

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DAS CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

DANIEL LOVAT

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO TRATAMENTO SUPERFICIAL NO COEFICIENTE
DE ATRITO DE UMA JUNTA PARAFUSADA APLICADA EM ÔNIBUS
RODOVIÁRIOS**

CAXIAS DO SUL

2021

DANIEL LOVAT

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO TRATAMENTO SUPERFICIAL NO COEFICIENTE
DE ATRITO DE UMA JUNTA PARAFUSADA APLICADA EM ÔNIBUS
RODOVIÁRIOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul. Área de concentração: Elementos de Máquinas.

Orientador Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano.

CAXIAS DO SUL

2021

DANIEL LOVAT

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO TRATAMENTO SUPERFICIAL NO COEFICIENTE
DE ATRITO DE UMA JUNTA PARAFUSADA APLICADA EM ÔNIBUS
RODOVIÁRIOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul. Área de concentração: Elementos de Máquinas.

Aprovado em ____/____/____.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Vagner Grison
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho aos meus pais Danilo Antônio Lovat e Fátima De Bastiani Lovat, por serem a minha base, inspiração e por todo o esforço e dedicação para que eu pudesse completar esta jornada. E à Poliana Forlin, pelo companheirismo, incentivo e apoio.

RESUMO

As uniões parafusadas possuem uma vasta utilização em ônibus sendo empregadas devido a sua versatilidade, promovendo ao produto a possibilidade de regulagem ou desmontagem de seus componentes para manutenção. É necessário que as juntas parafusadas presentes nos ônibus resistam às diversas aplicações nas quais estão submetidas, como por exemplo, os esforços mecânicos causados pelo pavimento das estradas, as intempéries no ambiente de rodagem do veículo. O propósito deste trabalho foi avaliar os efeitos do tratamento superficial no coeficiente de atrito, a fim de restringir a disparidade da força tensora em um processo de aplicação de torque constante aplicada à uma junta parafusada de sustentação de uma portinhola de ônibus rodoviário. Por meio de cálculos analíticos e testes práticos foi reavaliado a faixa de torques necessária para a prevenção de falhas ao longo da vida útil do produto. Através dos experimentos foi possível constatar uma flutuação em cerca de 62% na obtenção força tensora, proveniente das diferentes combinações utilizadas no estudo. Em suma, um procedimento baseado na norma VDI 2230 foi elaborado para aplicação nas demais juntas utilizadas na empresa.

Palavras-chave: União parafusada, ônibus, coeficiente de atrito, tratamento superficial.

ABSTRACT

Bolted unions have a wide use in a bus. They are employed due to their versatility, promoting to the product a possibility of adjusting or disassembling this components for maintenance. It's necessary that the bolted joints applied in a bus resist the diferents applications were subjected, like the mechanical efforts caused by the quality of the pavement on roads or the weather in the environment that the vehicle used. The purpose of this work was evaluate the effects for the diferents surface treatment on the friction coefficient, to decrease the variation of the tensor force in a constant torque process applyed to a bolted joint on a support of the road bus door. By means in analytical calculations and practical tests the fasteners has been reevaluated to the new range torque in order to prevent failures in the bolted joints during the product's lifecycle. Through the experiments was possible find a variation of about 62% in the force obtained, from the different combinations used in this work. In the end of this work a methodology based in the VDI 2230 standard was developed for others bolted joints application in the company.

Palavras-chave: bolted joints, bus, friction coefficient, fasteners, torque.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ônibus em operação de carga e descarga de bagagens.....	15
Figura 2 - Terminologia do padrão de roscas	19
Figura 3 - Parafusos normatizados	20
Figura 4 - Porcas com travamento	22
Figura 5- Atrito de rolamento e atrito de deslizamento.....	27
Figura 6 - Esquemática do cone frusta	30
Figura 7- Deformação devido ao carregamento estático no parafuso e contrapeça	34
Figura 8 - Deformação devido ao carregamento dinâmico no parafuso e contra peça	34
Figura 9 - Torque de montagem e força tensora em relação ao atrito	36
Figura 10 - Relação ângulo de rotação por Força tensora	37
Figura 11 - Aperto por controle do limite de escoamento	38
Figura 12 - Exemplo de sistema experimental	39
Figura 13 - Representação gráfica do fatorial 2 ²	41
Figura 14 - Diferentes tratamentos utilizados na indústria.....	44
Figura 15 - Desenho técnico de torques	45
Figura 16 - Suporte de sustentação da portinhola	46
Figura 17 - Fluxograma do método de trabalho	48
Figura 18 - Esquema de montagem da junta estudada	49
Figura 19 - Fluxograma com Etapas do dimensionamento da junta parafusada.....	51
Figura 20 - Fluxograma com as combinações testadas	52
Figura 21 - Corpos de prova fabricados para o experimento	53
Figura 22 - Teste realizado na máquina DTT.....	56
Figura 23 - Gráfico do Teste DTT referente à quarta combinação	57
Figura 24 - Gráfico do Teste DTT referente à terceira combinação	58
Figura 25 - Amostras após a realização dos testes	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classes métricas de aços para parafusos	21
Tabela 2 - Equivalência de classes em porcas e parafusos.....	22
Tabela 3- Dados de entrada do experimento	40
Tabela 4 - Tabela ANOVA fatorial 2 ²	43
Tabela 5 - Disposição binária do planejamento fatorial.....	54
Tabela 6 - Tabela ANOVA para coeficiente μG	54
Tabela 7 - Dados complementares para análise μG	55
Tabela 8 - Tabela ANOVA para coeficiente μK	55
Tabela 9 - Dados complementares para análise μK	55
Tabela 10 - Valores médios obtidos no DTT	56

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

CNT	Confederação Nacional do Transporte
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
E-COAT	Pintura Catódica por Imersão
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>
ZA	Tratamento superficial zincado amarelo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (mm^2)
A_{ers}	Área substitutiva (mm^2)
A_i	Área de secção transversal individual (mm^2)
A_N	Área de secção transversal (mm^2)
A_P	Área de apoio na cabeça do parafuso (mm^2)
A_S	Área de secção transversal resistente ao parafuso (mm^2)
C_A	Contraste do fator A
d	Diâmetro maior ou Diâmetro nominal (mm)
D_A	Diâmetro externo no cone frusta (mm)
D_B	Diâmetro do furo de passagem do parafuso (mm)
d_k	Diâmetro equivalente na cabeça do parafuso (mm)
D_{Km}	Diâmetro médio da face de contato na cabeça do parafuso (mm)
d_p	Diâmetro teórico de passo (mm)
d_r	Diâmetro menor (mm)
d_2	Diâmetro de passo (mm)
d_3	Diâmetro de núcleo da rosca (mm)
E	Módulo de elasticidade do material (MPa)
E_S	Módulo de elasticidade do material do parafuso (MPa)
F	Força de solitação (N)
f	Alongamento (mm)
F_A	Força de trabalho axial no parafuso (N)
F_a	Força de atrito (N)
f_i	Alongamento individual (mm)
F_{Kerf}	Força de retenção mínima necessária (N)
F_M	Força tensora (N)
$F_{Mmáx}$	Força tensora máxima (N)
$F_{Mmín}$	Força tensora mínima (N)
F_Q	Força de carregamento transversal na junta (N)
F_{SP}	Força tensora de fechamento das placas (N)
F_V	Carga de teste (N)
f_z	Deformação de assentamento (mm)
F_Z	Força de assentamento (mm)

l	Comprimento (mm)
l_i	Comprimento individual (mm)
M_A	Torque total de aperto (N.mm)
M_G	Componente de torque na rosca (N.mm)
M_{GA}	Momento tensor na rosca (N.mm)
M_K	Torque de fricção na cabeça do parafuso (N.mm)
n	Número total de réplicas do experimento
p	Passo de rosca (mm)
$P_{MÁX}$	Pressão superficial sobre a junta (MPa)
q	Número de interfaces da junta
$R_{p0,2}$	0,2% de deformação plástica. Valor mínimo de acordo com ISSO 898-1
s	Erro experimental
si	Desvio padrão do experimento “i”
SS_A	Soma dos quadrados do fator A
SS_T	Soma dos quadrados total
SS_E	Soma dos quadrados do erro
x	Fator de cálculo (mm)
W_N	Carga normal (N)
δ_i	Resiliência individual (mm/N)
δ_{GM}	Resiliência na rosca totalmente engajada (mm/N)
δ_K	Resiliência elástica na região da cabeça do parafuso (mm/N)
δ_p	Resiliência (mm/N)
δ_S	Resiliência do parafuso (mm/N)
μ	Coefficiente de atrito
μ_G	Coefficiente de atrito na rosca
μ_{Ges}	Atrito total da junta parafusada
μ_K	Coefficiente de atrito na cabeça do parafuso
μ_{Tr}	Coefficiente de atrito entre as interfaces
v	Variância
σ_M	Tensão de tração (MPa)
π	PI
φ	Ângulo de giro (°)
ϕ_K	Fator de forças

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	O AMBIENTE DE TRABALHO	15
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	16
1.3	OBJETIVO GERAL.....	17
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	ELEMENTOS DE FIXAÇÃO	18
2.1.1	Padrões de rosca	18
2.1.2	Parafusos	20
2.1.3	Porcas.....	21
2.2	TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	23
2.2.1	Zincagem eletrolítica	23
2.2.2	Organometálico em fixadores.....	24
2.2.3	Pintura a Pó.....	25
2.3	TRIBOLOGIA.....	26
2.3.1	A lubrificação.....	26
2.3.2	O coeficiente de atrito.....	26
2.3.3	O coeficiente de atrito atuante nos fixadores	27
2.4	UNIÃO PARAFUSADA	28
2.4.1	O conceito de resiliência em parafusos	29
2.4.2	Solicitações durante o aperto.....	31
2.4.3	O conceito de pré-carga de uniões em tração.....	33
2.4.4	Métodos de aperto em juntas parafusadas.....	34
2.4.4.1	Aperto por controle de torque.....	35
2.4.4.2	Aperto por controle de ângulo	36
2.4.4.3	Aperto por controle de escoamento	38
2.5	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	39
2.5.1	O planejamento por fatorial 2^k.....	39
2.5.2	Um exemplo do planejamento fatorial 2^2	40
2.5.3	A estimativa do erro experimental.....	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44

3.1	O TRATAMENTO SUPERFICIAL E O TORQUE EM JUNTAS PARAFUSADAS	44
3.2	O MÉTODO DE TRABALHO.....	47
4	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	49
4.1	DIMENSIONAMENTO DA JUNTA	49
4.1.1	O procedimento para dimensionamento de junta parafusada.....	50
4.1.2	Dimensionamento com coeficientes de atrito μ_G e μ_K tabelados	51
4.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	52
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.3.1	Cálculo da junta utilizando os coeficientes de atrito obtidos experimentalmente para a combinação 1.....	59
4.3.2	Considerações e cálculos para as demais combinações avaliadas.....	60
5	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – TABELAS DE CÁLCULOS PARA APLICAÇÃO DO TORQUE	66
	APÊNDICE B – GRÁFICOS OBTIDOS NA MÁQUINA DTT	76
	APÊNDICE C – TABELAS OBTIDAS NOS TESTES	85
	APÊNDICE D – TABELAS DO PLANEJAMENTO FATORIAL 2^2.....	87
	ANEXO A – TABELA UTILIZADA NA EMPRESA PARA DIMENSIONAMENTO DE TORQUE EM JUNTAS PARAFUSADAS	89
	ANEXO B – TABELAS ADAPTADAS DA NORMA VDI-2230 (2003).....	91

1 INTRODUÇÃO

As juntas parafusadas consistem na união de um conjunto de duas ou mais peças por meio de uma força de montagem na direção axial ao elemento de fixação, força a qual tem a atribuição de manter a junta rígida e suportar as cargas de trabalho na qual são impostas. As juntas possuem um importante papel em um projeto mecânico, sendo comumente utilizadas em sistemas onde sua desmontagem torna-se necessária para utilização ou manutenção do conjunto. Por sua vez, junções que não necessitam de desmontagem são concebidas por uniões permanentes, como por exemplo: colagem, soldagem, entre outros (NORTON, 2013; BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Ao aparafusar um componente em um conjunto, a energia gerada pelo torque é atribuída à força tensora, unindo os componentes da junta. Porém, uma parte desta energia é perdida pelo atrito e deformações entre as superfícies de contato, sendo esse atrito proveniente tanto do contato das roscas dos fixadores como das faces da cabeça do parafuso quando em contato com a face do componente. Esta perda de energia por atrito deve ser considerada crítica, pois a força tensora desejável está atrelada diretamente com a quantidade de perda de energia pelo coeficiente de atrito nas superfícies (NORTON, 2013; BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Porém, sabe-se que é difícil controlar a força tensora em uma linha de montagem, onde os equipamentos geralmente controlam apenas o torque de aperto. O controle apenas por torque não permite que o processo de montagem garanta as variáveis relacionadas ao atrito e ao desprezar este efeito não é possível verificar quando o aperto gera uma força tensora demasiada ou exígua. Por vezes, esta falta de monitoramento sobre a força tensora da junta resulta em problemas como quebra dos fixadores, ou o afrouxamento da junta, mesmo quando aplicado o torque especificado para o projeto.

Entende-se que o controle da força tensora em uma linha de montagem, como por exemplo, de ônibus é impraticável, seja pela diversidade em seus conjuntos que, muitas vezes possuem espaço restrito para o acesso de tais equipamentos ou principalmente por questões financeiras. Mesmo que o torque correto seja aplicado para a junta, é necessário entender que o que mantém as peças unidas é a força tensora, tornando assim de suma importância considerar os demais efeitos envolvidos, como o atrito provocado entre os elementos de fixação e as peças que compõem a união.

1.1 O AMBIENTE DE TRABALHO

A Marcopolo S.A é expoente no desenvolvimento de soluções para o transporte coletivo de passageiros há mais de 70 anos, sendo líder no segmento ônibus no mercado brasileiro e está posicionada entre as maiores fabricantes do mundo. Produz ônibus das mais diversas aplicações, como para utilização urbana em grandes centros bem como modelos executivos para longas viagens. Com foco na satisfação dos clientes, a empresa busca constantemente evoluir para assim trazer a cada dia mais qualidade e conforto para seus usuários (MARCOPOLO, 2020).

O presente trabalho foi concebido no setor de Engenharia de Desenvolvimento, o qual tem a atribuição de desenvolver novas soluções e produtos que atendam as diretrizes de inovação da empresa. Com o foco voltado para o sistema de aberturas do ônibus, este trabalho tem por objeto de estudo a fixação das portinholas do bagageiro que utiliza juntas parafusadas.

Na Figura 1, é possível identificar um ônibus com uma porta aberta na região inferior do ônibus. Esta porta é denominada internamente na empresa como “portinhola”, utilizada para acessar o bagageiro. Para permitir sua abertura, o sistema possui um mecanismo de movimento pantográfico com seu suporte fixado de forma soldada na longarina do ônibus.

Figura 1 - Ônibus em operação de carga e descarga de bagagens



Fonte: Apolinário (2017).

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O escopo de projeto de um ônibus visa contemplar as possíveis condições de sua aplicação, ou seja, o ônibus é projetado para resistir às diferentes condições de estradas encontradas em seu mercado consumidor. Voltando a atenção para o mercado brasileiro, segundo o relatório gerencial realizado pela CNT, em 2019, um total de 108.863 quilômetros de estradas brasileiras foram avaliados. A análise apontou que 64.198 quilômetros estão classificados como regular, ruim ou péssimo, representando 59% do total (CNT, 2020).

Apesar destas condições uma maioria absoluta do país utiliza o transporte rodoviário, sendo responsável por 93,3% da utilização geral, seguido pelo transporte aéreo que representa 4,1%. Em termos de consumo energético, o transporte é responsável por 32,7%, onde possui maior representatividade, ou seja, o transporte rodoviário é responsável por praticamente um terço do consumo energético do país (CNT, 2020).

Estes dados mostram que apesar das condições insatisfatórias, o transporte rodoviário é amplamente utilizado no país. Os veículos que trafegam nas vias brasileiras estão condicionados a regiões de elevado impacto e vibrações, acelerando o desgaste e fadiga em seus componentes. Consertos envolvendo fixadores roscados representam gastos significativos para as indústrias automotivas. Na Marcopolo, os gastos com assistência técnica envolvendo fixadores chegam a 3,5% do total gasto anualmente.

Atualmente, não existem estudos na empresa que relacione a força tensora pelo torque aplicado considerando o fator do coeficiente de atrito, oriundo dos revestimentos superficiais que compõe a junta. Uma alteração indevida do tratamento superficial em um dos componentes da junta gera mudanças significativas na relação torque aplicado por força tensora, levando a um excesso ou falta de pré-carga na junta.

O novo projeto da empresa, apresenta uma mudança no conceito da fixação do suporte de articulação da portinhola do bagageiro. O suporte atual é montado por meio de soldagem, passando a ser fixado por parafusos. A fixação por parafusos apresenta uma melhora no processo de montagem e tolerância dimensional do sistema. Com esta mudança, são acrescentadas em média dez juntas parafusadas críticas na montagem do ônibus.

Portanto, se faz necessária a realização de um estudo sobre a junta parafusada de sustentação da portinhola com ênfase na relação dos diferentes tratamentos superficiais utilizados na empresa, a fim de obter seus respectivos coeficientes de atrito. Após obter os dados de entrada, será proposta a combinação ideal dos revestimentos superficiais para compor a junta parafusada estudada neste trabalho.

1.3 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito do tratamento superficial no coeficiente de atrito a fim de controlar a força tensora de uma junta parafusada utilizada em ônibus rodoviários por meio do processo de controle de torque.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Estudar as propriedades dos revestimentos superficiais comumente utilizados nas juntas parafusadas da empresa.
- b) Realizar testes na máquina DTT utilizando combinações de tratamentos superficiais empregados na empresa.
- c) Encontrar o coeficiente de atrito da união parafusada por meio dos testes realizados na máquina DTT.
- d) Obter e analisar a relação de torque e pré-carga da junta por meios experimentais.
- e) Avaliar as combinações de tratamento superficial entre os fixadores e contra peças.
- f) Desenvolver um procedimento para dimensionamento de uniões parafusadas na empresa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados assuntos relacionados a uniões parafusadas, desde os componentes utilizados, bem como a aplicação e fatores externos que impactam em um projeto de junta parafusada, dando ênfase às diferentes forças tensoras obtidas na aplicação pelo controle de torque devido aos diferentes coeficientes de atrito oriundos dos tratamentos superficiais utilizados.

2.1 ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

Pode-se considerar como elemento de fixação, qualquer sistema que tenha a finalidade de unir dois ou mais componentes. Os elementos podem ser divididos em: elementos de fixação permanentes e não permanentes. Os elementos de fixação não permanentes são comumente empregados quando se faz necessário a desmontagem do sistema para manutenção ou substituição de componentes ao longo da vida útil de um produto (GARCIA, 2013).

Ao utilizar elementos de fixação, é imprescindível ter o conhecimento sobre a aplicação e desempenho dos diferentes tipos de conectores, a fim de garantir a qualidade e confiabilidade do produto. Conectores do tipo roscado representam a maior parcela na utilização da linha automotiva pesada, dentre eles: parafusos e porcas.

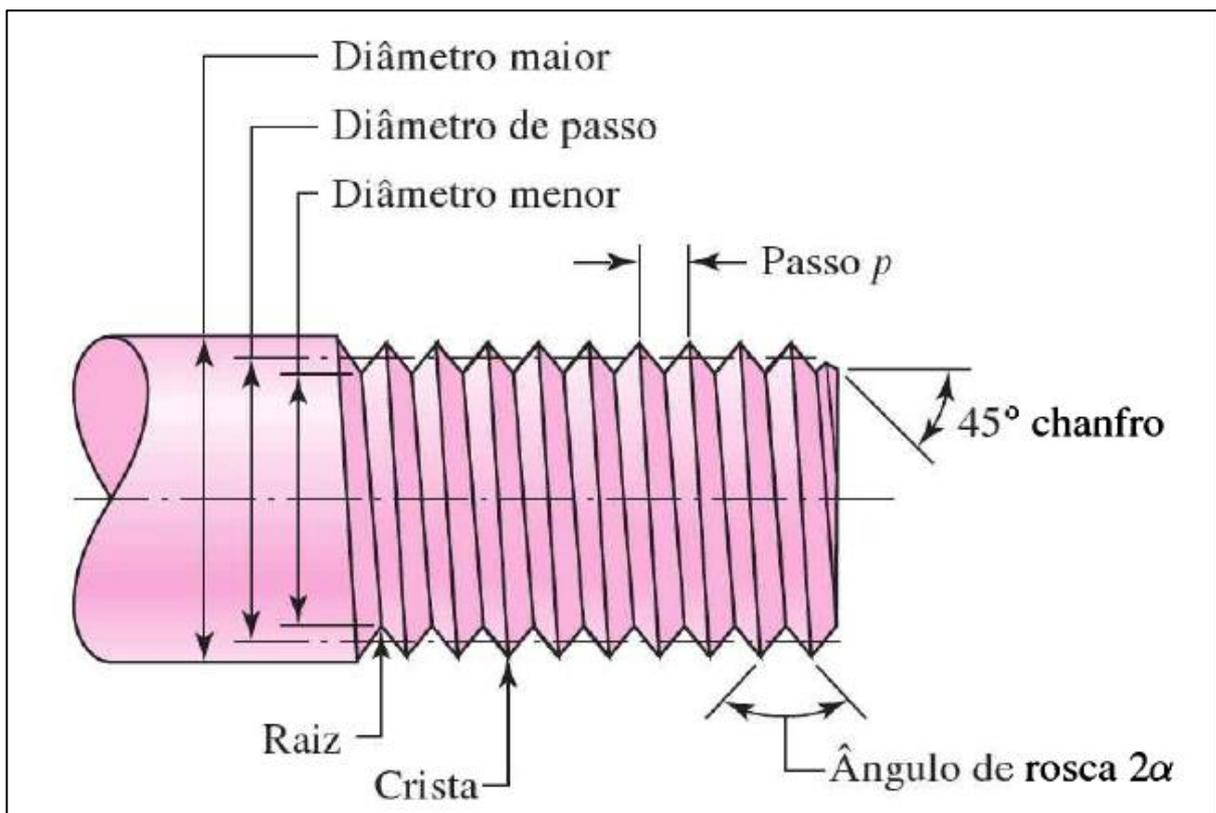
2.1.1 Padrões de rosca

A rosca está presente nos mais diversos fixadores. Basicamente, a rosca funciona como uma hélice fazendo com que o parafuso ou a porca gire deslocando-se de forma axial no sentido do eixo gerando o aperto necessário na junta. As roscas podem ser externas (parafusos) ou internas (furos roscados ou porcas). Por padrão, as roscas são fabricadas seguindo a regra da mão direita (salvo de exceções especificadas em projetos), se o elemento rotacionar em sentido horário ele avança pressionando a contra peça (NORTON, 2013).

A Figura 2 ilustra a terminologia aplicada às roscas, onde o ângulo padrão é de 60° para roscas métricas. O passo, representado pela sigla p , pode ser considerado como a distância entre as cristas do filete de rosca. O diâmetro maior, caracterizado como d é o maior diâmetro de uma rosca de um parafuso, já o diâmetro menor, d_r , é o menor diâmetro encontrado na rosca do parafuso. Por fim, o diâmetro de passo, d_p , é um diâmetro teórico encontrado entre o diâmetro maior e menor (BUDYNAS, NISBETT, 2011).

A denominação de uma rosca dada por um prefixo “M” indica se tratar de uma rosca métrica, seguido pelo diâmetro nominal maior e pelo passo da rosca. Como por exemplo, se avaliarmos a rosca M8 x 1,25 indica ser um parafuso métrico com diâmetro nominal de 8 mm e passo de 1,25 mm (ISO 965-1, 1998).

Figura 2 - Terminologia do padrão de roscas



Fonte: Adaptado de BUDYNAS, NISBETT (2011) p. 423.

