

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

WAGNER AUGUSTO FERREIRA PEREIRA

**QUEBRA DE PARADIGMA: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE UM
PARAFUSO COM ADESIVO MICROENCAPSULADO PELA APLICAÇÃO DA
ESTRATÉGIA DE APERTO POR TORQUE E ÂNGULO DE
DESLOCAMENTO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

RIO GRANDE, RS

2024

WAGNER AUGUSTO FERREIRA PEREIRA

**QUEBRA DE PARADIGMA: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE UM
PARAFUSO COM ADESIVO MICROENCAPSULADO PELA APLICAÇÃO DA
ESTRATÉGIA DE APERTO POR TORQUE E ÂNGULO DE
DESLOCAMENTO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Braz Medeiros

Coorientador: Dr. Roberto Garcia

RIO GRANDE, RS

2024

Ficha Catalográfica

P436q Pereira, Wagner Augusto Ferreira.
 Quebra de paradigma: análise da substituição de um parafuso com adesivo microencapsulado pela aplicação da estratégia de aperto por torque e ângulo de deslocamento / Wagner Augusto Ferreira Pereira. – 2024.
 87 f.

 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2024.
 Orientador: Dr. Jorge Luiz Braz Medeiros.
 Coorientador: Dr. Roberto Garcia.

 1. Parafuso 2. Coeficiente de atrito 3. Elementos de fixação
 4. Processo de aperto 5. Adesivo microencapsulados 6. Torque alvo
 7. Torque resultante 8 Força tensora I. Medeiros, Jorge Luiz Braz
 II. Garcia, Roberto III. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPGEMec



Ata nº 20/2024 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dez dias do mês de Dezembro de dois mil e vinte e quatro, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às dez horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **WAGNER AUGUSTO FERREIRA PEREIRA**, nacionalidade brasileiro, dissertação ligada a linha de pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais, com o seguinte título: **QUEBRA DE PARADIGMA: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE UM PARAFUSO COM ADESIVO MICROENCAPSULADO PELA APLICAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE APERTO POR TORQUE E ÂNGULO DE DESLOCAMENTO**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Jorge Luis Braz Medeiros, Luciano Volcanoglo Biehl e os convidados Cássio Aurélio Suski e Elton Gimenez Rossini sob a presidência do Professor Jorge Luis Braz Medeiros. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Jorge Luis Braz Medeiros: Aprovado
2. Luciano Volcanoglo Biehl: Aprovado
3. Cássio Aurélio Suski: Aprovado
4. Elton Gimenez Rossini: Aprovado

Foi concedido um prazo de 60 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:



Documento assinado digitalmente
JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS
Data: 10/12/2024 14:16:42-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

1. _____
CPF: 588.871.210-87
Documento assinado digitalmente
 LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL
Data: 11/12/2024 10:50:40-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>
2. _____
CPF: 515.195.100-00
Documento assinado digitalmente
 CASSIO AURELIO SUSKI
Data: 10/12/2024 16:23:31-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>
3. _____
CPF: 020.400.049-12
Documento assinado digitalmente
 ELTON GIMENEZ ROSSINI
Data: 10/12/2024 15:59:57-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>
4. _____
CPF: 477.364.370-68
Documento assinado digitalmente
 WAGNER AUGUSTO FERREIRA PEREIRA
Data: 11/12/2024 16:35:09-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Wagner Augusto Ferreira Pereira: _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, João Carlos Tavares Pereira e Maria de Lourdes Ferreira Pereira, por serem o meu suporte e a minha inspiração, tanto profissional como pessoal.

Agradeço à minha irmã, Mariana Louise Ferreira Pereira, por todo apoio e suporte ao longo do mestrado, e também à Agnes pelo companheirismo ao longo da realização deste trabalho;

Agradeço à minha noiva, Thauany da Silveira Brasil, que sempre me ajuda a ser uma melhor versão de mim mesmo, e também por todo apoio e incentivo ao longo de todo esse processo;

Agradeço aos professores Dr. Luciano Vocanoglo Biehl e Dr. Jorge Luis Braz Medeiros, por todo o apoio ao longo do Mestrado;

Agradeço ao meu coorientador, Dr. Roberto Garcia, pelo apoio, grande incentivo e suporte para a realização do mestrado, pelas lições aprendidas e, principalmente pelos conselhos e sugestões para a realização do presente trabalho;

Agradeço a todos os colegas e amigos da AGCO do Road Map Torque Team: Gilmar Hollerweger, Daniel Cantarelli, Eduardo Ferreira, Adair Cunha, Silvano Pessetto, Marcos Rech, Eduardo Froes, Gilson de Souza, Diogo Torresini e Marcos dos Santos;

Agradeço aos colegas e amigos do TMC da Atlas: Luís Martins, Wesley Zanini, Marcio Zonta e Raphael Pereira;

Agradeço à METALTORK, que foi essencial para a realização dos testes que tornaram possível a realização desse trabalho;

Agradeço à AGCO, por todos esses anos em que eu tive a oportunidade e o privilégio de aprender com profissionais extremamente capacitados e qualificados;

Agradeço à FURG e ao CAPES;

Obrigado a todos por contribuírem para o meu desenvolvimento e aprendizado, seja através de ensinamentos e palavras de apoio. Tenho certeza de que não conseguiria sem a ajuda e o auxílio de todos.

RESUMO

A definição da estratégia de aperto somada à utilização de um parafuso com coeficiente de atrito controlado, elimina a necessidade de meios auxiliares desnecessários que garantem a fixação durante o aperto, como por exemplo, os adesivos microencapsulados. Esse método de travamento, que está presente na rosca do parafuso por meio de agentes químicos, com adesividade anaeróbica, dentro de microcápsulas, são cercadas por uma fina camada de polímero, que ao serem aparafusadas, liberam os citados componentes líquidos de vedação e previnem o afrouxamento dos parafusos devido às vibrações; no entanto, esse método apresenta desvantagens durante a aplicação do torque em uma junta aparafusada. A trava química cria regiões de instabilidade durante o aperto, resultando em pontos excessivamente apertados, enquanto outros apresentam uma força de até duas vezes menor. Esse comportamento é atribuído a instabilidade dos valores de coeficiente de atrito (cabeça, rosca e total) do parafuso com adesivo, e, somada à definição incorreta da estratégia de aperto, pode levar à soltura dos parafusos, gerando um “torque falso”, ou seja, quando é aplicado um torque, dentro dos limites de especificação sem gerar a respectiva força tensora. O estudo da remoção do adesivo microencapsulado somente foi possível de ser realizado para essa aplicação devido ao elevado comprimento de aperto (L_K) do parafuso. Para isso, foi necessário redefinir o conceito de torque por meio da análise da proposta de substituição por um novo parafuso, com revestimento uniforme, que apresenta valores de coeficiente de atrito controlados através da adoção de uma estratégia de aperto por pré-torque e ângulo de deslocamento, com um consequente torque resultante, e não mais torque alvo, devido à otimização das propriedades mecânicas e tribológicas, tornando o processo mais eficiente, obtendo de uma força de união constante e superior, com um valor de torque menor.

Palavras-chave: parafuso, coeficiente de atrito, elementos de fixação, processo de aperto, adesivo microencapsulados, torque alvo, torque resultante, força tensora.

ABSTRACT

The definition of the tightening strategy, combined with the use of a screw with a controlled coefficient of friction, eliminates the need for unnecessary auxiliary means that ensure fixation during tightening, such as microencapsulated adhesives. This locking method, which is present in the screw's threads through chemical agents with specific anaerobic adhesiveness inside microcapsules, surrounded by a thin polymer layer, releases these sealing liquid components when tightened and prevents screw loosening due to vibrations. However, this method presents disadvantages during the application of torque in a bolted joint. The chemical locking creates regions of instability during tightening, resulting in some points being overly tightened, while others exhibit a force up to twice as low. This behavior is attributed to the instability of the friction coefficient values (head, thread, and total) of the screw with adhesive, which, combined with the incorrect definition of the tightening strategy, can lead to screw loosening, generating a "false torque," meaning torque is applied within the specification limits without generating the corresponding tensile force. The study of the removal of the microencapsulated adhesive was possible only for this application due to the elevated tightening length (LK) of the screw. To achieve this, it was necessary to redefine the torque concept through the analysis of a proposal to replace the screw with a uniform coating, which presents controlled friction coefficient values through the adoption of a tightening strategy based on pre-torque and displacement angle, with a resulting torque, rather than a target torque. This approach optimizes the mechanical and tribological properties, making the process more efficient, achieving a constant and higher clamping force with a lower torque value.

Keywords: screw, friction coefficients, fasteners, tightening process, microencapsulated adhesive, torque target, resulting torque, clamping load, tightening force.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de juntas aparafusadas	17
Figura 2 – Intervalos de limites de resistência e dureza.....	18
Figura 3 – Acabamento superficial de parafusos	19
Figura 4 – Tipos de acabamento superficiais	20
Figura 5 – Parafusos com adesivos microencapsulados	21
Figura 6 – Contato entre as roscas do parafuso e da contrapeça.....	22
Figura 7 – Diferentes valores de L_k	23
Figura 8 – Comportamento (elástico) do parafuso e contrapeça durante o torque	26
Figura 9 – Janela de torque.....	27
Figura 10 – Dispersão de torque	27
Figura 11 – Eficiência do parafuso	30
Figura 12 - Limites de coeficiente de atrito de parafusos	31
Figura 13 – Dispersão da força de montagem	31
Figura 14 – Curva de torque residual	34
Figura 15 – Software de torque residual	35
Figura 16 – Propriedades do parafuso	36
Figura 17 – Método dos mínimos quadrados	37
Figura 18 - Estratégia de aperto por torque.....	40
Figura 19 - Aperto por torque e monitoramento de ângulo.....	40
Figura 20 - Aperto por torque ângulo de deslocamento	41
Figura 21 – Componentes do diferencial.....	42
Figura 22 – Metodologia.....	43
Figura 23 – Parafuso com adesivo e proposto	44
Figura 24 – Relação torque e força	45
Figura 25 – Gama: Método dos mínimos quadrados	46
Figura 26 – Beta: Método dos mínimos quadrados.....	46
Figura 27 – Segmentação do processo de aperto.....	47
Figura 28 - Experimentos do parafuso com adesivo microencapsulado	49
Figura 29 – Análise dos dados dos experimentos.....	49
Figura 30 – Curva de aperto <i>Toolsnet</i>	51

Figura 31 – Histograma de torque 1 ano de produção do parafuso com adesivo	52
Figura 32 – Histograma de ângulo de aperto: Janela atual de aprovação	53
Figura 33 – Histograma de gama de aperto: Janela atual de aprovação	54
Figura 34 – Reprovações da linha de produção	54
Figura 35: Relação Torque e Força – Parafuso Proposto	56
Figura 36: Relação Torque e Força – Parafuso com adesivo	57
Figura 37 – Beta: Parafuso com adesivo	57
Figura 38: Ensaio DTT – Beta: Amostra 2: Parafuso Proposto	58
Figura 39 – Dados de capacidade de geração de força (beta)	59
Figura 40 – Gama: Parafuso com adesivo	59
Figura 41 – Gama: Parafuso proposto	60
Figura 42 – Transformação de torque em ângulo de aperto (Rate)	60
Figura 43 – Dados de coeficiente de atrito de cabeça	61
Figura 44 – Dados de coeficiente de atrito de rosca	62
Figura 45– Dados da eficiência do parafuso	62
Figura 46 - Dados de coeficiente de atrito dos parafusos	63
Figura 47 – Dispersão de torque e ângulo do parafuso com adesivo	66
Figura 48 – Protótipo: Curva de aperto parafuso com adesivo	67
Figura 49 – Dispersão de força: Parafuso adesivo	68
Figura 50– Protótipo 1: Valores de torque e ângulo de aperto	69
Figura 51 – Protótipo 1: Curva de aperto parafuso proposto	70
Figura 52 – Protótipo 1 : Dispersão de força: Parafuso proposto 1	70
Figura 53 – Dispersão de torque e ângulo do parafuso proposto 2.....	71
Figura 54 – Protótipo 2: Curva de aperto parafuso proposto 2.....	71
Figura 55 – Protótipo 2: Dispersão de força do parafuso proposto	72
Figura 56 – Protótipo 1: Histograma de força parafuso proposto	73
Figura 57 – Protótipo 2: Histograma de força parafuso proposto	74
Figura 58 – Comparação gama dos protótipos	75
Figura 59 – Curva de torque estático: Protótipo com adesivo	75
Figura 60 – Curva de torque estático: Parafuso proposto	76
Figura 61 – Torque estático dos protótipos	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de fator de torque em função dos revestimentos	25
Tabela 2 – Dados dos parafusos analisados.....	44
Tabela 3 – Dados de aperto	48
Tabela 4 – Dados da ferramenta de aperto.....	48
Tabela 5 – Valores calculados do ensaio de DTT	64

LISTA DE ABREVIATURAS

CTF – Centro Tecnológico de Fixação
DTT – Determinação Torque Tensão
DIN – *Deutsches Institut für Normung*
DTT – Determinador de Torque Tensão
HRC - *Hardness Rockwell C*
IFI – *Industrial Fasteners Institute*
ISO - *International Organization for Standardization*
MMQ – Método dos Mínimos Quadrados
MSDS - *Material Safety Data Sheet*
PDCA – Plan, Do, Check, Act
TA – Torque Alvo
TMA – Torque de Monitoramento do Ângulo
TR – Torque Resultante
rpm – Rotações por minuto
VDA – *Verband der Automobilindustrie*
VDI – *Verein Deutscher Ingenieure*

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do parafuso	mm^2
D	Diâmetro nominal do parafuso	mm
E	Módulo de Elasticidade	MPa
F	Força	kN
M_A	Momento de aperto	Nm
L	Comprimento	mm
L_K	Comprimento de aperto	mm
P	Passo	mm
K	Fator K	adm
V	Velocidade	rpm
W	Trabalho	J
α	Ângulo	grau
β	Gradiente de força	kN/grau
∂_p	Resiliência do parafuso	mm/N
γ	Gradiente de torque	Nm/grau
η	Eficiência	adm
μ_g	Coeficiente de atrito de rosca	adm
μ_{GES}	Coeficiente de atrito total	adm
μ_k	Coeficiente de atrito de cabeça	adm
∂_s	Resiliência da contrapeça	mm/N
∂_p	Resiliência do parafuso	mm/N

SUMÁRIO

Justificativa do Tema.....	14
Objetivo geral	15
Objetivos específicos	15
1 Referencial teórico	16
1.1 Juntas aparafusadas	16
1.2 Parafusos e as suas aplicações.....	17
1.3 Acabamento superficial dos parafusos.....	19
1.4 Adesivos microencapsulados.....	20
1.5 Comprimento de aperto.....	23
1.6 Torque e sua importância.....	24
1.7 Coeficiente de atrito em parafusos.....	26
1.8 Ângulo de aperto	32
1.9 Resiliência e suas consequências	32
1.10Estratégia de aperto por torque e ângulo	33
1.11Região elástica, elastoplástica e plástica	36
1.12Método dos mínimos quadrados	37
1.13Estratégia de aperto	39
1.14Diferencial automotivo.....	41
2 Metodologia.....	43
2.1 Definição da nova estratégia de aperto.....	44
3 Resultados e discussões.....	51
3.1 Resultados dos ensaios de determinador torque tensão	56
3.2 Nova estratégia de aperto	64
3.3 Ensaios dos protótipos	65
3.4 Comparação entre os protótipos	72
3. 5 Resultado do torque estático dos protótipos	75
4 Conclusões	79
5 Trabalhos futuros	81
6 Referências	82
7 Apêndice I – Curvas do ensaio determinador torque tensão.....	86

JUSTIFICATIVA DO TEMA

Em juntas aparafusadas, a falha catastrófica de componentes mecânicos pode ocorrer devido a soltura dos parafusos, ocasionada pela incorreta aplicação do aperto, através da geração de um torque falso, ou seja, quando é aplicado um valor dentro do intervalo de torque especificado, principalmente por tabelas de torque, sem a geração da respectiva força tensora de união. Esse efeito pode ocorrer porque um grande percentual do torque aplicado é utilizado apenas para superar as forças de atrito envolvidas, com uma pequena parcela dessa energia sendo usada para gerar a união da junta aparafusada. Diversos fatores contribuem negativamente para o comportamento variável da força tensora em processos de aperto, como a falta do controle do coeficiente de atrito do parafuso e a incorreta definição da estratégia de aplicação do torque. O processo de modernização na indústria sempre encontra grandes resistências, especialmente quando provenientes de aplicações menos evidentes, surgindo os mesmos questionamentos, como “sempre foi assim”, ou “para que mexer nisso se nunca deu problema”. Esse pensamento acaba gerando a perpetuação de conceitos que nunca tiveram a oportunidade de serem revistados e melhorados, o que acaba propiciando a reprodução de conceitos em aplicações semelhantes, sem o devido estudo prévio para saber se realmente podemos replicá-los. A aplicação analisada no presente trabalho utiliza 18 parafusos com adesivos microencapsulados na fixação da coroa de um diferencial, localizado no eixo traseiro de um trator. Existem inúmeras considerações sobre suas causas e efeitos, que ainda não foram completamente estudadas, resultando em uma grande falta de consenso no setor industrial de manufatura sobre o seu conceito principalmente envolvendo a utilização de travas químicas. A perda de pré-carga devido ao “self-loosening” (autoafrouxamento) continua sendo um dos temas mais estudados em relação a elementos de fixação roscados. Fundamentalmente, a aplicação do adesivo é mandatória, quando o comprimento não engajado do parafuso é muito pequeno. No entanto, esse acaba sendo um dos diversos conceitos que acaba se estendendo para diversas soluções de aperto devido a propagação de conceitos defasados em juntas aparafusadas, não atendendo apenas ao critério de engajamento, L_k , mas que, por muitas vezes são replicadas em juntas aparafusadas atendendo apenas a

criticidade. Existem algumas soluções que podem ser adotadas para auxiliar na prevenção do afrouxamento, por meio da modernização do processo de aperto, através da análise da real utilização do adesivo em parafusos, como: aumento da força de união, substituição por coeficiente de atrito constante, ou alteração do processo de aperto para um com maior controle de torque-ângulo.

OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo analisar a substituição do parafuso com adesivo microencapsulado através da implementação por parafuso com coeficiente de atrito controlado e da aplicação da estratégia de aperto por torque e ângulo de deslocamento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Avaliar a necessidade da utilização do adesivo microencapsulado nos parafusos na aplicação específica da montagem da coroa do diferencial de um trator, por meio da implementação de uma força tensora constante e confiável;
- 2) Propor a substituição do parafuso com coeficiente de atrito uniforme, por meio dos ensaios de determinação de torque tensão;
- 3) Comparar os dados de coeficiente de atrito dos parafusos com e sem adesivo, analisando a influência da aplicação do torque (alvo) em juntas aparafusadas e definir uma estratégia de torque (resultante) com pré-torque e ângulo de deslocamento;
- 4) Melhorar o produto e o processo com redução de custo, avaliando os benefícios de se ter o conhecimento das principais variáveis de juntas aparafusadas: Elemento de fixação, ferramenta, estratégia de aperto e força de união.

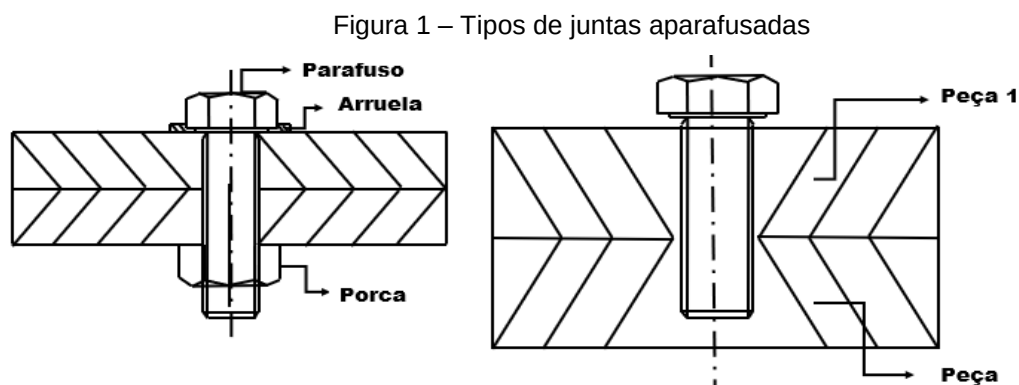
1 REFERENCIAL TEÓRICO

Os parafusos são suscetíveis a soltura após a sua montagem, principalmente, quando são submetidos a diversas solicitações como vibrações, cargas térmicas alternadas e impactos externos. No entanto, também existem diversos fatores aos quais prejudicam a qualidade da união aparafusada, principalmente a forma como foi realizado o aperto. Um dos principais motivos de ocorrer tal soltura está relacionado à montagem e a definição incorreta da estratégia de aperto, aumentando as chances de a ferramenta aplicar um torque dentro dos limites especificados por tabelas, mas que na prática não são transformados em força de união. No momento da aplicação do torque, ocorre uma grande perda de energia, sendo apenas uma pequena parcela transformada em trabalho útil, em função da dissipação de energia devido ao atrito nas roscas e na cabeça do parafuso. Por causa dessa dispersão, é mandatório o conhecimento das propriedades mecânicas e tribológicas de um parafuso. A definição de uma estratégia de aperto correta torna mais eficiente a utilização destas propriedades, porque garante uma força de união constante e independentemente das variações encontradas, eliminando a possibilidade de torque falso, fornecendo estabilidade, segurança, qualidade ao processo e robustez do produto, mas para isso deve-se ter controle dos coeficientes de atrito dos parafusos, pois são variáveis fundamentais na relação entre torque e força, e o seu controle reflete diretamente na qualidade do aperto.

1.1 JUNTAS APARAFUSADAS

A união de peças desempenha um papel fundamental em diversos processos de manufatura, fabricação e construção, sendo essencial para a garantia da integridade das estruturas envolvidas. Sua união pode ser realizada de dois modos: móvel ou permanente. No primeiro caso, os elementos de fixação (como, por exemplo porcas e parafusos), podem ser retirados sem causar quaisquer danos às peças envolvidas. No segundo método, uma vez instalados, os elementos de fixação (um exemplo típico é o rebite), não podem ser retirados e reaproveitados. Existem diversos métodos de se realizar essa união, podendo

ser soldadas, coladas, rebitadas, encaixadas ou aparafusadas. As juntas aparafusadas, por sua vez, apresentam rapidez e facilidade de montagem, além de acesso rápido para a manutenção de componentes, caso seja necessário. Na figura 1, mostra-se as juntas podem ser unidas por parafusos, apresentando furos passantes ou não passantes.



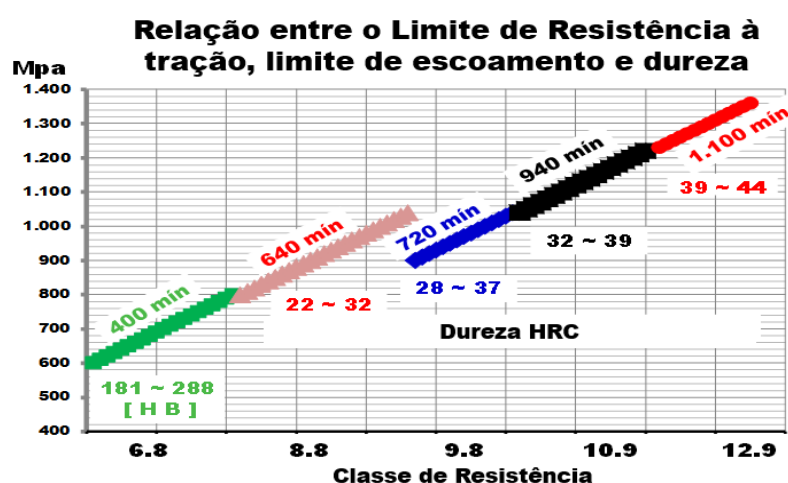
Fonte: Próprio Autor

1.2 PARAFUSOS E AS SUAS APLICAÇÕES

O parafuso é um dos elementos de fixação mais populares, devido à sua enorme flexibilidade e facilidade de utilização podendo ser encontrado nas mais diversas aplicações do nosso cotidiano. Essa popularização faz com que existam conceitos defasados, que envolvem o processo de aperto. Pensamentos como: “Parafuso é tudo igual” ou de “é apenas um parafuso” são conceitos, que estão infelizmente enraizados pelo senso comum, e devem ser revistos para que seja viável modernizar os processos de aplicação de torque para extrair a máxima capacidade de geração de força do parafuso. Em uma junta aparafusada, o parafuso desempenha um papel fundamental sendo um fusível do sistema, ou seja, em caso da aplicação incorreta do torque no momento da união é ele que deve se romper, de forma a preservar a contrapeça. De acordo com a norma ISO 898 – parte 1, a principal norma aplicável para as propriedades mecânicas de fixadores roscados normalizados, existem intervalos de requisitos estabelecidos que especificam e definem a composição química e as suas propriedades (resistências mecânicas e dureza). Esses intervalos podem variar dentro do mesmo lote de parafusos afetando na qualidade do torque aplicado. Os

parafusos métricos são classificados através da sua classe de resistência, e essa informação é indicada por uma marcação na cabeça do parafuso através de dois números separados por um ponto, sendo o primeiro número à esquerda multiplicado por 100 indicando o valor da resistência à tração, enquanto o segundo número à direita, multiplicado pelo valor da resistência a tração representa o limite de escoamento. Para parafusos de classe de resistência 8.8, 10.9 e 12.9, o seu material deve ser de médio carbono ou aço ligado, e necessariamente devem receber tratamento térmico por meio do aquecimento e resfriamento provocando transformações alotrópicas acarretando na necessidade da realização de revenimento para o alívio das tensões residuais, evitando que sejam agregadas propriedades indesejadas ao parafuso. A utilização de normas abrangentes e de baixo controle da qualidade desses elementos de fixação possibilitam que existam valores nos extremos das especificações, contribuindo para as variações em processos de aperto. Na figura 2, estão demonstrados visualmente a dispersão dos valores, encontrados em um parafuso devido a variações inerentes a sua matéria prima, processo de fabricação e ou tratamentos térmicos relacionando os intervalos de escoamento e resistências de tração para cada classe de resistência com a sua dureza superficial. [1-5]

Figura 2 – Intervalos de limites de resistência e dureza

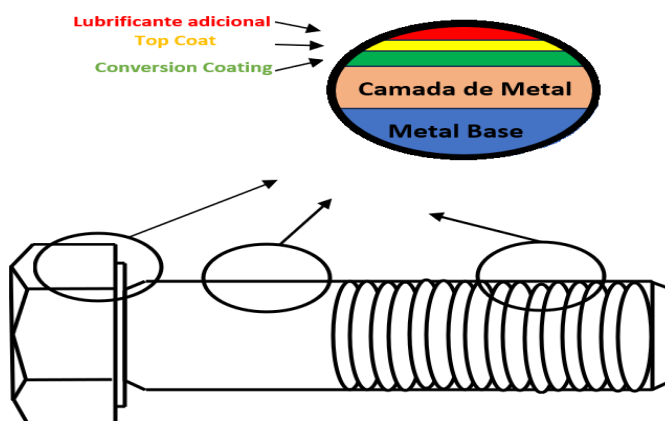


Fonte: GARCIA, 2018.

