implementação do Controle Estatístico do Processo (CEP): A adoção de técnicas de CEP permitiu um monitoramento contínuo da qualidade do aperto, garantindo maior estabilidade e previsibilidade do processo.
- Redução de falhas e aumento da confiabilidade: A definição de limites estatisticamente embasados permitiu identificar e rejeitar fixações fora dos padrões, garantindo maior segurança estrutural e durabilidade dos produtos.
- Contribuição para a melhoria dos processos industriais: O método proposto demonstrou potencial para ser amplamente aplicado na indústria, contribuindo para o aprimoramento da qualidade e eficiência produtiva.

Dessa forma, o estudo reforça a importância do monitoramento conjunto de torque e ângulo de aperto e propõe uma abordagem inovadora para garantir a qualidade e confiabilidade das junções parafusadas. A metodologia apresentada pode ser aplicada em diversos setores industriais, promovendo maior segurança e redução de falhas, contribuindo assim para a evolução dos processos de fixação de componentes roscados.

Por fim, este trabalho abriu caminho para futuras pesquisas, incluindo a aplicação da inteligência artificial para aperfeiçoar ainda mais a análise dos parâmetros de fixação e a implementação do método em diferentes condições operacionais. O aprimoramento contínuo do controle de fixação contribuirá significativamente para a segurança e a eficiência dos processos industriais no futuro.

## 6.1 INOVAÇÕES ENCONTRADAS NOS RESULTADOS

A principal inovação identificada nos resultados deste estudo foi o uso do ângulo de aperto como um indicador sensível da qualidade das conexões roscadas, através da definição de limites de aceitação por meio de um método estatístico que pode ser aplicado de forma padronizada. Embora o torque de aperto seja amplamente utilizado na indústria, a inclusão da análise do ângulo de aperto calculado, utilizando essas duas variáveis em conjunto, proporciona uma avaliação mais abrangente e precisa, permitindo identificar o comportamento da junta e possíveis problemas que poderiam passar despercebidos ao considerar apenas o torque.

## 6.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

A análise estatística depende diretamente da qualidade e quantidade dos dados coletados. Portanto, a disponibilidade de um volume adequado de dados confiáveis é essencial para a eficácia do método proposto. Além disso, o método pode gerar um aumento no número de rejeições, uma vez que leva em consideração comportamentos anômalos das curvas. No entanto, uma análise detalhada caso a caso pode ser realizada para avaliar a possibilidade de expandir a janela de aceitação sem comprometer a qualidade e a segurança das fixações.

## 7 CONSIDERAÇÃO FINAIS DO MESTRADO

O presente trabalho, teve como objetivo explorar e contribuir para o campo do controle de processo de parafusamento, com foco na definição de um método inovador, qualitativo e quantitativo, baseado no controle de torque e no monitoramento do ângulo de aperto. Ao longo desta pesquisa, foi possível identificar lacunas significativas na literatura atual, evidenciando a carência de métodos abrangentes que considerem a estatística como ferramenta fundamental na definição de limites aceitáveis de ângulo.

A revisão crítica da literatura revelou que as práticas atuais de controle de processo de parafusamento muitas vezes carecem de abordagens estatísticas mais robustas. A proposta de integrar métodos estatísticos para definir limites de aceitação de ângulo, representa uma inovação significativa e uma resposta direta à lacuna identificada.

Ao adotar uma abordagem estatística, nosso método busca não apenas monitorar o processo de parafusamento em tempo real, mas também estabelecer limites estatisticamente definidos para o ângulo de aperto. Essa abordagem, baseada em dados históricos, proporciona uma compreensão mais profunda das variações normais e anormais no processo, permitindo a identificação precoce de problemas potenciais. Com ajuda da ISO 22514-2:2017 foi possível identificar uma solução para distribuição de dados não normais, como se demonstrou o ângulo final de aperto, que é dependente de vários fatores que variaram com o tempo.

As implicações práticas dessa pesquisa são vastas, particularmente no contexto industrial, onde a segurança e a confiabilidade das conexões parafusadas são críticas. A implementação bem-sucedida desse método pode levar a processos de parafusamento mais eficientes, evitando falhas prematuras, garantindo a integridade estrutural e, por fim, promovendo a segurança do produto.

Como sugestões para futuras pesquisas, recomenda-se a expansão do método proposto para diferentes contextos industriais e a incorporação de tecnologias emergentes, como inteligência artificial e aprendizado de máquina, para aprimorar ainda mais a capacidade de prever e prevenir problemas no processo de parafusamento.

## REFERÊNCIAS

ARONSON, R. M.; BHATIA, A.; JIA, Z.; GUILLAME-BERT, M.; BOURNE, D.; DUBRAWSKI, A.; MASO, M. T. Data-Driven Classification of Screwdriving Operations. Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 2017.

ATLAS COPCO. Seminar Series: Torque Theory. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/en-us/itba/local/web-courses/tightening-technique>. Acesso em: 2025.

BICKFORD, J. H. Advances in bolting technology. Nuclear Engineering and Design, v. 90, p. 307-315, 1985.