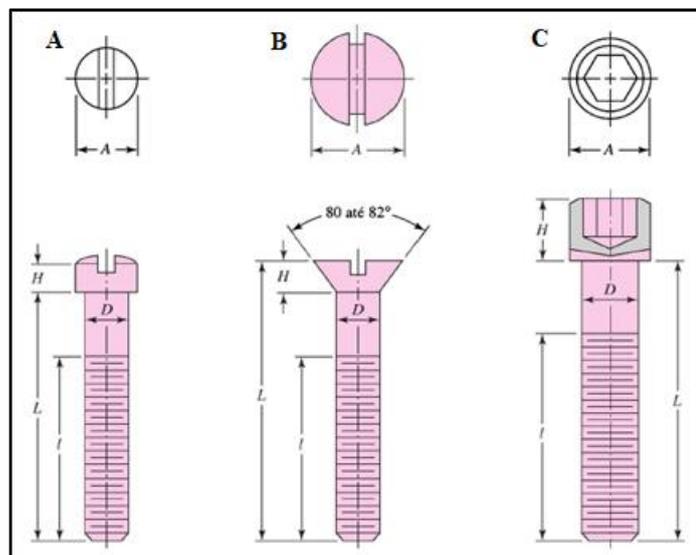
O passo das roscas pode ser dividido em três diferentes tipos, sendo a série grossa a mais encontrada, utilizada em aplicações comuns, onde requer diversas inserções e remoções do parafuso para regulagem ou montagem. Roscas finas possuem maior resistência ao afrouxamento perante vibração devido ao menor ângulo de hélice, geralmente aplicados em produtos que devem resistir a vibrações (NORTON, 2013).

2.1.2 Parafusos

Os parafusos são geralmente empregados em uniões não permanentes para realizar a montagem de dois ou mais componentes, onde são dimensionados para que possam suportar as cargas de tração, torção ou um estado de cargas combinadas (GARCIA, 2013).

Geralmente são concebidos seguindo parâmetros e normas, nas quais é definido sua geometria, formato da cabeça, dimensões limite, composição do material, características mecânicas, dentre outras. Na Figura 3 é apresentada uma pequena variedade de formatos e estilos de parafusos de máquinas que podem ser encontrados, onde, independentemente da norma em que os parafusos estão atribuídos, estas características tendem a convergir. Onde o parafuso A e B possuem uma espécie de encaixe superior denominado de fenda, porém, possuem diferentes formatos de cabeça sendo o A do tipo panela e o B do tipo chata. Por fim, o parafuso C possui uma cabeça de formato cilíndrico com encaixe conhecido como sextavado interno.

Figura 3 - Parafusos normatizados



Fonte: Adaptado de BUDYNAS, NISBETT (2011) p. 435.

Além dos aspectos visuais e geométricos, os parafusos são classificados conforme sua resistência. Em parafusos métricos, a classe de resistência é especificada por um conjunto de dois algarismos, sendo o primeiro algarismo indicador de resistência mínima a tração, e o segundo algarismo representando o limite na tensão de escoamento (MOTT, 2015). Como por exemplo um parafuso classificado como 12.9 representa um limite de resistência mínima à tração de 1220 MPa, com o escoamento equivalente a 90% do valor referente ao limite mínimo

de tração, sendo igual à 1100 MPa, onde pode-se perceber demais valores apresentados na Tabela 1 (ISO 898-1, 2009).

A norma ISO 898-1 apresenta informações referentes a resistência e composição química de parafusos, onde a unidade padrão para resistência desta norma é MPa. A resistência de prova de um parafuso consiste na máxima resistência na qual o parafuso é submetido antes de apresentar deformação plástica (MOTT, 2015).

Tabela 1- Classes métricas de aços para parafusos

Classe	Tamanho do parafuso	Resistência à tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Resistência de prova (MPa)
4.6	M5-M36	400	240	225
4.8	M1,6-M16	420	340	310
5.8	M5-M24	520	415	380
8.8	M17-M36	830	660	600
9.8	M1,6-M16	900	720	650
10.9	M6-M36	1040	940	830
12.9	M,16-M36	1220	1100	910

Fonte: Adaptado de MOTT, (2015) p.734.

2.1.3 Porcas

As porcas possuem a função de travar o parafuso e garantir o aperto de uma união parafusada. De forma similar aos parafusos, as porcas são normalizadas tendo suas principais características padrão, como: dimensional de rosca, altura, dimensional de corpo, composição química e material. A norma que rege estes parâmetros é a ISO 898-2.

Em uma junta parafusada utilizando conectores de mesma classe, quando colocados sob esforço o primeiro componente a falhar deve ser o parafuso, isto ocorre devido a maior área de seção transversal da porca e por características normalizadas da mesma que são projetadas para promover a falha do parafuso ante a porca (FERREIRA, 2014).

A classe de resistência de porcas é similar aos parafusos, sendo possível verificar a equivalência das classes de resistência na Tabela 2. As porcas de classe 8, 10 e 12, sendo as mais utilizadas na indústria automotiva pesada, devem ser constituídas de aço médio carbono ou de aço ligado, para que possam ser tratadas termicamente. Já as porcas de grau 6 ou inferior não necessitam de tratamento térmico e podem ser fabricadas em aço baixo carbono (ISO 898-2, 2012).

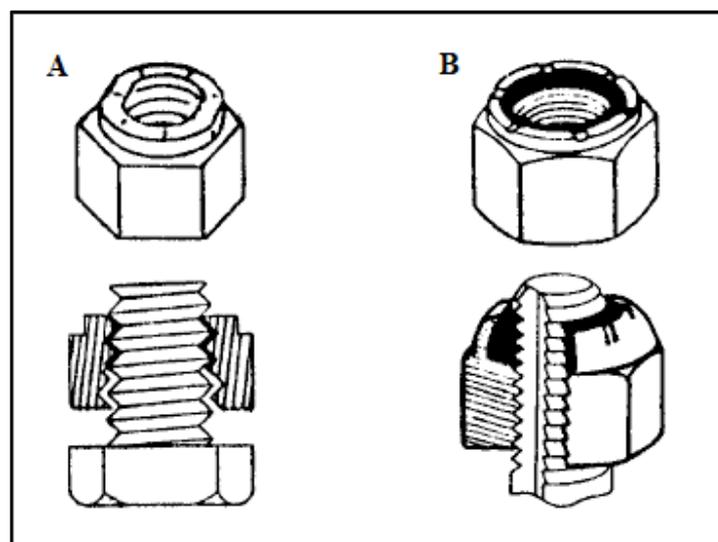
Tabela 2 - Equivalência de classes em porcas e parafusos

Classe de porcas	Classe de parafusos
5	5.8
6	6.8
8	8.8
9	9.8
10	10.8
12	12.9

Fonte: Adaptado de NORMA ISO 898-2, (2012), p.4.

Uma constante preocupação na aplicação de porcas é o afrouxamento devido a vibração. Para tal, há diversas tecnologias empregadas com o propósito de manter o aperto de uma junta parafusada (FERREIRA, 2014). A Figura 4 apresenta dois modelos de porcas empregadas na indústria automotiva pesada com sistemas de travamento especial, sendo elas: a porca de travamento elíptica indicada pela letra A, a qual possui seus últimos filetes dispostos de forma elíptica com a finalidade de travar na rosca do parafuso por interferência, e a porca com inserto de náilon indicada pela letra B, sendo composta por um filete de náilon sobre a porca que no aperto é conformado travando a rosca (NORTON, 2013).

Figura 4 - Porcas com travamento



Fonte: Adaptado de NORTON, (2013) p. 880.

2.2 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

O tipo mais comum de corrosão que uma peça sofre é pelo processo químico de oxidação metálica, onde é admitido que há perdas de elétrons em um átomo. No caso da corrosão atmosférica, a intensidade da corrosão está atrelada às condições climáticas, sendo agravadas em regiões costeiras e com clima úmido, por exemplo (CHIAVERINI, 1986).

Uma forma comum e eficiente para coibir o acontecimento da corrosão em peças metálicas é o revestimento de sua superfície, os revestimentos não só impedem o aparecimento da corrosão, como em alguns casos, auxiliam na resistência ao desgaste da peça.

Um fator importante para o sucesso na aplicação do tratamento superficial em um componente é seu preparo, onde, por meio de substâncias alcalinas como fosfato, solventes e decapagem ácida, procura-se limpar impurezas presentes devido ao processo de fabricação destes componentes, para assim a superfície estar limpa e manter a coesão do revestimento depositado sobre a mesma (CHIAVERINI, 1986).

O teste de nevoa salina, conhecido por *Salt-spray* é empregado na empresa para validar a efetividade do revestimento aplicado nas peças. O teste consiste em manter o componente em uma câmara saturada por um vapor de solução de cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 5%, com a temperatura interna média em torno de 35°C onde é acelerado o processo de corrosão das peças testadas. Através do teste são obtidos os tempos de resistências para dois tipos de corrosão: vermelha e branca, fornecendo dados relevantes para realização de manutenção preventiva, bem como a troca de componentes e fornecimento de garantias (PIMENTA; SANTOS, 2016).

2.2.1 Zincagem eletrolítica

O processo de eletrodeposição é comumente utilizado na indústria metal mecânica, tendo como principais metais utilizados nesta técnica o zinco, estanho, cobre, níquel, cromo, cádmio, entre outros. O processo de eletrodeposição consiste em um fenômeno inverso ao de corrosão, onde o metal é depositado em solução, ou seja, um metal envolve a peça de aço impedindo que a mesma entre em contato com a atmosfera e sofra corrosão (CHIAVERINI, 1986).

A Marcopolo S/A utiliza o zinco como metal base para o tratamento de eletrodeposição, onde possui camada limite de 5 a 25 µm. No processo de zincagem, as peças tratadas passam por processos de pré-tratamento, como o desengraxe e a decapagem, com

enxagues entre cada processo. Após o revestimento ser aplicado, os componentes passam por um processo de passivação (SOUZA; TOAZZA, 2006).

A resistência a corrosão através do teste *Salt-Spray* para o tratamento de zincagem eletrolítica aplicado na empresa, é de no mínimo 72 horas para corrosão branca considerando a espessura de camada limite variando entre 5 e 25 μm , já a resistência à corrosão vermelha varia, sendo o mínimo 120 horas para uma espessura de 5 μm , e 336 horas para uma espessura de 25 μm de espessura mínima de camada (SOUZA; TOAZZA, 2006).

Em fixadores ao passar pelo processo de galvanização, a camada de zinco evita que o aço entre em contato com a atmosfera, e, portanto, oxidando. Parafusos com classe de resistência de até 8.8 podem ser galvanizados pelo processo padrão (eletrodeposição), já parafusos de classe 10.9 que possuem uma resistência elevada e são tratados termicamente, passam pelo processo de zincagem por imersão a quente. Por fim, não é aconselhado este tratamento em parafusos de classe 12.9, devido a possibilidade de o componente apresentar fragilização por hidrogênio ao passar pelo processo de galvanização (ISO 898-1, 2009).

A espessura de camada limite padrão para este tratamento em fixadores varia entre 3 a 8 μm , garantido assim uma durabilidade de 96 horas para corrosão branca e 132 horas para corrosão vermelha quando submetidos a teste de *Salt-spray* (INDUFIX, 2016).

2.2.2 Organometálico em fixadores

O tratamento organometálico, conhecido também como zinco lamelar, consiste em um processo de revestimento inorgânico composto por água e metais, sendo isento do cromo hexavalente e trivalente. É uma alternativa em relação ao tratamento de zinco eletrolítico, sendo muito empregado em peças de alta resistência, a partir de 1000 MPa, ou seja, fixadores com classe 10.9 ou superior, devido ao fato de o tratamento organometálico não provocar a fragilização por hidrogênio (INDUFIX, 2016).

O pré-tratamento é fundamental para um desempenho satisfatório do acabamento superficial, entre etapas de lavagem, o fixador passa por etapas de desengraxe, jateamento e fosfatização a fim de limpar as impurezas da superfície para garantir uma boa aderência no revestimento no fixador. Após o pré-tratamento, o revestimento é aplicado por meio de imersão e centrifugação. Os fatores que influenciam na qualidade do revestimento estão atribuídos ao tempo de imersão, velocidade e tempo de centrifugação, condições de secagem e parâmetros de cura são essenciais para um bom rendimento do revestimento.

O tratamento organometálico permite camadas limites entre 8 e 16 μm , possui uma elevada resistência a corrosão, resistindo mais de 500 horas contra corrosão branca e mais de 1000 horas contra corrosão vermelha quando submetidos ao teste de *Salt-spray* (INDUFIX, 2016).

2.2.3 Pintura a Pó

A pintura a pó consiste em um processo de baixo custo e fácil aplicação. A pintura a pó possui várias composições, podendo ser epoxidica, hibrida, de poliéster puro, de poliuretano ou de acrílicos. Na Marcopolo S/A utiliza-se a pintura a pó do tipo poliéster, devido ao fato de possuir boa resistência ao intemperismo natural, é aplicada em componentes que ficam expostos à atmosfera em seu uso geral.

A aplicação da pintura a pó é semelhante ao da tinta líquida, onde ocorre a fluidificação do ar comprimido com a tinta e posteriormente aplicado por pistolas. As tintas a pó podem ser aplicadas de diferentes formas, sendo elas: leito fluidizado, leito fluidizado eletrostático, pistola eletrostática e pistola tribo (PINTO, 2012). O processo de pintura a pó da empresa utiliza o sistema de Pistola Eletrostática.

A pintura por pistola eletrostática ocorre pelo princípio de pulverização, formando um campo elétrico entre a ponta da pistola e a face da peça, as partículas são carregadas durante o trajeto entre a pistola e a peça (este deve ser de 10 a 20 cm), que quando entram em contato com a peça formam um filme que ao passar pelo processo de secagem é polimerizado (SILVA, 2009).

A peça pintada a pó passa por um pré-tratamento que consiste em nove etapas, sendo elas: desengraxe alcalino, enxague 1, fosfatização, enxague 2, enxague com água destilada, pintura *E-coat* (com pH: 5,60), três enxagues subsequentes. Após estas etapas a peça passa por um período de cura com duração de 10 minutos de 180°C a 200°C, após a cura a peça passa pela pintura eletrostática (com a utilização de uma cabine e pistola). Por fim, ocorre a cura da pintura, em estufa com temperatura de 200°C por cerca de 10 minutos (SCARABOTTO; SCIENZA, 2014).

A camada limite no processo de pintura a pó pode variar entre 30 a 90 μm , dentre os tratamentos superficiais estudados é o que apresenta maior espessura e variação de camada limite, devido ao fato da aplicação não ser automatizada, apresentando o fator de erro humano e de outros fatores como geometria da peça que por vezes facilitam o acúmulo de tinta em certas

regiões. Apesar destes pontos, a pintura a pó apresenta ótimos resultados financeiros, o que justifica sua ampla utilização (SILVA, 2009).

2.3 TRIBOLOGIA

A tribologia consiste em estudar a interação das superfícies em movimento, envolvendo assuntos como desgaste, atrito e lubrificação. Devido ao fato de que qualquer superfície sólida possa apresentar irregularidades, podendo chegar a uma ordem microscópica, o contato entre duas superfícies perfeitamente planas ocorrerá somente em alguns pontos, conforme a carga normal à superfície aumenta, uma maior quantidade de pontos entra em contato gerando uma força de atrito entre as superfícies (MUNIZ; SINATORA, 2007).

2.3.1 A lubrificação

A principal função da lubrificação é reduzir o atrito e o desgaste no contato entre superfícies de sólidos distintos. Com a utilização de lubrificantes especiais, é possível obter o coeficiente de atrito necessário para o dimensionamento da união parafusada. A lubrificação de elementos roscados auxilia na desmontagem de fixadores para uma eventual manutenção ou substituição de componentes (CROCCOLO et al., 2016).

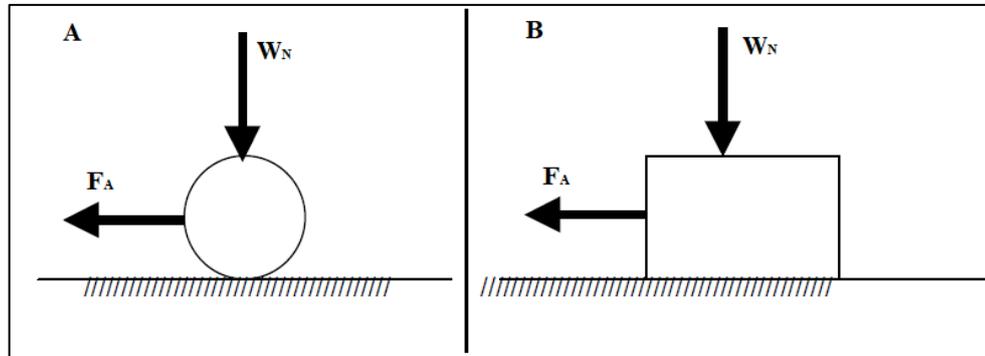
2.3.2 O coeficiente de atrito

O coeficiente de atrito é uma grandeza adimensional, podendo ser definido como a resistência encontrada em um movimento entre dois corpos. Existem dois tipos de atrito: o atrito de rolamento A, e o atrito de deslizamento, indicado por B, apresentados na Figura 5.

Pode-se compreender o coeficiente de atrito de duas maneiras: coeficiente de atrito dinâmico e estático. O dinâmico ocorre quando a força atua em superfícies em movimento, já o estático é considerado como a força à qual é necessária para mover o corpo em repouso (MUNIZ; SINATORA, 2007).

A pré-carga em uma junta parafusada é dimensionada para que a união permaneça estável, resista a solicitações mecânicas e vibrações sem romper ou afrouxar. Para ter uma repetibilidade no valor de pré-carga é necessário seguir os parâmetros de rugosidade, lubrificação e método de aperto, uma vez que agem diretamente influenciando o coeficiente de atrito (KOUNOUDJI et al., 2016).

Figura 5- Atrito de rolamento (A) e atrito de deslizamento (B)



Fonte: Adaptado de Nascimento Jr. (2003) p. 41.

A Equação 1, que representa o coeficiente de atrito μ , é formada pela razão da força de atrito F_a e da carga normal W_N . Geralmente o valor de μ é encontrado entre 0,1 a 1 para os materiais utilizados em projetos mecânicos (NASCIMENTO JR., 2003).

$$\mu = \frac{F_a}{W_N} \quad (1)$$

2.3.3 O coeficiente de atrito atuante nos fixadores

O controle do coeficiente de atrito em fixadores pode ser realizado obtendo a média e o desvio padrão do lote por meios experimentais. Com estes dados, é possível restringir a variação do coeficiente a uma pequena margem de erro. É importante ressaltar que o atrito não é uma propriedade inerente a um material, o coeficiente de atrito é um parâmetro obtido através dos contatos entre superfícies (MUNIZ; SINATORA, 2007).

Para o dimensionamento do coeficiente de atrito, é necessário levar em conta todas as superfícies que interagem, monitorando os parâmetros da superfície dos fixadores e a superfície das peças que são fixadas na união. É necessário controlar a superfície que entrará em contato com a superfície do parafuso (CROCCOLO et al., 2016).

Em uma união parafusada, onde é comumente utilizado um conjunto de parafuso e porca, ocorre o atrito em duas regiões durante a aplicação: o coeficiente de atrito na rosca μ_G e o coeficiente de atrito sobre a cabeça do parafuso μ_K , descritos na Equação 2. Onde o M_G é o componente de torque que age na rosca, o F_V é a carga considerada no teste e d_2 o diâmetro de passo do parafuso (DIN 946-1, 1991).

$$\mu_G = \frac{M_G / F_V - 0,159 \cdot p}{0,578 \cdot d_2} \quad (2)$$

Já a fórmula do coeficiente de atrito sob a cabeça do elemento girante μ_K , é definido pela Equação 3 (DIN 946-1, 1991):

$$\mu_K = \frac{2 \cdot M_K}{D_{Km} \cdot F_V} \quad (3)$$

Onde M_K é o torque oriundo da fricção que age na face de contato da cabeça do parafuso e D_{Km} é o diâmetro médio da face de contato na cabeça do parafuso. Por fim, é possível obter a Equação 4, do atrito total, o μ_{Ges} pela equação (DIN 946-1, 1991).

$$\mu_{Ges} = \frac{M_A / F_V - 0,159 \cdot p}{0,578 \cdot d_2 + \frac{D_{Km}}{2}} \quad (4)$$

É por meio de coletas experimentais utilizando uma máquina de determinação de Torque x Tensão que são obtidos os coeficientes de atrito apresentados acima. A máquina opera controlando os valores de pré-carga e torque total empregado e através de células de carga, fornece os valores dos coeficientes de atrito instantaneamente (MUNIZ; SINATORA, 2007).

2.4 UNIÃO PARAFUSADA

Pode-se considerar uma união parafusada, qualquer conjunto com duas ou mais peças unidas por meio de conectores roscados, sendo os mais comuns: porcas e parafusos. A união destes componentes é exercida pela força tensora, sendo responsável por imprimir uma compressão entre a face da cabeça do parafuso com a face da base da porca mantendo a união dos componentes montados (BUDYNAS, NISBETT, 2011).

A força tensora é gerada por um torque que pode ser aplicado na cabeça do parafuso ou na porca. Este é responsável por gerar uma pré-carga na junta provocando tensões internas que causam um alongamento no parafuso. Abaixo são abordados os cálculos e tópicos pertinentes a uniões parafusadas.

2.4.1 O conceito de resiliência em parafusos

Pode-se dividir um parafuso em um certo número de elementos, os quais podem ser decompostos em corpos cilíndricos de vários comprimentos l e de diversas áreas de secções transversais A . Com estas segmentações, é possível calcular o alongamento f conforme a lei de Hooke, assim introduzindo a constante de mola do material, onde E é o módulo de elasticidade do material e F a força de solitação, conforme Equação 5:

$$f = \frac{F \cdot l}{E \cdot A} \quad (5)$$

Portanto, é possível afirmar que cada elemento individual terá uma resiliência elástica individual δ_i , apresentado na equação 6, no caso do parafuso, cada corpo é engastado em seu próximo, assim podemos escrever como uma soma das resiliências, na Equação 7 (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001).

$$\delta_i = \frac{f_i}{F} = \frac{l_i}{E_S \cdot A_i} \quad (6)$$

$$\delta_S = \delta_K + \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_{GM} \quad (7)$$

Onde δ_K é a resiliência elástica na região da cabeça sob tensão e δ_{GM} é a resiliência elástica na rosca totalmente engajada, d o diâmetro nominal do parafuso e E_S é o módulo de elasticidade do material do parafuso. Através de experimentos práticos, pode-se descrever as Equações 8 e 9 respectivamente (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001).

$$\delta_{GM} = \delta_G + \delta_M = \frac{0,5 \cdot d}{E_S \cdot A_N} + \frac{0,4 \cdot d}{E_S \cdot A_N} \quad (8)$$

$$\delta_K = \frac{0,4 \cdot d}{E_S \cdot A_N} \quad (9)$$

Onde para a Equação 8 e Equação 9, a área de secção transversal A_N é descrita:

$$A_N = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (10)$$

Em uniões parafusadas, quando o eixo do parafuso não coincide com o centro de gravidade da junta, acaba gerando uma deformação extra por flexão, portanto a resiliência calculada passa a ser δ_p , a área substitutiva A_{ers} , na qual a resiliência elástica das placas deve ser embasada, passa a ser: (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001)

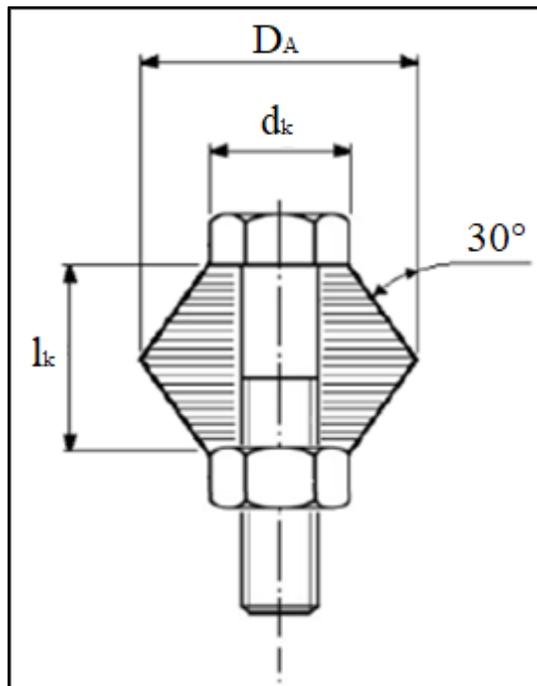
$$A_{ers} = \frac{\pi}{4} (d_k^2 - D_B^2) + \frac{\pi}{8} \cdot d_k (D_A - d_k) \cdot [(x + 1)^2 - 1] \quad (11)$$

$$\delta_p = \frac{l_k}{A_{ers} \cdot E_p} = \frac{f}{F} \quad (12)$$

Na Equação 11, o D_A é o diâmetro externo no cone da junta, o d_k é o diâmetro equivalente na cabeça do parafuso conforme apresentado na Figura 6, por fim, o x é o fator de cálculo para montagem da junta utilizando porca, desde que respeite a relação: $l_k/d \leq 10$ e é descrito pela Equação 13 (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001).

$$x = \sqrt[3]{\frac{l_k \cdot d_k}{D_A^2}} \quad (13)$$

Figura 6 - Esquemática do cone frustra



Fonte: Adaptado de CIOTO, (2001).