1.3 ACABAMENTO SUPERFICIAL DOS PARAFUSOS

Os parafusos, por serem fabricados de materiais metálicos, são suscetíveis a sofrerem ataques corrosivos. Por isso, são aplicados revestimentos em sua superfície como uma técnica mais comum de proteção contra corrosão, abrangendo todo o parafuso, desde a cabeça até parte roscada, conforme podem ser vistos na figura 3. A passivação refere-se à criação de uma camada inorgânica em revestimentos de superfície de zinco ou ligas de zinco, sendo aplicada por meio de imersão em soluções químicas. O selante é uma fina camada protetora orgânica ou inorgânica em revestimentos de superfície de zinco ou suas ligas. Geralmente, é realizado em superfícies passivadas, onde o selante penetra na camada de passivação e forma uma camada composta. Dependendo do agente de selante, ele é aplicado úmido sobre úmido ou após secagem intermediária, podendo conter pigmentos para fins de coloração, além de aditivos adequados para alcançar os coeficientes de atrito desejados. O *Top Coat* se refere a uma camada protetora orgânica ou inorgânica para revestimentos. (*Base Coat*). [6-8]

Figura 3 – Acabamento superficial de parafusos



Fonte: ECCLES, 2023.

O acabamento superficial do parafuso, por outro lado, afeta as características de atrito, principalmente na fase inicial de aplicação do torque. Por apresentarem baixo custo comparado com outros componentes, existem pensamentos errôneos de que parafusos que apresentam os mesmos valores dimensionais e classes de resistências, mas de acabamento superficiais

(coloração) diferentes, conforme mostrado na figura 4, podem ser simplesmente substituídos. O potencial de disseminação causado pela falta de controle de uma força de união em uma linha de produção em série pode acarretar prejuízos de milhares de reais, problemas de campo e até possíveis recalls, afetando o controle de vibrações na fixação e na qualidade do aperto. [9-15]

Figura 4 – Tipos de acabamento superficiais



Fonte: Próprio Autor

A fosfatização a frio, é um tratamento da superfície de metais ferrosos e não ferrosos que ocorre em temperatura ambiente, convertendo o estado de superfícies do tipo metálicas em superfícies revestidas com uma camada de fosfato do cátion metálico. Utilizada em preparações de peças para pinturas, ela dispõe de uma composição cristalina bem definida, proporcionando ótima aderência e resistência a inúmeros tipos de corrosão. A fosfatização pode ser aplicada através de imersão ou spray sobre o ferro ou em peças construídas com aço carbono, resultando no aumento da resistência ao desgaste e na diminuição do coeficiente de atrito, possibilitando um melhor desempenho tribológico. [14-15]

1.4 ADESIVOS MICROENCAPSULADOS

A falha de componentes de juntas aparafusadas potencializa defeitos catastróficas, que colocam em perigo a vida de pessoas. Não é incomum que as juntas aparafusadas falhem quando submetidas a cargas dinâmicas, principalmente, quando as forças atuam perpendicularmente ao eixo do parafuso. Isso pode resultar em perda parcial ou total da força de pré-carga,

ocasionando a soltura dos parafusos. Atualmente, existem dois sistemas de travamento para juntas aparafusadas: Giro livre e por torque prevalente. No primeiro caso, o travamento é realizado na superfície de apoio do parafuso e só começa a ser efetivo quando as superfícies de apoio forem colocadas em forte contato. Para o segundo caso, o travamento na rosca do parafuso oferece um torque residual após o desaperto da fixação, restringindo a soltura do parafuso, como por exemplo roscas de interferência, porcas deformadas, adesivos químicos microencapsulados e aditivos não metálicos. Para juntas de alto torque, grandes solicitações de carga e de elevadas criticidades são adotadas estratégias, que garantem que o processo de aperto seja feito adequadamente através da aplicação de adesivos microencapsulados e de colas ajudam, quando aplicados de forma adequada, na fixação de parafusos. Na figura 5, são mostradas resinas acrílicas, resinas epóxi e peróxidos sendo muito utilizadas nas indústrias automotivas, agrícolas, aeroespacial, naval e construção civil. Nestes segmentos, foram desenvolvidos métodos para garantir que os parafusos estivessem devidamente fixados. Um desses métodos foi inserir em todo o perímetro dos fios da rosca um adesivo, para que ocorresse uma maior adesão entre os filetes da contrapeça e do parafuso. Porém, cria-se mais uma variável, que deve estar corretamente aplicada e dimensionada na junta aparafusada, sendo também devidamente armazenada no estoque devido à perda das suas propriedades aditivas. [17-27]

Figura 5 – Parafusos com adesivos microencapsulados

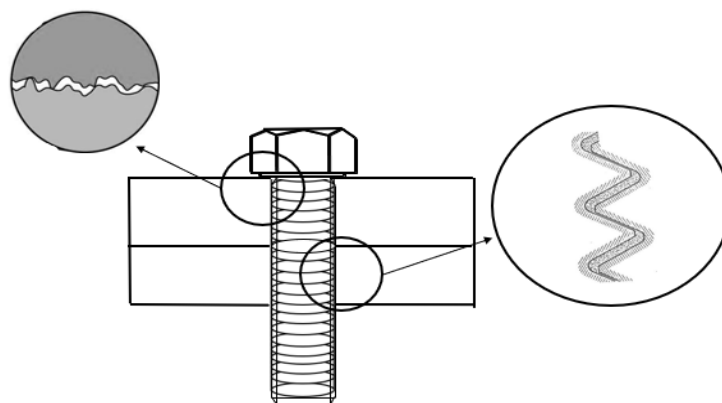


Fonte: Revista do Parafuso, 2007.

As características dos adesivos microencapsulados para travamento e vedação permanecem inertes durante a estocagem do fixador, tornando-se

efetivas somente quando na sua montagem. Durante o rosqueamento, as microcápsulas rompem-se, iniciando o processo de cura e endurecimento do adesivo, preenchendo todos os espaços disponíveis entre as roscas, travando e vedando a fixação, como pode ser visto na figura 6.

Figura 6 – Contato entre as roscas do parafuso e da contrapeça



Fonte: BOELLHOFF (adaptado), 2014.

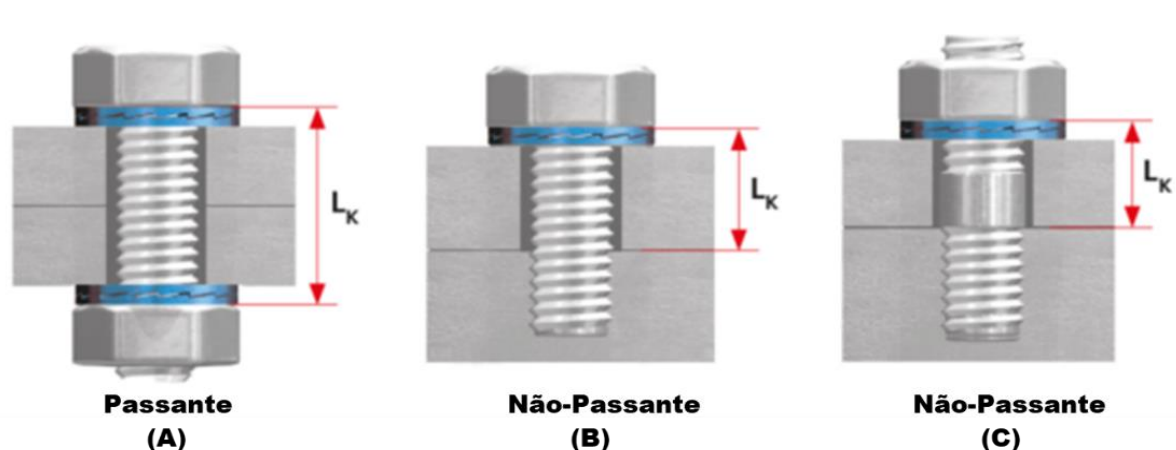
De acordo com a Nylok, fabricante das travas químicas, as propriedades dos seus adesivos diferem pela sua coloração, sendo utilizada para médio e alto torques, conforme a necessidade da sua aplicação. Em 03 horas após a instalação, em temperatura ambiente, já apresenta cerca de 90% da cura, e após 06 horas sua cura já está completa. Após 24 horas de cura em temperatura ambiente, garante a performance conforme especificações, sendo o mecanismo de adesão ocorre em meio anaeróbico. Apresentam uma firme camada seca ao toque e são não tóxicas, mas o produto, antes de ser aplicado nos elementos de fixação é tóxico (MSDS), apresentando uma vida útil de até 04 anos, quando estocado em temperatura de até 30°C e umidade relativa de até 65%. Porém, não é tóxico quando aplicado ou após ser montado, podendo ser utilizado a uma temperatura de aplicação de -60 a 200 °C. Os revestimentos químicos são aplicados como parte da fabricação do parafuso antes da entrega para montagem, apresentando um custo mais elevado em comparação com parafusos normais, devido ao fato de que a aplicação da trava química pode ocorrer em um fornecedor diferente ao do parafuso. Os adesivos anaeróbicos de travamento de rosca tornaram-se uma das maneiras mais confiáveis e econômicas de garantir que uma montagem roscada permaneça travada e à

prova de vazamentos durante toda a sua vida útil de serviço. A norma DIN 267, parte 27 é uma especificação técnica, que trata de requisitos de revestimentos completo de adesivos microencapsulados para parafusos de aço. Um problema potencial ao usar um adesivo anaeróbico é que a cura nem sempre é garantida, pois pode ser afetada pelo tipo de material do qual o fixador roscado é feito ou revestido. As primeiras duas a três voltas da rosca devem ser em grande parte livres de material de revestimento para facilitar o rosqueamento. Ao mesmo tempo, o revestimento também pode ser usado em diferentes materiais e superfícies, conforme o produto, e a posição do adesivo que pode variar conforme a necessidade da junta. De acordo com a Nylok e a Drilloc, ambas empresas fabricantes das travas químicas, os adesivos requerem roscas das contrapeças completamente limpas e isentas de qualquer líquido, óleos, resíduos de líquidos refrigerantes, poeiras ou outras sujeiras que possam reduzir ou até impedir a ação do adesivo na vedação e travamento. [7, 23-27]

1.5 COMPRIMENTO DE APERTO

É a distância entre a cabeça do parafuso e a porca que mantém todos os componentes juntos (l_k). Na figura 7 observa-se que essa medida depende da junta aparafusada em que ela está sendo utilizada. Em uma junta com furo passante, é a distância entre a cabeça do parafuso e a porca. Enquanto em um furo não-passante ou em um parafuso prisioneiro é a distância entre a cabeça (ou porca) e o primeiro filete engajado no furo roscado. [4,28]

Figura 7 – Diferentes valores de L_k



Fonte: NORD LOCK (adaptado), 2017.

Para otimizar uma junta aparafusada, recomenda-se que o comprimento de aperto seja pelo menos 3 a 5 vezes o diâmetro do parafuso. Aumentar a elasticidade do fixador melhora significativamente as propriedades da junta, pois amplia o alongamento do parafuso, reduzindo o efeito de assentamento e aumentando a flexibilidade do fixador. Isso reduz o risco de afrouxamento espontâneo sob vibrações e cargas transversais. O parâmetro L_k é essencial para o uso de adesivos microencapsulados, que são indicados para parafusos curtos. À medida que o comprimento do parafuso aumenta e, conseqüentemente, o valor de L_k , o número de filetes de rosca engajados também cresce, o que melhora a fixação e geração de força. Isso tornando desnecessária a aplicação da trava química, embora ainda seja utilizada em juntas críticas devido às incertezas e por se tratar de um item de segurança, mesmo que esteja superdimensionado. A relação entre L_k/D apresenta uma relação diretamente proporcional à melhoria na confiabilidade de juntas aparafusadas carregadas. Para um parafuso com relação L_k/D de 5, pode ocorrer uma perda de pré-carga de 7%. Porém, em placas de junta mais finas e com relação L_k/D de 1, essa perda pode chegar a 35%. Uma maior relação reduz a rigidez à flexão do parafuso, e uma relação de L_k/D igual ou superior a 5 pode tornar a junta resistente ao auto afrouxamento e reduzindo o risco de falha. [4,28, 29]

1.6 TORQUE E SUA IMPORTÂNCIA

A definição mais abrangente de torque é a de uma grandeza vetorial que tem a tendência de rotacionar um corpo ao aplicar uma força sobre ele. O torque tem como grandeza N.m, que é o equivalente a Joule, uma grandeza que representa energia. Assim, como energia, o momento de aperto, pode ser desperdiçado. Existem formas de se estimar o quanto esse valor pode variar no processo de aperto de uma junta aparafusada. Sua equação básica, eq. 1, é definida pelo produto vetorial da força aplicada pela distância necessária para produzir um apoio para gerar essa rotação, conhecido como braço de alavanca. Sendo a força aplicada e a distância de aplicação dessa força diretamente proporcionais ao torque aplicado, ou seja, quanto maior a distância o ponto de aplicação da

força estiver, menor será a força necessária para mover esse corpo para o mesmo torque. [3,4]

$$M_A = F * K * d \quad (1.1)$$

Esse parâmetro é chamado de fator K, essa variável incorpora diversos fatores, conforme observados na tabela 1, que alteram o valor do torque através de perdas como variação do coeficiente de atrito, tolerâncias dimensionais, processo e revestimento dos parafusos. [3,4]

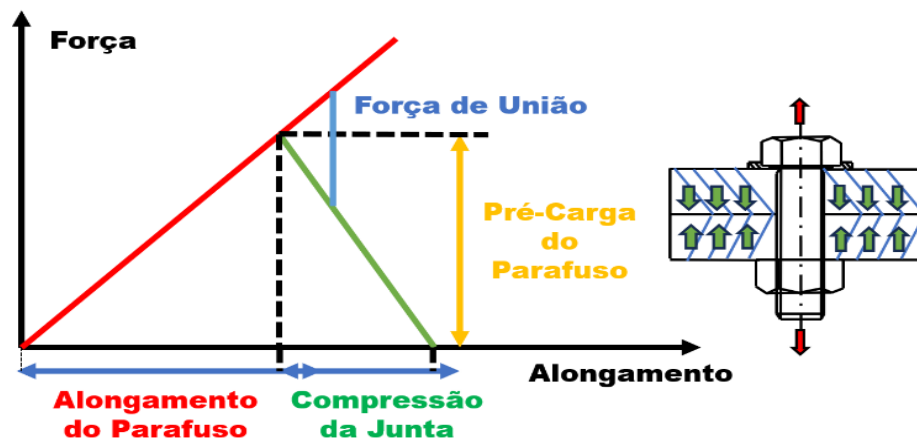
Tabela 1 – Valores de fator de torque em função dos revestimentos

Revestimento	Fator de Torque [k]
Fosfato	0,12 ± 0,072
Zincado	0,17 ± 0,03
Zincado	0,16 ± 0,02
Oleado	0,20 ± 0,03
Aço inoxidável	0,40 ± 0,10

Fonte: GARCIA, 2011.

O fator K é uma grandeza tabelada, mas deve ser utilizado apenas como referência, pois incorpora inúmeras grandezas, englobando como por exemplo o coeficiente de atrito. Em processos de fixação por torque, o conceito de atrito está associado à dispersão ou desperdício da energia, o que podem ser ocasionados por diversos fatores, como rugosidade, planicidade, presença de substâncias que facilitam (óleo) ou prejudicam (contaminações sólidas) a operação de aperto. Outro conceito que se pode dar para o momento de aperto, que para juntas aparafusadas é o mais adequado é de que o torque é definido como a energia necessária para se gerar uma força tensora. Na figura 8, tem-se a representação do comportamento de um parafuso durante a realização do aperto. Ao se realizar a fixação de duas superfícies, o parafuso sofre esforços combinados de tração e torção, fazendo com que a peça e a contrapeça sofram esforços axiais compressivos, unindo as suas superfícies. Após essa deformação inicial do parafuso começa a ocorrer a união por reação das peças envolvidas. Somente após estarem em contato as duas contrapeças é que a união começar a acontecer. [3,4]

Figura 8 – Comportamento (elástico) do parafuso e contrapeça durante o torque



Fonte: BOELLHOFF (adaptado), 2014.

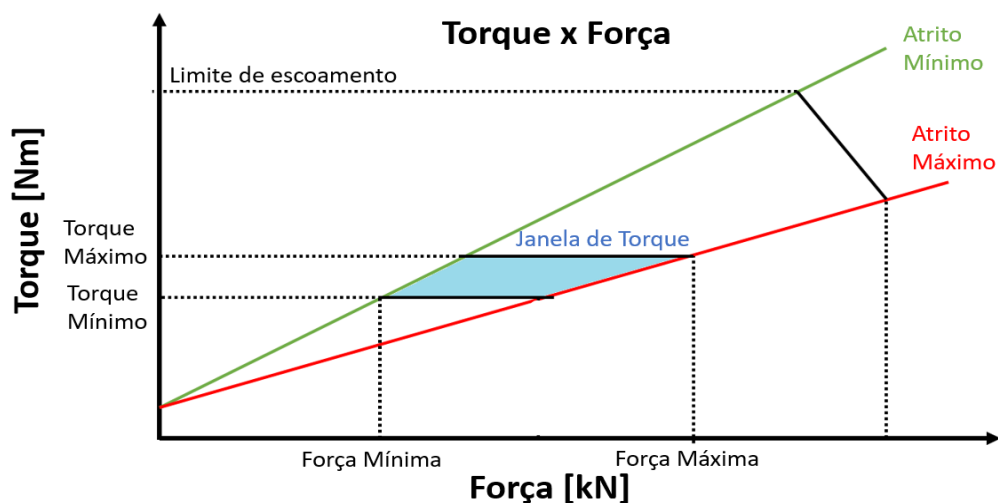
1.7 COEFICIENTE DE ATRITO EM PARAFUSOS

O coeficiente de atrito é uma grandeza adimensional que representa a razão da resistência mecânica encontrada ao movimento relativo entre as superfícies que estão em contato. Sendo definida, na eq. 2, pela razão entre a força de atrito e a carga normal W .

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (1.2)$$

O resultado dessa resistência mecânica leva a uma perda de energia na forma de aquecimento dos elementos afetados: superfícies, lubrificante e o ar ao redor. Em processos de aperto de juntas aparafusadas, o coeficiente de atrito tem papel fundamental, principalmente porque em muitos casos, não é um fator previsível, a menos que sejam tomadas as precauções corretas. O coeficiente de atrito pode variar entre fixadores, mesmo que seja utilizado o mesmo material e acabamento superficial, que pode variar dentro de um intervalo de aceitação, como mostrado na figura 9. Além disso, o processo de aperto torna-se ainda mais complexo devido à variação causada pela imprecisão da ferramenta, experiência do operador e da estratégia de aperto o que contribui para o aumento da variação no pré-carga obtida. [3, 30-32]

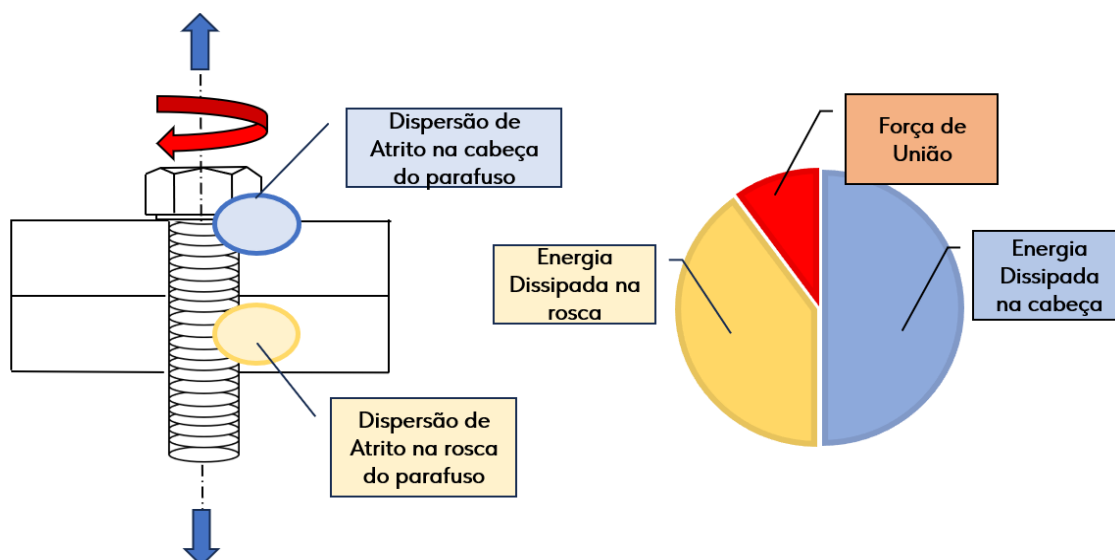
Figura 9 – Janela de torque



Fonte: Próprio Autor

O valor do coeficiente de atrito do fixador influencia a facilidade e a velocidade com que ocorre o auto afrouxamento. À medida que o atrito do fixador diminui, o torque necessário para superar o atrito também diminui, mas o torque necessário para alongar o fixador permanece constante. Inexatidões na determinação no coeficiente de atrito podem levar a uma superestimação ou subestimação do desempenho de uma junta aparafusada. As parcelas de torção e tração dependerão de fatores geométricos do parafuso e de fatores de atrito entre as rocas do parafuso e da peça, conforme visto na figura 10. [31, 34]

Figura 10 – Dispersão de torque



Fonte: Próprio Autor

De acordo com a norma DIN 946 e a ISO 16047, o coeficiente de atrito está separado em duas partes: μ_K representa coeficiente de atrito na cabeça do parafuso, conforme eq. 3, e μ_G representa o coeficiente de atrito na sua rosca, conforme eq. 4. [3,4]

$$\mu_k = \frac{2 * M_K}{D_{km} * F_v} \quad (1.3)$$

$$\mu_g = \mu_{th} = \frac{\frac{M_g}{F_v} - 0,159 * p}{0,578 * d_2} \quad (1.4)$$

Na equação básica, o fator K é utilizado para representar as variações que ocorrem durante o processo de aperto, influenciando a quantidade de torque aplicado e o torque que efetivamente é transmitido à contrapeça. Esses valores são ajustados conforme, a norma DIN 946, que representa as variações que podem ocorre durante o processo de aperto, afetando a quantidade do torque aplicado de fato na contrapeça. Esses ajustes são feitos de acordo com a norma ISO 16047, que explicitamente define as variáveis que compõem o fator K. O coeficiente de atrito de rosca (μ_g) pode ser considerado uma propriedade intensiva do revestimento, ou seja, é uma propriedade que depende exclusivamente dele mesmo. Por outro lado, o coeficiente de atrito total (μ_{Ges}), eq. 5, é uma propriedade extensiva, que depende de fatores geométricos, como o passo de rosca e diâmetro. [3, 4]

$$\mu_{GES} = \mu_{tot} = \frac{\frac{M_A}{F_v} - 0,159 * p}{0,578 * d_2 \frac{D_{km}}{2}} \quad (1.5)$$

Dessa expressão, conclui-se a relação direta entre ângulo de deslocamento e força de união, conforme demonstrado nas eq. 6 a 7. Durante o aperto do parafuso, o torque aplicado é dispersado devido à dissipação nas roscas e na cabeça do parafuso, resultando em uma pequena parcela sendo convertida em trabalho útil. [4]

$$M_A = \frac{\alpha}{360^\circ} * p * \frac{1}{\partial_s + \partial_p} * (0,159 * p + 0,578 * d_2 * \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} * \mu_k) \quad (1.6)$$

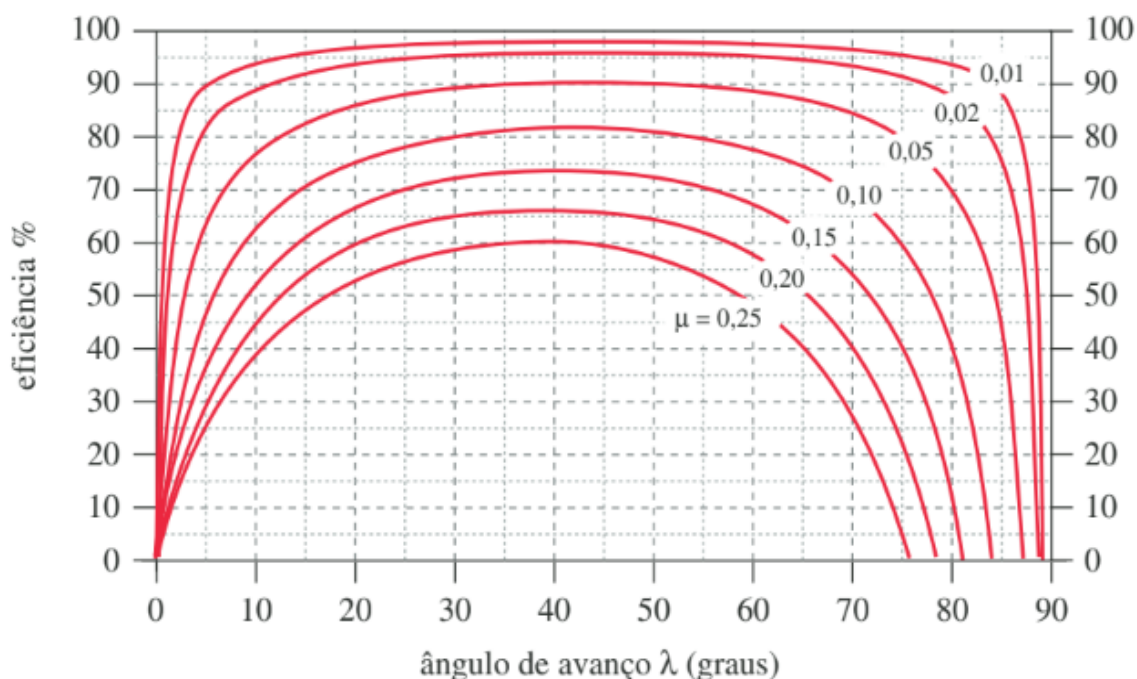
$$M_{Atotal} = (F_V * 0,159 * p) + (F_V * 0,578 * d_2 * \mu_G) + \left(F_V * \frac{D_{Km}}{2} * \mu_k \right) \quad (1.7)$$

A expressão matemática que relaciona o coeficiente de atrito de rosca total e define que a eficiência do parafuso pode ser observada na eq. 8.