BICKFORD, J. H. Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

BICKFORD, J. H.; NASSAR, S. Handbook of bolts and bolted joints. 1. ed. Nova Iorque: Marcel Dekker, Inc., 1998.

CORT, J.; EATON, L.; SMETS, M.; STEPHENS, A.; MALONE, G.; PORTO, R. A comparison of the physical demands associated with various right-angle direct-current power tools. Applied Ergonomics, Elsevier: Science Direct, 2021.

DIRECTIVE 2001/95/EC. Directive of The European Parliament And Of The Council of 3 December 2001 on General Product Safety.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES, J. A. V. Design Science Research. Springer, Cham, 2015.

FERREIRA, Jeferson. Treinamento em Aplicação de Fixadores – Área Automotiva. São Paulo, Brasil, 2018.

FIGUEIREDO, T. G. Metodologia Seis Sigma como estratégia para redução de custos: Estudo de caso sobre a redução de consumo de óleo sintético na operação de usinagem. Departamento de Engenharia de Produção. Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, 2006.

FINAMORE JUNIOR, A. Qualidade e produtividade na indústria. São Paulo: Pearson, 2008.

FRIEDRICH, C.; HUBBERTZ, H. Friction behavior and preload relaxation of fastening systems with composite structures. Composite Structures, Elsevier: Science Direct, 2013.

HERMANSSON, T. O. Quality assured tightening of screw joints. Journal of Mechanical Engineering Science, 2015.

HILSDORF, W. C. A Estratégia Seis Sigma para Melhoria da qualidade: uma análise crítica das métricas utilizadas. *Revista Pesquisa e Tecnologia FEI*, São Paulo, v. 15, n. 23, p. 25-39, outubro de 2002.

HOSOYA, N.; HOSOKAWA, T.; KAJIWARA, I. et al. Evaluation of the Clamping Force of Bolted Joints Using Local Mode Characteristics of a Bolt Head. *J. Nondestruct Eval*, v. 37, p. 75, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0528-7>.

INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TASK FORCE (IATF). IATF 16949: Automotive Quality Management System Standard. 1. ed. 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/IEC 17025: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Genebra: ISO, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5479: Statistical interpretation of data — Tests for departure from the normal distribution Genebra: ISO, 1997

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9001: Quality Management Systems - Requirements. 5. ed. Genebra: ISO, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 22514-2: Statistical methods in process management - Capability and performance - Part 2: Process capability and performance of time-dependent process models. Genebra: ISO, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5393: Rotary tools for threaded fasteners - Performance test method. Genebra: ISO, 1994.

KLINGAJAY, M.; GIANNOCARO, N. I. The Automated Threaded Fastening Based on On-line Identification. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier: Science Direct, 2004.

LEE, N. K. S.; AN, Y.; TSUNG, F. Studying effects of screw-fastening process on assembly accuracy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 25, p. 493-499, 2004.

MATLIN, M. M.; KAZANKIN, V. A.; KAZANKINA, E. N. Methods of increasing the efficiency of tightening monitoring of threaded connections (survey of published studies). *Chemical and Petroleum Engineering*, v. 56, n. 7-8, 2020.

MEINERS, M.; MAYR, A.; FRANKE, J. Process curve analysis with machine learning on the example of screw fastening and press-in processes. *Procedia CIRP*, Elsevier: Science Direct, 2020.

MILANI, A. A.; HAMED, M. A Knowledge-based System for Selecting Fastening Tools in Automobile Assembly Lines. *Proceedings of ICIT 2008 - Industrial Technology*. Piscataway: IEEE, p. 1-7, 2008.

MONTGOMERY, D. C. Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade. Tradução e revisão técnica de Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

NAM, J.; KIM, D.; OH, J. H. Investigation of the fastening behavior of self-tapping plastic joints with various supporting ribs. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier: Science Direct, 2022.

NASSAR, S. A.; YANG, X.; GANESHMUTHY, S. Analysis on Yield Tightening of Threaded Fasteners. SAE International, University of British Columbia, 2008.

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2013.

PFEIFFER, K.; ESCANDE, A.; KHEDDAR, A. Nut Fastening with a Humanoid Robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017.

STEINGRABER, C.; DEVRIES, D.; EATON, L.; SMETS, M.; STEPHENS, A.; MALONE, G.; PORTO, R.; CORT, J. Physical demands associated with right-angle direct-current power-tools: An evaluation of current technology. *Applied Ergonomics*, Elsevier: Science Direct, 2021.

TIAN, Y.; QIAN, H.; CAO, Z.; ZHANG, D.; JIANG, D. Identification of Pre-Tightening Torque Dependent Parameters for Empirical Modeling of Bolted Joints. *Applied Sciences*, v. 11, p. 9134, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199134>.

VDI/VDE. VDI/VDE 2645 Part 2: Capability test for fastening technology, Machine capability test – MCT. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2014.

VDI/VDE. VDI/VDE 2862 Part 1: Minimum restrictions for application of fastening systems and tools - Applications in the automotive industry. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2012.

VDI/VDE. VDI/VDE-MT 2637 Part 1: Qualification in fastening technology - Appropriate qualification for executives and employees. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2018.