A partir das resiliências δ_P e δ_S calculadas é possível determinar o fator de forças ϕ_K da junta parafusada e é descrito pela Equação 14. O fator de forças ϕ_K é admitido para o caso teórico de ação da força de trabalho agindo no plano da cabeça do parafuso ou na base da porca (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001).

$$\phi_K = \frac{\delta_P}{\delta_S + \delta_P} \quad (14)$$

2.4.2 Solicitações durante o aperto

Em uma montagem de uma união parafusada a pré-carga é provocada pelo giro do parafuso ou da porca. Por estes motivos o parafuso sofre tensão axial e torção, portando a relação entre o momento torsor na rosca M_{GA} . Considerando o ângulo de flanco da rosca padrão ($\alpha = 60^\circ$), se pode definir a Equação do momento torsor (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001):

$$M_{GA} = F_M \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left(\frac{p}{\pi \cdot d_2} + 1,155 \cdot \mu_G \right) \quad (15)$$

A partir da força tensora, considerando utilizar um limite de escoamento de 0,2% ($R_{P0,2}$) a tensão de tração pode ser determinada pela Equação 16:

$$\sigma_M = \frac{v \cdot R_{P0,2}}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left[\frac{2 \cdot d_2}{d_0} \left(\frac{p}{\pi \cdot d_2} + 1,155 \cdot \mu_G \right) \right]}} \quad (16)$$

Onde na Equação 16, d_0 representa o diâmetro da menor área resistiva e $R_{P0,2}$ um valor informado conforme norma ISO 898-1 para 0,2% de deformação plástica. (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001) Por fim, a força tensora de fechamento da junta F_{SP} , é calculada pela Equação 17:

$$F_{SP} = \sigma_M \cdot A_S \quad (17)$$

Com A_S , sendo a área de seção transversal resistente do parafuso, onde d_3 é o diâmetro do núcleo da rosca do parafuso descritos na Equação 18:

$$A_S = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \quad (18)$$

A partir da força de fechamento da junta é possível determinar a pressão superficial sobre a junta $P_{M\acute{A}X}$. Apresentada na Equação 19, onde F_A é a força axial de trabalho no parafuso. Caso a pressão superficial exceda o limite de escoamento das placas na junta P_G , pode ocorrer uma perda de pré-carga e relaxamento da junta por deformação plástica das chapas que a compõe (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001).

$$P_{M\acute{A}X} = \frac{F_{SP} + \phi \cdot F_A}{A_P} < P_G \quad (19)$$

Com A_P sendo a área de apoio da cabeça do parafuso ou da porca descrita pela Equação 20, onde D_B é o diâmetro do furo de passagem do parafuso.

$$A_P = \frac{\pi}{4} \cdot (D_A^2 - D_B^2) \quad (20)$$

Para se garantir que não aconteça a abertura unilateral sob as forças transversais que incidem sobre a junta, para as Equações de dimensionamento deve ser acrescida a força de retenção mínima necessária F_{Kerf} apresentada na Equação 21, (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001).

$$F_{Kerf} = \frac{F_Q}{\mu_{Tr} \cdot q} \quad (21)$$

Onde F_Q é a força de carregamento transversal, q é o número de interfaces e μ_{Tr} é o coeficiente de atrito entre as interfaces.

O assentamento das placas durante o aperto ocorre principalmente devido às irregularidades na planicidade da junta. As somas por deformações de assentamento f_Z geram uma redução na força de montagem e conseqüentemente uma redução da deformação elástica dos fixadores, implicando na perda de pré-carga da junta. A Equação 22, descreve a força de assentamento F_Z (CIOTO, 2001):

$$F_Z = \frac{f_Z \cdot \phi_K}{\delta_P} \quad (22)$$

Através de resultados experimentais, a deformação por assentamento independe do número de interfaces e das rugosidades nas interfaces, porém depende diretamente da relação de comprimento l_K , podendo ser descrita pela Equação 23 (CIOTO, 2001):

$$f_Z = 3,29 \cdot \left(\frac{l_K}{d}\right)^{0,34} \cdot 10^{-3} \quad (23)$$

Por fim, pode-se definir a força tensora de montagem mínima $F_{Mmín}$, por meio da relação dos carregamentos com o fator de força ϕ_K , através da Equação 24. A força tensora de montagem máxima $F_{Mmáx}$, é obtida mediante o produto entre a $F_{Mmín}$ e o fator de aperto α_A , apresentada na Equação 25 (VDI 2230, 2003):

$$F_{Mmín} = F_{Kerf} + (1 - \phi_K) \cdot F_A + F_Z \quad (24)$$

$$F_{Mmáx} = \alpha_A \cdot F_{Mmín} \quad (25)$$

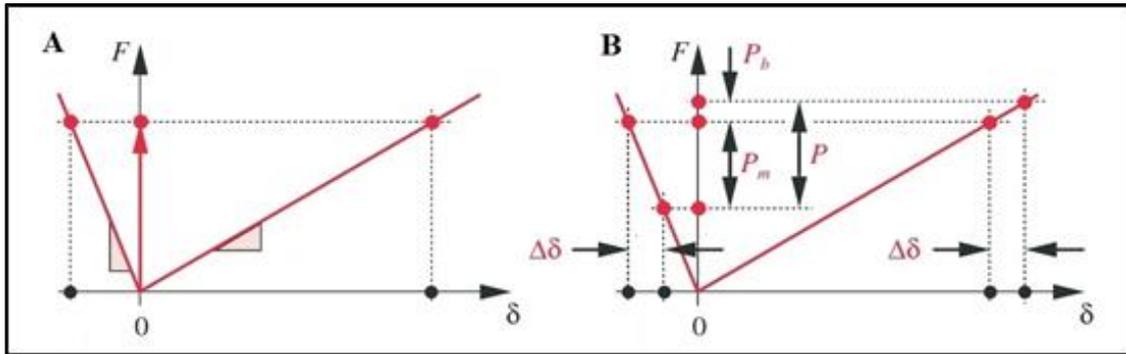
2.4.3 O conceito de pré-carga de uniões em tração

Em uniões parafusadas, geralmente se aplica um pré-carregamento com intensidade próxima ao limite de resistência de prova do parafuso sendo 90% para carregamentos estáticos e 75% para carregamentos dinâmicos (NORTON, 2013).

A pré-carga sob regime estático tem seu comportamento exibido na Figura 7 A, mostra que a inclinação da linha referente ao parafuso é positiva, uma vez que seu comprimento aumenta conforme o aumento da força. Ao analisar a curva da contrapeça, percebe-se que é negativa uma vez que possui maior área de contato, desde que seja considerado que a junta possui o mesmo material (NORTON, 2013).

Ao aplicar uma carga P conforme Figura 7 B, ocorre uma deflexão extra $\Delta\delta$, espera-se que esta deflexão seja igual para ambos os componentes da junta, ao menos que a junta venha a abrir. Também é possível perceber que a maior parte desta força é absorvida pela contrapeça P_m , e uma exígua parcela é absorvida pelo parafuso P_b (NORTON, 2013).

Figura 7- Deformação devido ao carregamento estático no parafuso e contrapeça

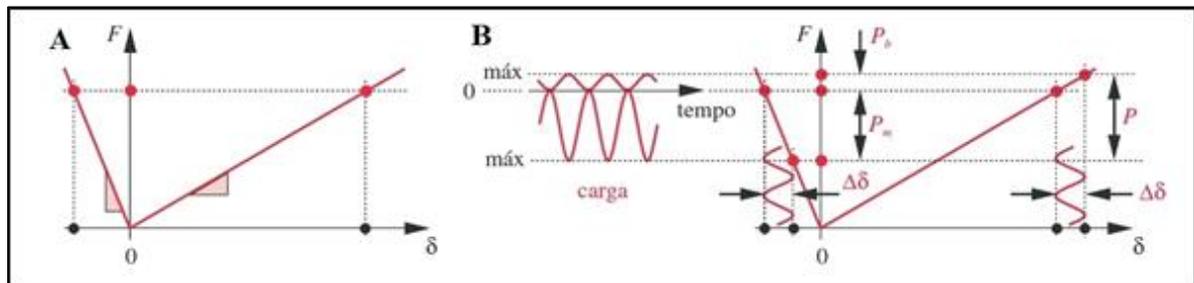


Fonte: Adaptado de NORTON, (2013) p. 885.

Esta importância passa a ser ainda maior quando as juntas são carregadas dinamicamente. Percebe-se que o gráfico da Figura 8 A é similar ao da Figura 7 A, a mudança ocorre quando o carregamento dinâmico passa a surgir na junta (NORTON, 2013).

Ao observar a Figura 8 B, quando a carga P for igual a 0 apenas a pré-carga estará agindo na junta. Da mesma forma do carregamento estático, o parafuso absorve uma menor quantidade de oscilações de carga em relação à contra peça (NORTON, 2013).

Figura 8 - Deformação devido ao carregamento dinâmico no parafuso e contra peça



Fonte: Adaptado de NORTON, (2013) p. 890.

2.4.4 Métodos de aperto em juntas parafusadas

A obtenção da força calculada está diretamente ligada com o grau de incerteza em função do fator de dispersão α_A . O método de aparafusamento deve ser escolhido cuidadosamente, já que com a melhora na qualidade e aumento de confiabilidade tem-se uma redução do fator de dispersão. Serão descritos na sequência as técnicas com maior utilização no meio industrial: aperto por controle de torque, aperto por controle de torque-ângulo e o aperto controlado até o limite de escoamento (GARCIA, 2019).

2.4.4.1 Aperto por controle de torque

O aperto por controle de torque é realizado por torquímetros indicadores ou por parafusadeiras. Onde o torque total M_A , é constituído pelo torque de aperto na rosca M_{GA} e pelo momento de atrito na cabeça do parafuso ou na rosca M_A , conforme Equação 26, (NORMA VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001):

$$M_A = M_{GA} + M_K \quad (26)$$

Considerando o ângulo padrão (normatizado) da rosca como $\alpha = 60^\circ$ há a equação 27 que possibilita determinar o torque necessário M_A , para a obtenção da força tensora F_M , desejada (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001):

$$M_A = F_M \cdot \left[0,16 \cdot p + \mu_G \cdot 0,58 \cdot d_2 + \frac{D_{km}}{2} \cdot \mu_K \right] \quad (27)$$

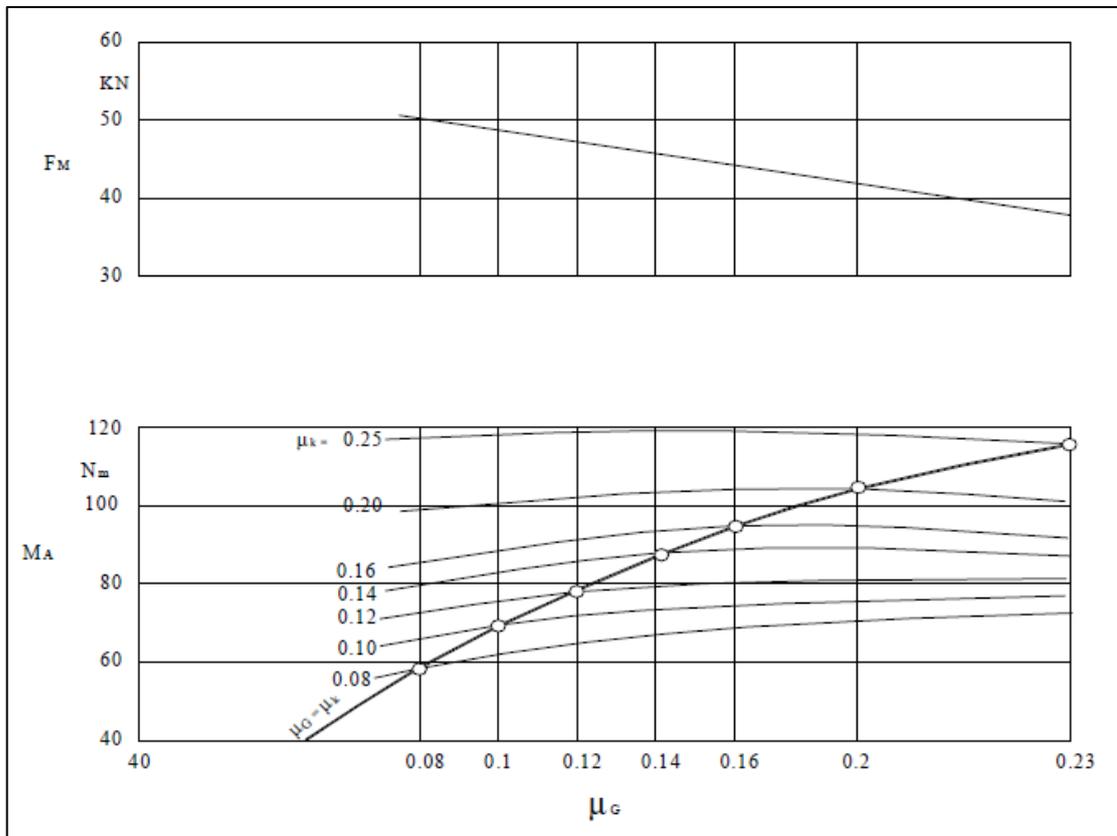
Onde, admitindo pequenos arredondamentos pode-se deduzir o raio de atrito médio, D_{km} , como:

$$D_{km} = \frac{2}{3} \cdot \frac{(d_K^3 - D_B^3)}{(d_K^2 - D_B^2)} \quad (28)$$

Tendo a variável D_B como o diâmetro do furo de passagem do parafuso e d_K como o diâmetro externo de assentamento da cabeça. A partir deste equacionamento é possível determinar o torque em função da força de montagem necessária (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001).

A relação entre o torque e a força tensora está condicionada a uma relação de todos os atritos μ_K e μ_G , no que resulta em uma vasta variação da força tensora F_M para um torque constante. Na Figura 9 é possível compreender uma relação entre os coeficientes μ_K e μ_G com a força tensora resultante perante o torque aplicado (CIOTO, 2001).

Figura 9 - Torque de montagem e força tensora em relação ao atrito



Fonte: Adaptado de CIOTO, (2001).

2.4.4.2 Aperto por controle de ângulo

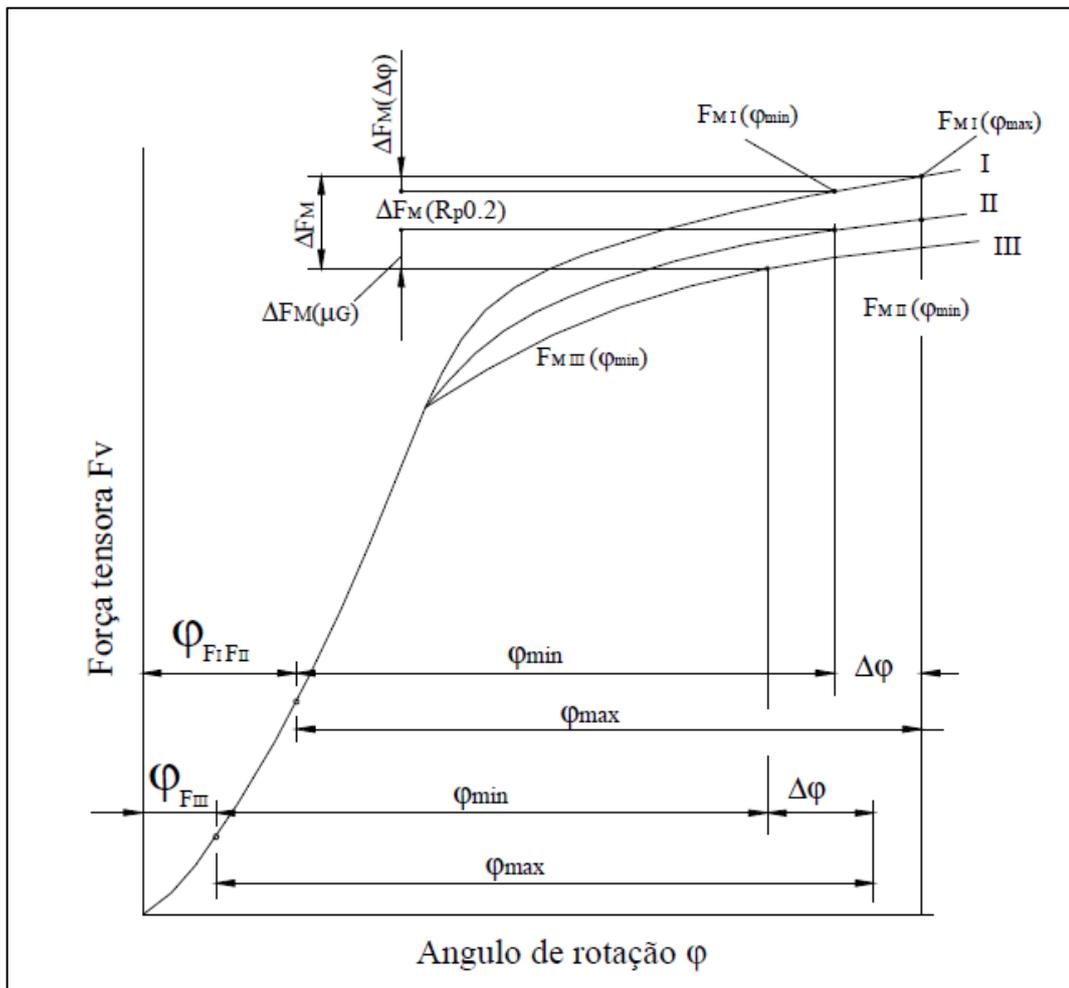
O método de controle de ângulo, mede indiretamente o alongamento do parafuso. O processo consiste em aplicar uma pré-carga até que a junta esteja fechada e, portanto, o ângulo de rotação passa a ser medido conforme apresentado na Figura 10. É comum obter alta precisão neste processo quando o parafuso é apertado até gerar deformação plástica, devido à horizontalidade da linha de deformação encontrada na Figura 10. Ao trabalhar na região elástica do parafuso para este processo, é comum encontrar erros na pré-carga similares aos do processo de controle de torque (CIOTO, 2001).

Neste processo, a quantidade de desmontagens torna-se exígua, devido ao fato de o parafuso transpassar seu limite de escoamento tornando-os inutilizáveis após algumas aplicações de reaperto. Por fim, a relação do ângulo de giro pela força tensora é apresentada pela equação 29, (VDI 2230, 2003; CIOTO, 2001):

$$\varphi = \frac{360}{p} \cdot F_M \cdot (\delta_S + \delta_P) \quad (29)$$

Onde φ é o ângulo de rotação necessário para obter a força tensora F_M , especificada. Durante o regime plástico alguns fatores são determinantes na obtenção da força tensora, dentre eles o coeficiente de atrito na rosca do fixador μ_G , as propriedades mecânicas do material e a variação do ângulo de rotação $\Delta\varphi$. Estes fatores influenciam diretamente sobre a deformação do fixador e consequentemente na obtenção da força Tensora destacados pelas curvas I, II e III na Figura 10 (CIOTO 2001).

Figura 10 - Relação ângulo de rotação por Força tensora



Fonte: Adaptado de CIOTO, (2001).

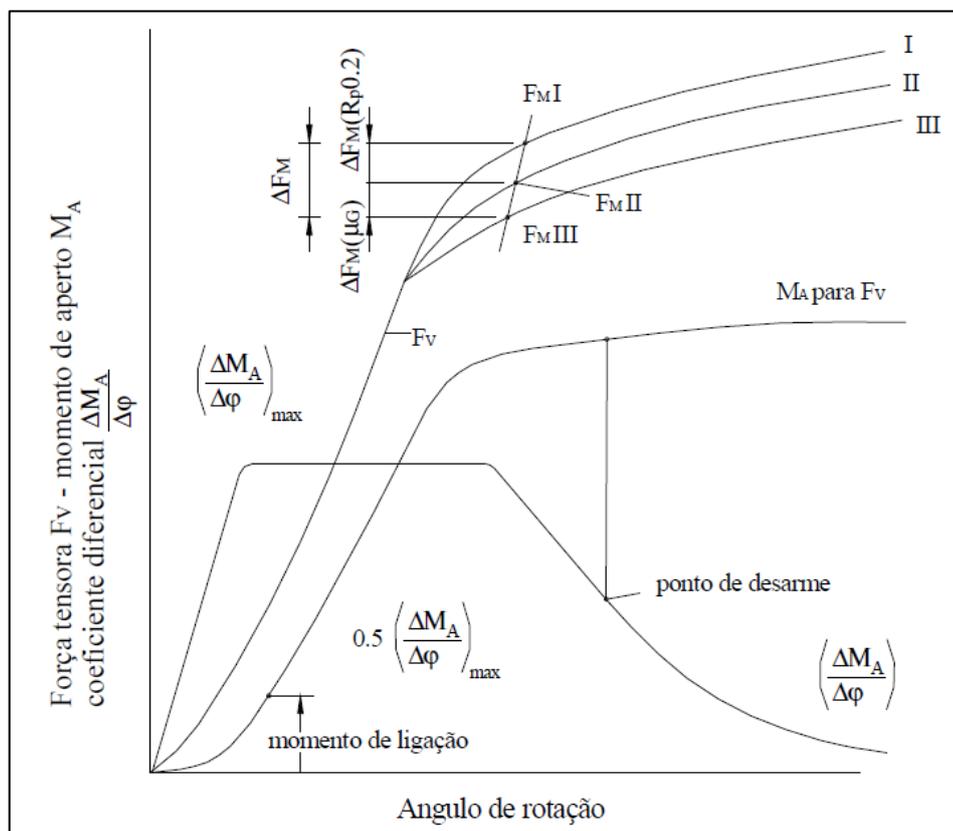
2.4.4.3 Aperto por controle de escoamento

O processo consiste em um sistema eletrônico que capta o ponto de escoamento. O sistema mede a relação do torque aplicado pelo Ângulo de rotação durante o aparafusamento conforme Figura 11, obtendo a razão diferencial $dM_A/d\varphi$, sendo proporcional à inclinação da tangente na curva torque por ângulo. Na região onde o limite de escoamento é atingido ocorre uma queda no gradiente, sinalizando ao sistema o fim do aperto (CIOTO 2001).

Com a utilização deste processo, a força de pré-tensão independe dos coeficientes de atrito presentes na junta, importando-se apenas com os valores de dispersão do limite mecânico do material. É considerado o processo mais eficiente e preciso, porém o elevado custo prejudica sua utilização em massa (CIOTO 2001).