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 * \left[\frac{4}{1 + \left(\frac{d_3}{d_2} \right)} * \left[\frac{p}{\pi d_2} + 1,155 * \mu_g \right] \right]^2}} \quad (1.8)$$

A eq. 8, que relaciona a eficiência de um parafuso, com o coeficiente de atrito de rosca (μ_G), destaca a importância desse parâmetro, que varia para parafusos de geometrias idênticas. Essas variáveis, por se tratarem de parâmetros normalizados como DIN e ISO, apresentam valores com uma baixa tolerância e, conseqüentemente baixa variância entre si. Por isso, é possível considerar os parâmetros de diâmetro (d_2 e d_3) e passo (p) constantes entre parafusos que apresentem o mesmo diâmetro e passo de rosca, evidenciando a importância da influência e do controle do coeficiente de atrito de rosca na garantia de uma melhor eficiência do aproveitamento da capacidade de geração de força do parafuso. Sendo o coeficiente de atrito inversamente proporcional a eficiência do parafuso, portanto ao se diminuir o coeficiente de atrito, ocorre um aproveitamento mais eficiente devido a menor dispersão de energia. Na figura 11, está representada a eficiência em função dos coeficientes de atrito e do ângulo de avanço (quantidade em que ocorre o movimento de rotação e deslocamento axial do parafuso na contrapeça), onde é possível analisar os casos em que a eficiência se aproxima de zero, o que indica que nenhum trabalho útil está sendo realizado, e que o aumento da eficiência não é uma situação trivial de apenas reduzir o valor de atrito. E também no caso em que a eficiência também se aproxima de zero, que é quando os ângulos de avanço são altos, porque o torque está simplesmente aumentando e essa energia está sendo dispersada e não está se transformando em rotação do parafuso. [1,2,4,7]

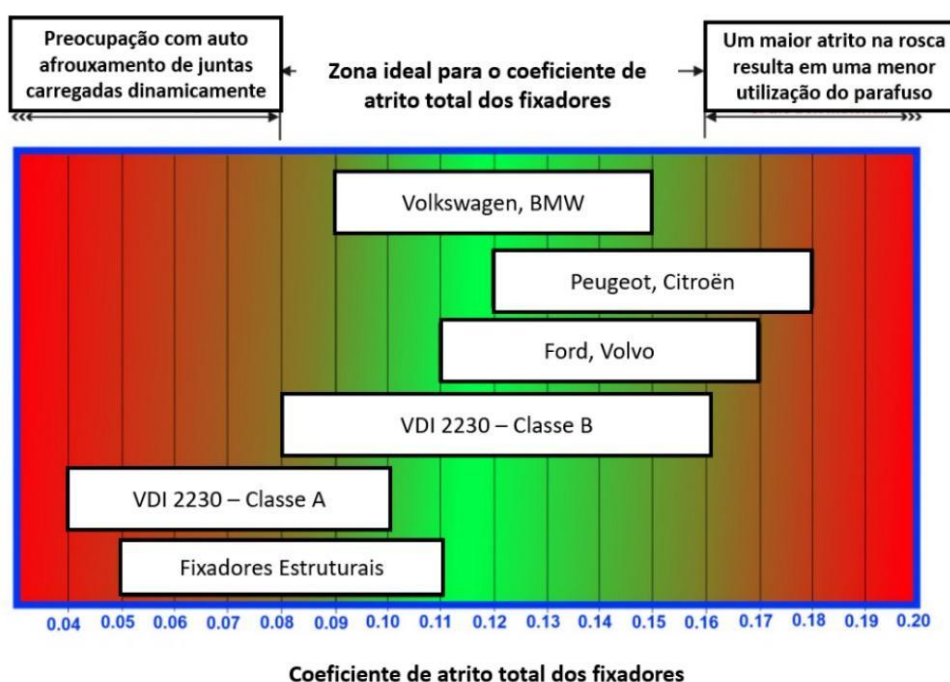
Figura 11 – Eficiência do parafuso



Fonte: NORTON, 2013. pg. 872

Há uma preocupação de que coeficientes de atrito muito baixos permitiam, com muita facilidade, o afrouxamento automático quando as juntas aparafusadas estão carregadas dinamicamente. Por isso, normas e instituições industriais como a VDI aconselham, assim como muitos fabricantes e empresas especificam em seus padrões internos, faixas de tolerância de atrito em seus fixadores, aconselhando que o atrito do fixador seja da classe de coeficiente de atrito B. Como pode ser visto na figura 12, os fabricantes em grande escala especificam suas próprias faixas. [4, 6]

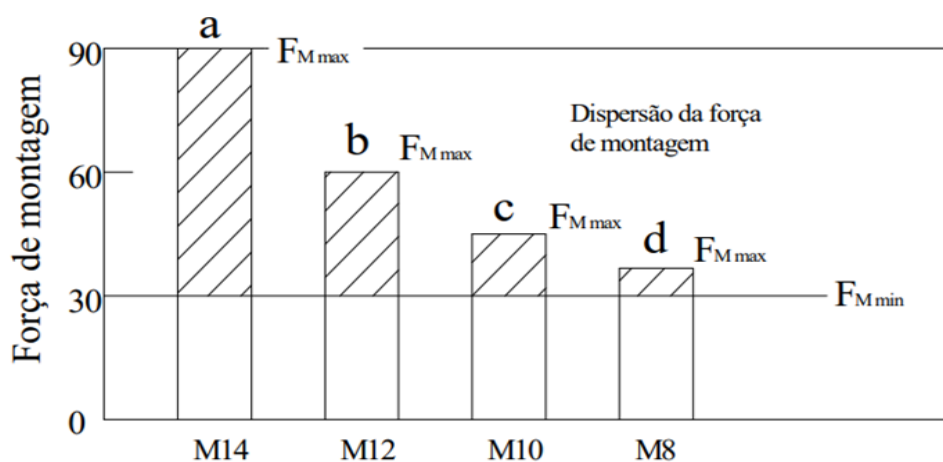
Figura 12 - Limites de coeficiente de atrito de parafusos



Fonte: ECCLES (adaptado), 2023.

Devido à alta dispersão de energia, tem-se a dimensão da influência do fator tribológico no processo de aperto para a geração da força de união, figura 13. O coeficiente de atrito pode ser afetado devido à rugosidade ou imperfeições das superfícies, lubrificação (excesso ou a sua falta) e acabamentos superficiais dos parafusos envolvidos. [4,6]

Figura 13 – Dispersão da força de montagem



Fonte: VDI 2230 (adaptado), 2003.

Essas inexatidões na determinação do coeficiente de atrito podem resultar em uma superestimação ou subestimação da força de aperto real na junta. Para os casos de superestimação da força de aperto, pode gerar falhas devido ao afrouxamento do fixador, separação da junta, vazamento, ruído e fadiga. Enquanto, para a subestimação da força de aperto real, pode levar a falhas de material devido à sobrecarga, podendo causar deformações no material da contrapeça. [3,4,6]

1.8 ÂNGULO DE APERTO

Um método indireto de se monitorar e controlar a qualidade do aperto em juntas aparafusadas é através da avaliação do ângulo de aperto. Esse parâmetro é possível medir comprimento do parafuso, uma vez que a deformação linear do parafuso no passo da rosca é diretamente proporcional ao ângulo de rotação. Neste caso, as deformações por compressão das peças sujeitadas e as deformações elástica e plástica (do parafuso) que ocorrem antes do fechamento completo das interfaces, são medidas ao mesmo tempo. O parafuso, no processo de aperto pode ter o seu comportamento comparado por uma mola, onde a relação entre a força aplicada e a sua deformação é diretamente proporcional, respeitando a lei de Hooke no regime elástico. [3,4]

1.9 RESILIÊNCIA E SUAS CONSEQUÊNCIAS

Os parafusos alongam-se em função de sua resistência, sendo composto por um número individual de elementos (cabeça, haste e rosca), eq. 9. O alongamento total do parafuso será a soma dos alongamentos individuais. A resiliência do parafuso considera não somente a deformação elástica do parafuso dentro do comprimento de sujeição, como também todas as deformações elásticas, que ocorrem fora desta região e exercem um efeito no comportamento de deformação do parafuso na junta. [4]

$$\delta_i = \frac{f_i}{F} = \frac{l_i}{E_s A_i} \quad (1.9)$$

Essa expressão tem validade apenas no regime elástico do parafuso, pois tem como base física que o parafuso obedece a lei de Hooke, tendo o seu comportamento similar a uma mola. Sendo o α é o ângulo de deslocamento, a variável que relaciona o torque com a força, conforme pode na eq. 10. Enquanto ∂_s e ∂_p são as resiliências do elemento de fixação e da junta em [mm/N]. [3]

$$\alpha = \frac{360^\circ}{p} * (\partial_s + \partial_p) * F_v \quad (1.10)$$

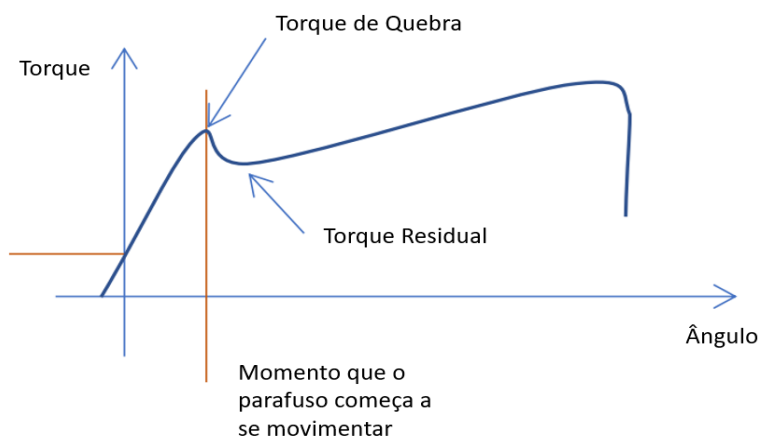
Alterando a resiliência elástica de um fixador, altera-se o incremento de força gerado para cada ângulo de giro, sendo assim o parâmetro de aperto utilizado deve ser revisado. Em aplicações em que o torque é o único parâmetro de aperto, a variação da resiliência elástica do fixador poderá ser notada através da variação da janela de ângulo de monitoramento, onde o parafuso poderá rotacionar mais ou menos dependendo da substituição realizada, para manter a força de união da junta. Devido a fatores externos a energia para concluir o processo de aperto varia fazendo com que ocorra uma dispersão de força de união. [3,4]

1.10 ESTRATÉGIA DE APERTO POR TORQUE E ÂNGULO

O torque dinâmico é o medido em tempo real, apenas por uma ferramenta eletrônica com controle de torque, em que são registrados e geralmente são exibidos em um painel durante a montagem para os operadores. Assim, o seu valor não pode ser checado após sua aplicação, no processo de aperto, mas apenas monitorado. O torque estático ou torque de verificação é o valor utilizado em processos de auditoria, e neste caso, corresponde ao aperto necessário para se iniciar a quebra da inércia de um parafuso devidamente fixado. Utilizado em processos de auditoria de torque, tem como objetivo de verificar e quantificar o quanto de torque aplicado na junta aparafusada sofreu de relaxamento, após esforços mecânicos (dinamicamente). A perda da pré-carga é um fenômeno previsto nos cálculos e dimensionamento de juntas aparafusadas, podendo ocorrer devido às condições estáticas ou dinâmicas. Nas condições estáticas, essa perda pode estar relacionada as deformações plásticas sob o assentamento da cabeça do parafuso e nos filetes de rosca, devido a pressões

excessivas de contato ou resistência insuficiente do material. Essa resistência pode ser do material do material, da contrapeça ou do parafuso, quando a área de assentamento ou número de filetes engajados insuficientes. Além disso, problemas como falta de planicidade e rugosidade excessiva das contrapeças podem causar relaxamento da junta e aumentam a falta de vedação entre as peças. Em condições dinâmicas, a perda da pré-carga pode ocorrer devido às vibrações transversais que resultam na perda de força tensora ou de baixos valores de coeficiente de atrito de cabeça na cabeça do parafuso, assim como em comprimentos pequenos de L_k . Uma perda considerável devido ao relaxamento é esperada quando a temperatura de trabalho é elevada. Em temperatura ambiente, ainda não ocorrem grandes quantidades de relaxamento em parafusos pré-carregados puramente elásticos. A sua curva pode apresentar dois comportamentos distintos. Nas figuras 14 e 15, observa-se, que o valor de torque residual é medido, quando ocorre a quebra da inércia do parafuso. Sendo este o seu valor de torque residual diferente ou igual ao torque de quebra. No primeiro caso, verifica-se uma redução do valor de torque de pico, seguida de um crescimento. [3,4, 33, 34]

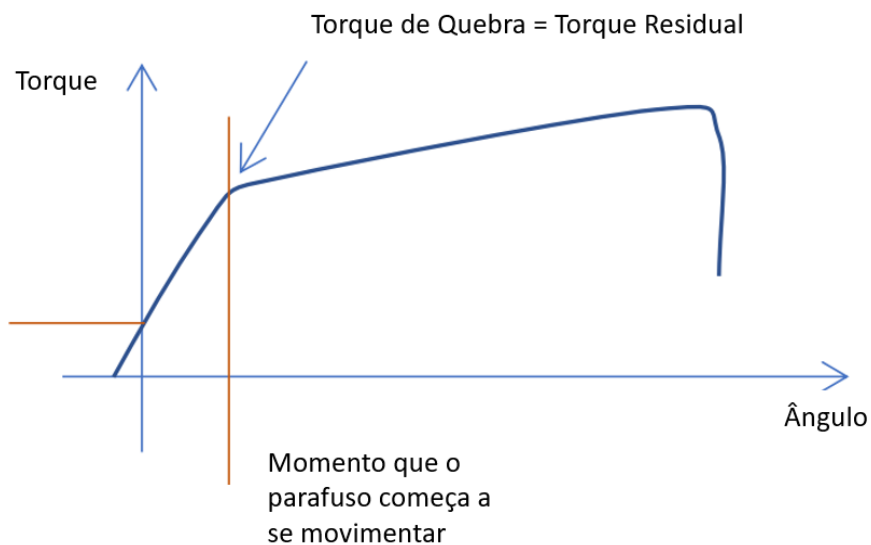
Figura 14 – Curva de torque residual



Fonte: M. SHIMIZU (adaptado), 2023.

Para o segundo caso, não ocorre a redução do valor de pico, e o valor do torque residual é igual ao valor do torque de quebra, dando para a curva de verificação de torque estático uma característica mais suave. [33]

Figura 15 – Software de torque residual



Fonte: M. SHIMIZU (adaptado), 2023.

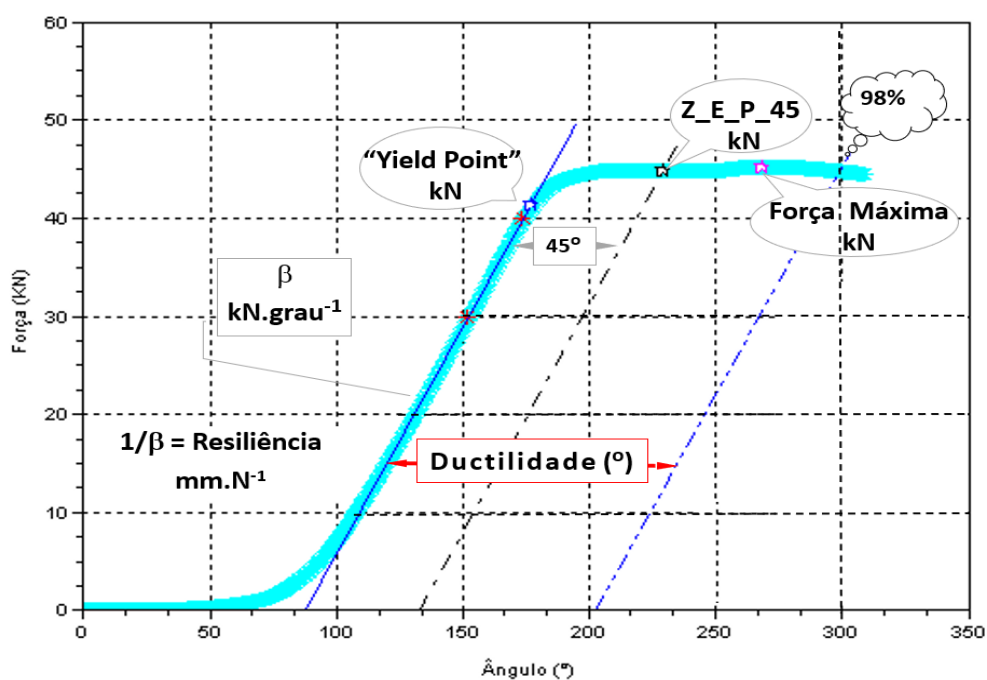
A dispersão do valor de torque aplicado é impossível através da detecção visual, sendo possível apenas com os recursos de ferramentas de aperto modernas, que possuem controle dos valores de torque e ângulo. Somente com essas ferramentas é que esses valores podem ser conhecidos. Atualmente, existem diversas ferramentas, que podem ser utilizadas para se aplicar torque, podendo ser a baterias, pneumáticas ou eletrônicas.

Ferramentas de aperto com controle eletrônico facilitam a aplicação do torque, pois apresentam um método de controle através de desligamento quando os valores de torque e ângulo são atingidos. Possuem alta acuracidade e leitores de display desses valores, gerando informações visuais de aperto "OK", quando aprovados e "NOK" para os casos de reprovação, rejeitando no momento da aplicação incorreta na linha de produção. Permitindo que os apertos rejeitados sejam possíveis de serem realizados logo após o momento da sua aplicação incorreta, evitando possíveis retrabalhos fora do posto do trabalho em que se aplicou o torque. Também é possível adotar estratégias, que além de controlar essas variações de processo, garantem a padronização e rastreabilidade do aperto.

1.11 REGIÃO ELÁSTICA, ELASTOPLÁSTICA E PLÁSTICA

Na figura 16, estão demonstradas as três regiões existentes analisadas durante a aplicação de torques em parafusos: Elástica, elastoplástica e plástica. Para garantir a segurança da junta aparafusada através do controle da vida útil do parafuso, deseja-se que o elemento de fixação esteja dentro da região elástica. É nessa região, em que as tensões são proporcionais às deformações, e o parafuso tem um comportamento linear (região elástica), se comportando como uma mola, ou seja, sofrendo alongamento não permanente ao sofrer aplicações de forças externas e voltando ao seu estado inicial, quando cessado essa aplicação, quando o mesmo está abaixo do seu limite de escoamento (*Yield Point*). [3][4]

Figura 16 – Propriedades do parafuso



Fonte: GARCIA, 2013.

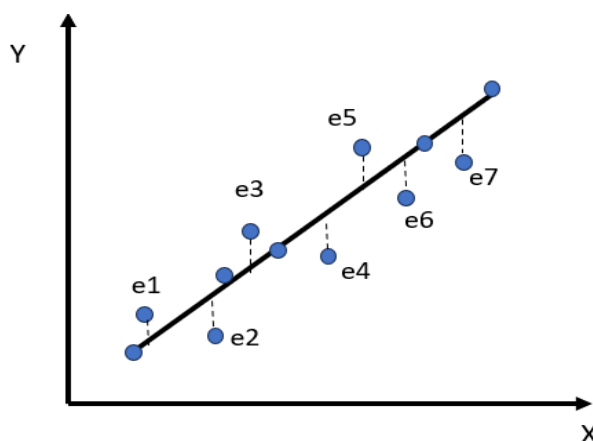
Nos processos de fixação, as definições da estratégia de aperto, em conjunto com o dimensionamento do parafuso, garantem uma aplicação de força constante em uma junta aparafusada. É essencial um melhor aproveitamento do rendimento do parafuso, sendo o coeficiente de atrito dos parafusos uma variável

com enorme influência na relação entre torque e força tensora gerada. Além disso, com a implementação de uma estratégia de aperto por torque e ângulo de deslocamento, torna o processo mais eficiente, pois serão melhor utilizadas as propriedades mecânicas e tribológicas do parafuso, eliminando a possibilidade de torque falso, fornecendo estabilidade, segurança e qualidade ao processo.

1.12 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O Método dos mínimos quadrados (MMQ) é uma técnica estatística amplamente utilizada para a análise de dados experimentais. O objetivo desse ajuste é determinar os valores dos coeficientes de uma equação linear. O MMQ busca minimizar a soma das diferenças quadráticas entre a reta e os pontos obtidos experimentalmente, pelos respectivos quadrados dos desvios padrão. Ao representar os dados obtidos experimentalmente por uma linha de tendência, que melhor aproxima esses pontos por uma reta, surge uma diferença entre a posição do ponto e o valor real da função, identificado no gráfico pelos segmentos, como pode ser observado na figura 17. [35,36]

Figura 17 – Método dos mínimos quadrados



Fonte: Próprio Autor

Esse método procura minimizar para todos os pontos (x_i, y_i) que foram obtidos experimentalmente, e que podem ser aproximados por uma curva de forma que passe pela maioria dos pontos, procurando minimizar o erro encontrado através das somas dos quadrados das diferenças entre o valor da

função e os valores experimentais. Assim, o MMQ busca determinar os coeficientes “a”, eq. 11 e “b”, eq. 12, que melhor se ajustem a curva analisada. [35,36]

$$a = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}} \quad (1.11)$$

$$b = \frac{\sum y}{n} - a \frac{\sum x}{n} \quad (1.12)$$

O coeficiente de determinação (R^2), é uma medida que avalia a qualidade do ajuste de um modelo estatístico, fornecendo uma referência sobre a eficiência do ajuste realizado através do MMQ, em uma regressão linear. O valor de R^2 varia entre 0 e 1, sendo que valores próximos a 1 indicam uma melhor aproximação entre a reta aproximada e os dados experimentais. O R^2 é calculado, conforme eq. 13, pela divisão entre a soma dos quadrados da regressão e a soma dos quadrados total. [35,36]

$$r = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x \sum y)/n}{n}}{\sqrt{(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n})/n [\sum x^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}]}} \quad (1.13)$$

Matematicamente, o gama representa a derivada do torque em relação ao ângulo. Esse método de análise tem validade para os valores aplicados em qualquer ponto dentro da região linear do parafuso, ou seja, quando o comportamento do parafuso é elástico. A eq. 14, descreve essa relação, permitindo a análise da variação da rotação para se chegar em um valor de torque. Este tipo de metrificação do processo de aperto possibilita uma avaliação mais detalhada do comportamento do aperto durante a aplicação do torque em função do ângulo de aperto. [4]

$$\frac{\partial M_A}{\partial \alpha} = \gamma = Nm \cdot \alpha^{-1} \quad (1.14)$$

Definido pela derivada da força em relação ao ângulo de aperto, como pode ser visto na eq. 15.

$$\frac{\partial F_V}{\partial \alpha} = \beta = kN \cdot \alpha^{-1} \quad (1.15)$$

Derivando toda a equação básica de torque em relação ao ângulo de aperto, e introduzindo os conceitos de gama e beta obtém-se a eq. 16.

$$\frac{\partial M_A}{\partial \alpha} = \frac{\partial F_V}{\partial \alpha} \cdot k \cdot d \quad (1.16)$$

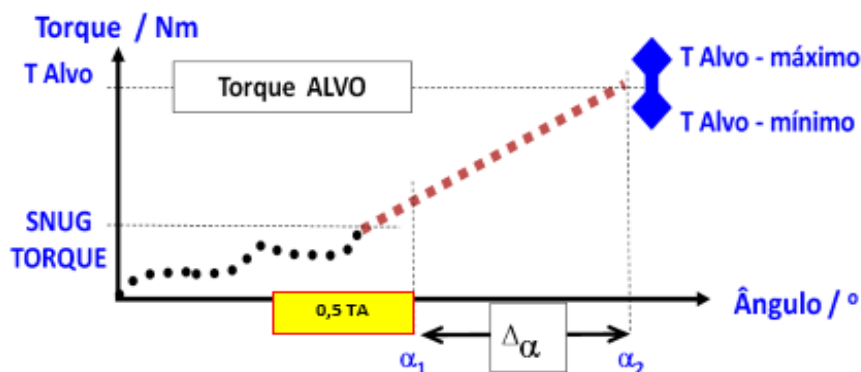
A equação do torque, pode ser reescrita por meio da definição alternativa do fator K, onde as propriedades dimensionais (passo, diâmetro) e as propriedades tribológicas (coeficiente de atrito), podem ser escritas em função de gama e beta. Como os parafusos analisados apresentam apenas diferenças nos valores de acabamento superficial. A variação do valor de K, eq. 17, pode ser analisado para esse caso específico devido ao comportamento dos coeficientes de atrito, que podem ser analisados através de beta e rate. [3]

$$K = \frac{\gamma}{\beta d} \quad (1.17)$$

1.13 ESTRATÉGIA DE APERTO

A estratégia de aperto que utiliza apenas o torque como o único parâmetro para a aprovação do aperto, como ilustrado na figura 18, torna o aperto sensível a variações de processo. Aumentando significativamente as chances da aplicação de um torque incorreto, o que pode comprometer a segurança e qualidade da junta aparafusada. Para minimizar esses riscos, as tabelas de torque definem um intervalo de aceitação, o que inclui valores de mínimo e máximo, além do torque nominal (alvo). Esse intervalo tem como objetivo absorver as variações de processo devido a capacidade da ferramenta de aperto e possíveis alterações que podem ocorrer em uma linha de montagem. [18]

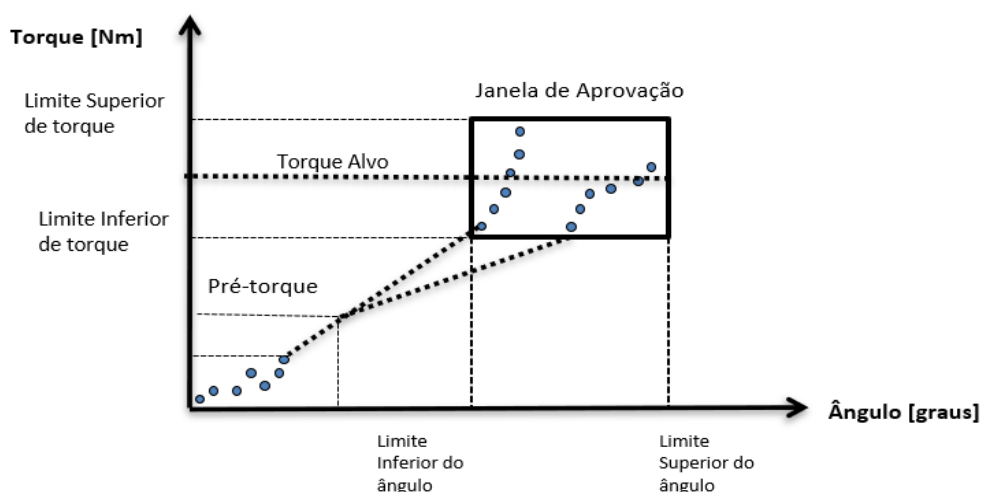
Figura 18 - Estratégia de aperto por torque



Fonte: GARCIA, 2011.