Percebe-se que ao iniciar a deformação plástica, no decorrer do ângulo de rotação, a força tensora varia em função do atrito na rosca μ_G e devido a características do material que compõe o parafuso, influenciando na diminuição ou aumento da força de montagem final apresentado em I, II e III na Figura 11 (VDI 2230, 2003).

Figura 11 - Aperto por controle do limite de escoamento



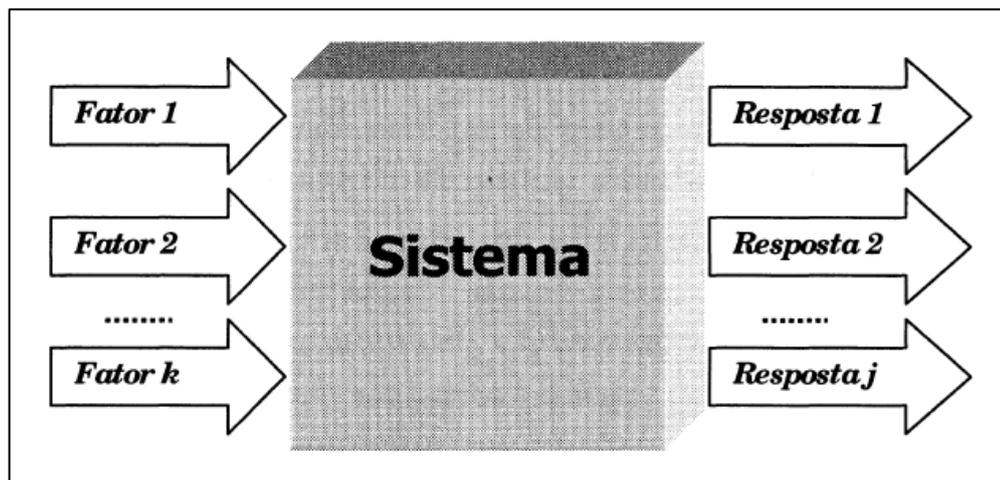
Fonte: Adaptado de CIOTO, (2001).

2.5 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Uma dificuldade recorrente da realização de experimentos é determinar a influência das variáveis de entrada sobre a variável de interesse. Ou seja, o experimento basicamente consiste em identificar como a resposta depende dos fatores (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

No início do experimento é necessário definir quais são os fatores e as respostas de interesse. Os fatores podem ser divididos em quantitativos ou qualitativos, em determinados experimentos não é possível controlar todos os fatores que afetam a resposta. As respostas são as variáveis de saída do sistema, nas quais serão avaliadas se haverá efeito sobre as modificações realizadas nos fatores. É possível existir diversas respostas de interesse para um mesmo sistema (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001). O planejamento do experimento descrito pode ser mais bem exemplificado na Figura 12:

Figura 12 - Exemplo de sistema experimental



Fonte: Adaptado de (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

2.5.1 O planejamento por fatorial 2^k

O delineamento fatorial é utilizado em experimentos que aplicam um estudo de efeito de “k” fatores com uma resposta, onde cada fator resulta em dois níveis. O planejamento mais simples utilizado é o 2^2 ou 2×2 , onde significa que serão utilizados dois fatores, por exemplo A e B em dois níveis de cada fator. Para possuir um delineamento fatorial completo é necessário que todos os fatores tenham interação entre si, onde é obtido um total de 2^k combinações possíveis (MONTGOMERY, 2001).

Geralmente são utilizados baixos valores para o fator k, como por exemplo 2 ou 3, uma vez que, nestas condições são apresentadas soluções claras e objetivas por análise de variância, regressão ou análise gráfica. Em situações em que o fator k se apresenta em valores superiores a 4, é indicado a utilizar o fracionamento do planejamento de experimento, que mesmo com um número reduzido de experimentos é possível obter com qualidade respostas condizentes com a proposta de avaliação (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

2.5.2 Um exemplo do planejamento fatorial 2²

Um exemplo de Montgomery (2001), foi adaptado para representar a análise de um planejamento fatorial 2² completo. O experimento analisado consiste em analisar o efeito da concentração de um reagente e a quantidade do catalisador em um determinado processo químico. Os níveis dos fatores são representados por (+) e (-) sendo o maior e o menor respectivamente (MONTGOMERY, 2001). A Tabela 3 apresenta os dados de entrada do experimento:

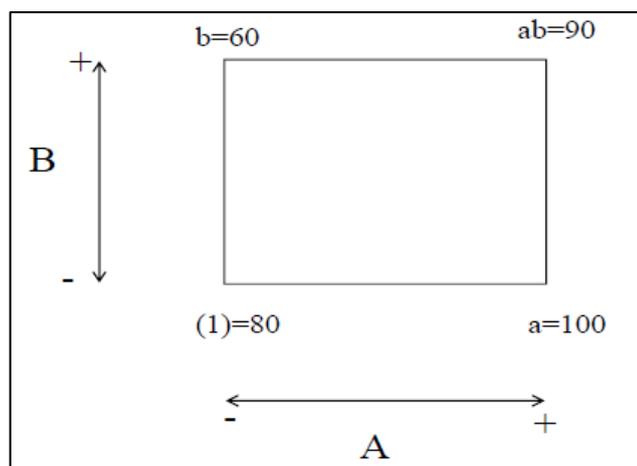
Tabela 3 - Dados de entrada do experimento

Fator		Tratamentos		Réplicas			Total
A	B			I	II	III	
-	-	Aa	Bb	28	25	27	80
+	-	AA	Bb	36	32	32	100
-	+	Aa	BB	18	19	23	60
+	+	AA	BB	31	30	29	90

Fonte: Adaptado de Montgomery, (2001).

Este experimento foi realizado para verificar o efeito da concentração (fator A) de um reagente e a quantidade de um catalisador (fator B) na produção de uma reação química (MONTGOMERY, 2001).

Para a representação gráfica o delineamento é geralmente representado em formato de um quadrado, os quatro tratamentos estão retratados na Figura 13. O (1) está representando os menores níveis Aa e Bb. O a, está relacionado ao nível maior AA e ao menor nível Bb. A letra b, corresponde ao menor tratamento Aa e ao maior tratamento BB. E por fim, ab representa o maior nível de ambos os fatores AA e BB (MONTGOMERY, 2001).

Figura 13 - Representação gráfica do fatorial 2²

Fonte: Adaptado de Montgomery, (2001).

O efeito é definido através da mudança gerada na resposta devido a alteração do nível do fator avaliado. O cálculo dos principais efeitos dos fatores EA e EB podem ser descritos pelas equações 30 e 31 (MONTGOMERY, 2001).

$$EA = \frac{1}{2n} \cdot [ab + a - b - (1)] \quad (30)$$

$$EB = \frac{1}{2n} \cdot [ab + b - a - (1)] \quad (31)$$

Onde n corresponde ao número total de réplicas produzidas no teste. O efeito da interação entre os fatores A e B é calculado pela equação 32:

$$EAB = \frac{1}{2n} \cdot [ab + (1) - a - b] \quad (32)$$

Utilizando os dados fornecidos da Tabela 3, são calculados os valores para os efeitos equacionados acima. Os efeitos calculados são: $EA = 8,33$, $EB = -5,00$ e $EAB = 1,67$. Ao analisar estes dados é possível afirmar que o efeito de A é positivo indicando que o acréscimo da concentração aumenta a produção, já o fator B possui um efeito negativo, indicando que o aumento do catalisador diminui a produção. Por fim, o efeito da interação dos fatores é considerado irrisório e não impacta a produção (MONTGOMERY, 2001).

O contraste extraído dos colchetes das equações de efeito, também conhecido como efeito total, são calculados através das equações 33, 34 e 35 (MONTGOMERY, 2001):

$$C_A = ab + a - b - (1) \quad (33)$$

$$C_B = ab + b - a - (1) \quad (34)$$

$$C_{AB} = ab + (1) - a - b \quad (35)$$

Os valores obtidos para os contrastes do exemplo analisado são: $C_A = 50$, $C_B = 30$ e $C_{AB} = 10$. Pode-se elucidar que os contrastes são ortogonais, a soma dos sinais dos coeficientes é igual a zero e a soma dos produtos dos sinais dos coeficientes é igual a zero. O cálculo para a soma dos quadrados é obtido através das equações 36, 37 e 38 (MONTGOMERY, 2001).

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{4n} \quad (36)$$

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{4n} \quad (37)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n} \quad (38)$$

Por meio das equações acima, a soma dos quadrados calculadas para o exemplo são: $SS_A = 208,33$, $SS_B = 75$ e $SS_{AB} = 8,33$. Ao calcular a soma total dos quadrados, é utilizado a equação 39 (MONTGOMERY, 2001).

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{4n} \quad (39)$$

Onde y_{ijk} é a resposta da i -ésima repetição do i -ésimo nível do fator A e o j -ésimo nível do fator B . Por fim, pode-se calcular a soma quadrada dos erros através da equação 40 (MONTGOMERY, 2001).

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (40)$$

A Tabela 4 apresenta uma análise de variâncias, também conhecida como tabela ANOVA. Ao avaliar a coluna de Valor P é possível concluir que os dois efeitos principais possuem grande relevância no experimento, já a interação não é significativa.

Tabela 4 - Tabela ANOVA fatorial 2²

Fontes de variação	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F ₀	Valor P
A	208,33	1	208,33	53,15	0,0001
B	75	1	75	19,13	0,0024
AB	8,33	1	8,33	2,13	0,1826
Erro	31,34	8	3,92	-	-
Total	323	11	-	-	-

Fonte: Adaptado de Montgomery, (2001).

2.5.3 A estimativa do erro experimental

Uma forma de mitigar a distorção estatística nos resultados é aplicando os testes em ordem aleatória. A aleatorização é um princípio experimental importante, pois impede que fatores indesejáveis corrompam os efeitos investigados. Outro fator importante no processo experimental é que as repetições refletem nas condições de variabilidade do produto estudado. A partir das repetições é possível estimar um erro experimental (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

Para um mesmo número de repetições em todos os ensaios, a estimativa do erro experimental característico ou erro padrão se , é obtido pela equação 41 (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

$$se^2 = \frac{v_1 s_1^2 + v_2 s_2^2 + \dots + v_m s_m^2}{v_1 + v_2 + \dots + v_m} \quad (41)$$

Para um caso em que o número de repetições é o mesmo para todos os experimentos realizados, v_i é a variância para o caso ensaio i , e s_i o desvio padrão amostral do ensaio i (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

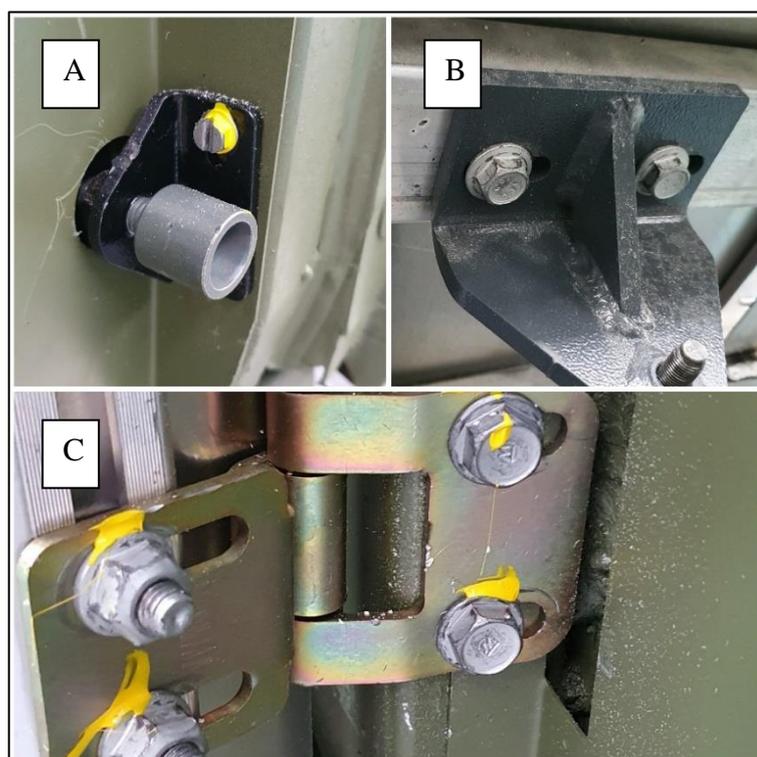
Este capítulo apresenta a situação atual do dimensionamento e aplicação de juntas parafusadas na empresa, com o propósito de explicar e justificar os motivos que fomentaram a elaboração deste trabalho.

Por fim, é apresentado um método para dimensionamento de uma junta parafusada, onde será avaliado o impacto provocado pelos diferentes tratamentos superficiais mais empregados em contra peças e fixadores na empresa.

3.1 O TRATAMENTO SUPERFICIAL E O TORQUE EM JUNTAS PARAFUSADAS

O tratamento superficial em metais é empregado com a finalidade de coibir a ação da corrosão atmosférica no ônibus. Dentre os tratamentos superficiais utilizados na empresa, a pintura a pó eletrolítica e a zincagem eletrolítica são os mais aplicados em aço carbono. Os fixadores utilizados na empresa possuem, em sua grande maioria, os tratamentos organometálico ou zincagem, devido a política de padronização. Na Figura 14, é possível perceber os tratamentos citados anteriormente, empregados em diferentes componentes parafusados.

Figura 14 - Diferentes tratamentos utilizados na indústria



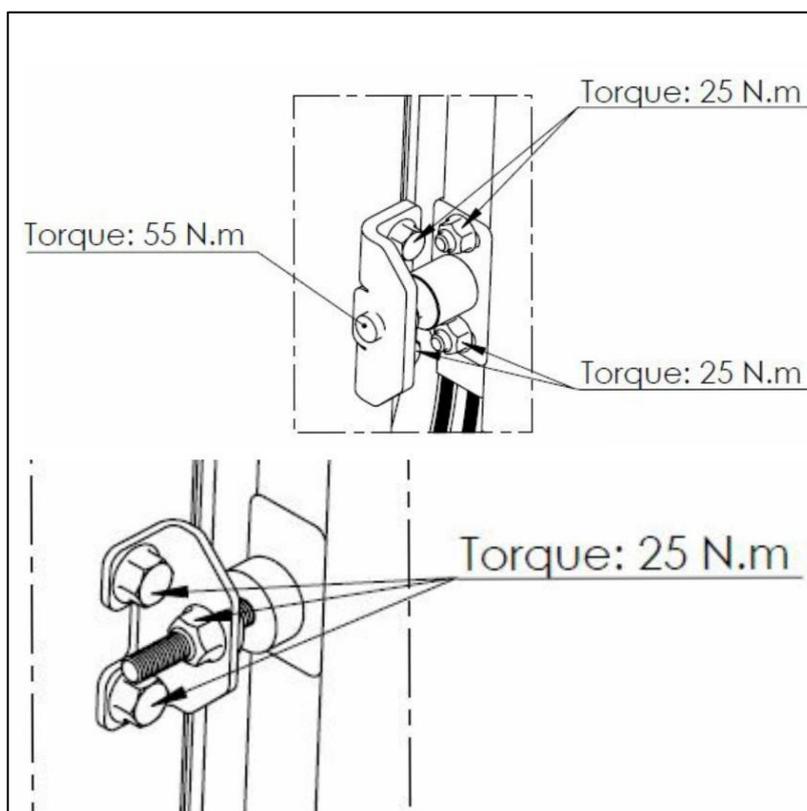
Fonte: O Autor, (2021).

Na Figura 14, podem-se observar peças com pintura a pó apresentado nos campos A e B e o tratamento superficial zincado apresentado em C. Sendo assim, é possível compreender uma grande variação em aplicação de revestimentos anticorrosivos pela empresa. A aplicação de pintura a pó ocorre geralmente em componentes que ficam parcialmente expostos e necessitam de um apelo estético, podendo ser aplicada tanto em aço quanto alumínio. A zincagem eletrolítica é aplicada em componentes para utilização externa, em portinholas de inspeção ou bagageiro, como apresentado em C.

Em componentes parafusados, o tratamento superficial influencia diretamente sobre os coeficientes de atrito μ_G e μ_K alterando a relação da força tensora por torque aplicado. No cenário atual, a empresa especifica o torque de suas uniões parafusadas com base em tabelas atribuídas a um coeficiente de atrito padrão apresentada no Anexo A, não havendo dados respectivos aos tratamentos aplicados pela empresa.

O torque aplicado para cada união parafusada é informado através de um desenho técnico denominado “detalhe de torques” apresentado na Figura 15. Neste desenho, o operador possui acesso à informação necessária de qual torque deve ser aplicado a qual junta parafusada, sendo esse detalhe exclusivo para torques, servindo apenas como um informativo técnico.

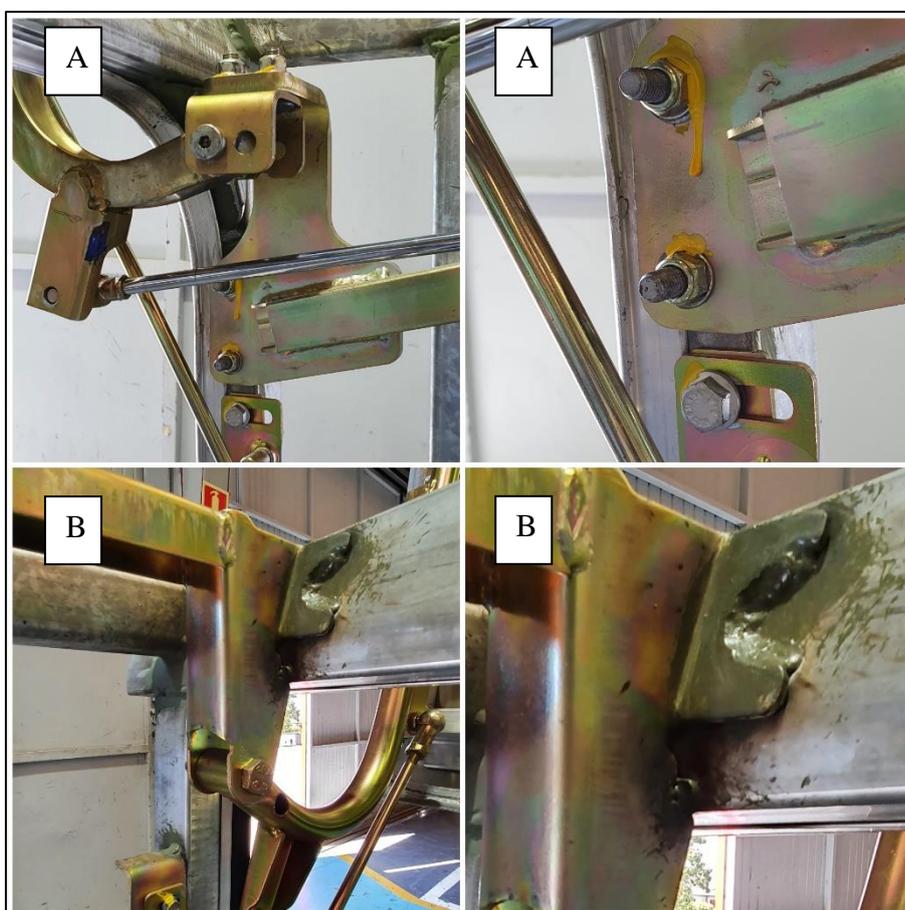
Figura 15- Desenho técnico de torques



Fonte: o Autor, (2021).

As uniões parafusadas ganham relevância no sistema de abertura da portinhola, onde a fixação do mecanismo de articulação que atualmente é soldado, passará a ser parafusado no novo projeto do ônibus rodoviário. Esta mudança de conceito ocorre devido à necessidade de reposicionar o suporte junto à coluna lateral e remover a fixação superior acoplada na longarina, devido a uma situação construtiva do ônibus, apresentado na Figura 16. As imagens destacadas por “A” nos quadrantes superiores são referentes ao novo conceito e as figuras apresentadas por “B” nos quadrantes inferiores são relacionadas ao conceito atual. Na coluna à direita, pode-se visualizar de forma ampliada os métodos fixação, sendo a parafusada em A e a soldagem do suporte em B abaixo.

Figura 16 – Conceitos do suporte de sustentação da portinhola



Fonte: O Autor, (2021).

A nova fixação parafusada utiliza um conjunto de parafuso M8x1.25 classe 8.8, com arruela lisa e porca com inserto de náilon apresentado pela Figura 16 A. Devido ao fato deste suporte sustentar todo o sistema da portinhola, é de suma importância que a união seja dimensionada de forma assertiva, a fim de atender às expectativas de garantia e vida útil do

produto. Portanto é necessário realizar o dimensionamento da junta parafusada avaliando os tratamentos aplicados em fixadores e contra peças a fim de garantir a disparidade da força tensora aplicado pelo torque.

Financeiramente, os gastos com assistência técnica somam 3,5% em falhas relacionadas ao aparafusamento de peças. Os problemas apresentados variam entre: “afrouxamento de peças e componentes”, “fixação ineficiente”, entre outros. Apesar do baixo valor percentual, o valor gasto é elevado e um estudo contribuindo para um correto dimensionamento acarretará em reduções de ocorrências em assistência técnica.

3.2 O MÉTODO DE TRABALHO

Um método de trabalho foi concebido a fim de sequenciar as etapas que serão desenvolvidas durante este estudo. Posteriormente, estes dados poderão ser utilizados como um manual descritivo para dimensionamento de juntas parafusadas utilizando demais tratamentos superficiais.

Inicialmente, os elementos da junta foram revisados, calculando as forças atuantes no mecanismo a fim de constatar a eficiência da fixação atual, que é composta por dois parafusos M8x1.25 classe 8.8 fixos na coluna, sustentando um suporte de chapa de aço revestido por zincagem. Sobre os suportes, estão duas arruelas lisas e duas porcas M8x1.25 classe 8 com insertos de náilon revestidas pelo tratamento zincado. Concluído o dimensionamento da junta parafusada, será verificado se os atuais fixadores correspondem à solicitação da união e caso necessário, novos fixadores serão dimensionados.

Após a etapa de cálculos, uniões parafusadas com novas combinações de revestimentos foram concebidas a fim de avaliar os impactos dos diferentes tratamentos superficiais na relação Força tensora x Torque aplicado através de um dispositivo DTT (Determinador de Torque x Tensão). Para este trabalho, foram empregados os tratamentos superficiais mais utilizados na empresa, sendo a zincagem e pintura a pó nas contra peças e os tratamentos organometálico e zincagem para os fixadores.

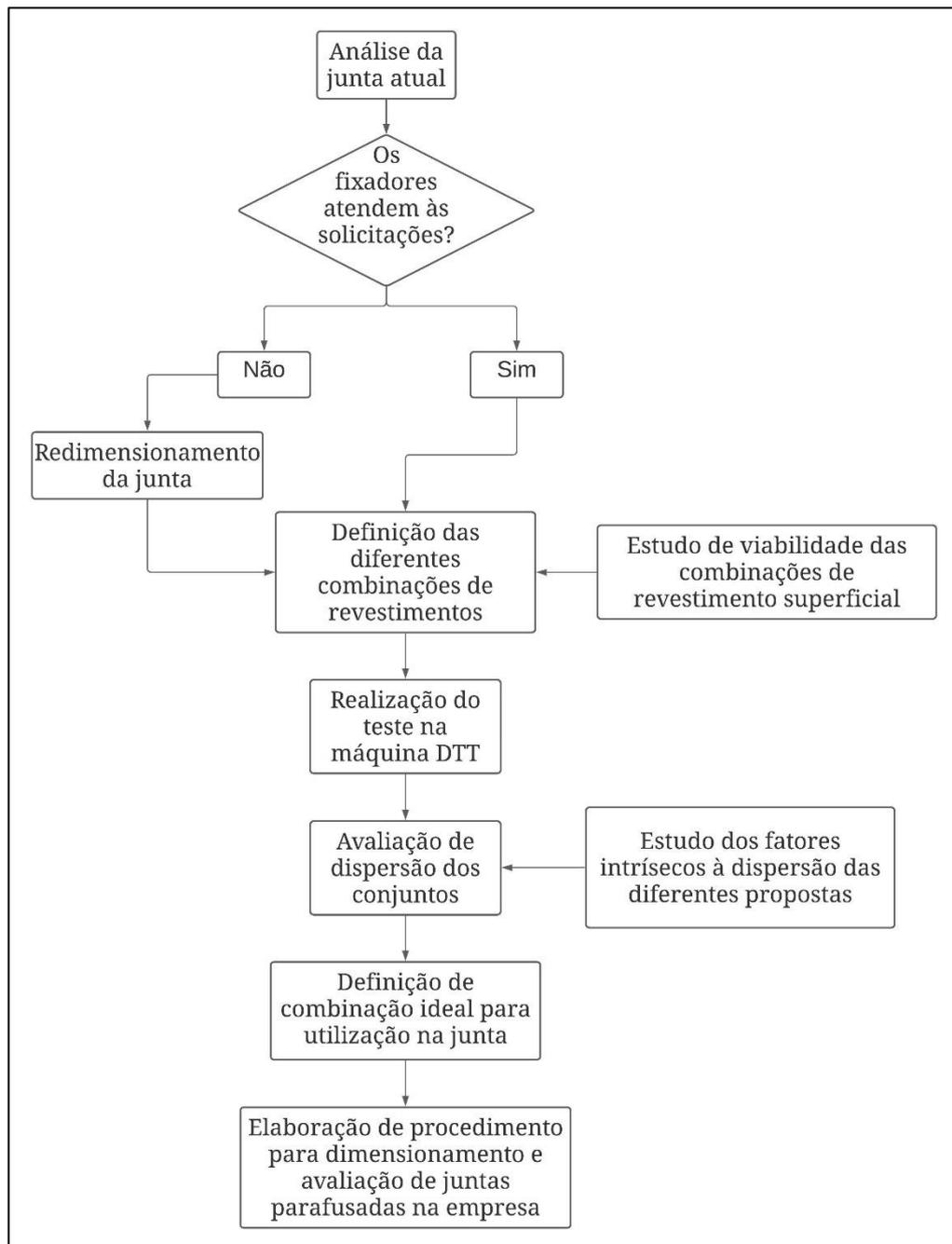
Com as combinações de tratamento definidas e avaliadas na máquina DTT, é constatado a dispersão da força tensora provocada pelos diferentes atritos μ_G e μ_K através do torque aplicado utilizando como base a norma VDI 2230.

Com a dispersão de força tensora, foi possível determinar quais tratamentos superficiais são utilizados para atender aos parâmetros de atrito necessários para suportar as solicitações da união parafusada.

Por fim, um procedimento de dimensionamento para juntas parafusadas foi adaptado da norma VDI 2230, propondo um correto dimensionamento que avalie todas as interfaces envolvidas em uma união parafusada.

A Figura 17 apresenta um fluxograma contendo as etapas descritas acima, em forma de tópicos com a metodologia de dimensionamento.

Figura 17 - Fluxograma do método de trabalho



Fonte: O Autor, (2021).

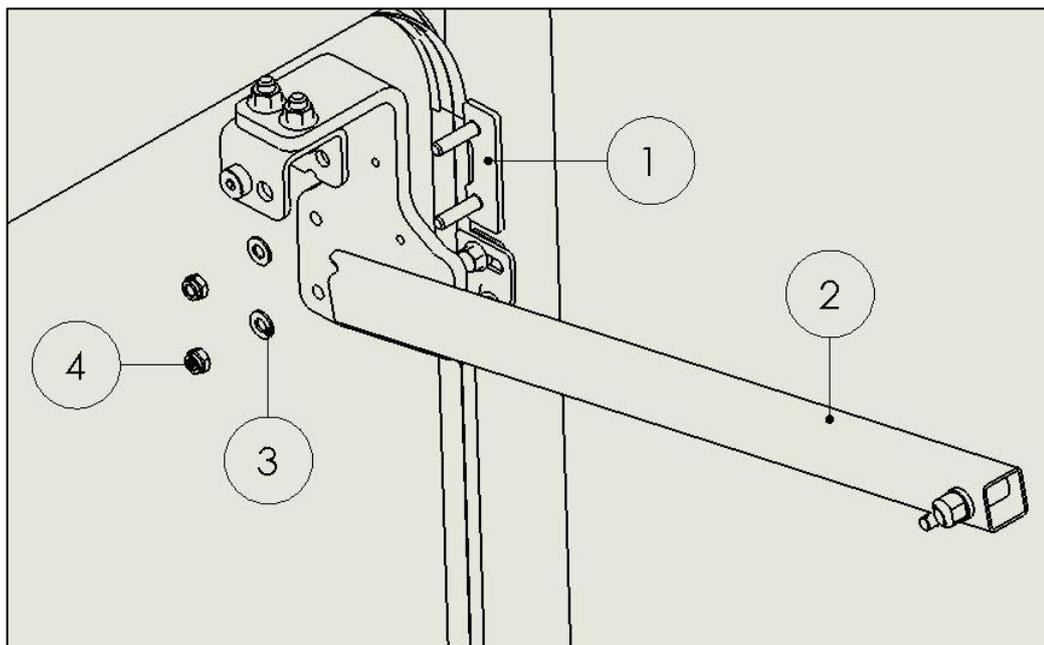
4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste capítulo são abordados os procedimentos indicados na metodologia. Inicialmente foi revisada a geometria e construção da junta atual, os cálculos que envolvem o dimensionamento da junta parafusada foram elaborados seguindo o procedimento baseado na norma VDI-2230. Por fim foram determinadas diferentes combinações de tratamentos superficiais para compor a junta e foram fabricados os corpos de prova que foram testados na máquina DTT. Com os resultados obtidos foi possível redimensionar a junta aplicando o torque correto para as condições de atrito encontradas e foi elaborado um procedimento para dimensionamento de juntas aparafusadas para aplicar na empresa.

4.1 DIMENSIONAMENTO DA JUNTA

A forma construtiva que atende aos requisitos de montagem e possui o menor custo de fabricação está representada na Figura 18, e é composta por uma chapa soldada à coluna, com os parafusos fixos de forma embutida apresentado em (1). O suporte de sustentação (2) da portinhola é acoplado nos parafusos engastados, e é assentado por arruelas lisas (3) e porcas auto travantes (4).

Figura 18 - Esquema de montagem da junta estudada



Fonte: O Autor, (2021).

4.1.1 O procedimento para dimensionamento de junta parafusada

Para realização do cálculo de dimensionamento da junta, o método de cálculo da VDI 2230 (2003), foi adaptado às condições de projeto avaliadas. Para este estudo, a bitola e classe de resistência do parafuso foi definida previamente. Inicialmente é necessário obter os valores tabelados intrínsecos à construção do parafuso, como o diâmetro nominal do parafuso d , o diâmetro efetivo de rosca d_2 , entre outros. A partir dos dados iniciais, é possível determinar a relação do comprimento de carregamento com a bitola do parafuso l_k/d .

Com os dados obtidos, é necessário calcular a pressão que a base da cabeça ou porca do fixador gera sobre a junta durante o aperto $P_{MÁX}$. Após o cálculo é necessário verificar se $P_{MÁX}$ não excede a pressão limite superficial da junta P_G , onde pode ser considerado o limite de escoamento do material da junta.

Com base na aplicação da junta, e em seu processo de montagem pode-se determinar o fator de aperto α_A , que pode ser encontrado na Tabela 8 da VDI 2230 (2003), apresentada no Anexo B.

A próxima etapa consiste em calcular a força de retenção residual mínima F_{Kerf} , onde tem o propósito de a menor força necessária para garantir que não ocorra o desprendimento unilateral das chapas que compõe a junta.

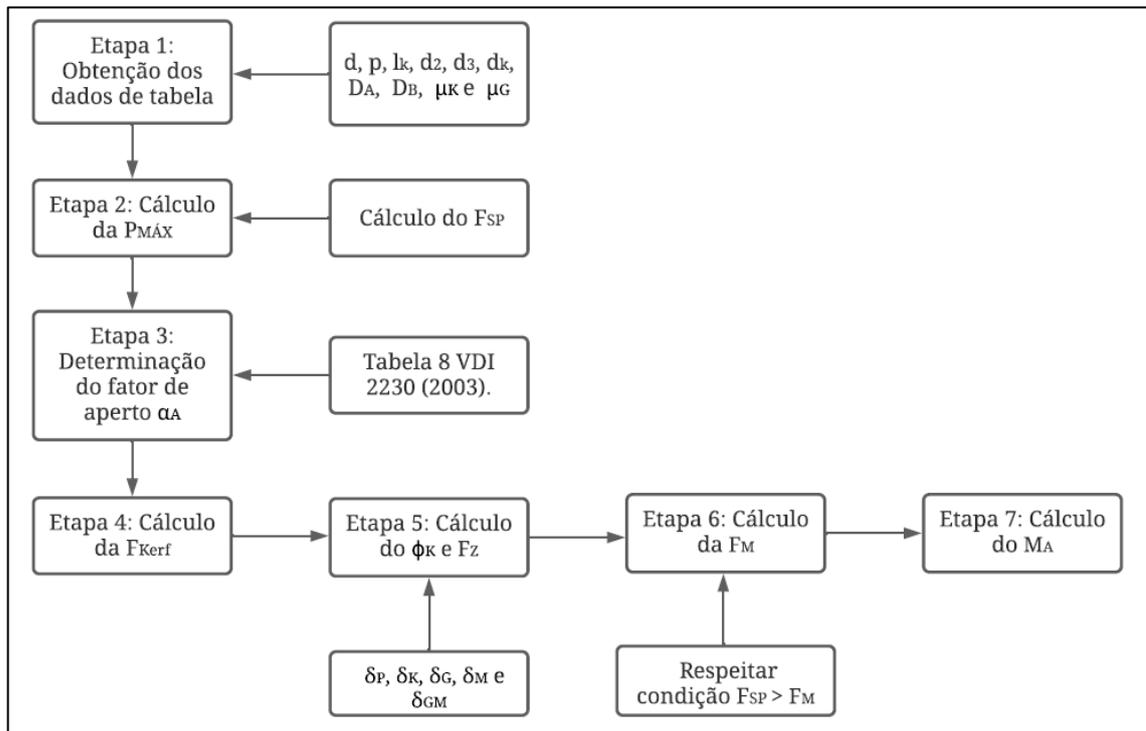
A partir das resiliências calculadas, se obtêm o fator de forças (concêntricas à junta) ϕ_K . Para este estudo, foi considerado um carregamento para juntas concêntricas por motivos de simplificação. Também a partir das resiliências, calcula-se a perda de pré-carga por relaxamento da junta F_Z .

Com os dados anteriores conhecidos, é determinado a força tensora obtida na junta parafusada. É necessário garantir que a condição $F_{SP} > F_M$ seja respeitada, caso não atenda a classe de resistência e/ou a bitola do parafuso deverão ser alteradas.

A partir da força tensora, é calculado o torque de montagem necessário para a junta, para o dimensionamento do torque é levado em conta os coeficiente de atrito presentes na junta e demais informações calculadas.

Para um melhor entendimento do método de cálculo aplicado, a Figura 19 apresenta um fluxograma elencando as principais etapas de cálculo realizadas. As demais etapas presentes na VDI 2230 (2003) foram desconsideradas para este estudo pois o objetivo é atendido ao obter o torque avaliado em função dos diferentes coeficientes de atrito.

Figura 19 - Fluxograma com Etapas do dimensionamento da junta parafusada



Fonte: O Autor, (2021).

4.1.2 Dimensionamento com coeficientes de atrito μ_G e μ_K tabelados

Seguindo o método de cálculo apresentado na VDI 2230 (2003), foram seguidas as etapas de dimensionamento que se adequem à junta estudada. O primeiro cálculo leva em consideração os atritos tabelados atualmente utilizados na empresa com valores dos coeficientes de atrito, $\mu_G = 0,12$ e $\mu_K = 0,12$.

Inicialmente foi determinada a pressão superficial sob a porca $P_{MÁX}$, para a situação atual e obteve-se o valor de $P_{MÁX} = 165,04 \text{ N/mm}^2$ sendo inferior a resistência do material da junta que é de 280 N/mm^2 , portanto é garantido que não há deformação plástica nas chapas que compõem a junta. A segunda etapa consiste em determinar o fator de aperto por meio da tabela 3 do anexo B, que leva em avaliação as condições de montagem da união, para este estudo, foi considerado $\alpha_A = 1,7$.

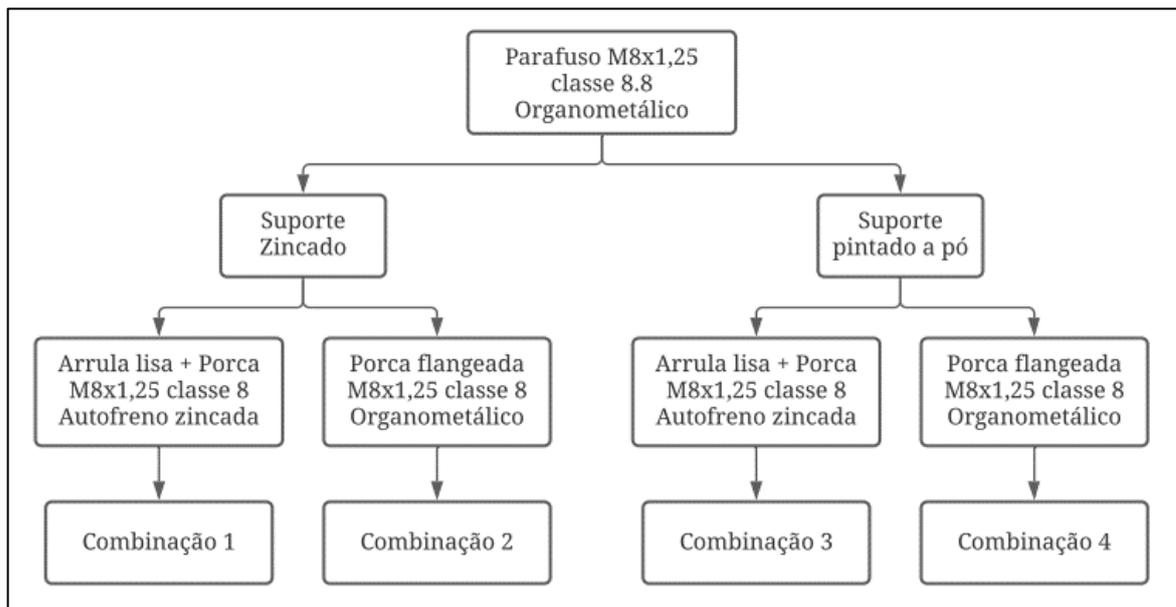
Na terceira etapa é determinada a força tensora residual mínima $F_{Kerf} = 1519 \text{ N}$, onde são atribuídas características específicas da junta estudada. Na quarta etapa, são calculadas as resiliências presentes na junta parafusada, posteriormente é definido o fator de forças ϕ_K , onde obteve-se um valor de $\phi_K = 0,1175$.

A partir dos carregamentos extraídos de análises numéricas, foi possível determinar a força tensora $F_M = 16649$ N e a força de fechamento das placas $F_{SP} = 19367$ N. Percebe-se que a condição $F_{SP} > F_M$ foi respeitada, garantindo que os fixadores utilizados atendem às necessidades. Por fim, é calculado o torque de aperto necessário para aplicar a força tensora, o torque de aperto para a junta é $M_A = 24,86$ N.m, os detalhes do cálculo estão apresentados na tabela do Apêndice A. Portanto, o torque aplicado na operação de $M_A = 25,00$ N.m está de acordo com os parâmetros estimados para a junta.

4.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram realizados na metalúrgica Hassmann com o intuito de avaliar o efeito causado nos coeficientes de atrito pelos tratamentos comumente utilizados na Marcopolo S/A. Os tratamentos de zincagem eletrolítica e pintura a pó foram utilizados nas chapas que simulam o suporte do mecanismo da portinhola. O parafuso é o mesmo para todas as combinações devido a restrições de projeto. Os fixadores terão duas variações, sendo uma porca sextavada flangeada M8x1,25 classe 8 com tratamento organometálico e a segunda fixação é composta por uma arruela lisa e uma porca sextavada M8x1,25 classe 8 com travamento por inserto de náilon e tratada por zincagem. A Figura 20 apresenta um fluxograma com as possíveis combinações.

Figura 20 - Fluxograma com as combinações testadas

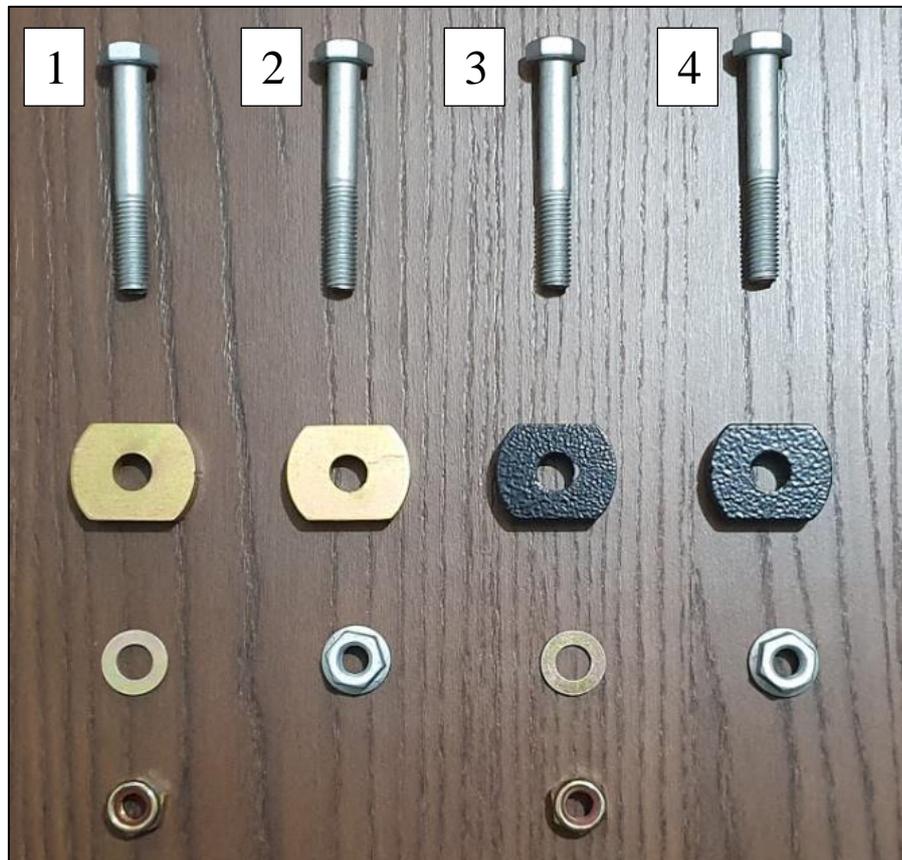


Fonte: O Autor, (2021).

Para realização dos testes no DTT , foram confeccionados 20 conjuntos de corpos de prova. Os corpos de prova são compostos pelas combinações apresentadas na Figura 21 e indicados por suas respectivas combinações. A espessura (7,94 mm) e a geometria do suporte foram concebidas para que a análise respeite as condições de projeto na relação l_k/d e D_B .

As peças foram fabricadas pelo processo de corte laser, simulando a fabricação dos suportes atuais. Os fixadores foram extraídos aleatoriamente de um lote padrão provido pelo fornecedor majoritário de fixadores na Marcopolo S/A, com o intuito de garantir uma total aleatoriedade para o experimento.

Figura 21 - Corpos de prova fabricados para o experimento



Fonte: O autor, (2021).

Por haver dois fatores que variam, o planejamento fatorial 2^2 foi escolhido para explicar este experimento. Os dois fatores de entrada para o sistema são: as porcas utilizadas para fixação e o tratamento superficial da chapa de assentamento, apresentados na Tabela 5. As respostas de saída buscadas são os coeficientes de atrito na rosca e sobre a base da porca, μ_G e μ_K respectivamente.

Tabela 5 - Disposição binária do planejamento fatorial

Tipo da Porca	Tipo do tratamento
x1	x2
Sextavada flangeada Geomet [+1]	Pintura a pó [+1]
Sextavada com arruela ZA [-1]	Zincado amarelo [-1]

Fonte: O autor, (2021).

Dentre os cinco testes realizados, os resultados extremos foram removidos da análise, restando somente triplicatas para cada combinação. Os limites superiores e inferiores encontrados são removidos devido à necessidade de mitigar as falhas que podem ocorrer por questões construtivas da máquina ou devido a possibilidade de falha do fixador. O Apêndice D apresenta as tabelas de cálculo para o planejamento fatorial 2^2 referente às respostas dos coeficientes de atrito μ_K e μ_G com o objetivo de avaliar o impacto destes fatores sobre o dimensionamento do torque.

Através da análise de variância da resposta μ_G foi possível identificar que apenas o fator x1 (tipo da porca) é relevante para a flutuação dos valores obtidos, esta análise é baseada no fato de que a soma dos quadrados do fator x1 se sobressai a soma dos quadrados do erro, os demais fatores foram insignificantes perante ao erro. Esta análise está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Tabela ANOVA para coeficiente μ_G

Tabela ANOVA					
Termo	GDL	SQ	MQ	F	P-valor
x1	1	0,00801	0,00801	16,5690	0,00358
x2	1	0,00041	0,00041	0,8448	0,38490
x1x2	1	0,00001	0,00001	0,0172	0,89877
Erro	8	0,00387	0,00048	-	-
Total	11	0,01229	-	-	-

Fonte: O autor, (2021).

O valor de regressão $R^2 = 0,6854$ evidencia que o modelo matemático da análise explica cerca de 68,54% do experimento realizado. Ao analisar o valor de $R^2_{ajust} = 0,5675$ é possível compreender que as variáveis independentes possuem uma correlação entre si, pois há um decréscimo considerável entre os valores de regressão real e ajustado, os dados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados complementares para análise μ_G

Dados complementares			
S	R ²	R ² (ajust.)	F _{tab}
0,0220	0,6854	0,5675	5,32

Fonte: O autor, (2021).

Na análise de variância do coeficiente de atrito μ_K , a Tabela 8 ANOVA evidenciou que todos os fatores são relevantes para as respostas obtidas no teste. Foi possível identificar a influência dos fatores uma vez que, todos os valores do teste F superaram o valor tabelado, F_{tab} .

Tabela 8 - Tabela ANOVA para coeficiente μ_K

Tabela ANOVA					
Termo	GDL	SQ	MQ	F	P-valor
x1	1	0,02901	0,02901	22,4581	0,00147
x2	1	0,01268	0,01268	9,8129	0,01396
x1x2	1	0,02168	0,02168	16,7806	0,00345
Erro	8	0,01033	0,00129	-	-
Total	11	0,07369	-	-	-

Fonte: O autor, (2021).

Por fim na Tabela 9 estão apresentados os dados extras da análise de variância. O valor de regressão $R^2 = 0,8598$ mostra que o modelo matemático contempla cerca de 86% do experimento analisado, o valor de regressão ajustado $R^2_{ajust} = 0,8076$. O valor de R^2_{ajust} demonstra uma queda em cerca de 5% em relação ao R^2 apontando não haver uma conexão entre as variáveis independentes.

Tabela 9 - Dados complementares para análise μ_K

Dados complementares			
S	R ²	R ² (ajust.)	F _{tab}
0,0359	0,8598	0,8072	5,32

Fonte: O autor, (2021).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos testes realizados, foram obtidas as diferentes médias de coeficiente de atrito para cada combinação. Ao analisar as respostas obtidas para os arranjos que utilizam a junção de porca sextavada com arruela, nota-se que não houve flutuação significativa nos valores de coeficientes de atritos médios obtidos e apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores médios obtidos no DTT

Combinação	Média μ_G	Média μ_K	FM média [kN]
1	0,29	0,19	10,43
2	0,23	0,20	10,1
3	0,30	0,17	10,6
4	0,25	0,35	7,17

Fonte: O autor, (2021).