Para se aumentar o controle dos processos de aperto e reduzir a variação da força aplicada em um parafuso, foram desenvolvidas estratégias, que visam diminuir as dispersões encontradas na aplicação do torque. Uma dessas estratégias é o monitoramento do ângulo de aperto, adicionando mais uma variável no processo de aprovação de aperto. No entanto, essa estratégia requer a utilização de uma ferramenta eletrônica para a sua aplicação e apenas cria uma janela de aprovação de ângulo, conforme figura 19. [3,4,18]

Figura 19 - Aperto por torque e monitoramento de ângulo

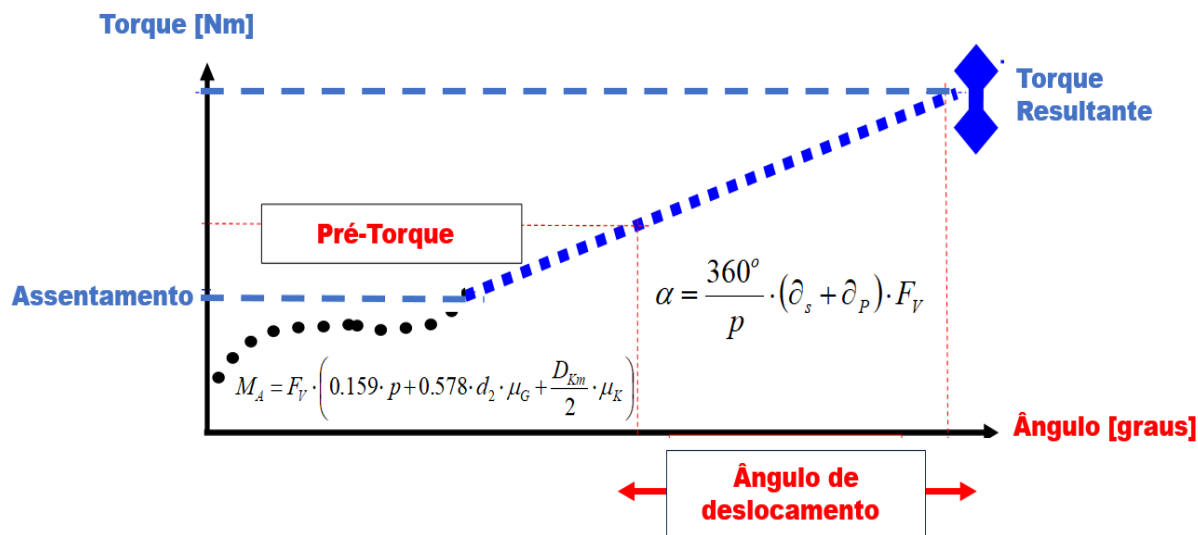


Fonte: GARCIA, 2011.

Na figura 20, observa-se que a primeira parte do aperto denominada de pré-torque, a qual garante um bom assentamento, possui uma força tensora

parcial inferior à exigida de projeto. Porém uma força adicional será inserida devido ao ângulo de deslocamento e a força tensora total deverá estar abaixo do limite de escoamento do parafuso. [3,4,18]

Figura 20 - Aperto por torque ângulo de deslocamento

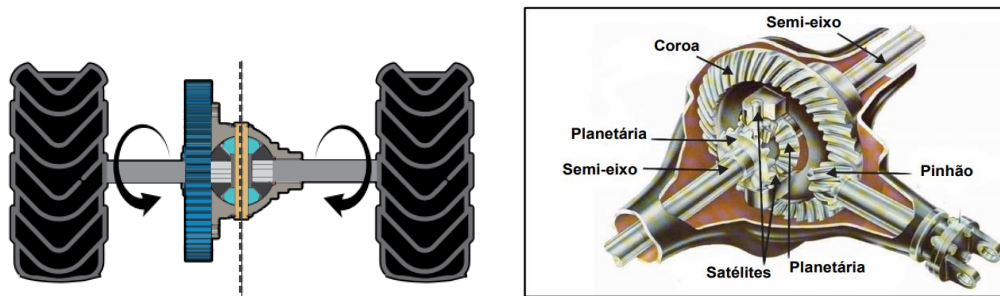


Fonte: GARCIA, 2011.

1.14 DIFERENCIAL AUTOMOTIVO

Para contextualizar a importância da aplicação do torque será apresentada a junta aparafusada, que está sendo fixada e que será base de estudo para a alteração estudada. O diferencial automotivo, figura 21, localizado no eixo traseiro de um trator, apresenta diversos parafusos em sua aplicação. Devido a sua criticidade, esse dispositivo mecânico, apresenta uma grande importância em veículos, pois tem como finalidade fazer com que as rodas possam rotacionar com velocidades diferentes. [37,38]

Figura 21 – Componentes do diferencial



Fonte: BERGOLI, 2019.

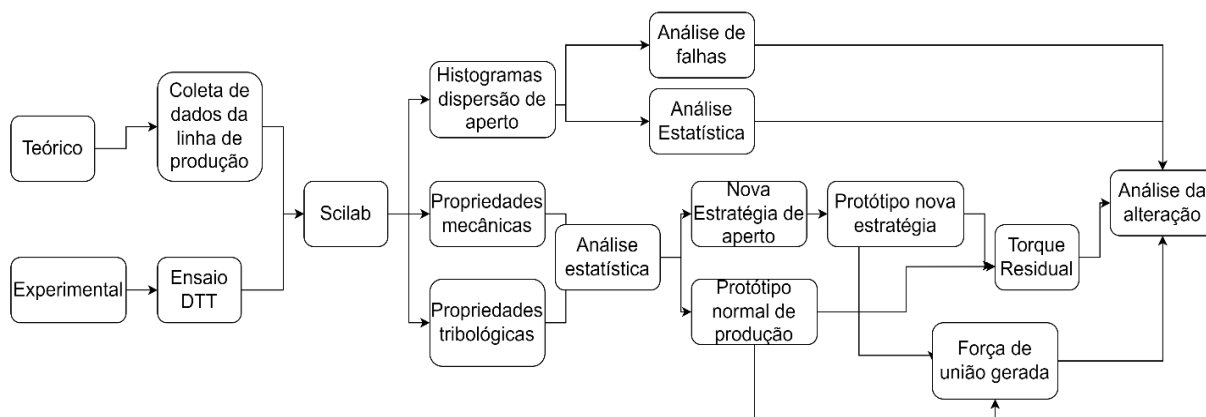
Essa diferença de rotação é essencial ao se realizar uma curva, porque a roda mais afastada do centro de rotação percorre uma maior distância comparada com a da parte interna, tendo que girar mais rápido do que para conseguir acompanhar o movimento durante uma curva. Isso é apenas possível por causa da relação de engrenagens existentes entre a transmissão e as rodas. Problemas em um diferencial podem impactar de forma negativa na integridade da segurança dos passageiros do veículo automotivo, dificultando na mudança de direção. [37,38]

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada no presente trabalho é de caráter teórico experimental, conforme ilustrado na figura 22, utilizando uma das ferramentas mais conhecidas de planejamento estratégico e melhoria contínua de processos: ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), que em português significa: Planejar- Fazer – Verificar – Agir [40].

Inicialmente, no planejamento, são coletados dados da linha de produção ao longo de um ano, para a análise dos apertos realizados dos parafusos com adesivo, utilizando a estratégia de aperto por torque e a janela de ângulo de aprovação. Para analisar o comportamento do parafuso atual e definir a nova estratégia de aperto com o parafuso proposto são realizados ensaios DTT. Na fase de execução, são realizados experimentos com três protótipos, sendo dois sem adesivo e um com adesivo, para observar as variações de desempenho em cada condição. Após a realização dos experimentos, na etapa de verificação, é estimada a força de união gerada nos protótipos, além de ser analisado o torque residual para avaliar a eficácia das estratégias de aperto adotadas. Por fim, na fase de ação, são analisados os efeitos da alteração da estratégia de aperto e da remoção do adesivo, buscando identificar melhorias ou ajustes necessários para otimizar o processo.

Figura 22 – Metodologia



Fonte: Próprio Autor

2.1 DEFINIÇÃO DA NOVA ESTRATÉGIA DE APERTO

A coroa do diferencial é fabricada de um aço forjado 20MCS, apresentando dureza superficial variando de 58 a 61 HRC, enquanto no núcleo varia entre 26 a 40 HRC. Essa junta aparafusada possui 18 parafusos que têm em sua rosca a aplicação do adesivo microencapsulado. O planejamento para a alteração do parafuso e remoção da trava química, começa com a avaliação dos dados de torque coletados na linha de produção utilizando o parafuso com adesivo e a estratégia de aperto atual. Na figura 23, é possível observar no lado esquerdo, o parafuso com adesivo na sua rosca (atual), e no lado direito o parafuso fosfatizado a frio sem o adesivo (proposto).

Figura 23 – Parafuso com adesivo e proposto



Fonte: Próprio Autor

Os dados dos parafusos analisados são apresentados na tabela 2, onde é possível observar que ambos parafusos possuem mesmo diâmetro, passo e comprimento de rosca, mas apresentam acabamentos superficiais diferentes.

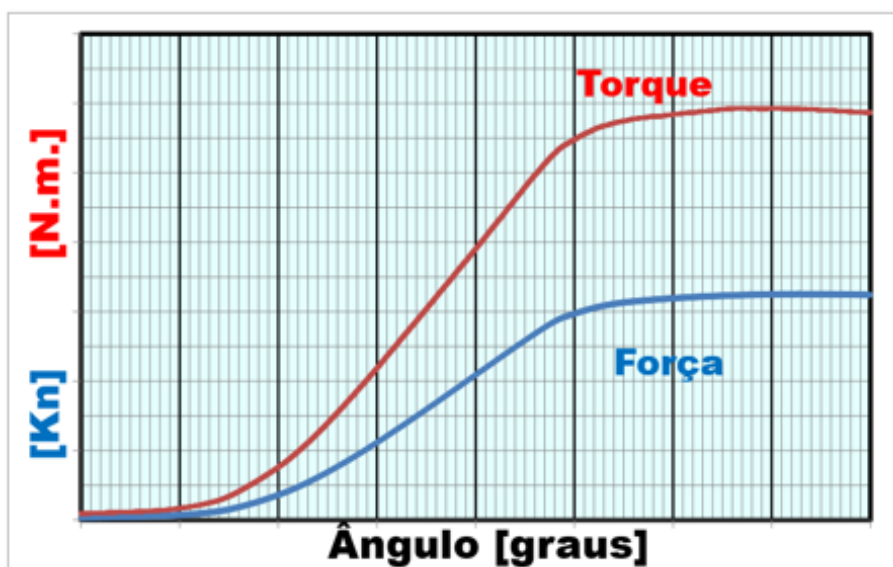
Tabela 2 – Dados dos parafusos analisados

Variável	Valor
Diâmetro	16 mm
Passo	2,0
Comprimento	40 mm
Classe de Resistência	10.9
Acabamento Superficial Parafuso Adesivo	Fosfatizado
Acabamento Superficial Parafuso Proposto	Fosfatizado a frio

Fonte: Próprio Autor

Para a adoção da nova estratégia de aperto do parafuso proposto, foram realizados 20 ensaios DTT para a avaliação e comparação das propriedades de ambos os parafusos: 10 com adesivo microencapsulado e 10 com o proposto. Os ensaios DTT, foram realizados utilizando o laboratório da Meltatork e consiste em realizar o aperto em uma junta padrão, utilizando com transdutores que monitoram simultaneamente os dados de ângulo, torque e força ao longo da aplicação do aperto, para analisar o comportamento dos parafusos. Na figura 24, estão representadas as duas curvas: torque x ângulo, (em vermelha), e uma de força x ângulo (em azul).

Figura 24 – Relação torque e força

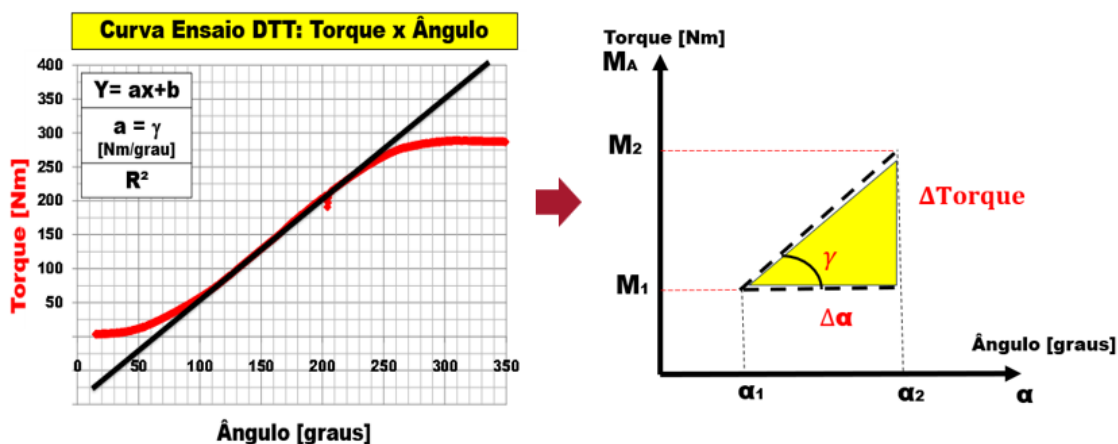


Fonte: GARCIA (adaptado). 2011.

Através do software matemático de programação livre *Scilab*, por meio do método dos mínimos quadrados, foram aproximados os valores obtidos experimentalmente dentro da zona elástica do parafuso, quantificando suas propriedades fundamentais. Para a avaliação dos ensaios DTT, foram definidas duas variáveis que auxiliam na análise quantitativa e qualitativa dos apertos realizados: Gama e beta. A primeira variável é obtida através da análise do torque aplicado em função do ângulo de aperto, sendo definida como gama, como pode ser observado na figura 25, sendo a razão a distância percorrida entre o torque alvo e o de início de monitoramento, pela distância em que o parafuso rotaciona nesse intervalo. O gama é utilizado para monitorar o

comportamento do coeficiente de atrito, através da sua inclinação, representando a dificuldade ou facilidade com que a energia aplicada (torque) está sendo transformada em rotação no parafuso.

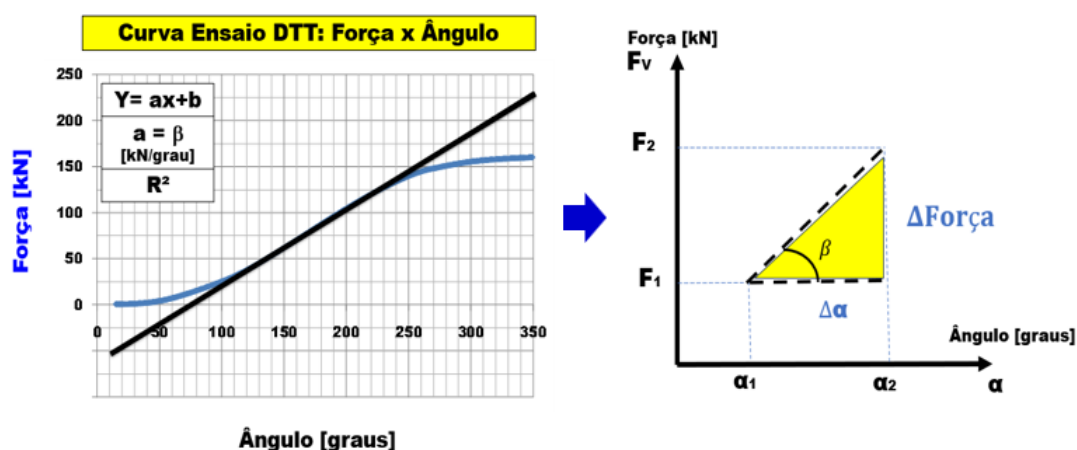
Figura 25 – Gama: Método dos mínimos quadrados



Fonte: Próprio Autor

A segunda variável surge da análise do torque aplicado em função da força de união gerada, sendo representada por beta (β), conforme pode ser observado na figura 26, como sendo o parâmetro que mensura a capacidade de geração de força que o parafuso aplicar por grau de aperto.

Figura 26 – Beta: Método dos mínimos quadrados

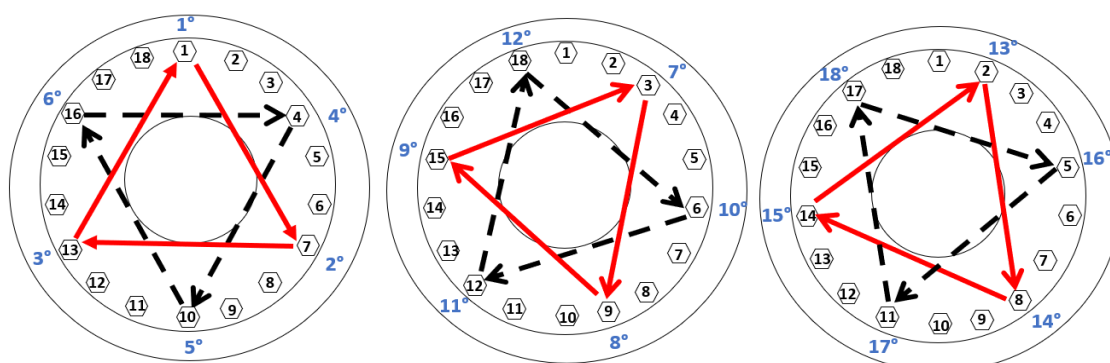


Fonte: Próprio Autor

Pela especificação, obrigatoriamente o equipamento de aperto utilizado para aplicações de torque e ângulo deve ser necessariamente eletro-eletrônico, por razões de capacidade da ferramenta. [3]

Por isso, para a realização dos apertos das peças protótipos foi utilizada uma aparafusadeira eletrônica angular, modelo ETV ST101-1000-TM, com capacidade de 1000 N.m, conectada ao painel controlado *Power focus 4000*, que armazena e coleta os dados de aperto com o servidor *Toolsnet*, sendo todo o conjunto da *Atlas Copco*. Os apertos foram segmentados em grupos de 3, como pode ser observado na figura 27, divididos em triângulos, que formam planos que facilitam a acomodação da junta, tornando uniforme o processo de assentamento e as distribuições de forças aplicadas nos parafusos, eliminando a possibilidade de variação no processo de aperto, para que não influenciasse a comparação os experimentos realizados.

Figura 27 – Segmentação do processo de aperto



Fonte: Próprio Autor

Na tabela 3, estão apresentados os valores utilizados na criação dos programas de aperto. Para uma maior precisão e assentamento da junta, o programa inicia com uma velocidade inicial (v_1) e reduz quando se aproxima do torque alvo (T_A) para uma velocidade final (v_2), trocando o valor da sua rotação em $T_A/5$. O torque de monitoramento do ângulo (TMA) é o valor em que o programa de aperto iniciará o monitoramento dos valores de ângulo. Sendo a partir desse valor, que se estabelece um ponto de referência para saber quanto o parafuso rotacionou até chegar no torque final, sendo um parâmetro para medir indiretamente através do ângulo de aperto a dispersão da força encontrada.

Tabela 3 – Dados de aperto

Variável	Valor
Torque início de monitoramento	140 N.m.
Torque limite Inferior	266 N.m.
Torque alvo	280 N.m.
Torque limite superior	294 N.m.
Ângulo limite inferior	30 graus
Ângulo limite superior	80 graus
Velocidade 1	150 rpm
Velocidade 2	52 rpm

Fonte: Próprio Autor

Existem outros parâmetros que foram considerados na criação do programa de aperto, como a precisão, capacidade e rotação da ferramenta eletrônica utilizada, conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Dados da ferramenta de aperto

Variável	Valor
Torque Mínimo	TA /1,05
Torque Máximo	TA *1,05
Velocidade 1	0,85* Rotação máxima em rpm
Velocidade 2	0,15* Rotação máxima em rpm

Fonte: Próprio Autor

Para a realização dos 3 protótipos, foram criados dois programas de aperto. No caso do parafuso com adesivo, foi reproduzido o programa utilizado linha de montagem, que define um torque alvo com limites inferior e superior de aprovação, além de valores mínimo e máximo para a aprovação. Foi desenvolvido um protótipo para confirmar os resultados obtidos na linha de montagem, conforme ilustrado na figura 28. Enquanto para o parafuso proposto, adotou-se uma estratégia de aperto por torque e ângulo.

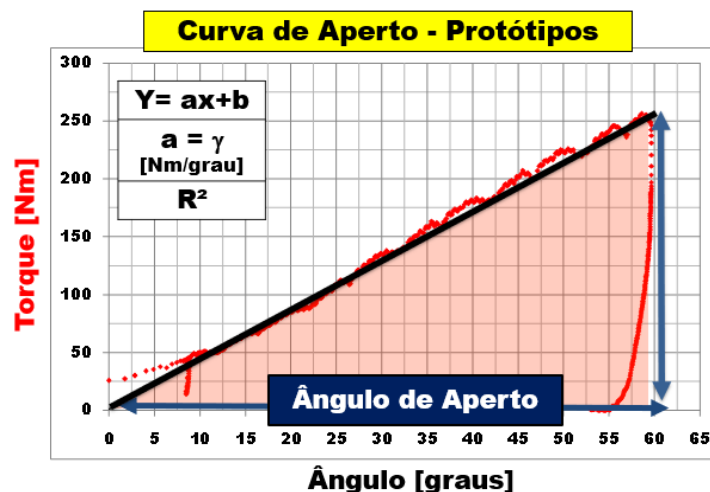
Figura 28 - Experimentos do parafuso com adesivo microencapsulado



Fonte: Próprio Autor

Os 3 protótipos seguem o mesmo procedimento, no qual são analisadas as curvas de apertos na zona elástica do parafuso. Para isso, utiliza-se o método dos mínimos quadrados, por meio de um algoritmo desenvolvido no *Scilab*. Foram analisadas individualmente as 54 curvas de aperto, sendo 18 curvas parafuso com adesivo e 36 curvas sem adesivo. A partir dessas curvas, obteve-se uma reta que melhor aproxima os pontos obtidos experimentalmente através dos ensaios das peças protótipos, conforme pode ser visto na figura 29, fornecendo os valores aproximados dos coeficientes da equação da reta. O coeficiente “a” corresponde ao valor de gama nos casos em que o torque está sendo avaliado. Além disso, o valor do ângulo de aperto é determinado pela distância obtida entre a projeção da reta aproximada na região linear do parafuso no eixo x.

Figura 29 – Análise dos dados dos experimentos



Fonte: Próprio Autor

Através do valor do ângulo de aperto obtido através da projeção no eixo x da reta é possível estimar a força de união gerada durante a aplicação do aperto. Para isso, utiliza-se a capacidade de geração de força que um parafuso consegue gerar por ângulo de aperto. Variável que foi definida anteriormente como sendo beta, que representa a quantidade de força que se obtém do parafuso, quando o mesmo rotaciona de fato na contrapeça durante a aplicação do torque.

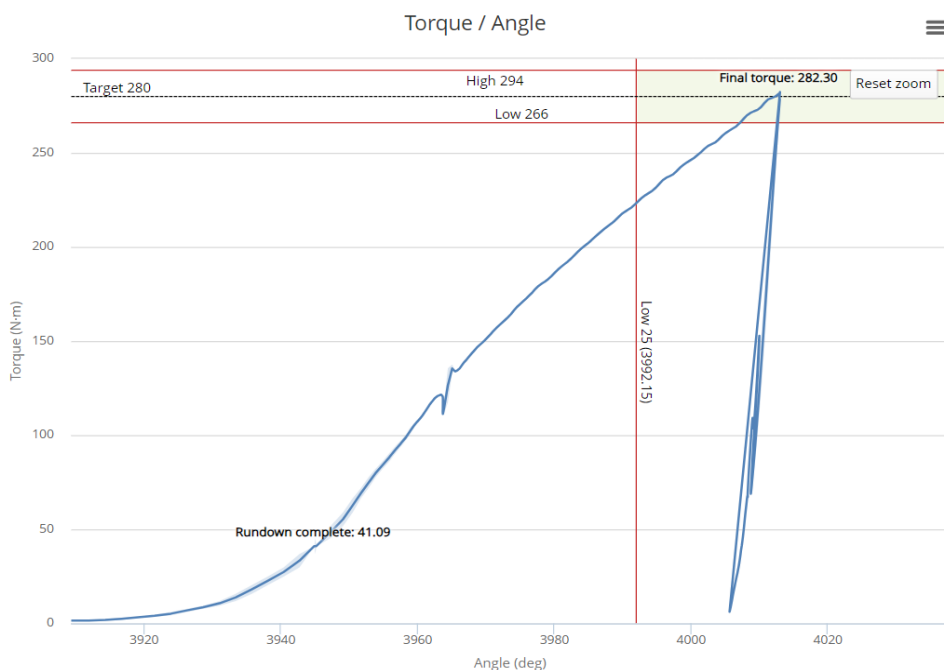
Para representar a variação existente nos parafusos foram analisados todos os valores de beta calculados após o ensaio de DTT e todos os ângulos de aperto calculados nos protótipos, essa estimativa tem como objetivo de reproduzir a variação encontrada em parafusos do mesmo lote. Para os cálculos, foram utilizados os 20 valores obtidos no ensaio DTT, sendo 10 para cada tipo de parafuso, a fim de estimar o valor da força gerada por cada parafuso. Para melhor visualização dessa dispersão foram analisadas de dois modos diferentes o seu comportamento. O primeiro modo, foi de criar uma nuvem de pontos que representa todas as possíveis forças encontradas para cada aperto dos protótipos, e o segundo modo foi de representar o comportamento da força em formato de histograma, para analisar a dispersão dos seus valores semelhante aos dados de torque e ângulo obtidos.