Com bases na análise fatorial, o valor do erro experimental, ou desvio padrão obtido para o coeficiente de atrito μ_K foi de $s=0,0359$ para um nível de 95% de confiança. Já o desvio padrão para o coeficiente de atrito μ_G apresentou o valor $s=0,022$.

Ao comparar o coeficiente de atrito teórico utilizado inicialmente $\mu_K=\mu_G=0,12$, foram encontradas flutuações nos valores de resposta entre 25% e 300% maiores, como por exemplo o ensaio 4 que apresentou um coeficiente $\mu_K=0,36$ sendo mostrado no Apêndice D.

A Figura 22 exibe um teste realizado corresponde à combinação 3:

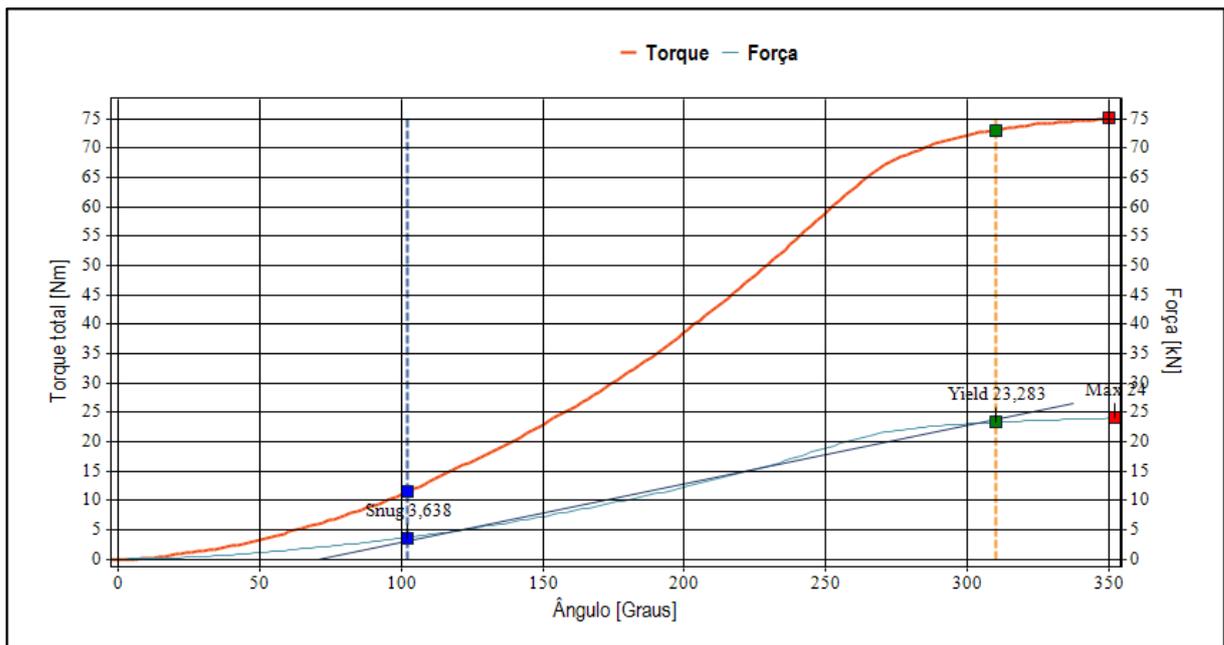
Figura 22 - Teste realizado na máquina DTT



Fonte: O autor, (2021).

A Figura 23 corresponde ao quinto teste realizado para a quarta combinação, que está apresentada na tabela do Apêndice C. Ao analisar o gráfico, percebe-se um comportamento padrão para a combinação com porca flangeada, onde as curvas de crescimento do torque destacadas em vermelho e da força tensora em azul apresentam um crescimento linear proporcional. A linha vertical amarela apresenta o limite de escoamento do parafuso, onde a força tensora obtida neste ponto foi de 23,28 kN.

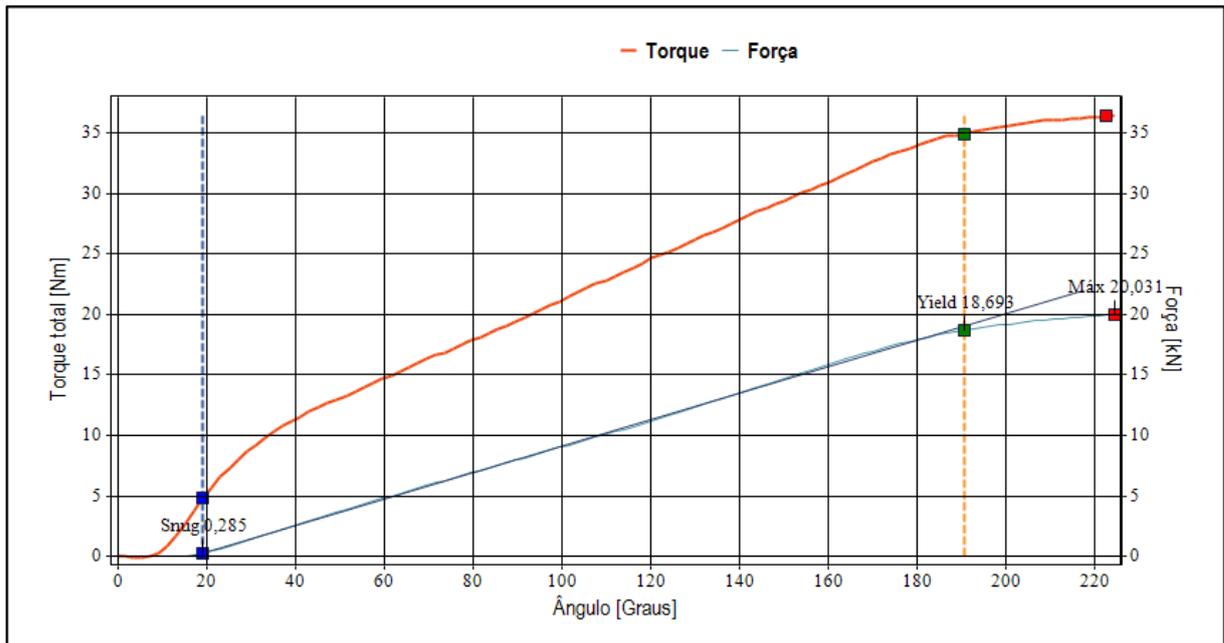
Figura 23 - Gráfico do Teste DTT referente à quarta combinação



Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

O terceiro ensaio refere-se à terceira combinação e está apresentado na Figura 24. A linha vermelha é referente ao torque aplicado, a linha azul mostra o comportamento da força tensora. O gráfico evidencia um comportamento inicial diferente do apresentado na Figura 23, devido ao fato desta combinação ser composta por uma porca com inserto de náilon que provocou um crescimento abrupto no valor do torque quando a rosca começa a perfilar o inserto polimérico. Após o início do teste o crescimento estabiliza e apresenta um comportamento linear durante o aperto, a força tensora obtida na linha de escoamento do aparafuso apresenta um valor de 18,69 kN.

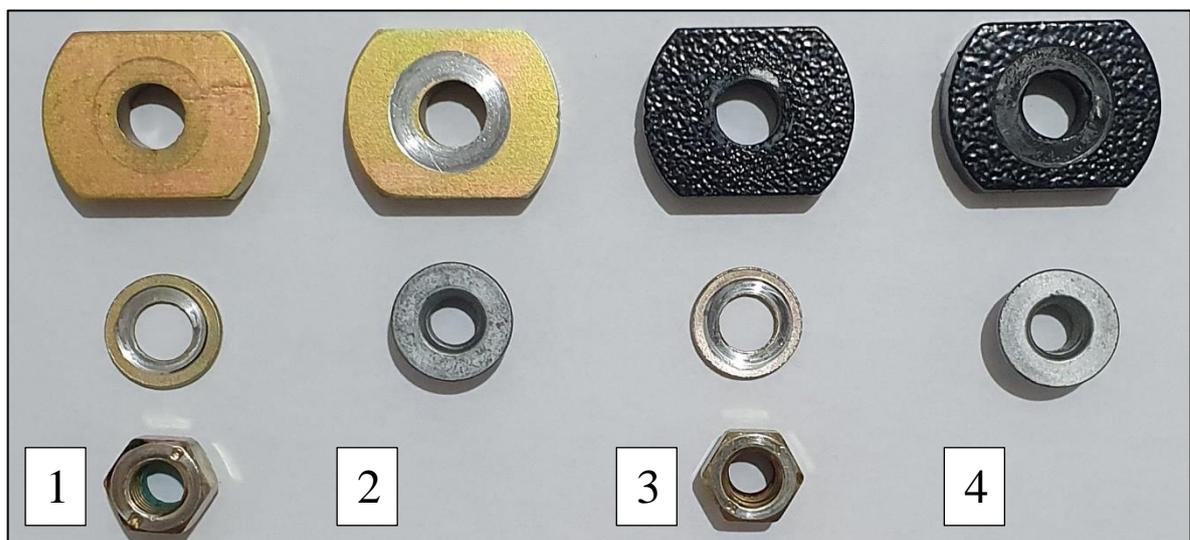
Figura 24 - Gráfico do Teste DTT referente à terceira combinação



Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

A causa da baixa flutuação nos valores de atrito μ_K das combinações 1 e 3 apesar da alteração do calço pode ser clarificada pela utilização da arruela na junta. A arruela presente na composição da junta atuou de forma fixa em relação à chapa de apoio, ou seja, durante o aperto, a base da porca deslizou sobre a face da arruela, mantendo o coeficiente μ_K em condições de contorno iguais para as combinações 1 e 3, esta constatação pode ser evidenciada na Figura 25.

Figura 25 - Amostras após a realização dos testes



Fonte: O autor, (2021).

O coeficiente de atrito μ_K obtido nos testes das combinações 2 e 4 apresentam um comportamento característico. Há uma variação de 57,14% do coeficiente de atrito medido sobre o suporte pintado a pó em relação ao calço zincado, sendo que os maiores valores para μ_K foram encontrados na combinação 4.

Ao analisar as respostas do coeficiente de atrito na rosca μ_G , percebe-se que a variação ocorre somente por meio do fator x1 (tipo da porca). Os menores valores são encontrados nas combinações que possuem o fixador tratado por organometálico.

A força tensora obtida nos testes está inversamente relacionada ao coeficiente de atrito na base da porca, os menores coeficientes de atrito resultaram em forças tensoras maiores. O motivo deste comportamento se dá pelo fato de que quanto maior o coeficiente de atrito na base da porca, maior será o torque necessário para vencer a resistência do contato, infligindo um menor torque na rosca dos fixadores.

4.3.1 Cálculo da junta utilizando os coeficientes de atrito obtidos experimentalmente para a combinação 1

Com a realização dos testes na máquina de DTT novos cálculos foram realizados a fim de avaliar a dispersão na força tensora calculada inicialmente para a força tensora obtida por meio das diferentes combinações empregadas.

A partir dos coeficientes de atritos obtidos no teste apresentados no Apêndice C, foi determinada a combinação 1 para recalculer o torque de aplicação para a junta estudada. Os coeficientes de atrito médios aplicados para o cálculo foram $\mu_G = 0,287$ e $\mu_K = 0,19$.

Os valores de pressão superficial, fator de aperto, força residual mínima e resiliências não foram afetados pela mudança no coeficiente de atrito, portando as condições calculadas inicialmente permanecem constantes.

Do mesmo modo, os valores da força tensora e da força de fechamento das placas não sofreram alteração devido ao novo coeficiente de atrito, portanto, as mesmas condições foram mantidas. Em razão dos novos valores de atrito obtidos no teste foi recalculado o torque de aperto necessário.

Com o objetivo de atingir a mesma força de montagem $F_M = 16649\text{N}$, o novo torque de aperto para a junta é $M_A = 44,16 \text{ N.m}$, os detalhes do cálculo estão apresentados na tabela 2 do Apêndice A. Desta forma, o torque aplicado na operação de $M_A = 25 \text{ N.m}$ é cerca de 56,3% inferior ao necessário para a aplicação nas condições atuais de fabricação e montagem.

Considerando a aplicação do torque por torquímetro manual, uma faixa de torque de $M_A = 47$ N.m com tolerância de ± 3 N.m é adequada para se obter valores de força tensora superiores à F_M e inferiores ao limite plástico da junta determinado pela F_{SP} .

4.3.2 Considerações e cálculos para as demais combinações avaliadas

Ao analisar as demais combinações, percebe-se que os valores de torque obtidos apresentam variações conforme a mudança do coeficiente de atrito. As combinações que utilizaram os calços pintados a pó apresentaram os maiores valores nominais de torque aplicado. Estes cálculos foram realizados considerando que a mesma força tensora deve ser aplicada para todas as combinações, variando apenas os coeficientes de atrito e o torque aplicado, portanto, a força tensora utilizada foi $F_M = 16649$ N.

A segunda combinação obteve um valor de torque de $M_A = 41,31$ N.m este valor é cerca de 6,5% inferior ao obtido pela combinação 1, o torque encontrado na combinação 2 indica que há uma baixa resistência nos atrito da base da porca $\mu_K = 0,20$ e no atrito de rosca $\mu_G = 0,23$.

A terceira combinação apresenta um valor de torque similar as demais condições, apesar de utilizar o calço pintado a pó a utilização da arruela contribuiu para que os coeficientes de atrito na base fossem menores, sendo $\mu_K = 0,17$ e $\mu_G = 0,30$. O torque calculado nesta condição foi de $M_A = 42,86$ N.m.

Por fim, a quarta combinação apresentou os maiores valores do coeficiente de atrito μ_K devido ao fato da porca rotacionar sobre o calço pintado a pó sem o uso de uma arruela. O torque aplicado nesta condição foi de $M_A = 59,91$ N.m com valores para coeficiente atrito $\mu_K = 0,35$ e $\mu_G = 0,25$. A combinação 4 apresentou um valor 45% superior em relação a combinação 2, esta flutuação está relacionada apenas aos diferentes coeficiente de atrito obtidos no teste.

A partir deste estudo, é possível utilizar os dados obtidos nos ensaios para dimensionar inúmeras juntas parafusadas aplicadas no ônibus aplicando o procedimento descrito neste trabalho. Ao dimensionar uma nova união parafusada, é necessário ter atenção para os tratamentos superficiais sejam os mesmos avaliados neste trabalho, caso contrário um novo teste em máquina DTT deverá ser realizado, utilizando as combinações requeridas.

Os tratamentos superficiais de zincagem e pintura a pó são amplamente utilizados em sistemas dinâmicos do ônibus, como: dobradiças, portas, portinholas de inspeção entre outros. Nestas situações em que as condições de contorno se assemelham às estudadas, pode-se empregar os dados de coeficiente de atrito obtidos nos ensaios deste trabalho.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho finda-se ao atingir o objetivo principal de avaliar o efeito dos tratamentos superficiais utilizados, expondo a necessidade de compreender as influências intrínsecas no dimensionamento correto de uma união parafusada.

Ao examinar os valores obtidos no ensaio de DTT, percebe-se que atualmente a força tensora gerada na junta $F_{Mi} = 10,43$ kN é insuficiente, sendo 62,65% inferior ao necessário de $F_{Mf} = 16,648$ kN. Esta discrepância ocorreu devido aos coeficientes de atrito teóricos serem menores em relação aos coeficientes de atrito obtidos no teste.

O tratamento superficial do suporte que compõe a junta aparafusada não apresentou relevância sobre o coeficiente de atrito μ_K nas combinações 1 e 3 que utilizaram uma arruela juntamente com a porca, devido ao fato da porca ter rotacionado sobre a arruela que permaneceu inerte ao longo do aperto, portanto, o coeficiente de atrito nos dois experimentos teve as mesmas condições de contorno.

As combinações 2 e 4, utilizaram uma porca flangeada sem a presença da arruela apresentando uma variação de 57,14% no coeficiente de atrito μ_K devido a alteração do tratamento superficial do suporte. Portanto, entende-se que em juntas parafusadas onde não há a utilização de uma arruela, o tratamento superficial é um fator determinante no correto dimensionamento do torque aplicado na união.

O tipo de porca retratou influências menores em relação ao tratamento superficial do suporte. Apresentando uma mudança em cerca de 22% ao alterar fator “tipo de porca”. Portanto, pode-se afirmar que as variações no coeficiente de atrito μ_G causam uma alteração significativa na força tensora obtida.

Em suma, reitera-se que ambos os fatores estudados são relevantes para o cálculo e devem ser considerados no dimensionamento de uniões parafusadas. A adaptação da metodologia proposta pela VDI-2230 mostrou-se assertiva para futuros dimensionamentos parafusados na Marcopolo S.A.

Levando em consideração o trabalho realizado e os resultados encontrados, sugere-se a realização de trabalhos futuros aplicando o procedimento de cálculo para o dimensionamento da junta parafusada utilizando diferentes tratamentos superficiais dos estudados neste trabalho. Outro tema que poderá ser abordado é variação do coeficiente de atrito da junta no reaperto dos fixadores. Para uma melhor avaliação dos resultados obtidos na máquina DTT pode-se ampliar a quantidade de amostras com o propósito de gerar curvas de tendência para as respostas analisadas.

REFERÊNCIAS

APOLINÁRIO, Paulo. Viagens em ônibus interestaduais podem ficar mais baratas, afirma Governo. *In: Revide*. Ribeirão Preto, 17 ago. 2017. Disponível em:

<https://www.revide.com.br/noticias/transporte/empresas-de-onibus-interestaduais-terao-maior-flexibilidade-para-oferecer-descontos-08/>. Acesso em: 21 ago. 2020.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**: Projeto de Engenharia Mecânica. 8ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 1084 p. v. Único.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**: Processos de Fabricação e Tratamento. 2ª. ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda., 1986. 315 p. v. 2.

CIOTO, Rubens. **Comportamento das Juntas Rigidamente Fixadas por Parafusos**: Cálculo e Dimensionamento. 1ª. ed. Sorocaba, SP: Metalac, 2001.

CNT, **Pesquisa Rodoviária – Relatório Gerencial**. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2019c. Disponível em: < <https://www.cnt.org.br> >. Acesso em: 21 ago. 2020.

CROCCOLO, Dario *et al.* Tribological properties of bolts depending on different screw coatings and lubrications: an experimental study. **Tribology International**, [s. l.], ano 2016, 11 nov. 2016.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (Alemanha). DIN 946-1991-1. **Bestimmung der Reibungszahlen von Schrauben und Muttern unter festgelegten Bedingungen**, Alemanha, v. 1, p. 1-4, Outubro 1991.

FERREIRA, Jeferson. **Fatores atuantes no aperto de fixadores roscados de aço com tratamentos superficiais que influem no surgimento do fenômeno stick-slip**. Orientador: Prof. Dr. Sergio Delijaicov. 2014. 138 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em engenharia mecânica) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, 2014. Disponível em: <http://sofia.fei.edu.br:8080/pergamumweb/vinculos/00000b/00000b14.pdf>. Acesso em: 5 set. 2020.

GARCIA, Roberto. A que se propõem os Elementos de Fixação?. **Revista do Parafuso**, São Paulo, v. Único, ed. 41, 19 set. 2013. Disponível em: <http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=653>. Acesso em: 16 jan. 2021.

GARCIA, Roberto. O parafuso no nosso cotidiano. Quanta Ciência e quanto menosprezo. Casos relatados de Recalls. **Jornal do Parafuso**, São Paulo, SP, v. 1, n. 75ª, 30 maio 2019. Disponível em: <http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=1172>. Acesso em: 28 set. 2020.

INDUFIX (Cambuci, SP). **Guia de Acabamentos Superficiais**: Tratamento da superfície do metal. 1ª. ed. Cambuci, SP: [s. n.], 2016. 31 p. v. Único. Disponível em: <https://www.indufix.com.br/catalogo-de-parafusos/guia-de-acabamentos-superficiais/>. Acesso em: 10 set. 2020.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION **ISO 898-1 Mechanical Properties of Fasteners – Part1: Bolts, Screws and Studs**. – Genève – 2009.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION **ISO 898-2 Mechanical Properties of Fasteners – Part2: Nuts**. – Genève – 2012.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION **ISO 965-1 General Purpose Metric Screws Threads: Tolerances**. – Genève – 1998.

KOUNOUDJI, Komla Apéléké, MOLLON Guilhem, RENOUF Mathieu, BERTHIER Yves. Tribological Analysis of Bolted Joints Submitted to Vibrations. **Tribology Online**, Tóquio, v. 11, n. 2, p. 255-263, 30 abr. 2016.

MACROSUL BORRACHAS E PARAFUSOS LTDA. **Manual Técnico: elementos de fixação** / Macrosul Borrachas e Parafusos – Caxias do Sul, RS: Macrosul, 2011. 132p.: il.

MARCOPOLO (Caxias do Sul, RS). **A Marcopolo: Nossa História**. [S. l.], [2020]. Disponível em: <https://www.marcopolo.com.br/marcopolo/a-marcopolo/nossa-historia>. Acesso em: 29 ago. 2020.

METALÚRGICA HASSMANN. 27/04/2021. **Relatório de coeficiente de atrito**, Imigrante, RS, 27 abr. 2021.

MOTT, Robert L. **Elementos de Máquinas: Em projetos mecânicos**. 5ª. ed. São Paulo: Pearson, 2015. 897 p. v. Único.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. 5ª. ed. Nova Iorque, EUA: John Wiley & Sons, 2001. 287 p. v. Único. ISBN 0-471-31649-0.

MUNIZ, José Maria; SINATORA, Amilton. Fenômenos tribológicos intrínsecos ao travamento de juntas de engenharia aparafusadas. **Congresso SAE BRASIL**, São Paulo, ano 2007, p. 1-17. Disponível em: <http://www.pme.poli.usp.br/pme/05pesq/cont/pdf/810.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2020.

NASCIMENTO JR., Hermano. **Estudo da relação torque x força tensora e do coeficiente de atrito em parafusos revestidos isentos de cromo hexavalente**. Orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales. 2003. 212 f. Dissertação de Mestrado (Mestre em engenharia mecânica) - Pontífica Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003. Disponível em: http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngMecanica_NascimentoJuniorH_1.pdf. Acesso em: 16 set. 2020.

NETO, Benício de Barros; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2ª. ed. Campinas, SP: Unicamp, 2001. 401 p. v. Único. ISBN 85-268-0544-4.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p. v. Único.

PIMENTA, Egnalda Pereira da Silva; SANTOS, Sandra Goulart. Resistência à corrosão de aços revestidos com zinco submetidos ao teste em câmara de névoa salina. **INTERCORR 2016**, Búzios/RJ, ano 2016, p. 1-14, 20 maio 2016. Disponível em: https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2016/INTERCORR2016_074.pdf. Acesso em: 4 out. 2020.

PINTO, Denis William Cardoso. **Evolução e tecnologia da tinta em pó**. Orientador: Prof.ª. MSc. Maria de Lourdes Rezende. 2012. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso superior em Tecnologia de Polímeros) - Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2012.

SCARABOTTO, M.; SCIENZA, L. C. Efeito da variação das condições de cura em um sistema de pintura e-coat (epóxi) e pintura a pó (poliéster) aplicado em aço carbono. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Cuiabá, MT, Brasil, n. 21º, p. 6926-6933, 13 nov. 2014. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/404-032.pdf>. Acesso em: 3 out. 2020.

SILVA, Silvio Domingos da. **Pintura industrial em pó: DT 13 (Desenvolvimento tecnológico Nº 13)**. 3. ed. Guaramirim, SC: WEG Indústrias S.A. - Tintas, 2009. 91 p.

SOUZA, Josemara de; TOAZZA, Sinara. **Tratamento superficial de materiais:** Especificação de Engenharia. EME QUI015/06. ed. Caxias do Sul: Marcopolo S.A, 2006. 7 p. v. Único.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE **VDI 2230 Handbook construction for bolted joints.** – Dusseldorf – 2003.