Utilizando o sequenciamento e segmentação dos apertos também para a identificação, foram coletados os dados de torque imediatamente após a montagem, como premissa de que a trava química ainda não começou o seu processo de cura. Para verificar a eficiência de alteração do parafuso, os dados de torque foram coletados e analisados utilizando o torquímetro digital Phoenix III, desenvolvida pela M. Shimizu, em conjunto com o software desenvolvido pelo Centro Tecnológico de Fixação (CTF). [33]

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados analisados foram coletados a partir dos apertos realizados na linha de produção de montagem do diferencial do trator agrícola no ano de 2023, utilizando o *Toolsnet*. Na figura 30, observa-se em verde a janela de aprovação, na qual, para ser considerado aprovado, o aperto deve estar dentro dos limites estabelecidos de torque (266 a 294 N.m.) e de ângulo (30 a 80 graus). Caso o aperto não esteja obrigatoriamente dentro desses dois intervalos, o software indica obrigatoriamente o motivo da reprovação do aperto, por meio das combinações dos resultados de “NOK” (alto ou baixo) e “OK” dos valores de torque e ângulo.

Figura 30 – Curva de aperto *Toolsnet*



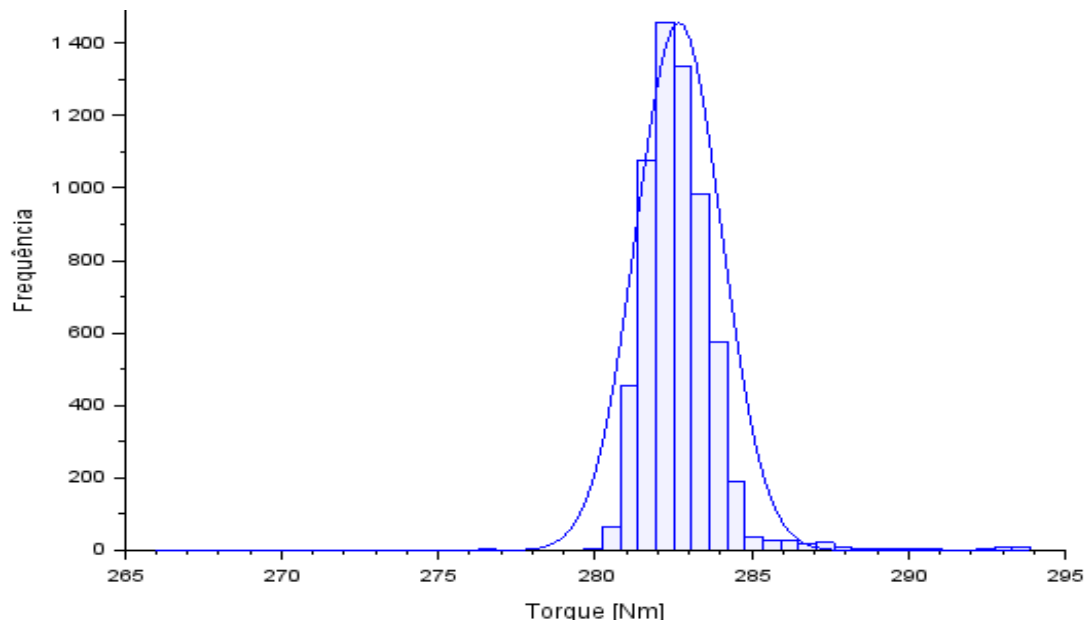
Fonte: Próprio Autor

As dispersões dos valores de torque foram analisadas utilizando histogramas como método de análise, apesar do torque não ser baseado na distribuição normal, é um excelente parâmetro, permitindo visualizar e compreender variações do processo. [3]

Para avaliar a importância de uma análise adequada da força de união gerada em processos de torque, na figura 31, foram primeiramente analisados

os dados de torque como a única condição necessária para a aprovação utilizando o parafuso com adesivo e a estratégia de aperto.

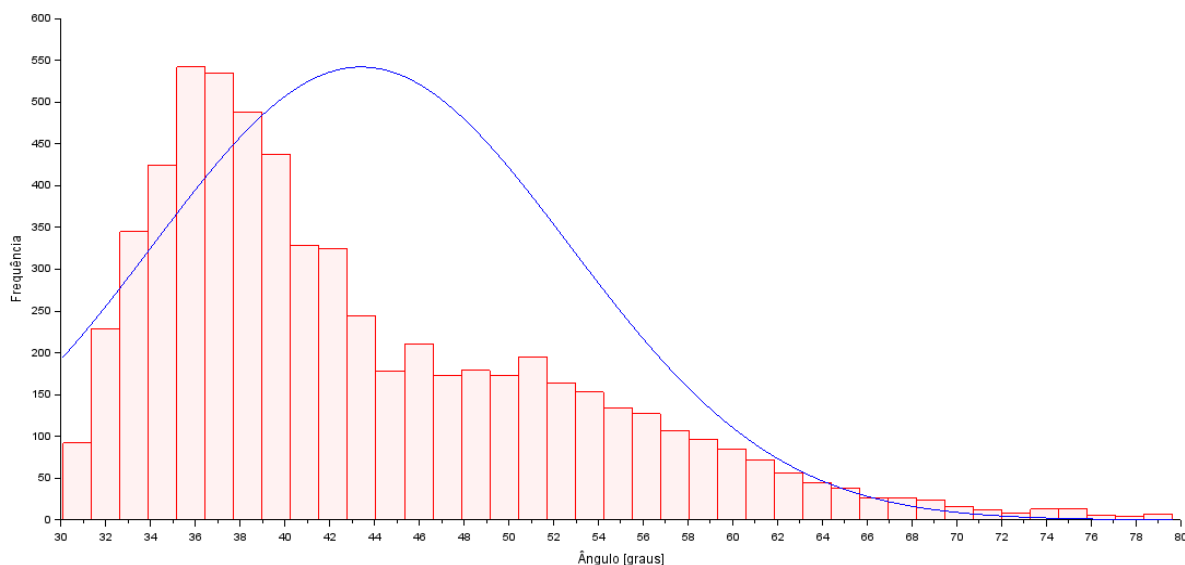
Figura 31 – Histograma de torque 1 ano de produção do parafuso com adesivo



Fonte: Próprio Autor

A análise dos valores encontrados permite concluir que o processo apresenta uma alta repetibilidade e tendência de centralização, uma vez que os valores de torque estão dentro dos limites de torque estabelecidos. No entanto, essa análise é incompleta. Os histogramas de ângulo de aperto gerados, para os casos em que teoricamente estariam aprovados o torque, como podem ser observados na figura 32, mostram uma alta dispersão dos seus valores, indicando a instabilidade de força de união gerada no processo, gerando pontos de alta e baixa compactação, aumentando as chances de vazamentos durante a sua operação.

Figura 32 – Histograma de ângulo de aperto: Janela atual de aprovação

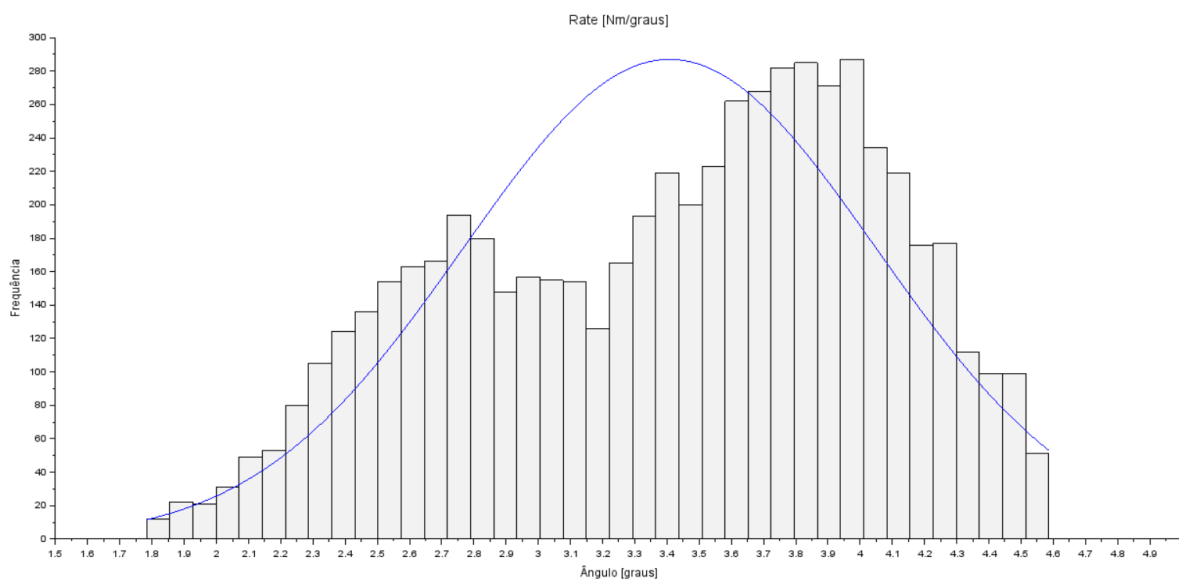


Fonte: Próprio Autor

Historicamente, grande ênfase tem sido dada apenas ao torque aplicado como método de controle da qualidade de aperto. É uma crença comum na indústria que, se o valor correto de torque for alcançado, a integridade estrutural da junta será garantida, no entanto diversos acidentes e problemas de montagem resultam da aplicação de torque falso que pode ocorrer devido à incorreta definição da estratégia de aperto e ao baixo controle do coeficiente de atrito do fixador. [6]

Os histogramas de gama, na figura 33, indicam que existem tendências de comportamentos distintas encontradas no parafuso com adesivo. Apresentando apertos que, devido à aplicação da trava química, necessitam de mais energia para conseguir converter o torque aplicado em rotação, havendo apertos que apresentam maior ou menor dificuldade para serem realizados. Essa variação está relacionada com a resistência (atrito) que o parafuso encontra para alcançar o torque alvo.

Figura 33 – Histograma de gama de aperto: Janela atual de aprovação

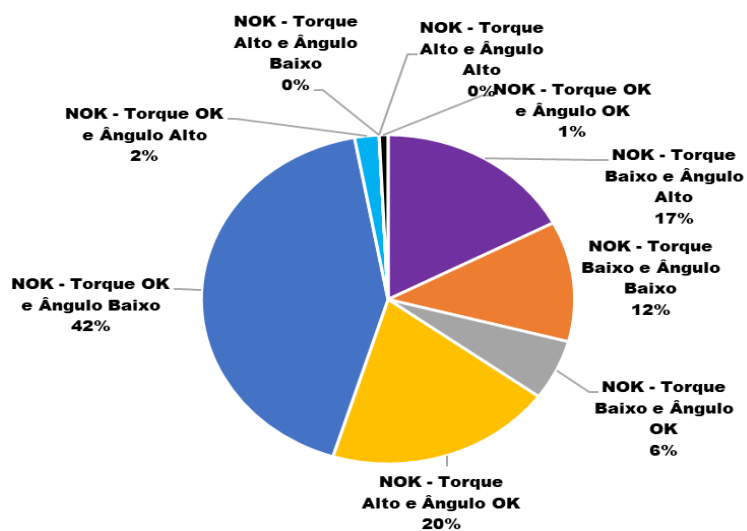


Fonte: Próprio Autor

É possível classificar as reprovações de aperto em 8 resultados possíveis, sendo cada uma dessas possibilidades encontradas a representação das combinações de torque e ângulo. Na figura 34, estão destacadas as reprovações e suas respectivas porcentagens em relação as reprovações dentro dos 10% do total de apertos reprovados.

Figura 34 – Reprovações da linha de produção

Reprovações da Linha de Produção



Fonte: Próprio Autor

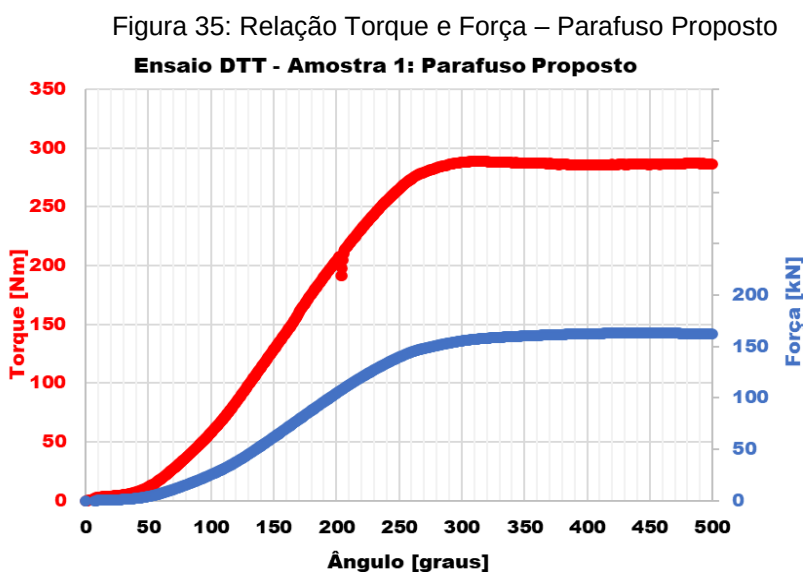
Ao analisar o percentual de reprovações dos apertos da linha de produção durante 1 ano, observa-se que a taxa de reprovação é de aproximadamente 10%. Os modos de falha encontrados por meio reprovações da linha de montagem estão, na sua maioria, relacionados à combinação de torque aprovado e com ângulo baixo. Essa combinação indica que 42% das reprovações são atribuídas ao torque falso, representado pelo baixo ângulo de aperto gerado, sendo esse comportamento atribuído a uma maior dificuldade (atrito) de se concluir os apertos, aumentando a dispersão de energia (torque) e da incorreta definição dos limites da estratégia de aperto. O segundo modo de falha mais comum, com 20% de ocorrência, é a combinação de torque alto e ângulo aprovado. Essa reprovação tem como objetivo de evitar o desgaste da ferramenta de aperto, evitando que apertos com elevados coeficientes de atrito, que exigem necessariamente maiores quantidades de energia aplicada para superar a alta resistência de contrato entre o parafuso e a contrapeça, ultrapassem a capacidade da ferramenta, essa reprovação também está relacionada a incorreta definição do intervalo de aprovação de ângulo. Com 17%, o terceiro modo de falha com maior frequência é a combinação entre torque baixo e ângulo alto, causada pelo baixo coeficiente de atrito dos parafusos, que gera uma força de união elevada para o mesmo torque aplicado. E com 12%, temos a combinação de torque e ângulo baixos, indicando apertos de baixa força de união, que não foram concluídos, indicando problemas relacionados ao processo como escape de soquete e soltura de gatilho por parte do operador antes do momento adequado. A análise dos principais modos de falha revela que as reprovações ocorrem principalmente por dois motivos: Variação do coeficiente de atrito e definição incorreta da estratégia de aperto. Pode-se supor erroneamente que a redução das janelas de ângulo tornará o processo de aperto mais eficaz. No entanto, embora essa alteração resulte na diminuição da dispersão de valores de força, ela não garante necessariamente uma melhoria no desempenho do processo, podendo até resultar em um aumento nos índices de rejeição na linha de montagem.

A VDI 2230 descreve que o aperto controlado por ângulo é o estado da arte atual na indústria automotiva. No entanto, para que essa estratégia seja eficaz deve-se ter o cuidado de não exceder o limite de escoamento, pois isso

prejudicaria a reutilização do parafuso e principalmente ter um controle do coeficiente de atrito. Para isso, é necessário, para a definição da estratégia de aperto, o conhecimento das propriedades dos parafusos através dos ensaios DTT. [4]

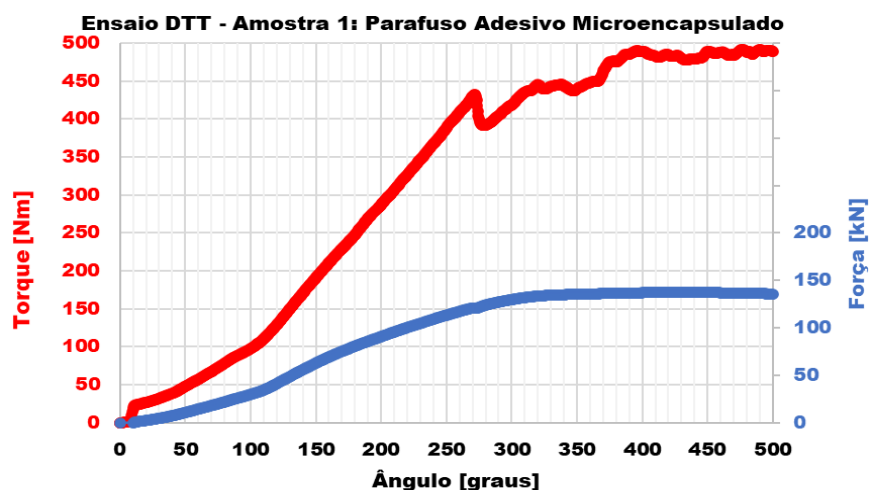
3.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DETERMINADOR TORQUE TENSÃO

Após a realização dos 20 ensaios de DTT, foram analisados os comportamentos tribológicos e mecânicos por meio das 10 curvas de aperto de cada tipo de parafuso testado. Como pode ser observado na figura 35, em que se apresenta um exemplo da curva gerada pelo parafuso proposto, e na figura 36, e para o parafuso com adesivo. Estão destacadas nessas figuras os dados obtidos simultaneamente de torque (em vermelho) e de força (em azul), em função ao ângulo de aperto.



Fonte: Próprio Autor

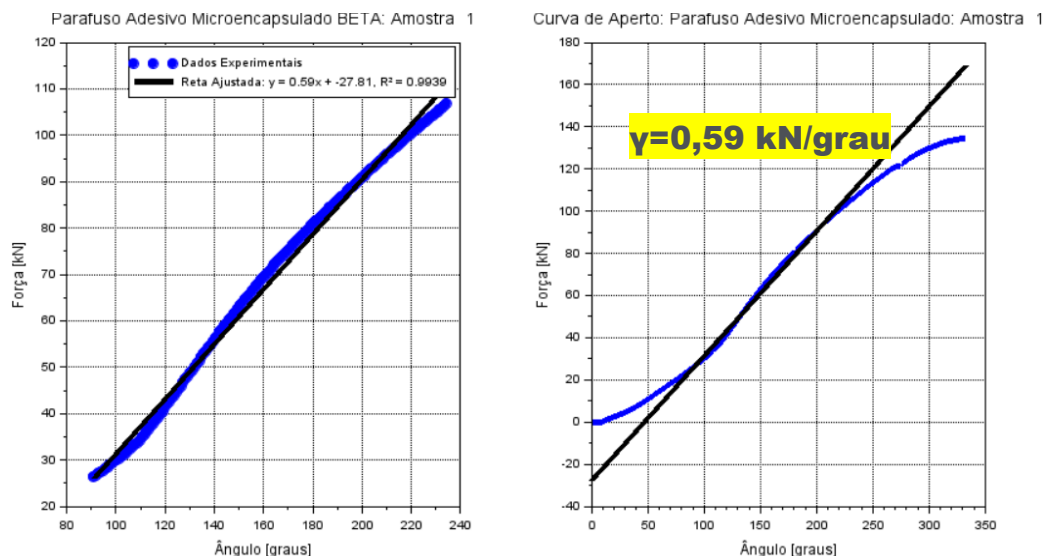
Figura 36: Relação Torque e Força – Parafuso com adesivo



Fonte: Próprio Autor

Nas figuras 37 (com adesivo) e 38 (sem adesivo), está ilustrado o procedimento para a obtenção dos 10 valores de beta para o parafuso com e sem adesivo, respectivamente. Diferentemente dos valores obtidos pelos ensaios DTT, os valores de beta e gama foram calculados no *Scilab* utilizando o método dos mínimos quadrados. Para isso, é analisado apenas os valores de força em função do ângulo de aperto. Na imagem à esquerda, está representada a aproximação da zona de aperto pelo método dos mínimos quadrados, evidenciando a reta que aproxima a região elástica do parafuso, enquanto na imagem à direita está a curva de aperto completa.

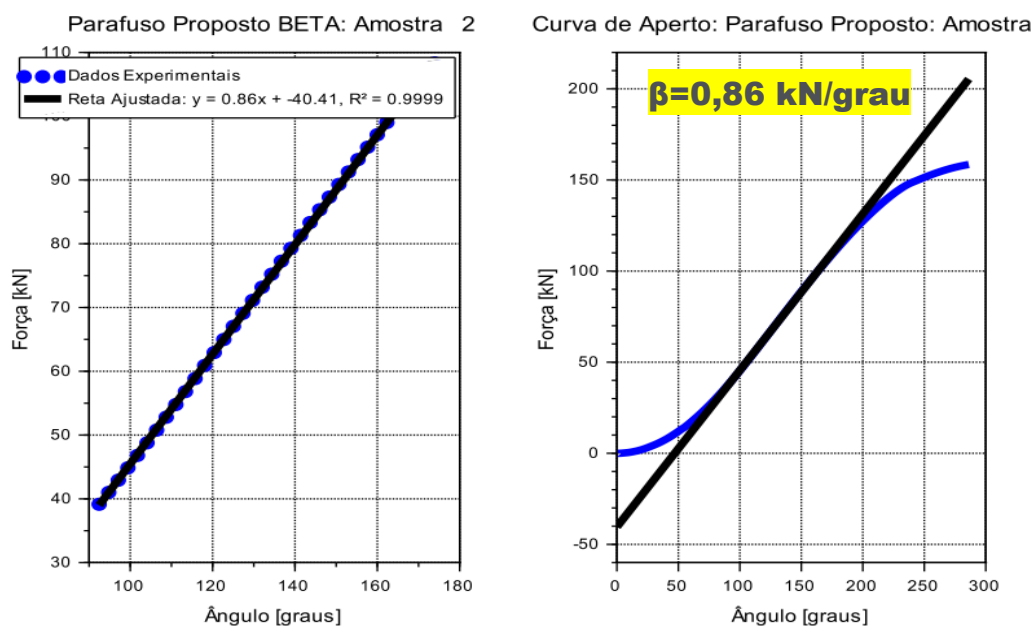
Figura 37 – Beta: Parafuso com adesivo



Fonte: Próprio Autor

Comparando os dois parafusos, observa-se a maior capacidade de geração de força do parafuso sem o adesivo. A curva de aperto do parafuso gerada pelo ensaio DTT apresenta um comportamento no qual podem ser identificadas três fases distintas. A primeira fase corresponde ao assentamento da junta, seguida pela segunda fase em que ocorre transição para região linear e, por fim, na terceira fase em que ocorre a mudança da inclinação, indicando o início da fase elastoplástica.

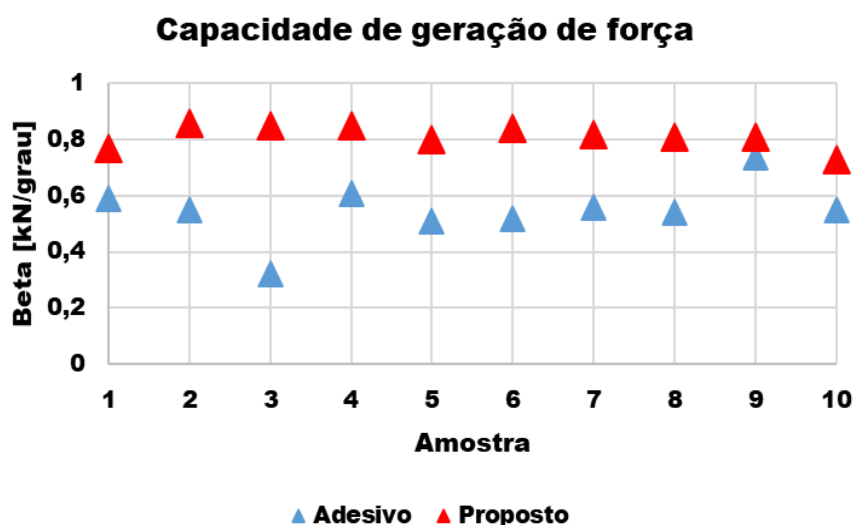
Figura 38: Ensaio DTT – Beta: Amostra 2: Parafuso Proposto



Fonte: Próprio Autor

Na figura 39, estão apresentados todos os 20 dados de beta calculados. Destaca-se no parafuso proposto os valores elevados e estáveis encontrados, representando uma maior capacidade de gerar força de união para cada ângulo de aperto, resultando em uma menor dispersão de energia e um maior aproveitamento das propriedades mecânicas do parafuso.