APÊNDICE A – TABELAS DE CÁLCULOS PARA APLICAÇÃO DO TORQUE

A tabela abaixo contempla todos os dados obtidos e calculados para a união parafusada na condição atual de projeto, com a utilização de coeficientes de atrito tabelados.

Cálculos realizados para um parafuso M8x1,25 - Classe 8.8			
Utilizado coeficiente de atrito tabelado			
Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro nominal do parafuso	d	8	mm
Passo de Rosca	p	1,25	mm
Comprimento de carregamento	l_k	7,94	mm
Diâmetro efetivo da rosca	d_2	7,188	mm
Diâmetro interno da rosca	d_3	6,466	mm
Diâmetro da base da porca ou arruela	d_k	17	mm
Diâmetro do cone frusta	D_A	24,94	mm
Diâmetro do furo	D_B	8,5	mm
Coeficiente de atrito na rosca	μ_G	0,12	-
Coeficiente de atrito na cabeça do parafuso	μ_K	0,12	-
Fator de aperto	α_A	1,7	-
Relação do comprimento carregado pelo diâmetro	l_k/d	0,9925	-
Área de apoio da cabeça do parafuso ou da porca	A_P	170,24	mm ²
Pressão superficial sobre a cabeça ou porca	$P_{m\acute{a}x}$	126,41	N/mm²
Força de fechamento das placas	F_{SP}	19367	N
Tensão de tração	σ_M	529,015	MPa
Área de secção transversal resistente do parafuso	A_S	36,61	mm ²
Área de secção transversal	A_N	50,27	mm ²
Grau de exploração do limite de escoamento durante o parafusamento	v	0,9	-
Deformação plástica devido ao assentamento	f_Z	0,0033	mm
Perda de pré carga devido ao assentamento	F_Z	2897	N
Resiliência das juntas por carregamento concêntrico	δ_P	1,33E-07	mm/N
Resiliência do parafuso	δ_S	1,00E-06	mm/N
Resiliência na cabeça do parafuso ou porca	δ_K	3,08E-07	mm/N
Resiliência na rosca totalmente engajada	δ_{GM}	6,92E-07	mm/N
Resiliência da rosca engajada	δ_G	3,84E-07	mm/N
Resiliência do deslocamento elástico dos filetes	δ_M	3,08E-07	mm/N
Componente axial de força de trabalho	F_A	6094	N
Força transversal normal ao eixo do parafuso	F_Q	729	N
Módulo de Elasticidade do material do parafuso	E_s	207000	Mpa
Área substitutiva	A_{ers}	288,09	mm ²
Fator de cálculo de montagem	x	0,795	-

Módulo de Elasticidade do material da junta	E_P	207000	MPa
Força de montagem calculada	F_M	16649	N
Fator de cálculo da junta	ϕ_K	0,118	-
Força tensora residual mínima para evitar a abertura unilateral	F_{kerf}	1519	N
Raio de atrito médio	D_{KM}	13,22	mm
Torque de aperto necessário para força tensora	M_A	24867	N.mm
Torque de aperto necessário para força tensora	M_A	24,87	N.m

Fonte: O autor (2021).

A tabela abaixo contempla todos os dados obtidos e calculados para a união parafusada na condição obtida após a realização do experimento na máquina do DTT, contemplando os coeficientes de atrito alcançados durante o teste para a primeira combinação:

Cálculos realizados para um parafuso M8x1,25 - Classe 8.8			
Utilizado coeficiente de atrito real do experimento			
Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro nominal do parafuso	d	8	mm
Passo de Rosca	p	1,25	mm
Comprimento de carregamento	l_K	7,94	mm
Diâmetro efetivo da rosca	d_2	7,188	mm
Diâmetro interno da rosca	d_3	6,466	mm
Diâmetro da base da porca ou arruela	d_k	17	mm
Diâmetro do cone frusta	D_A	24,94	mm
Diâmetro do furo	D_B	8,5	mm
Coeficiente de atrito na rosca	μ_G	0,287	-
Coeficiente de atrito na cabeça do parafuso	μ_K	0,19	-
Fator de aperto	α	1,7	-
Relação do comprimento carregado pelo diâmetro	l_K/d	0,9925	-
Área de apoio da cabeça do parafuso ou da porca	A_P	170,24	mm ²
Pressão superficial sobre a cabeça ou porca	$P_{m\acute{a}x}$	126,41	N/mm²
Força de fechamento das placas	F_{SP}	19367	N
Tensão de tração	σ_M	529,015	MPa
Área de secção transversal resistente do parafuso	A_S	36,61	mm ²
Área de secção transversal	A_N	50,27	mm ²
Grau de exploração do limite de escoamento durante o parafusamento	v	0,9	-
Deformação plástica devido ao assentamento	f_Z	0,0033	mm
Perda de pré carga devido ao assentamento	F_Z	2897,22	N
Resiliência das juntas por carregamento concêntrico	δ_P	1,33E-07	mm/N
Resiliência do parafuso	δ_S	1,00E-06	mm/N
Resiliência na cabeça do parafuso ou porca	δ_K	3,08E-07	mm/N
Resiliência na rosca totalmente engajada	δ_{GM}	6,92E-07	mm/N
Resiliência da rosca engajada	δ_G	3,84E-07	mm/N
Resiliência do deslocamento elástico dos filetes	δ_M	3,08E-07	mm/N
Componente axial de força de trabalho	F_A	6094	N
Força transversal normal ao eixo do parafuso	F_Q	729	N
Módulo de Elasticidade do material do parafuso	E_S	207000	Mpa
Área substitutiva	A_{ers}	288,09	mm ²
Fator de cálculo de montagem	x	0,795	-
Módulo de Elasticidade do material da junta	E_P	207000	MPa

Força de montagem calculada	F_M	16649	N
Fator de cálculo da junta	ϕ_K	0,118	-
Força tensora residual mínima para evitar a abertura unilateral	F _{kerf}	1519	N
Raio de atrito médio	D _{KM}	13,22	mm
Torque de aperto necessário para força tensora	M _A	44163	N.mm
Torque de aperto necessário para força tensora	M_A	44,16	N.m

Fonte: O autor, (2021).

A tabela abaixo considera todos os valores obtidos e calculados para a união parafusada após a realização do experimento na máquina de DTT, utilizando os coeficientes de atrito atingidos durante o teste para a segunda combinação:

Cálculos realizados para um parafuso M8x1,25 - Classe 8.8			
Utilizado coeficiente de atrito real do experimento			
Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro nominal do parafuso	d	8	mm
Passo de Rosca	p	1,25	mm
Comprimento de carregamento	l_K	7,94	mm
Diâmetro efetivo da rosca	d_2	7,188	mm
Diâmetro interno da rosca	d_3	6,466	mm
Diâmetro da base da porca ou arruela	d_k	17	mm
Diâmetro do cone frusta	D_A	24,94	mm
Diâmetro do furo	D_B	8,5	mm
Coeficiente de atrito na rosca	μ_G	0,23	-
Coeficiente de atrito na cabeça do parafuso	μ_K	0,2	-
Fator de aperto	α	1,7	-
Relação do comprimento carregado pelo diâmetro	l_K/d	0,9925	-
Área de apoio da cabeça do parafuso ou da porca	A_P	170,24	mm ²
Pressão superficial sobre a cabeça ou porca	$P_{m\acute{a}x}$	126,41	N/mm²
Força de fechamento das placas	F_{SP}	19367	N
Tensão de tração	σ_M	529,015	MPa
Área de secção transversal resistente do parafuso	A_S	36,61	mm ²
Área de secção transversal	A_N	50,27	mm ²
Grau de exploração do limite de escoamento durante o parafusamento	v	0,9	-
Deformação plástica devido ao assentamento	f_Z	0,0033	mm
Perda de pré carga devido ao assentamento	F_Z	2897	N
Resiliência das juntas por carregamento concêntrico	δ_P	1,33E-07	mm/N
Resiliência do parafuso	δ_S	1,00E-06	mm/N
Resiliência na cabeça do parafuso ou porca	δ_K	3,08E-07	mm/N
Resiliência na rosca totalmente engajada	δ_{GM}	6,92E-07	mm/N
Resiliência da rosca engajada	δ_G	3,84E-07	mm/N
Resiliência do deslocamento elástico dos filetes	δ_M	3,08E-07	mm/N
Componente axial de força de trabalho	F_A	6093,75	N
Força transversal normal ao eixo do parafuso	F_Q	729	N
Módulo de Elasticidade do material do parafuso	E_S	207000	Mpa
Área substitutiva	A_{ers}	288,09	mm ²
Fator de cálculo de montagem	x	0,795	-
Módulo de Elasticidade do material da junta	E_P	207000	MPa

Força de montagem calculada	F_M	16649	N
Fator de cálculo da junta	ϕ_K	0,118	-
Força tensora residual mínima para evitar a abertura unilateral	F _{kerf}	1519	N
Raio de atrito médio	D _{KM}	13,22	mm
Torque de aperto necessário para força tensora	M _A	41307	N.mm
Torque de aperto necessário para força tensora	M_A	41,31	N.m

Fonte: O autor, (2021).

A tabela abaixo exhibe todos os dados obtidos referente à terceira combinação para a união parafusada após a realização do experimento na máquina de DTT, utilizando os coeficientes de atrito obtidos durante o experimento:

Cálculos realizados para um parafuso M8x1,25 - Classe 8.8			
Utilizado coeficiente de atrito real do experimento			
Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro nominal do parafuso	d	8	mm
Passo de Rosca	p	1,25	mm
Comprimento de carregamento	l_K	7,94	mm
Diâmetro efetivo da rosca	d_2	7,188	mm
Diâmetro interno da rosca	d_3	6,466	mm
Diâmetro da base da porca ou arruela	d_k	17	mm
Diâmetro do cone frusta	D_A	24,94	mm
Diâmetro do furo	D_B	8,5	mm
Coeficiente de atrito na rosca	μ_G	0,3	-
Coeficiente de atrito na cabeça do parafuso	μ_K	0,17	-
Fator de aperto	α_A	1,7	-
Relação do comprimento carregado pelo diâmetro	l_K/d	0,9925	-
Área de apoio da cabeça do parafuso ou da porca	A_P	170,24	mm ²
Pressão superficial sobre a cabeça ou porca	$P_{m\acute{a}x}$	126,41	N/mm²
Força de fechamento das placas	F_{SP}	19367	N
Tensão de tração	σ_M	529,02	MPa
Área de secção transversal resistente do parafuso	A_S	36,61	mm ²
Área de secção transversal	A_N	50,27	mm ²
Grau de exploração do limite de escoamento durante o parafusamento	v	0,9	-
Deformação plástica devido ao assentamento	f_Z	0,0033	mm
Perda de pré carga devido ao assentamento	F_Z	2897	N
Resiliência das juntas por carregamento concêntrico	δ_P	1,33E-07	mm/N
Resiliência do parafuso	δ_S	1,00E-06	mm/N
Resiliência na cabeça do parafuso ou porca	δ_K	3,08E-07	mm/N
Resiliência na rosca totalmente engajada	δ_{GM}	6,92E-07	mm/N
Resiliência da rosca engajada	δ_G	3,84E-07	mm/N
Resiliência do deslocamento elástico dos filetes	δ_M	3,08E-07	mm/N
Componente axial de força de trabalho	F_A	6094	N
Força transversal normal ao eixo do parafuso	F_Q	729	N
Módulo de Elasticidade do material do parafuso	E_S	207000	Mpa
Área substitutiva	A_{ers}	288,09	mm ²
Fator de cálculo de montagem	x	0,795	-
Módulo de Elasticidade do material da junta	E_P	207000	MPa

Força de montagem calculada	F_M	16649	N
Fator de cálculo da junta	ϕ_K	0,118	-
Força tensora residual mínima para evitar a abertura unilateral	F _{kerf}	1519	N
Raio de atrito médio	D _{KM}	13,22	mm
Torque de aperto necessário para força tensora	M _A	42864	N.mm
Torque de aperto necessário para força tensora	M_A	42,86	N.m

Fonte: O autor, (2021).

A tabela abaixo apresenta os dados calculados para a condição obtida após a realização do experimento na máquina de DTT, sendo referida aos coeficientes de atrito alcançados durante o teste para a quarta combinação:

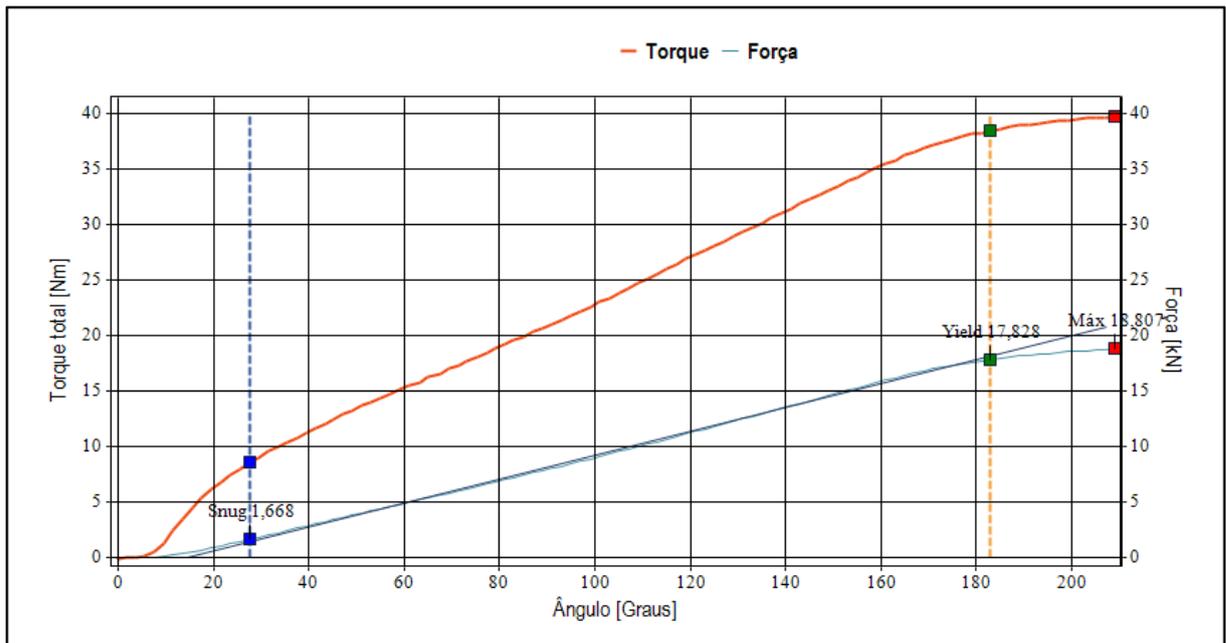
Cálculos realizados para um parafuso M8x1,25 - Classe 8.8			
Utilizado coeficiente de atrito real do experimento			
Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro nominal do parafuso	d	8	mm
Passo de Rosca	p	1,25	mm
Comprimento de carregamento	l_K	7,94	mm
Diâmetro efetivo da rosca	d_2	7,188	mm
Diâmetro interno da rosca	d_3	6,466	mm
Diâmetro da base da porca ou arruela	d_k	17	mm
Diâmetro do cone frusta	D_A	24,94	mm
Diâmetro do furo	D_B	8,5	mm
Coeficiente de atrito na rosca	μ_G	0,25	-
Coeficiente de atrito na cabeça do parafuso	μ_K	0,35	-
Fator de aperto	α_A	1,7	-
Relação do comprimento carregado pelo diâmetro	l_K/d	0,9925	-
Área de apoio da cabeça do parafuso ou da porca	A_P	170,24	mm ²
Pressão superficial sobre a cabeça ou porca	$P_{m\acute{a}x}$	126,41	N/mm²
Força de fechamento das placas	F_{SP}	19367	N
Tensão de tração	σ_M	529,02	MPa
Área de secção transversal resistente do parafuso	A_S	36,61	mm ²
Área de secção transversal	A_N	50,27	mm ²
Grau de exploração do limite de escoamento durante o parafusamento	v	0,9	-
Deformação plástica devido ao assentamento	f_Z	0,0033	mm
Perda de pré carga devido ao assentamento	F_Z	2897	N
Resiliência das juntas por carregamento concêntrico	δ_P	1,33E-07	mm/N
Resiliência do parafuso	δ_S	1,00E-06	mm/N
Resiliência na cabeça do parafuso ou porca	δ_K	3,08E-07	mm/N
Resiliência na rosca totalmente engajada	δ_{GM}	6,92E-07	mm/N
Resiliência da rosca engajada	δ_G	3,84E-07	mm/N
Resiliência do deslocamento elástico dos filetes	δ_M	3,08E-07	mm/N
Componente axial de força de trabalho	F_A	6094	N
Força transversal normal ao eixo do parafuso	F_Q	729	N
Módulo de Elasticidade do material do parafuso	E_S	207000	Mpa
Área substitutiva	A_{ers}	288,09	mm ²
Fator de cálculo de montagem	x	0,795	-

Módulo de Elasticidade do material da junta	E_P	207000	MPa
Força de montagem calculada	F_M	16649	N
Fator de cálculo da junta	ϕ_K	0,118	-
Força tensora residual mínima para evitar a abertura unilateral	F_{kerf}	1519	N
Raio de atrito médio	D_{KM}	13,22	mm
Torque de aperto necessário para força tensora	M_A	59206	N.mm
Torque de aperto necessário para força tensora	M_A	59,21	N.m

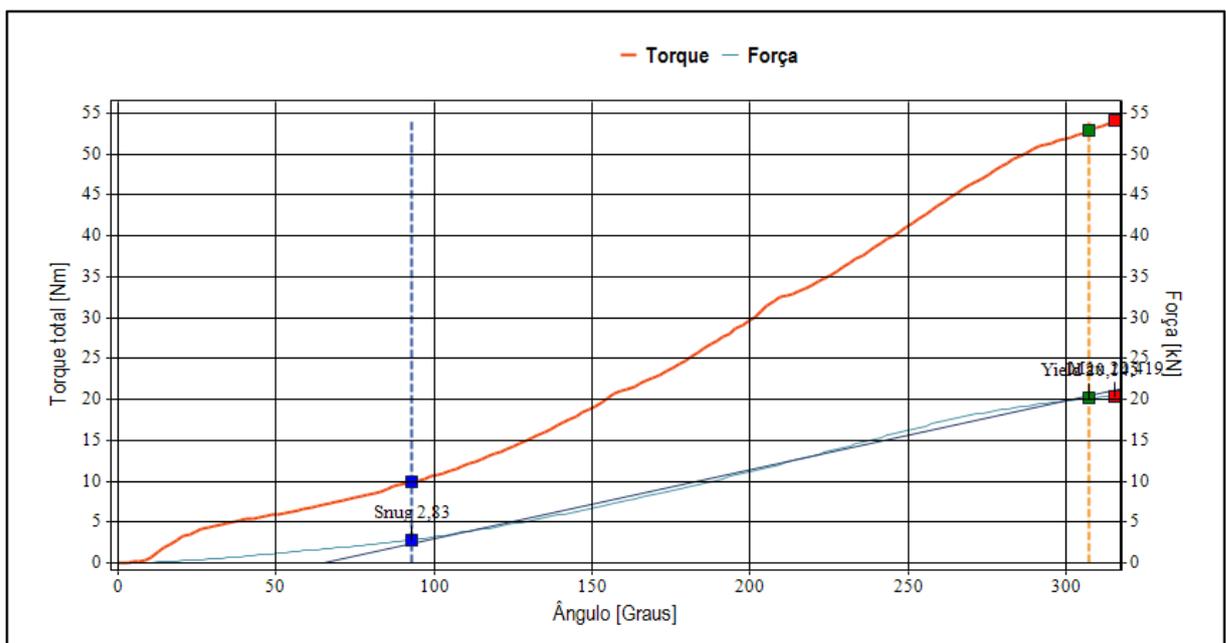
Fonte: O autor, (2021).

APÊNDICE B – GRÁFICOS OBTIDOS NA MÁQUINA DTT

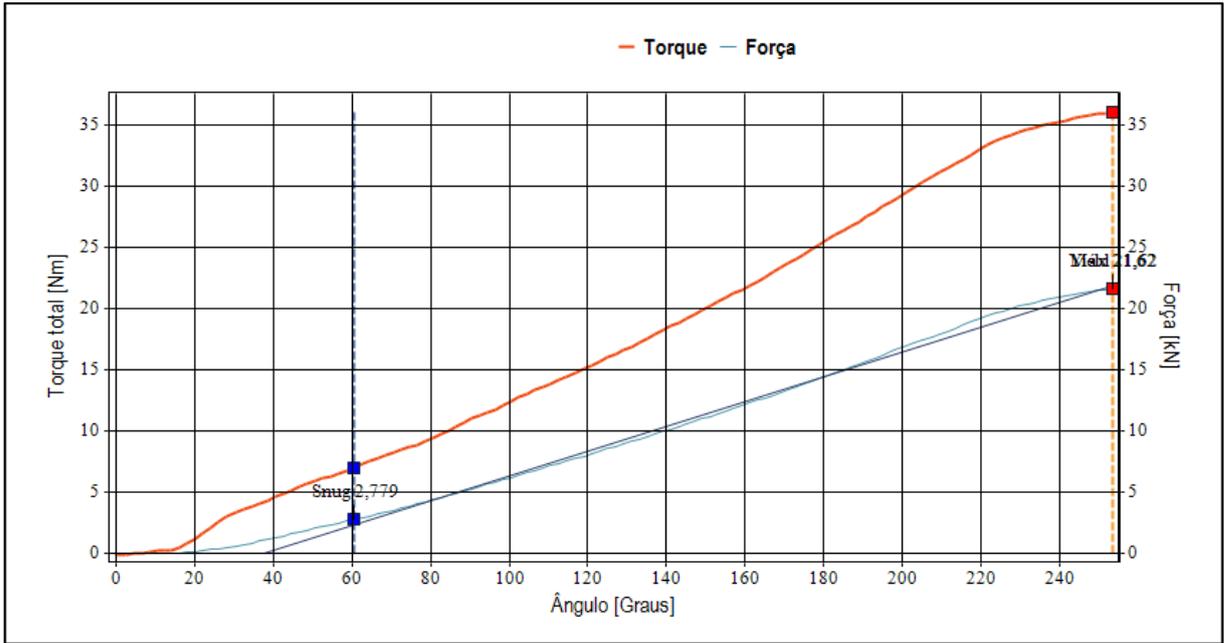
Os gráficos abaixo apresentam os dados obtidos da combinação 1, que contempla o calço zincado e a fixação por porca e arruela zincadas, estes gráficos estão dispostos conforme a ordem de ensaios das tabelas no Apêndice C.



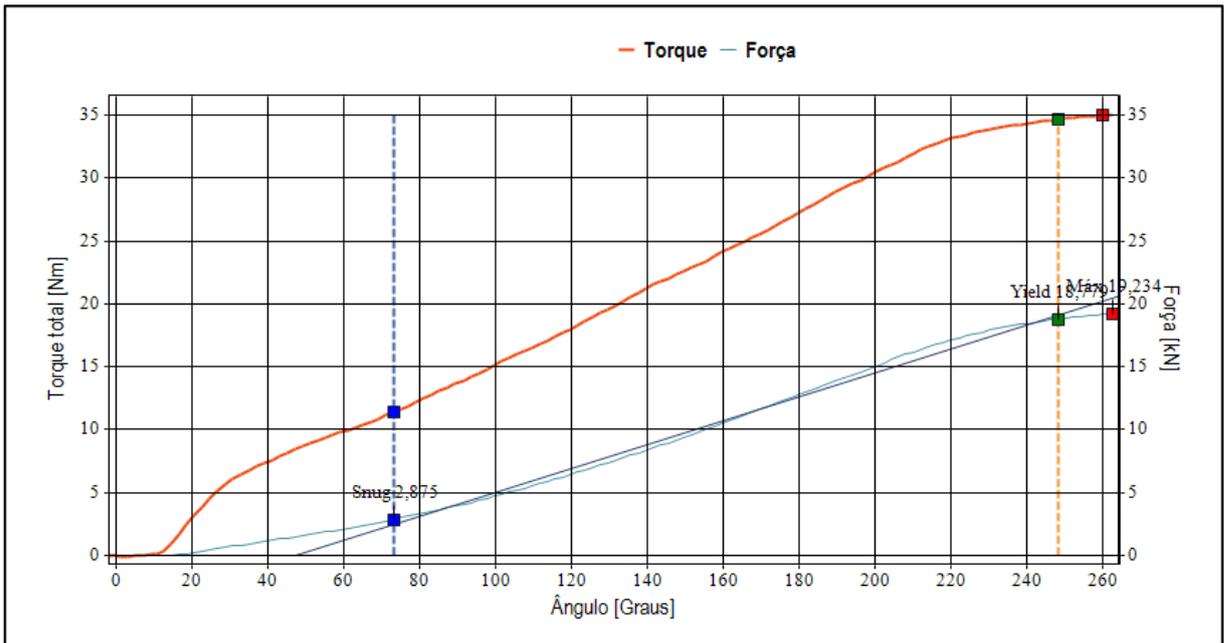
Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).