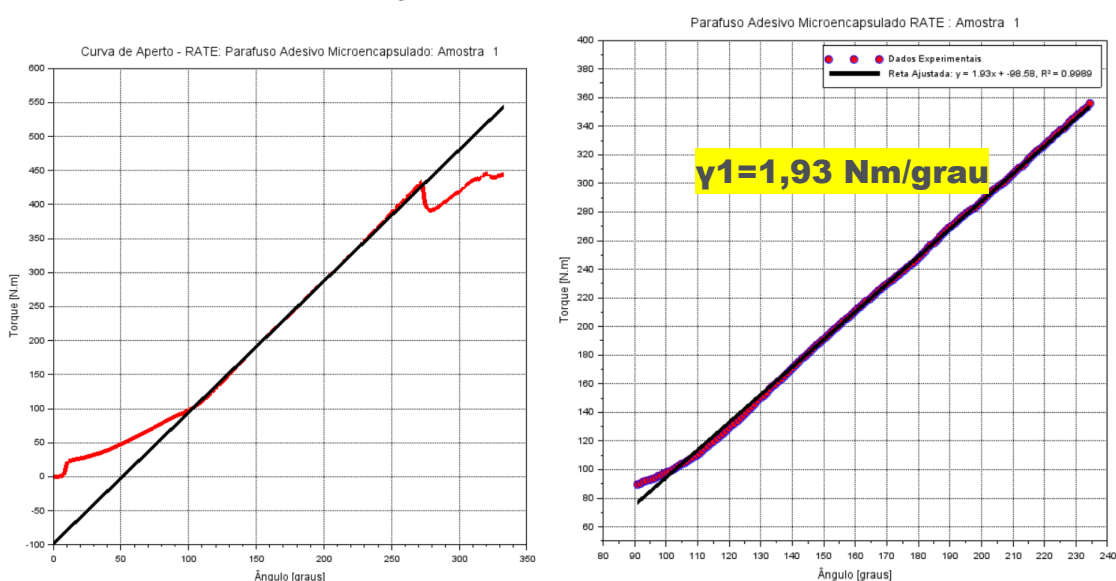
Figura 39 – Dados de capacidade de geração de força (beta)



Fonte: Próprio Autor

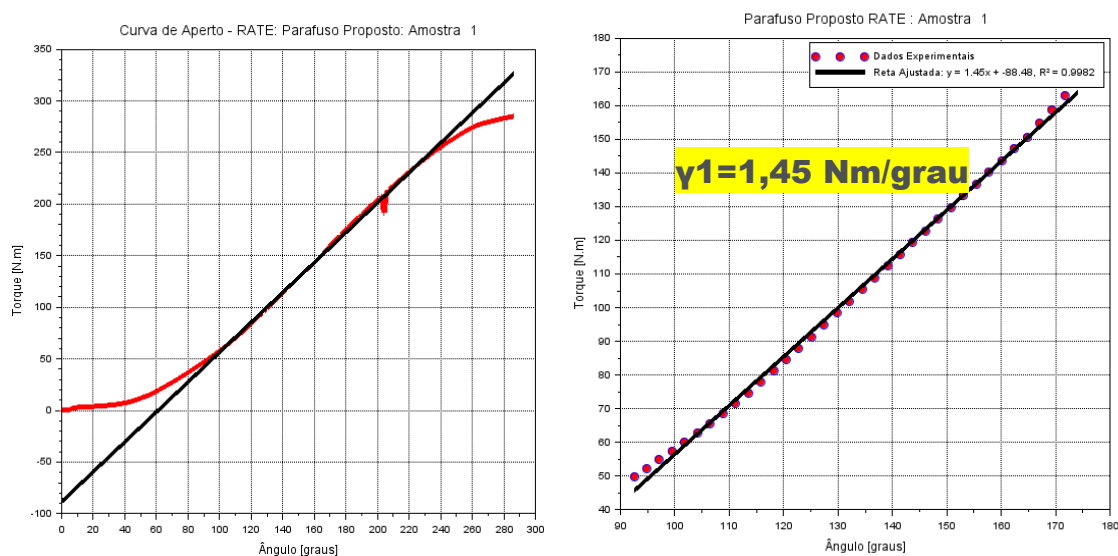
Esses resultados indicam uma maior uniformidade no revestimento do parafuso proposto e, no momento do aperto, resulta em uma menor dispersão dos valores de força, promovendo uma distribuição de forças ao longo da junta mais uniforme e confiável. Seguindo o mesmo procedimento de beta, foram analisados agora os resultados de torque em função do ângulo de aperto. Os valores de gama foram calculados para o parafuso com adesivo (figura 40), e sem o adesivo (figura 41). [4-5]

Figura 40 – Gama: Parafuso com adesivo



Fonte: Próprio Autor

Figura 41 – Gama: Parafuso proposto

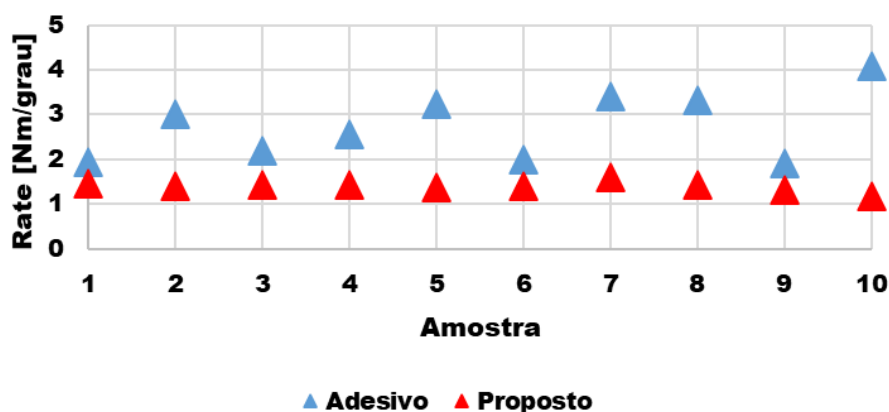


Fonte: Próprio Autor

Na figura 42, estão apresentados os 20 valores calculados de rate. Verifica-se o baixo valor apresentado pelo parafuso proposto, representado pela menor dificuldade de transformar torque em ângulo de aperto. Semelhante ao beta, os parafusos com adesivo apresentam um comportamento de instabilidade e inferiores ao parafuso proposto.

Figura 42 – Transformação de torque em ângulo de aperto (Rate)

Transformação de torque em ângulo de aperto

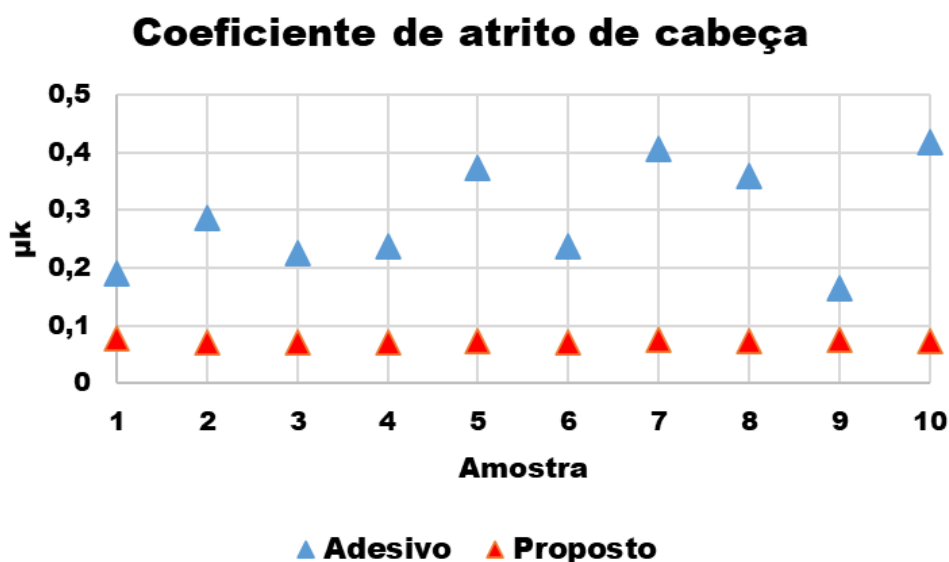


Fonte: Próprio Autor

Analisando os resultados de coeficiente de atrito, iniciando pelo atrito na cabeça do parafuso, como pode ser visto na figura 43. No parafuso proposto, o

comportamento uniforme é atribuído ao acabamento superficial, que permite que o seu revestimento apresente uma superfície coesa, facilitando a transferência de energia aplicada pela ferramenta eletrônica em força de união, por meio de uma baixa resistência entre as superfícies em contato.

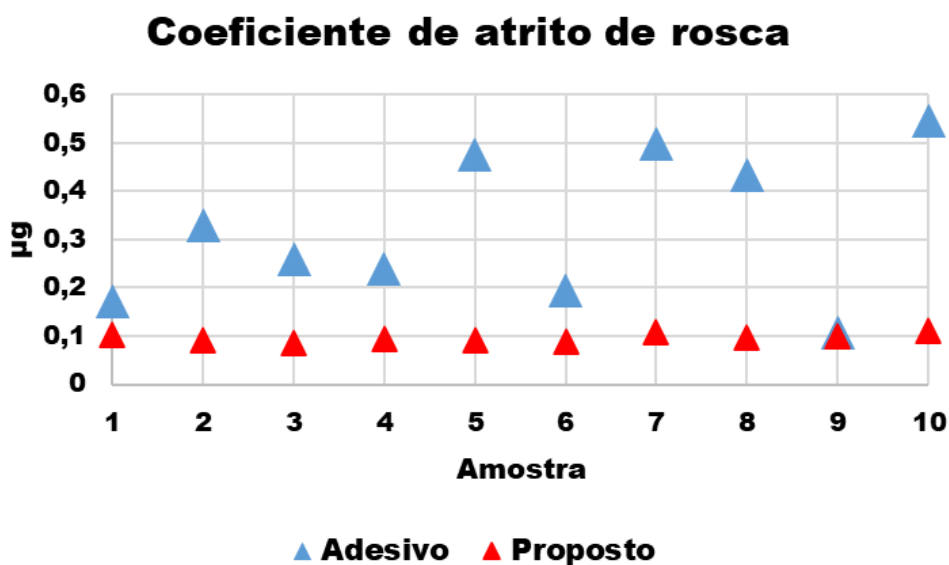
Figura 43 – Dados de coeficiente de atrito de cabeça



Fonte: Próprio Autor

A presença do adesivo no parafuso aumenta a rugosidade, criando uma resistência no contato entre as superfícies. Isso, por sua vez, eleva o valor do torque de assentamento, gerando dispersão de energia na forma de calor e aumentando o tempo necessário para que o parafuso se acomode antes que o fixador supere as forças resistivas, antes de propriamente começar a unir as contrapeças, estando a variação do coeficiente de atrito de rosca do parafuso com adesivo diretamente relacionada ao comportamento da trava química, criando uma superfície irregular e aumentando a dispersão dos valores de coeficiente de atrito na rosca. Na figura 44, observa-se pontos de baixo e alto de atrito na rosca devido ao rompimento das partículas presentes no adesivo.

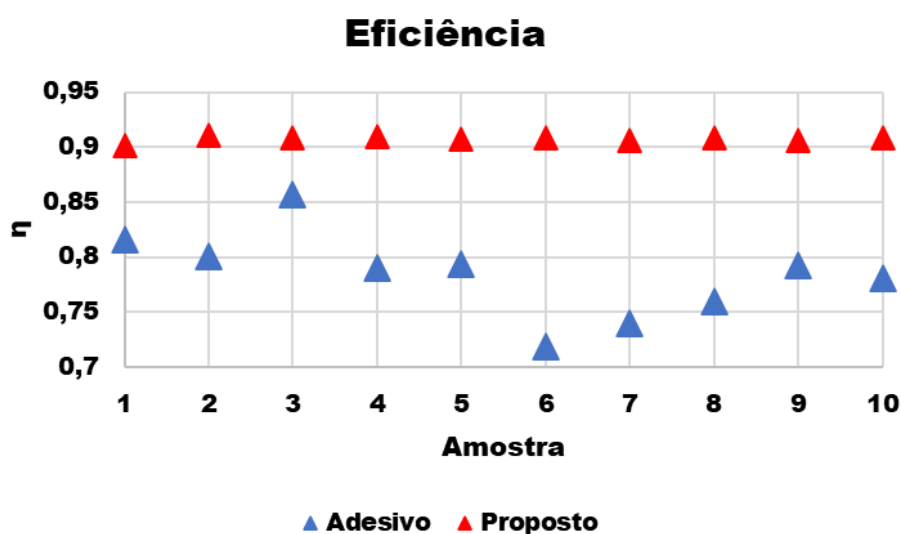
Figura 44 – Dados de coeficiente de atrito de rosca



Fonte: Próprio Autor

Na figura 45, ao comparar os dois parafusos, observa-se que o parafuso sem a trava apresenta maior eficiência e um padrão uniforme. A eficiência de aproveitamento pode ser atribuída à menor dispersão de torque na rosca. Os ensaios indicam que a variação da eficiência está diretamente relacionada ao coeficiente de atrito de rosca, uma vez que as propriedades dimensionais permanecem idênticas em ambos parafusos.

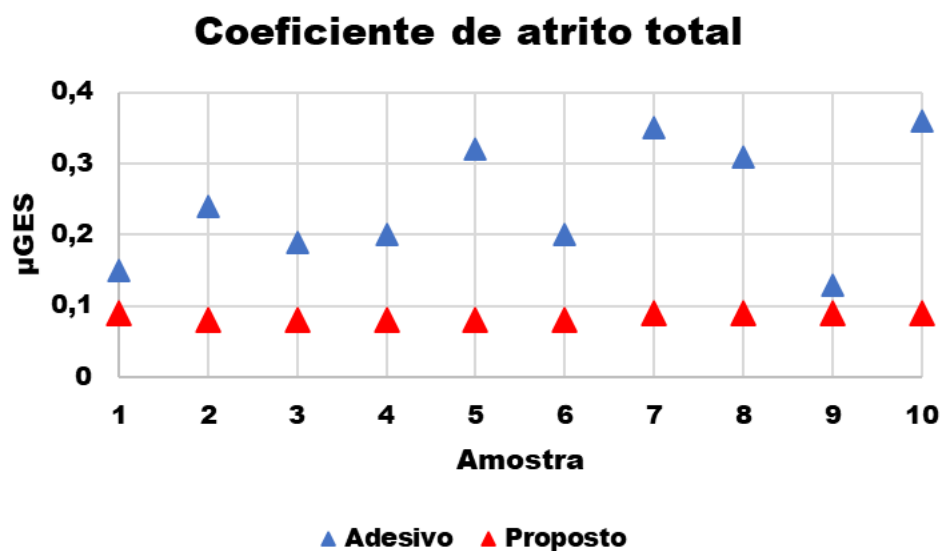
Figura 45– Dados da eficiência do parafuso



Fonte: Próprio Autor

O coeficiente de atrito total é uma variável única que incorpora os valores de atrito de rosca e de cabeça, apresentando o comportamento geral do parafuso. Verifica-se na figura 46 que o parafuso proposto apresenta o comportamento uniforme, com baixos valores de atrito, seguindo o mesmo comportamento dos coeficientes de rosca e de cabeça.

Figura 46 - Dados de coeficiente de atrito dos parafusos



Fonte: Próprio Autor

Há uma preocupação de que coeficientes de atrito baixos permitam o auto afrouxamento com mais facilidade quando as juntas são carregadas dinamicamente. Fabricantes especificam em seus padrões internos, os limites de coeficiente de atrito, desejando um intervalo de atrito bem definido em seus elementos de fixação adquiridos. [4]

O limite superior para os valores aceitáveis também é necessário para evitar que a variação no pré-aperto não seja excessiva. Esse comportamento tem o seu efeito principalmente em parafusos com estratégias de aperto sem controle de ângulo. [6]

O processo de seleção de adesivos é desafiador, pois não existe um adesivo universal que atenda a todas as aplicações. A escolha do adesivo adequado é frequentemente complicada pela variedade de opções disponíveis. Para realizar uma seleção eficaz, é necessário considerar diversos fatores, como a natureza dos substratos a serem unidos, o método de cura e aplicação do

adesivo, os ambientes de serviço esperados e as tensões relacionadas às quais a junta estará sujeita durante o uso. Essa complexidade aumenta a necessidade da personalização de cada junta, especialmente em juntas críticas, exigindo a implementação de uma estratégia de aperto específica. Isso envolve uma análise criteriosa das condições do parafuso e das ferramentas e das contrapeças envolvidas no processo de aperto. [16]

3.2 NOVA ESTRATÉGIA DE APERTO

A nova estratégia de aperto para o parafuso proposto tem como objetivo eliminar o risco de aplicação de um torque falso junta. Após a realização dos ensaios DTT, foram obtidos os valores de coeficientes de atrito, beta, rate, torque de assentamento, limite de escoamento e a ductilidade de todas as 20 amostras realizadas, tabela 5. Para uma análise mais abrangente dos efeitos no parafuso durante o aperto, o modelo de molas já não é mais suficiente, as resiliências devem ser levadas em consideração. A partir desses valores obtidos através do ensaio DTT do parafuso proposto, será possível criar a estratégia de aperto por torque e ângulo de deslocamento. [4]

Tabela 5 – Valores calculados do ensaio de DTT

	Parafuso Proposto	Parafuso Adesivo	Unidade
Beta Médio	0,85	0,6	kN/grau
Gama Médio	2,73	1,2	Nm/grau
Resiliência	$6,5 \times 10^{-6}$	$9,2 \times 10^{-6}$	mm/N

Fonte: Próprio Autor

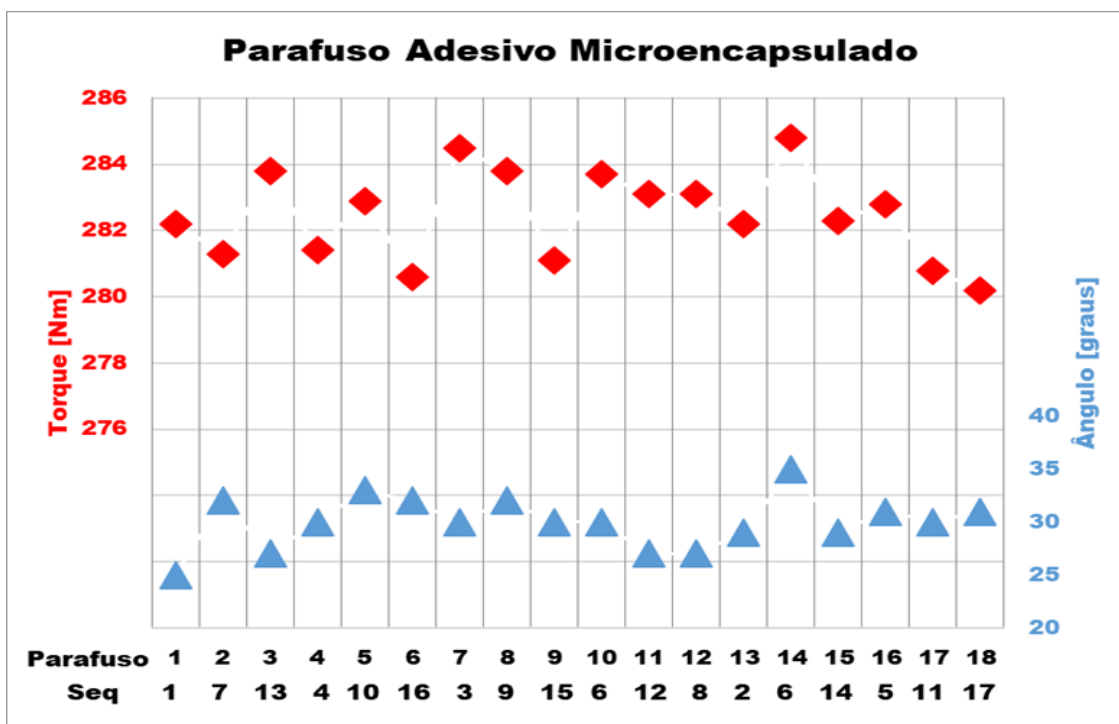
Para a implementação da estratégia de aperto por torque e ângulo, é necessário o conhecimento das propriedades do parafuso. A nova estratégia de aperto adotada por torque e ângulo, é dividida em duas etapas: Pré-torque e deslocamento angular. Na primeira etapa, o conhecimento do torque de assentamento é necessário, pois é nesse momento que o parafuso está sendo acomodado na junta, superando os atritos de cabeça e de rosca. O valor utilizado para o pré-aperto deve ser obrigatoriamente superior a esse valor, para que o parafuso realize o aperto após estar devidamente posicionado. Na segunda etapa, existem dois limites que devem ser considerados para a escolha do

ângulo de deslocamento adequado: limite de escoamento do parafuso e a dureza da contrapeça. Essas limitações são necessárias para garantir que, durante a aplicação, não ocorram deformações plásticas das juntas e dos parafusos envolvidos. [4]

3.3 ENSAIOS DOS PROTÓTIPOS

Em peças produtivas das coroas dos diferenciais, foram realizados os ensaios dos protótipos, utilizando os parafusos propostos e com adesivo. No caso do adesivo, foi replicada a mesma estratégia de aperto utilizada na linha de produção na montagem da coroa do diferencial de tratores agrícolas, por meio da aplicação de torque alvo (TA) de 280 N.m., com uma janela de aprovação de ângulo de aperto. Enquanto para o proposto, adotou-se a nova de estratégia de aperto, utilizando pré-torque e ângulo de deslocamento (80 N.m. + 40 graus), o que resulta agora em uma dispersão do valor de torque. O torque, antes a principal variável do processo de aperto, agora passa a se comportar como uma resultante do processo – torque resultante (TR) – podendo variar conforme o necessário para se atingir uma força de união constante, representada pelo ângulo de aperto. O comportamento dos apertos dos parafusos com adesivo pode ser observado na figura 47, a variação do coeficiente de atrito durante o processo de aperto, afetando negativamente a relação torque e força tensora gerada, não garantindo uma força de união uniforme. A adoção da estratégia de torque com uma janela de aprovação reduz a dispersão de forças encontradas na junta aparafusada. No entanto, essa estratégia não é sensível a alterações que podem ocorrer no processo de aperto, evidenciando instabilidades da força gerada, conforme pelo valor de ângulo de aperto.

Figura 47 – Dispersão de torque e ângulo do parafuso com adesivo

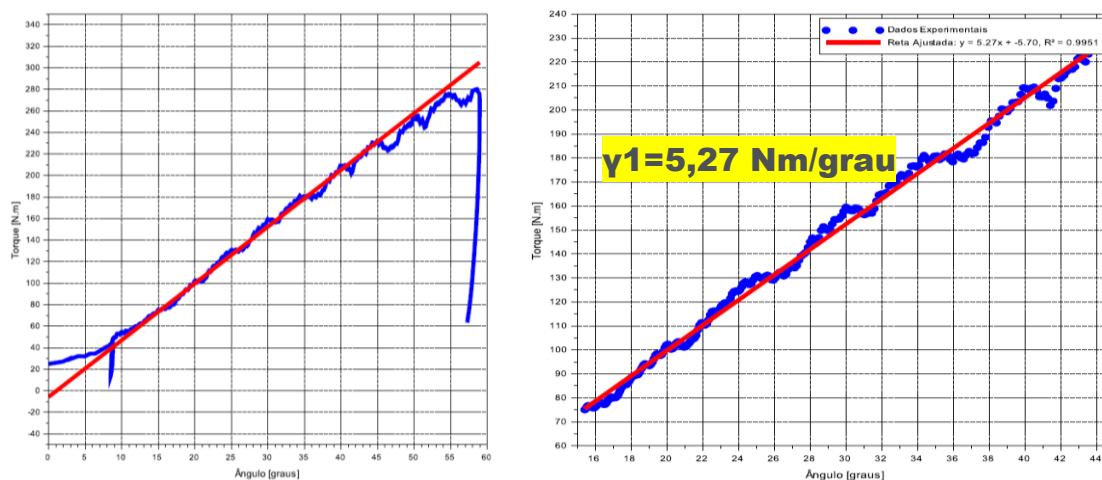


Fonte: Próprio Autor

As condições das superfícies nas interfaces roscadas, juntamente com o adesivo microencapsulado, tornam o coeficiente de atrito de rosca elevado e variável. Esse fator, aliado à estratégia de torque alvo sem o controle do ângulo de aperto, gera uma dispersão de força, necessária para superar o atrito do parafuso, resultando em um ângulo de aperto variável. Essas condições comprometem o desempenho, gerando um baixo rendimento na sua utilização, o que influenciando na integridade da junta. Devido ao fato de a relação torque ser altamente sensível a variações normais de atrito, os resultados da avaliação da alteração do revestimento do parafuso proposto podem melhorar a confiabilidade e a segurança das montagens aparafusadas, especialmente em aplicações críticas, com a da coroa do diferencial. [8]

Utilizando o *Scilab*, na figura 48, está representado um dos 18 apertos realizados com o parafuso com adesivo microencapsulado. Para facilitar a identificação, em azul estão os pontos obtidos experimentalmente de torque, e em vermelho, a reta gerada através do método dos mínimos quadrados para a melhor aproximação da reta.

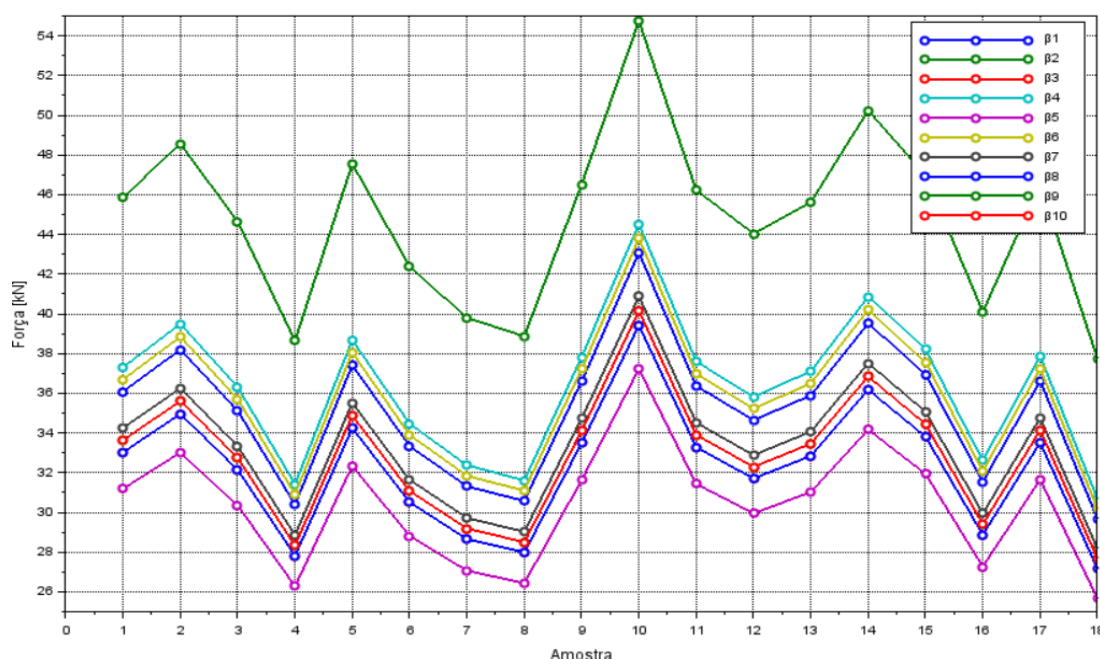
Figura 48 – Protótipo: Curva de aperto parafuso com adesivo



Fonte: Próprio Autor

Os 18 apertos realizados utilizando o adesivo microencapsulado, servem como base de referência para a análise das alterações propostas no presente trabalho. Realizando esse procedimento de obtenção dos valores de gama e ângulo de aperto, figura 48, juntamente com os 10 valores de beta obtidos dos ensaios de DTT, foi possível analisar os ensaios dos protótipos, através da criação de uma nuvem de pontos possíveis gerados por cada parafuso, conforme pode ser observado na figura 49. Essa variação de força de união encontrada, ocorre devido ao baixo controle do processo, o que se pode ser observado pela baixa eficiência do parafuso e de beta, reduzindo a capacidade de geração de força do parafuso. A variação do coeficiente de atrito aumenta a dispersão da força encontrada do processo, aumentando a dificuldade de se transformar a energia aplicada em ângulo de aperto, criando pontos de alta dispersão e instabilidade ao simular o comportamento encontrado em parafusos de mesmo lote.

Figura 49 – Dispersão de força: Parafuso adesivo



Fonte: Próprio Autor

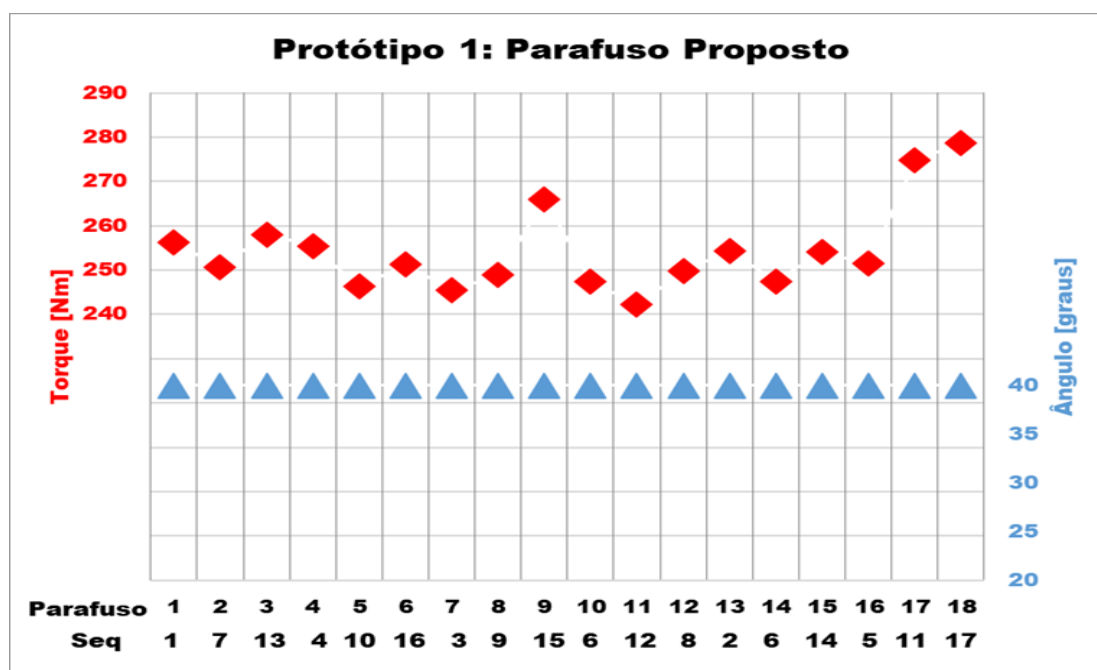
A estratégia de aperto por torque e ângulo de deslocamento constitui em um método indireto de medição de comprimento do parafuso, proporcionando uma qualidade superior de aperto. Isso ocorre porque a deformação linear do parafuso, que pode ser medida em relação ao passo da rosca, é teoricamente diretamente proporcional ao ângulo de rotação percorrido. Observa-se uma redução nos valores de torque de assentamento, indicando uma menor dificuldade do parafuso proposto em converter a energia aplicada em ângulo. Esse comportamento está relacionado à diminuição do coeficiente de atrito total, o que resulta em menores valores de torque. No entanto, devido à maior capacidade de conversão do ângulo de aperto em rotação, tal alteração é evidenciada pela estabilidade do ângulo de aperto e pelos valores de taxa de variação. A adoção da estratégia de aperto por torque e ângulo permite superar quaisquer adversidades encontradas durante o processo de aperto, alcançando uma força de união mais estável e uniforme. Contudo, essa estratégia apresenta melhor eficácia quando o parafuso possui propriedades uniformes e está bem dimensionada na junta. [4]

As vantagens nos coeficientes de atrito baixos, como a necessidade de um valor menor de torque devido a menor resistência encontrada no momento

do aperto. Verifica-se que o torque obtido apresenta variação justamente por ser a quantidade de energia que foi aplicada para superar as resistências encontradas durante o aperto. [6]

Como os valores de atrito são reduzidos em comparação com os parafusos com adesivo, o torque necessário apresenta valores mais baixos de torque. A estabilidade da força de união pode ser comprovada através da uniformidade dos valores de ângulo de aperto. Os valores obtidos de torque e ângulo obtidos, estão exibidos na figura 50. Nela, observa-se a variação de torque, que resultada diretamente do processo de aperto. É possível notar as possíveis alterações e a obtenção de uma força de união constante por meio da uniformidade dos valores do ângulo. [4]

Figura 50– Protótipo 1: Valores de torque e ângulo de aperto

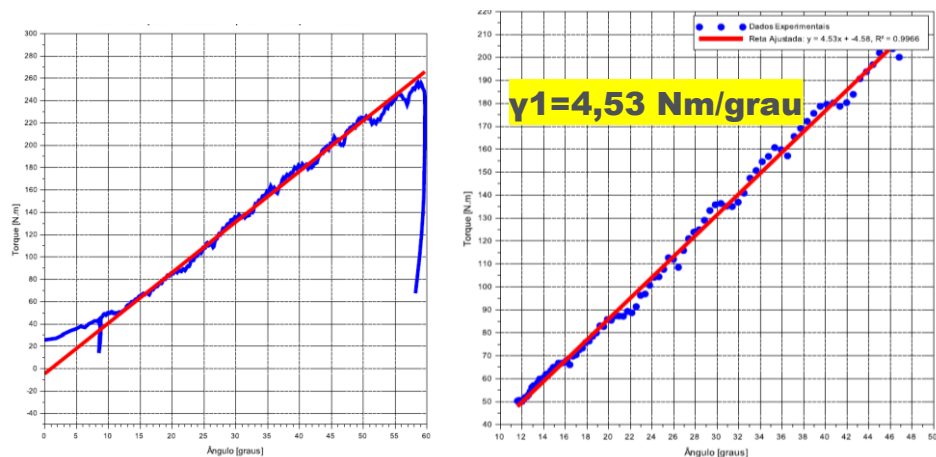


Fonte: Próprio Autor

Para a validação da análise dos apertos realizados utilizando a nova estratégia de aperto por torque e ângulo de deslocamento, foi seguido o mesmo procedimento, resultando na obtenção de mais 18 curvas de aperto utilizado novamente o parafuso proposto. Na figura 51, está representada a curva de aperto da segunda coroa do diferencial, utilizando os parafusos proposto. Novamente, foram traçadas as retas que melhor aproximem a curva experimental, para uma reta na região linear do parafuso e obtendo os valores

de gama, para a análise em conjunto dos valores obtidos por torque resultante e ângulo de aperto.

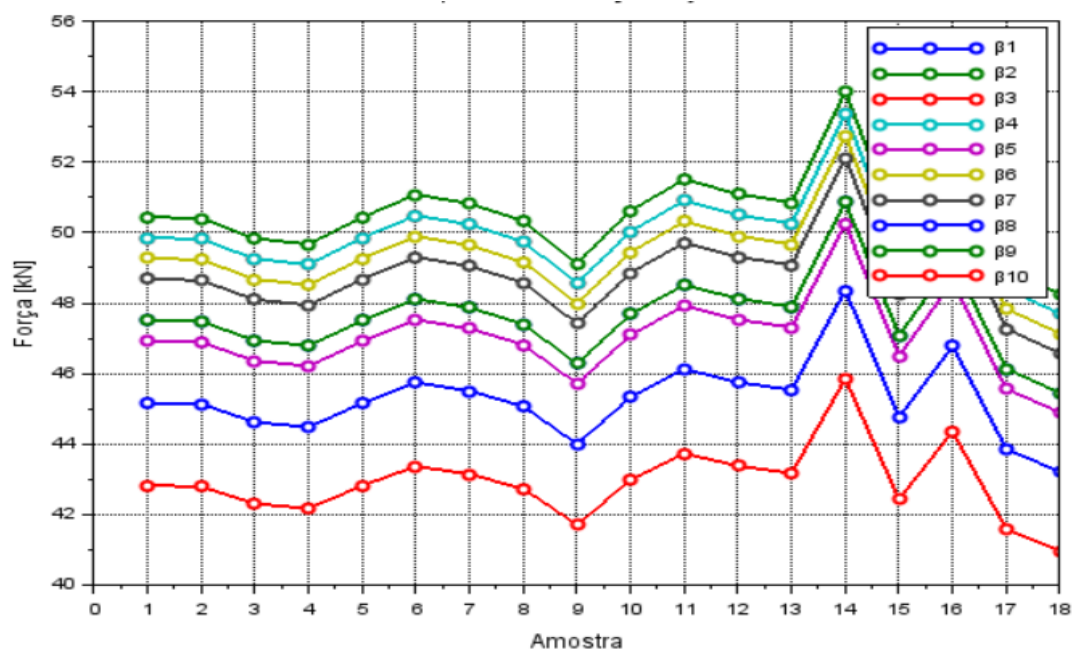
Figura 51 – Protótipo 1: Curva de aperto parafuso proposto



Fonte: Próprio Autor

A obtenção da nuvem de pontos possível de força gerada por cada parafuso proposto do protótipo 1, como pode ser vista na figura 52, considerando as variações possíveis de serem encontradas conforme os 10 valores de capacidade de geração de força obtidos dos ensaios de DTT.

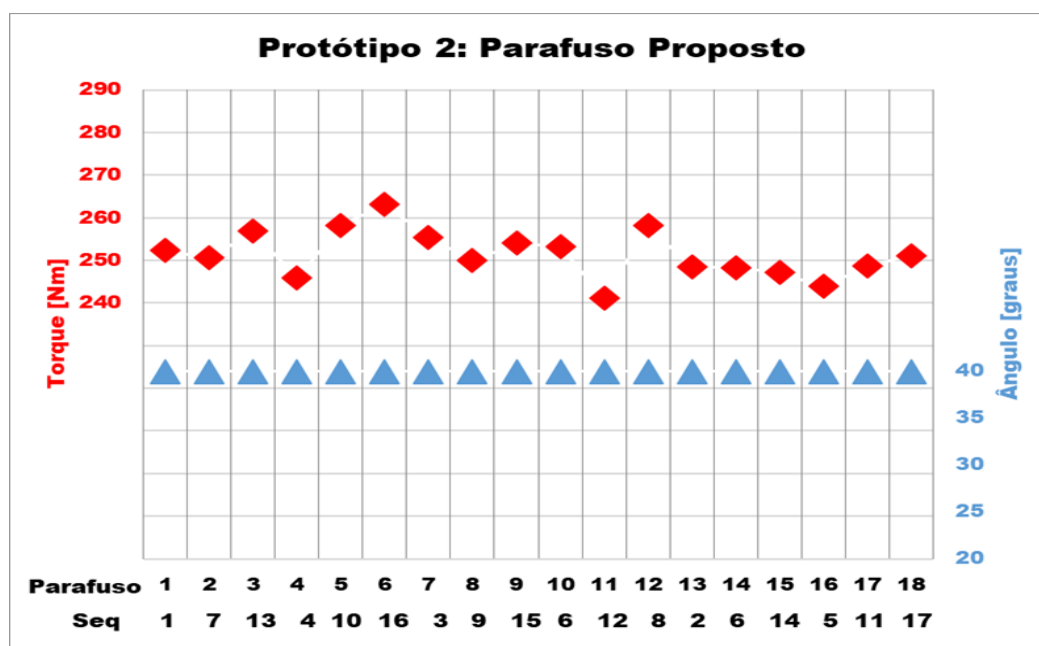
Figura 52 – Protótipo 1 : Dispersão de força: Parafuso proposto 1



Fonte: Próprio Autor

No parafuso proposto, figura 53, observa-se um maior controle sobre o coeficiente de atrito, o que resulta em uma redução de energia necessária para gerar uma força de união superior. Destaca-se o comportamento estável dos parafusos propostos, evidenciado pela alta repetibilidade.

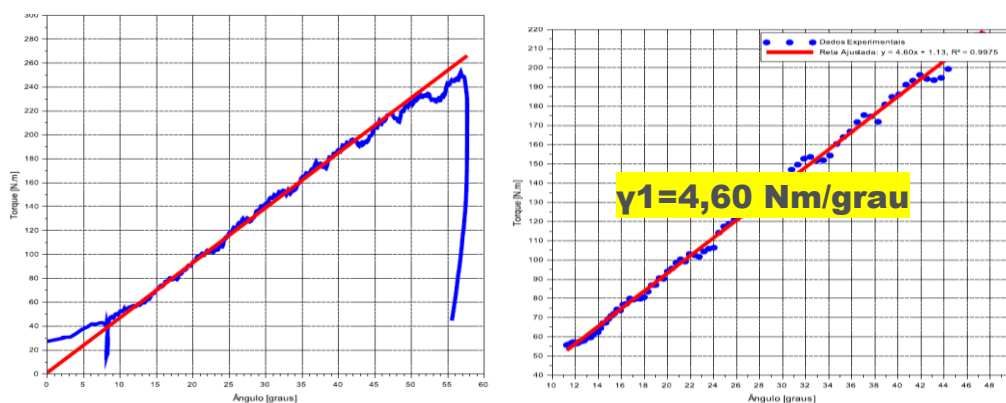
Figura 53 – Dispersão de torque e ângulo do parafuso proposto 2



Fonte: Próprio Autor

Os valores obtidos através do protótipo 2 seguem o mesmo procedimento dos demais ensaios. Na figura 54, são apresentados os valores de beta provenientes dos ensaios DTT, juntamente com os ângulos de aperto encontrados.

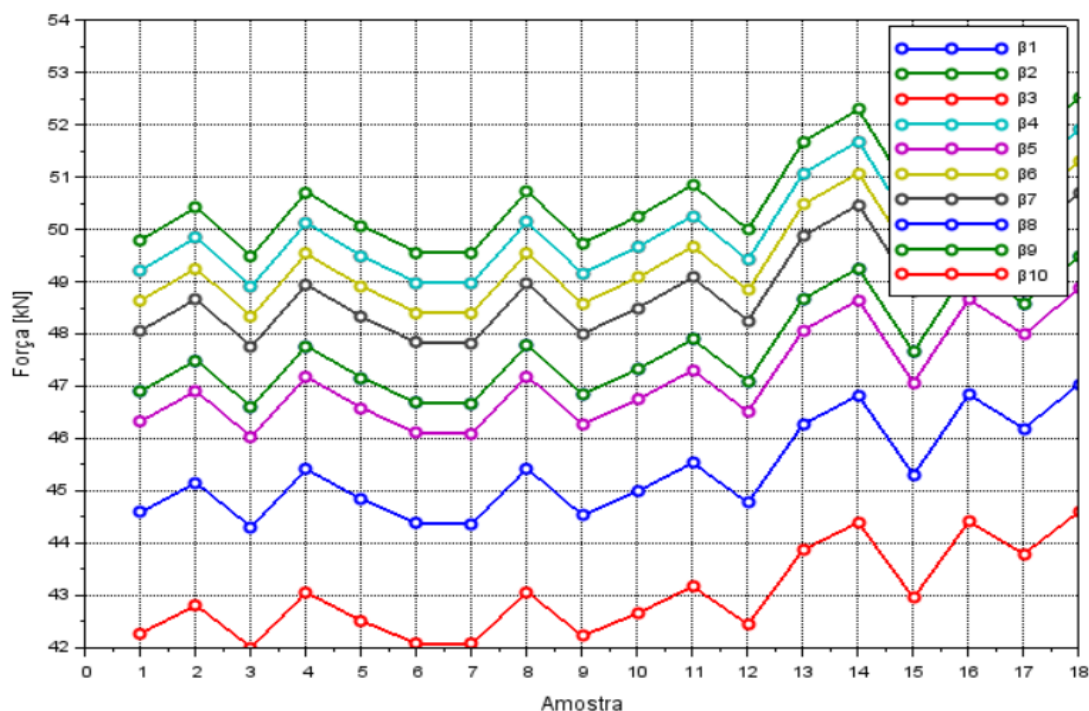
Figura 54 – Protótipo 2: Curva de aperto parafuso proposto 2



Fonte: Próprio Autor

Assim como o protótipo 1, o protótipo 2, conforme pode ser observado na figura 55, apresenta uma tendência de centralização de força, evidenciando, em comparação ao protótipo com parafuso com adesivo, a redução dos valores encontradas. Isso garante uma maior estabilidade ao processo devido a uniformidade da geração da força de cada parafuso.

Figura 55 – Protótipo 2: Dispersão de força do parafuso proposto



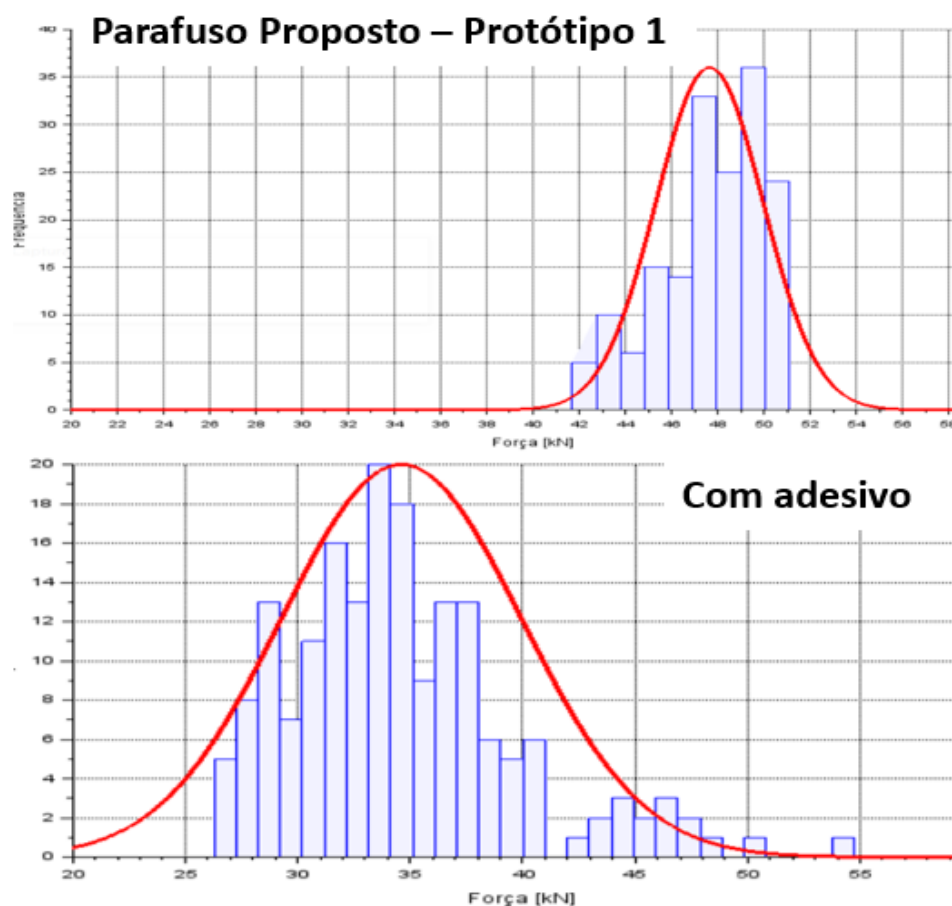
Fonte: Próprio Autor

3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS PROTÓTIPOS

A dispersão de força pode ser observada na figura 56, de modo alternativo através dos histogramas. Nota-se que há uma força maior em comparação ao parafuso com adesivo, devido uma variação menor de beta, apresentando uma tendência de centralização e estabilidade do processo, através da redução da dispersão de força garantindo uniformidade a junta. No protótipo com adesivo observa-se a tendência de dois comportamentos distintos, apresentando dispersões dos seus valores, pode ser atribuída ao uso do adesivo. A trava química cria regiões de instabilidade nas superfícies em contato durante o aperto, resultando em pontos de baixo e alto atrito na junta, apresentando

valores diferentes de ângulo de aperto que podem ser verificados através da variação do gama. Como resultado, alguns parafusos ficam excessivamente apertados, enquanto outros podem uma força até duas vezes menor. Isso reflete a facilidade dos parafusos propostos em converter a energia em força de união, graças ao baixo e controlado coeficiente de atrito.

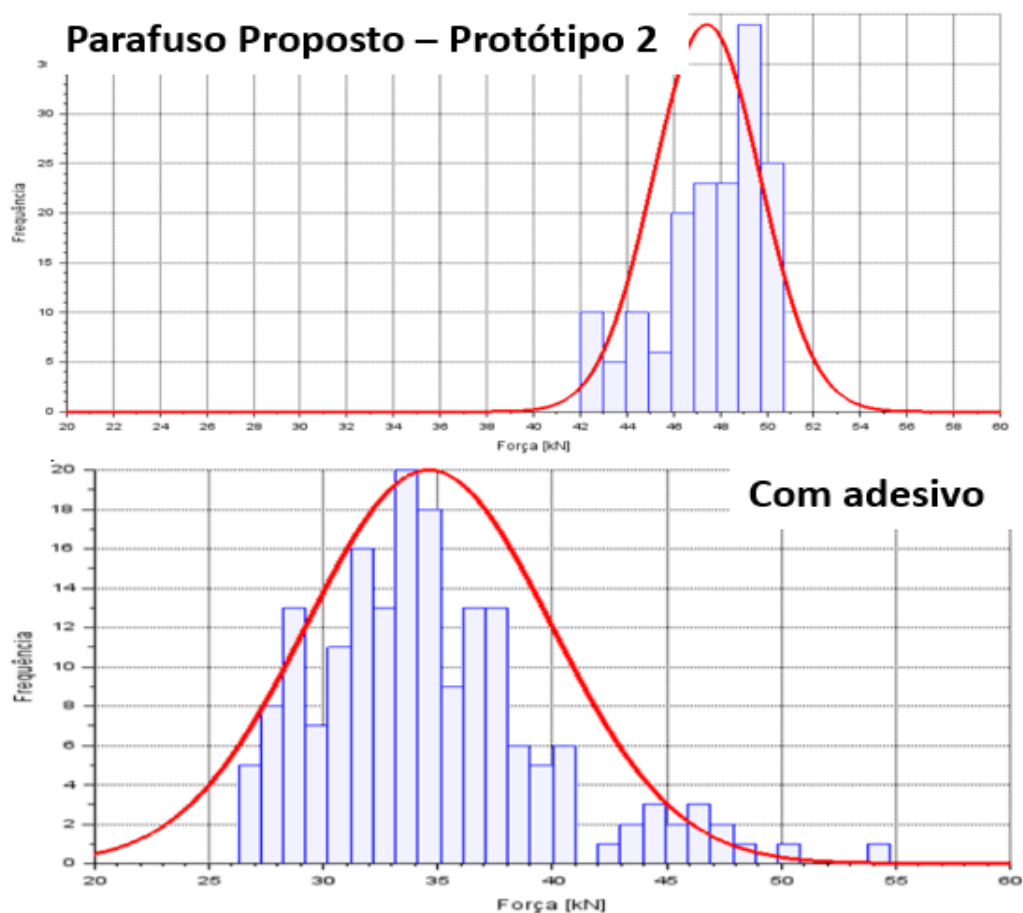
Figura 56 – Protótipo 1: Histograma de força parafuso proposto



Fonte: Próprio Autor

Para validar a adoção da nova estratégia de aperto, os valores de gama para os protótipos 1 e 2 são próximos, mas com uma leve alteração nos valores, a qual pode ser justificada pelo esforço adicional devido ao assentamento realizado na junta.

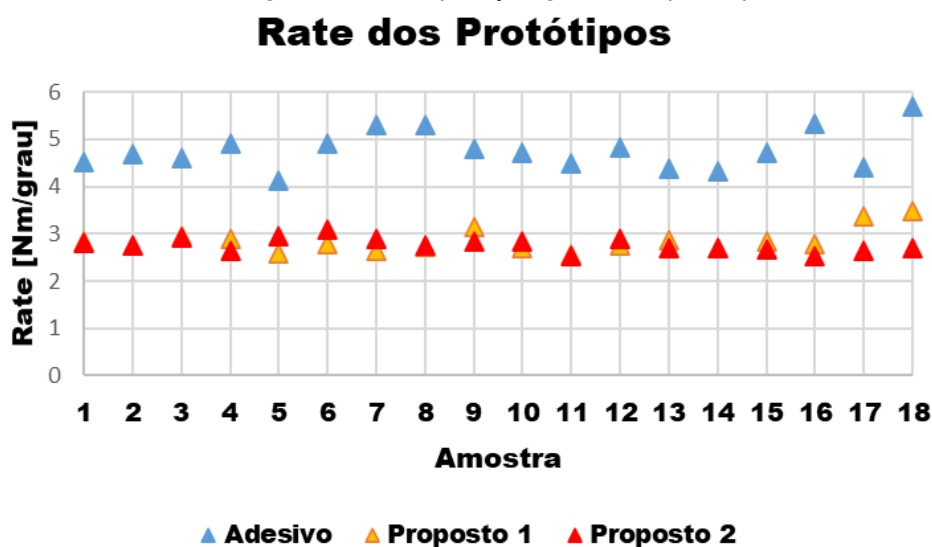
Figura 57 – Protótipo 2: Histograma de força parafuso proposto



Fonte: Próprio Autor

Comparando os valores obtidos na linha de produção, observa-se na figura 58, que os dados experimentais apresentam um comportamento semelhante ao observado na linha de produção. Os dados obtidos de gama diferem em comparação aos ensaios DTT, pois os ensaios realizados não reproduzem exatamente a junta, devido à diferença de resiliência entre a coroa do diferencial e a junta padrão utilizada nos ensaios. Por esse motivo, os valores de gama dos protótipos são superiores aos valores encontrados anteriormente.

Figura 58 – Comparação gama dos protótipos

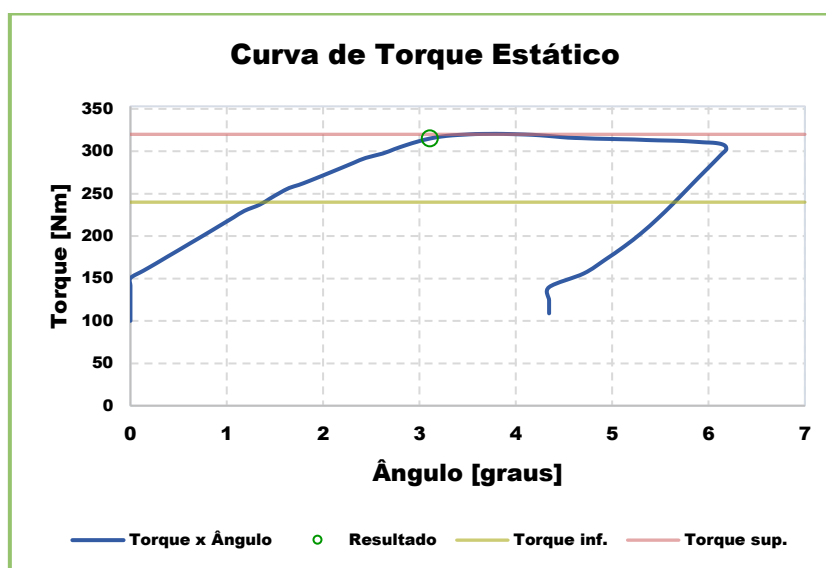


Fonte: Próprio Autor

3. 5 RESULTADO DO TORQUE ESTÁTICO DOS PROTÓTIPOS

Para as amostras contendo o adesivo microencapsulado, o torque residual é maior, sendo necessário quebrar a inércia, o que resulta em uma incerteza elevada devido à quebra da trava. O valor de ângulo encontrado na coleta de torque residual pode variar de 5 a 20 graus. Foram obtidas 18 curvas de torque estático para cada um dos três protótipos, conforme observadas na figura 59 (com adesivo) e figura 60 (sem adesivo).

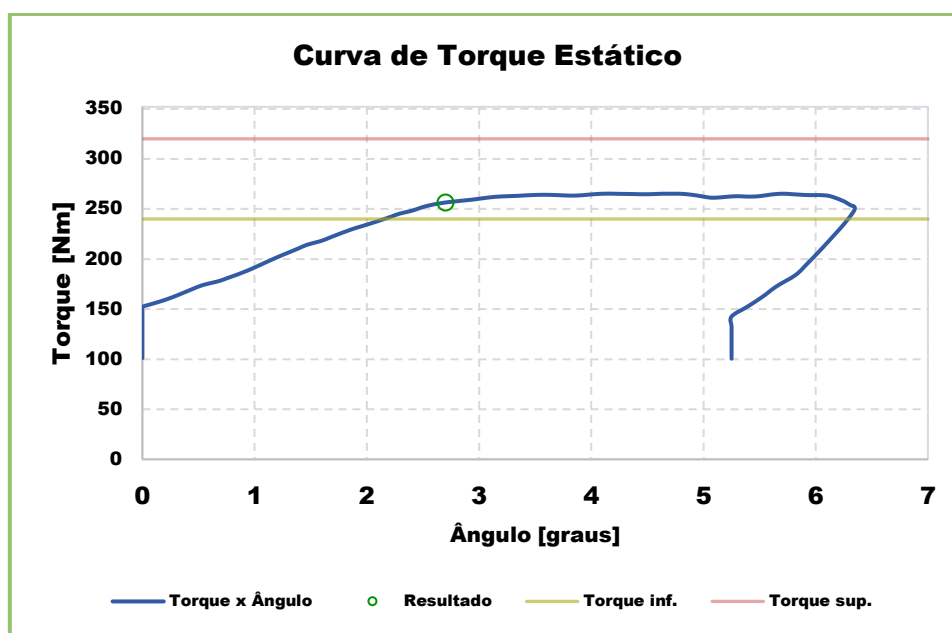
Figura 59 – Curva de torque estático: Protótipo com adesivo



Fonte: Próprio Autor

O valor de torque obtido após a verificação pode ser observado pelo ponto indicado no gráfico, os seus valores foram comparados e analisados com base nos valores de torque dinâmico obtidos pela ferramenta eletrônica obtida no momento da aplicação do torque.

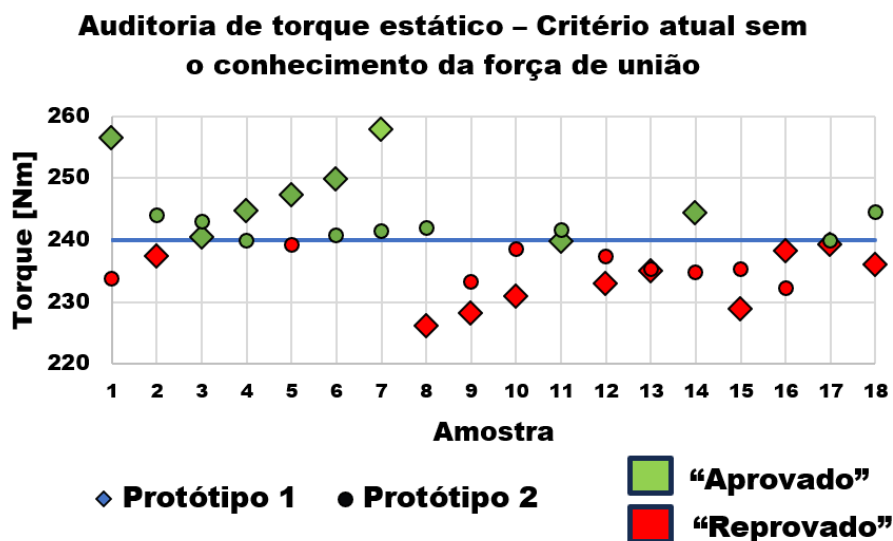
Figura 60 – Curva de torque estático: Parafuso proposto



Fonte: Próprio Autor

Na figura 61, estão representados os valores encontrados de torque estático, considerando o mesmo critério de aprovação utilizado, como sendo o valor mínimo de 240 N.m.. Se a auditoria de torque estático utilizasse os mesmos critérios adotados na linha de produção para aprovação de um aperto, vários apertos, destacados em vermelho, seriam considerados reprovados, em comparação aos pontos em verde, mesmo que apresentassem uma maior força e qualidade de aperto. Isso ocorre porque, ao utilizar o torque como critério único de aprovação, o método não leva em consideração outros fatores importantes para a qualidade do aperto.

Figura 61 – Torque estático dos protótipos



Fonte: Próprio Autor

Contudo, é necessário ressaltar que a principal variável em uma junta aparafusada é a força de união. Para uma análise adequada do processo de aperto, deve-se ter o conhecimento dos dados do parafuso e do histórico de aperto, caso contrário, a análise realizada se limita ao valor numérico do torque, sem o entendimento da ciência envolvida por trás desse aperto. Observando os dados dos ensaios DTT e dos valores obtidos de ângulo de aperto, através da projeção por mínimos quadrados, verifica-se uma baixa força e instável força do parafuso com trava química. Esse aumento nos valores de torque residual representa o aumento da energia utilizada para a quebra da inércia, a fim de romper a cura do adesivo e movimentar o parafuso. Por meio da verificação dos apertos realizados, com o parafuso proposto e com a estratégia de torque ângulo, observa-se que, após a aplicação do torque, ocorreu um relaxamento da junta e a diminuição do torque estático comparado ao torque dinâmico. Essa diminuição variou entre 8,9 e 3,9%. Por outro lado, os valores após a aplicação do torque dinâmico apresentaram um aumento de 0,1% a 12,5%. Esse aumento do valor encontrado se deve a cura do adesivo microencapsulado, que, devido às propriedades da trava química, faz com que o valor de torque necessário para a quebra da inércia aumente o valor de torque estático encontrado. Em processos de aperto de juntas aparafusadas, o torque é uma variável de extrema importância. No entanto, muitas vezes é analisado de forma inadequada,

considerando apenas o seu valor numérico. Esse foco no valor do torque leva a uma compreensão errada da qualidade do aperto, com a falsa crença de que quanto maior o torque, maior a força de aperto aplicada. Contudo, o torque deve ser analisado em paralelo com outras variáveis para o entendimento completo da qualidade do aperto realizado. O torque representa a quantidade de energia necessária para se gerar uma força de união. Em uma aplicação com aperto controlado, ele indica a dificuldade de se alcançar essa força de união. Nos protótipos 1 e 2, observa-se que os valores de gama são menores, indicando uma maior facilidade e eficiência no processo de aperto, com uma conversão mais eficaz de energia em força de união e um valor uniforme. Por outro lado, no protótipo padrão de produção, a conversão de torque em força de união é menos eficiente, como evidenciado pelo maior valor de gama. Além disso, os valores de força são dispersos e variados, como indicado pelos valores do ângulo de aperto. Com um valor de gama mais elevado, o aumento da força observada não reflete um aumento real na força de união, mas sim uma maior dificuldade de rotação do parafuso. Esse aumento da resistência à rotação, identificado pelo aumento do atrito na rosca e pela diminuição da eficiência do aperto e pelo valor elevado de gama, sugere que a ação da trava química gera uma dificuldade maior para a rotação do parafuso devido ao efeito da cola. Contudo, ao analisar os dados de beta e gama, percebe-se que essa ação não resulta em um aumento na geração de força de união, mas simplesmente impede o movimento do parafuso.

4 CONCLUSÕES

A avaliação da necessidade da utilização do adesivo microencapsulado nos parafusos, como método de travamento de segurança auxiliar e preventivo contra vibrações, para a aplicação do diferencial automotivo de um trator agrícola, gerou a necessidade de uma revisão no conceito de torque, destacando a importância de compreender as propriedades fundamentais dos parafusos para otimizar o processo de aperto. Em estratégias de aperto em que o torque é a única variável para a aprovação, aumenta a possibilidade da aplicação de um torque falso. Esse efeito se agrava devido às variações nas propriedades mecânicas e tribológicas de parafusos do mesmo lote, como o coeficiente de atrito, que ampliam ainda mais essa dispersão. Durante a aplicação o parafuso sofre esforços combinados de tração e de torção, onde o mesmo rotaciona em torno do seu eixo, superando as forças de atrito devido o contato entre as superfícies da parte inferior da sua cabeça e no contato entre as suas roscas e as roscas da contrapeça, para apenas uma pequena parcela da energia aplicar ser transformada em força de união. O ângulo de aperto é uma variável fundamental para essa transformação, pois é por meio dele que é possível verificar se a rotação está sendo convertida em força de união, sendo possível observar pela análise dos valores de torque em conjunto com o ângulo, permitindo uma avaliação mais precisa e eficaz do processo de aperto. A estratégia de aperto por torque e ângulo de deslocamento ressalta que o torque não é o único critério para se atingir a aprovação do aperto, mas o torque se transforma na resultante de um processo com uma força de união constante. Os ensaios de determinador de torque possibilitam a análise do comportamento completo do parafuso, desde a sua fase de assentamento, passando pela deformação elástica e plástica chegando por sua ruptura. A partir dessas informações verifica-se a variação de pré torque e do limite de escoamento e os coeficientes de atrito de rosca e de cabeça para os cálculos dos valores de capacidade de geração de força. O parafuso microencapsulado apresentou uma baixa capacidade ao se comparar com o proposto para a geração de força de união (beta), além de apresentar valores de baixa repetibilidade aumentando a incerteza e instabilidade da junta aparafusada, enquanto o parafuso proposto com revestimento fosfatizado a frio apresentou baixos valores de coeficiente de

atrito total com comportamento uniforme e confiável. Esses baixos valores tanto de atrito de rosca e como de cabeça reduzem a dispersão do momento da aplicação do aperto aumentando a eficiência da transformação da energia em força de união. Esse presente estudo da remoção do adesivo microencapsulado somente foi possível de ser realizado para essa aplicação específica devido ao elevado comprimento de aperto (L_K), viabilizando para esse caso a otimização do processo de aperto e do parafuso utilizado através da adoção de uma estratégia de aperto, somada ao controle das propriedades de revestimento, evitando a soltura dos parafusos e reduz a energia necessária a ser aplicada por meio de uma geração de uma maior força de união, otimizando a utilização do parafuso, melhorando a sua eficiência e aproveitamento das propriedades mecânicas e tribológicas. A baixa dispersão dos valores de ângulo de aperto na estratégia de pré-torque e ângulo, com uma janela de torque resultante, aumenta a eficiência do aperto e define um processo robusto, permitindo a eliminação da utilização desnecessária de adesivos microencapsulados. A adoção do parafuso proposto resulta em uma redução de custo tanto no elemento de fixação quanto na ferramenta de aperto, uma vez que será possível utilizar uma máquina com menor capacidade. A remoção do adesivo microencapsulado beneficia tanto o fabricante de parafusos quanto o cliente final, pois reduz o tempo de setup do fabricante, permitindo a produção de diferentes parafusos com apenas a alteração do comprimento, sem a necessidade de agregar valor adicional ao produto durante a aplicação da trava química. Para o usuário do parafuso, essa mudança representa uma redução no número de tipos de parafusos necessários, possibilitando a padronização do acabamento superficial em parafusos com as mesmas dimensões, além de diminuir o custo potencial de compra ao aumentar a demanda por um item de menor custo.

5 TRABALHOS FUTUROS

- Análise do torque residual após a perda de carga devido a esforços dinâmicos relacionados a solicitações de uma peça protótipo em condições reais de campo;
- Adoção de uma nova estratégia com redução do valor de torque na fase inicial de pré torque e consequente aumento do ângulo de aperto;
- Adoção de uma estratégia de aperto por torque e ângulo de deslocamento na fase elastoplástica do parafuso com controle do alongamento do parafuso, ou seja, buscando uma deformação permanente do parafuso;
- Adoção de estratégia de aperto individuais para cada um dos 18 parafusos, analisando os esforços reais e o comportamento da junta;
- Adotar tal sistemática, para outros parafusos que utilizam o adesivo microencapsulado e buscar uma relação ideal / real sobre o L_K ;
- Utilização de cola no parafuso no momento da montagem;
- Análise da perda de carga devido a baixo atrito em parafuso;
- Utilização de softwares matemáticos para a análise de dados de aperto;
- Redução de reprovações de apertos na linha de produção ao se implementar uma estratégia de aperto por torque e ângulo;

6 REFERÊNCIAS

- [1] ISO 898 – Part 1. **Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread**. Published. 5th Edition. 2013
- [2] NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas – Uma abordagem integrada**. 4^a edição. 2013.
- [3] GARCIA, R. **Conceitos Gerais sobre Torque e Processos de Torque, Conceitos Relevantes sobre Coeficiente de Atrito**. 2011.
- [4] VDI 2230: Verein Deutscher Ingenieure. **Systematic calculation of high duty bolted joints: Joints with one cylindrical bolt, Part 2**. 2003.
- [5] GARCIA, R. **A quem se propõem os elementos de fixação e como utilizá-los num moderno parque industrial – Parte III (Final)**. 2018.
Disponível em:
<http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=1058>.
Acesso em: janeiro de 2023.
- [6] ECCLES, W. **The Goldilocks Zone and the Coefficient of Friction of Threaded Fasteners Lubrication**, Maintenance and Tribotechnology. LUBMAT, Preston, UK, 2023.
- [7] DIN 267- Part 27. **Steel screws, bolts and stud with adhesive coating – Technical delivery conditions**. 2009.
- [8] NASSAR, Sayed A.; SUN, Tianshu; ZOU, Qian Beth. **The effect of coating and tightening speed on the torque-tension relationship in threaded fasteners**. SAE Technical Paper, 2006.
- [9] BUSSOLOTI, **Redução do limite à fadiga de parafusos de aço apresentando ferrita delta na camada superficial - Parte I**. 2015.
Disponível em:
<www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=781>.
- [10] INDUFIX, **Guia de acabamentos superficiais**.
Disponível em:
<https://pt.slideshare.net/RHIndufixFixadores/guia-de-acabamentos-superficiais-indufix-parafusos>.
Acesso em: janeiro de 2023.
- [11] GALMETA. **Fosfatização a frio**.
Disponível em: <https://www.galmeta.com.br/fosfatizacao-frio>.
Acesso em: janeiro de 2023.

- [12] SOUSA, Juliana Otaviano; SHIMODA, Mariana Mitsuko. **Análise comparativa da corrosão entre elementos de fixação em aço inoxidável e aço carbono fosfatizado**. 2021.
- [13] KÖNIG, Rafael Gomes et al. **Estudo do desgaste de revestimentos em matrizes de recorte a frio de cabeças de parafusos**. 2007.
- [14] PRIMOLINI, A. **O papel dos revestimentos em juntas aparafusadas - Parte Final**, 2016.
Disponível em:
<http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=904>.
Acesso em: janeiro de 2023.
- [15] PRIMOLINI, A. **O papel dos revestimentos em juntas aparafusadas – Parte 2**. 2016.
Disponível em:
<http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=885>.
Acesso em: janeiro de 2023.
- [16] MAGGIORE, Sofia et al. **A review of structural adhesive joints in hybrid joining processes**. Polymers, v. 13, n. 22, p. 3961, 2021.
- [17] BUSSOLOTI, R.S. **Rosqueamento Seguro**. 2007. Disponível em:
<www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=280>. Acesso em:
janeiro de 2023.
- [18] PEREIRA, W. **Anais do Seminário Nacional de Forjamento - Volume 4 – 2023 – 42ª SENAFOR**. Pg 547-555.
- [19] SILVA, Lucas FM; ÖCHSNER, Andreas; ADAMS, Robert D. **Introduction to adhesive bonding technology**. In: Handbook of adhesion technology. 2011.
- [20] SHANG, X. et al. **Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends**. Composites Part B: Engineering, v. 177, p. 107363, 2019.
- [21] CASTAGNETTI, Davide et al. **Predicting the Macroscopic Shear Strength of Tightened-Bonded Joints from the Intrinsic High-Pressure Properties of Anaerobic Adhesives**. Metals, v. 12, n. 7, p. 1141, 2022.
- [22] MAGGIORE, Sofia et al. **A review of structural adhesive joints in hybrid joining processes**. Polymers, v. 13, n. 22, p. 3961, 2021.
- [23] NYLOK. **Travante e vedante químico microencapsulado**
Disponível em:
<http://nylok.com.br/pdfs/135-00-Precote-Rev9-01-12-2011.pdf>
Acesso em: janeiro de 2023.

[24] DRAGONI, Eugenio; MAURI, P. **Intrinsic static strength of friction interfaces augmented with anaerobic adhesives**. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 20, n. 4, p. 315-321, 2000.

[25] SEKERCIOGLU, T.; KOVAN, VOLKAN. **Torque strength of bolted connections with locked anaerobic adhesive**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, v. 222, n. 1, p. 83-90, 2008.

[26] HERNANDEZ, Alan. **Use of Anaerobic Adhesive for Prevailing Torque Locking Feature on Threaded Product**. University of South Florida, 2015.

[27] LJUBOJEVIĆ, Pavle; LAZOVIĆ, Tatjana. **Stiffness as a criterion of dynamic load carrying capacity of tension-loaded bolted joints**. Engineering Today, v. 2, n. 1, 2023.

[28] NESS. J. **Three Ways Increasing the L/D Ratio Improves Reliability of Dynamically Loaded Bolt Joints**, 2021.

Disponível em:

<https://www.matrixengrg.com/wp-content/uploads/3-ways-l-d-ratio-ftimag-aug-sept-2021.pdf>

Acesso em: fevereiro de 2023.

[29] GÜLER, Britan; YURTDAS, Sezgin; DOĞAN, Sarper. **Loosening Behaviour of Conical Washer Usage in Bolted Joints Under Vibration**. NORM FASTENERS AR-GE MERKEZİ, p. 112, 2021.

[30] MORTENSEN, Jacob. **Friction Analysis of Bolts**. Aalborg University: Aalborg, Denmark, 2013.

[31] ZOU, Q. et al. **Effect of lubrication on friction and torque-tension relationship in threaded fasteners**. In: International Joint Tribology Conference, p. 591-602, 2006.

[32] BARBOSA, Theylor Moreira et al. **Dimensionamento de Juntas Aparafusadas e Aplicação de Torque em Peças Automotivas**. Associação Educacional Dom Bosco, 2014.

[33] M. SHIMIZU, **Torquímetro Digital Phoenix III–Torque/Ângulo**

Disponível em: <https://mshimizu.com.br/produtos/phoenix-3-torquimetro-digital-torque-angulo/>.

[34] GARCIA, R. **O parafuso no nosso cotidiano. Quanta Ciência e quanto menosprezo. Casos relatados de Recalls – Parte 2**.

Disponível em:

<https://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=1190>.

Acesso em: janeiro de 2023.

[35] HELENE, Otaviano. **Método dos mínimos quadrados com formalismo matricial**. Editora Livraria da Física, 2006.

[36] WILHELM, V. E. **Métodos Numéricos Ajuste de Curva pelo Método dos Quadrados Mínimos-MQM**. UFPR.

Disponível em:

https://docs.ufpr.br/~volmir/MN_13_MQM_ppt.pdf.

Acesso em: fevereiro de 2023.

[37] COSTA, Joao Pedro Santana. **Análise do Dispositivo mecânico diferencial**. 2019.

[38] BERGOLI, Bruno Accorsi. **Estudo de aplicação e análise de tensões em um diferencial de um veículo baja**. 2019.

[39] COGORNI, André Ferrari. **Avaliação e melhoria do processo de montagem do pinhão em eixos diferenciais automotivos**. 2009.

[40] DENNIS, Pascal. **Produção Lean simplificada**. Bookman Editora, 2009.

7 APÊNDICE I – CURVAS DO ENSAIO DETERMINADOR TORQUE TENSÃO



RELATÓRIO DE COEFICIENTE DE ATRITO

Amostra : P3176

Lote : Peças com trava

Descrição : M16-2,00 - Teste Garcia

Tipo : Parafuso

Origem : mtk

Bitola : 16 mm

Qtde de Amostras: 10 de 10

Passo : 2 mm

Tipo da Haste : ROSCADA

Data Relatório : 22/set/2023 08:29:35

Obs : Ensaio para desenvolvimento.

Amostra	Ângulo [°]	Força [kN]	T.Total [Nm]	T.Rosca [Nm]	T.Cabeça[Nm]	Along. [mm]	K	μG	μK	η	μGes
1	153,13	65,00	197,36	94,37	102,99	0,85	0,190	0,133	0,171	0,816	0,15
2	197,58	65,00	297,54	99,62	197,92	1,10	0,286	0,142	0,329	0,801	0,24
3	120,52	65,00	235,32	79,87	155,45	0,67	0,226	0,107	0,258	0,857	0,19
4	182,45	65,00	247,78	103,24	144,54	1,01	0,238	0,149	0,240	0,790	0,20
5	187,33	65,00	387,72	101,96	285,75	1,04	0,373	0,146	0,475	0,794	0,32
6	131,23	65,00	246,48	128,83	117,64	0,73	0,237	0,195	0,196	0,719	0,20
7	184,50	65,00	420,92	121,15	299,77	1,02	0,405	0,181	0,498	0,740	0,35
8	231,23	65,00	373,83	113,71	260,13	1,28	0,359	0,168	0,432	0,760	0,31
9	189,73	65,00	171,24	106,20	65,05	1,05	0,165	0,154	0,108	0,782	0,13
10	197,92	65,00	434,24	106,44	327,80	1,10	0,418	0,155	0,545	0,781	0,36
Média	177,56	65,00	301,24	105,54	195,70	0,99	0,290	0,153	0,325	0,784	0,25
Média+3S	277,60	65,00	588,76	146,66	472,37	1,54	0,566	0,227	0,785	0,900	0,50
Média-3S	77,52	65,00	13,72	64,42	-80,96	0,43	0,013	0,079	-0,135	0,668	-0,01
Máximo	231,23	65,00	434,24	128,83	327,80	1,28	0,418	0,195	0,545	0,857	0,36
Mínimo	120,52	65,00	171,24	79,87	65,05	0,67	0,165	0,107	0,108	0,719	0,13
Variação	110,71	0,00	263,00	48,96	262,75	0,61	0,253	0,088	0,437	0,138	0,23



RELATÓRIO DE COEFICIENTE DE ATRITO

Amostra : P3176

Lote : Peças sem trava

Descrição : M16-2,00 - teste Garcia

Tipo : Parafuso

Origem : mtk

Bitola : 16 mm

Qtde de Amostras: 10 de 10

Passo : 2 mm

Tipo da Haste : ROSCADA

Data Relatório : 22/set/2023 08:42:09

Obs : Ensaio para desenvolvimento.

Amostra	Ângulo [°]	Força [kN]	T.Total [Nm]	T.Rosca [Nm]	T.Cabeça[Nm]	Along. [mm]	K	μG	μK	η	μGes
1	194,46	100,00	196,81	98,29	98,52	1,08	0,123	0,078	0,102	0,902	0,09
2	163,53	100,00	182,02	92,99	89,02	0,91	0,114	0,072	0,092	0,911	0,08
3	174,17	100,00	177,85	93,74	84,11	0,97	0,111	0,072	0,087	0,909	0,08
4	168,61	100,00	185,17	93,30	91,87	0,94	0,116	0,072	0,095	0,910	0,08
5	193,11	100,00	183,18	94,80	88,38	1,07	0,114	0,074	0,092	0,907	0,08
6	175,06	100,00	180,88	93,76	87,12	0,97	0,113	0,072	0,090	0,909	0,08
7	231,70	100,00	199,89	95,69	104,20	1,29	0,125	0,075	0,108	0,906	0,09
8	232,77	100,00	187,34	94,22	93,12	1,29	0,117	0,073	0,097	0,908	0,09
9	143,96	100,00	190,91	95,78	95,13	0,80	0,119	0,075	0,099	0,906	0,09
10	129,16	100,00	202,61	94,61	108,00	0,72	0,127	0,073	0,112	0,908	0,09
Média	180,65	100,00	188,67	94,72	93,95	1,00	0,118	0,074	0,097	0,908	0,09
Média+3S	281,54	100,00	214,31	99,41	116,94	1,56	0,134	0,079	0,121	0,915	0,10
Média-3S	79,77	100,00	163,02	90,03	70,96	0,45	0,102	0,068	0,073	0,900	0,07
Máximo	232,77	100,00	202,61	98,29	108,00	1,29	0,127	0,078	0,112	0,911	0,09
Mínimo	129,16	100,00	177,85	92,99	84,11	0,72	0,111	0,072	0,087	0,902	0,08
Variação	103,61	0,00	24,76	5,30	23,89	0,57	0,016	0,006	0,025	0,009	0,01