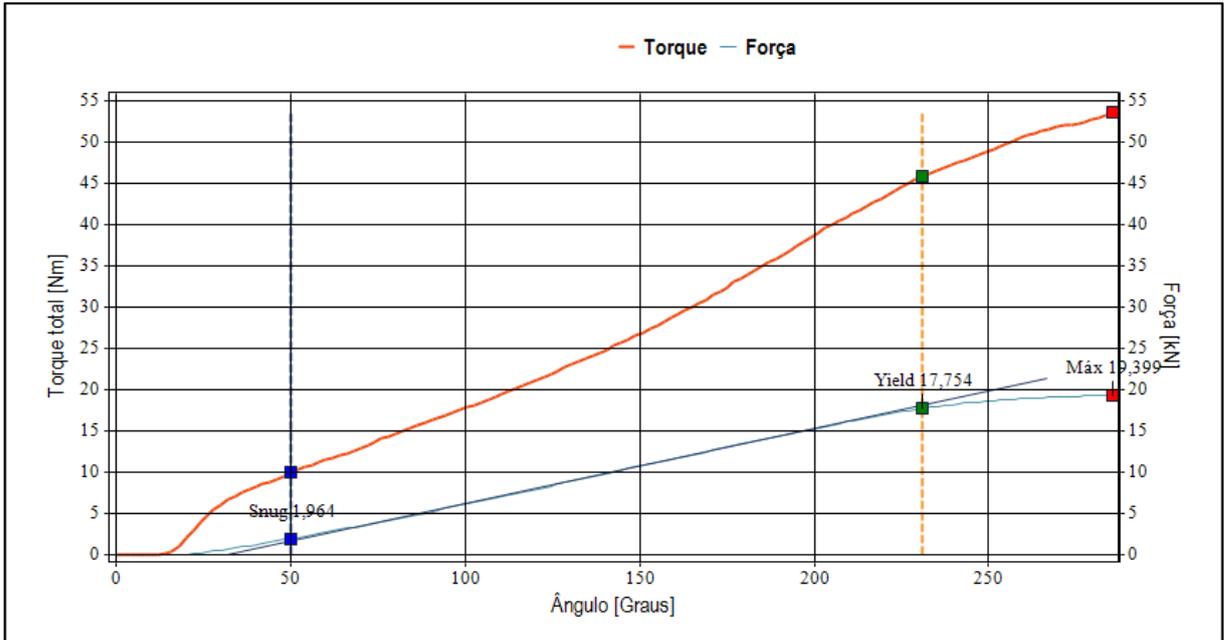
Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).



Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

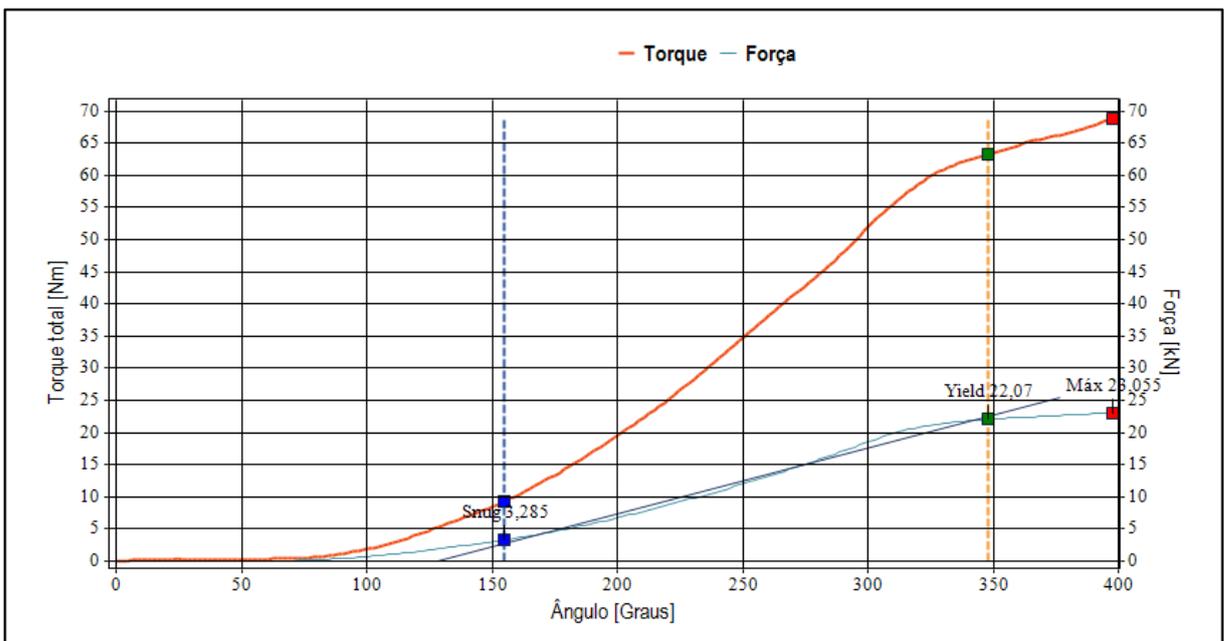


Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

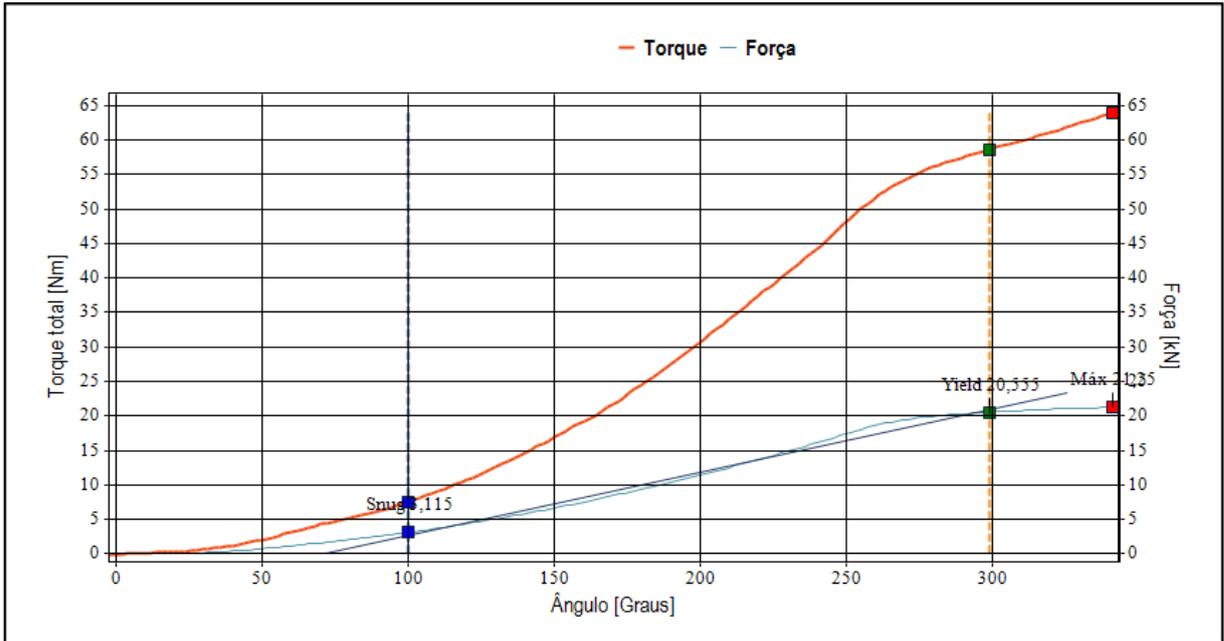


Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

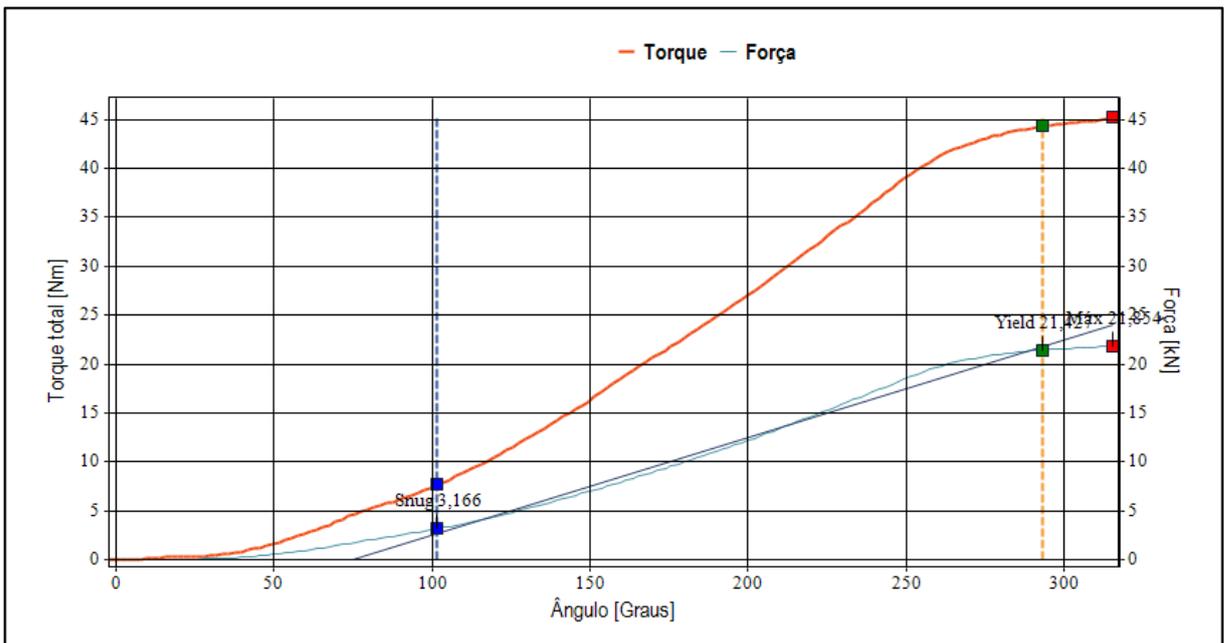
Os gráficos abaixo apresentam os dados obtidos da combinação 2, onde utiliza o calço zincado e a fixação por porca flangeada com tratamento organometálico, estes gráficos estão exibidos conforme a ordem de ensaios presente nas tabelas no Apêndice C..



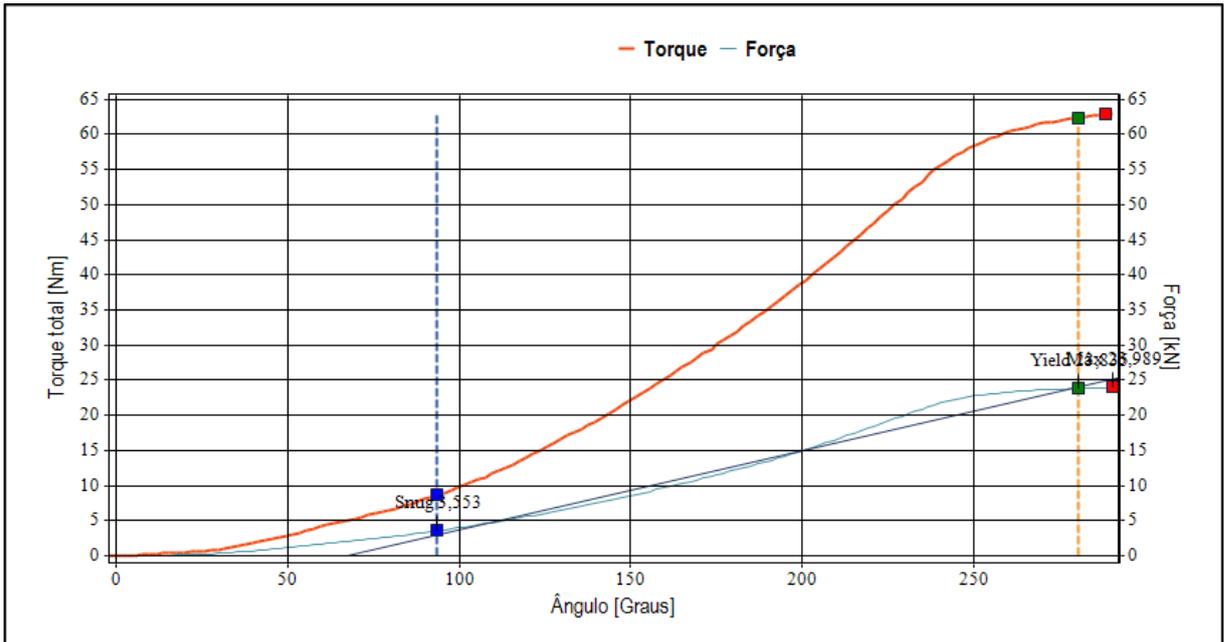
Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).



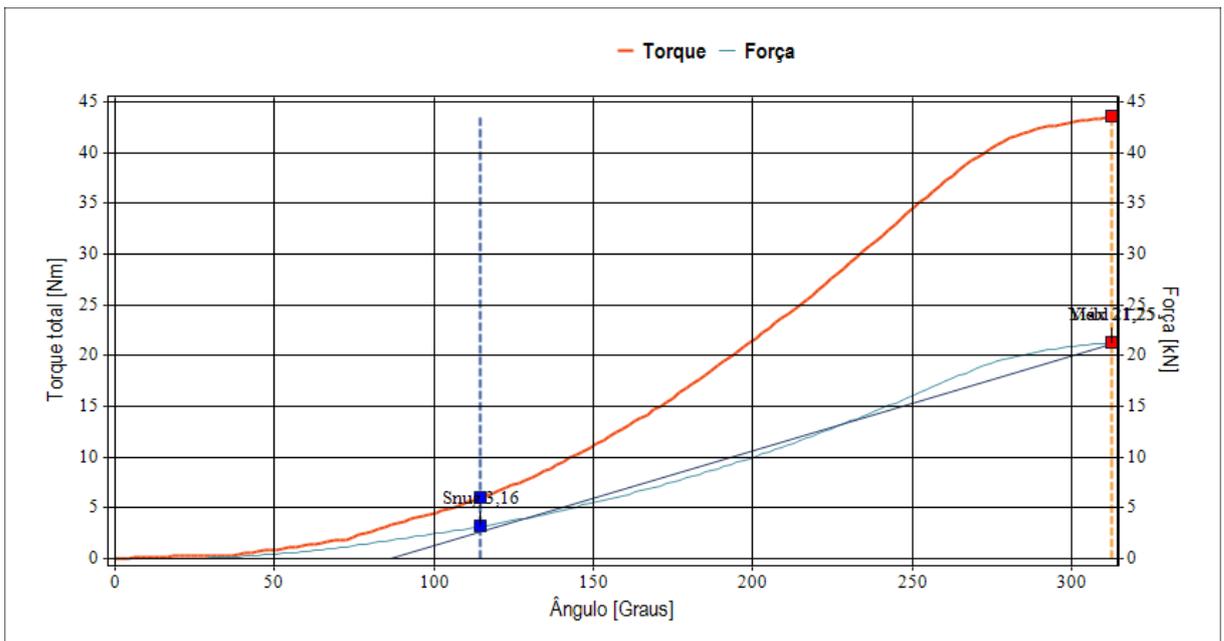
Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).



Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

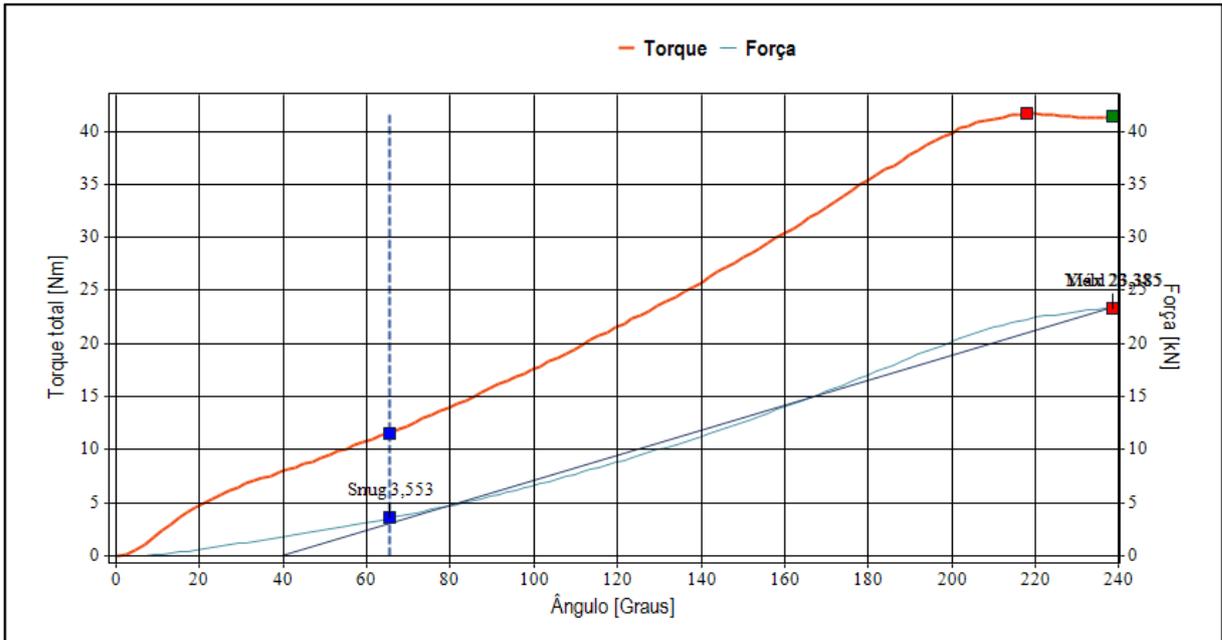


Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

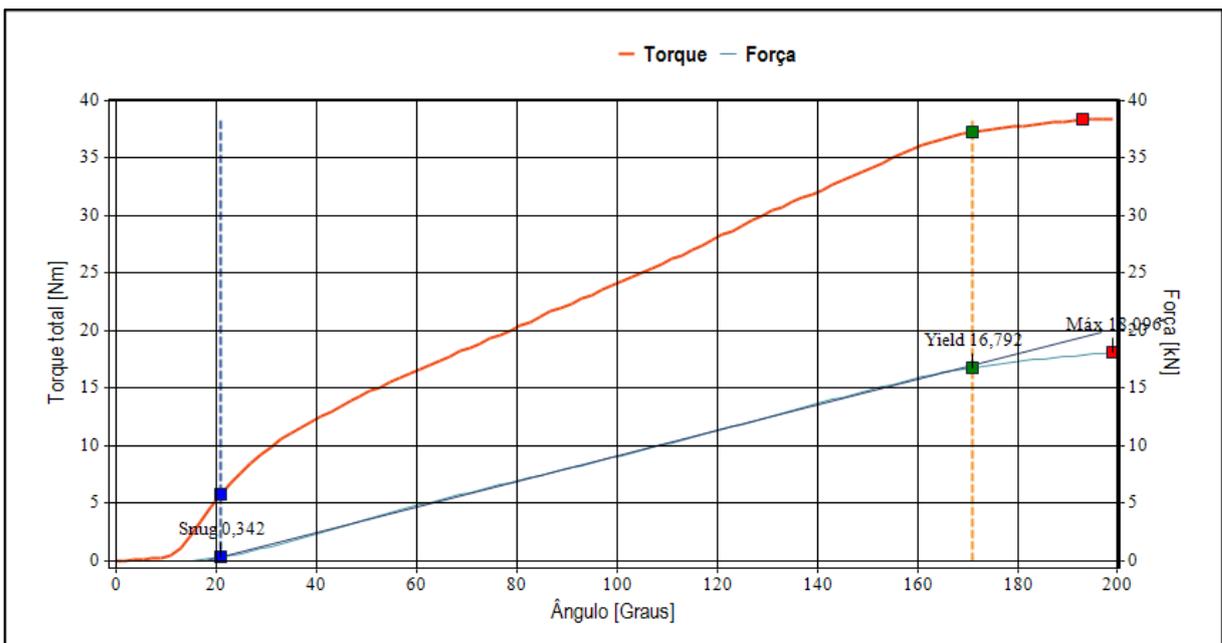


Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

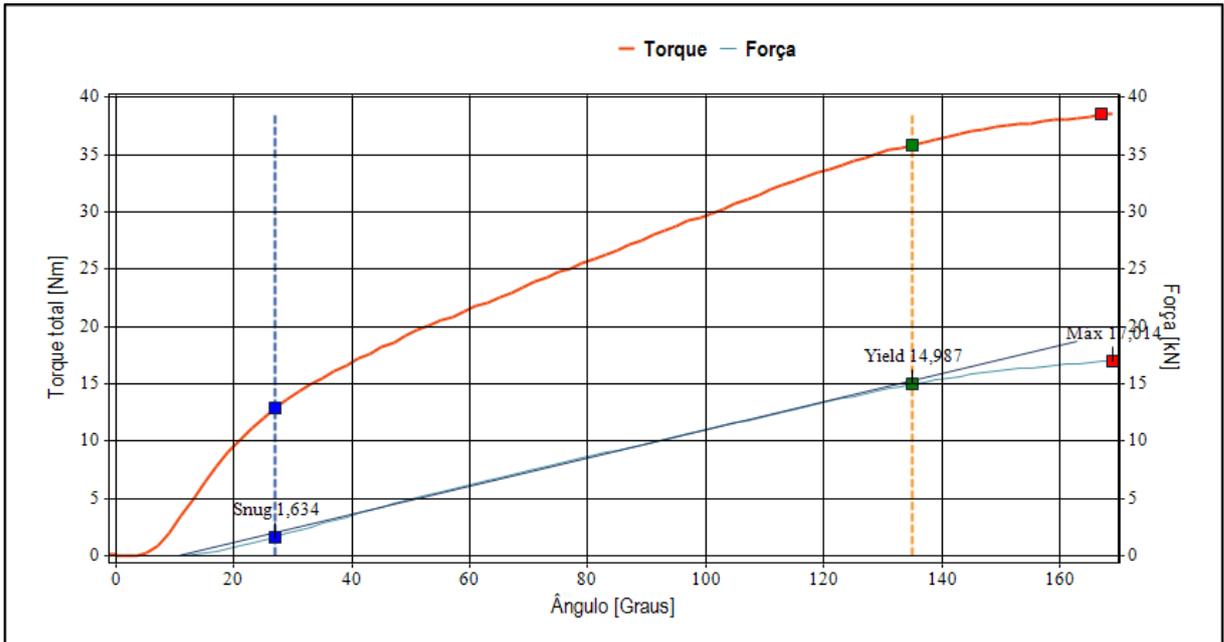
Os gráficos abaixo apresentam os dados obtidos da combinação 3, que utiliza o calço pintado a pó e a fixação por porca e arruela com tratamento zincado, estes gráficos estão apresentados conforme a ordem de ensaios das tabelas no Apêndice C, com exceção do terceiro gráfico que está apresentado no corpo deste estudo.



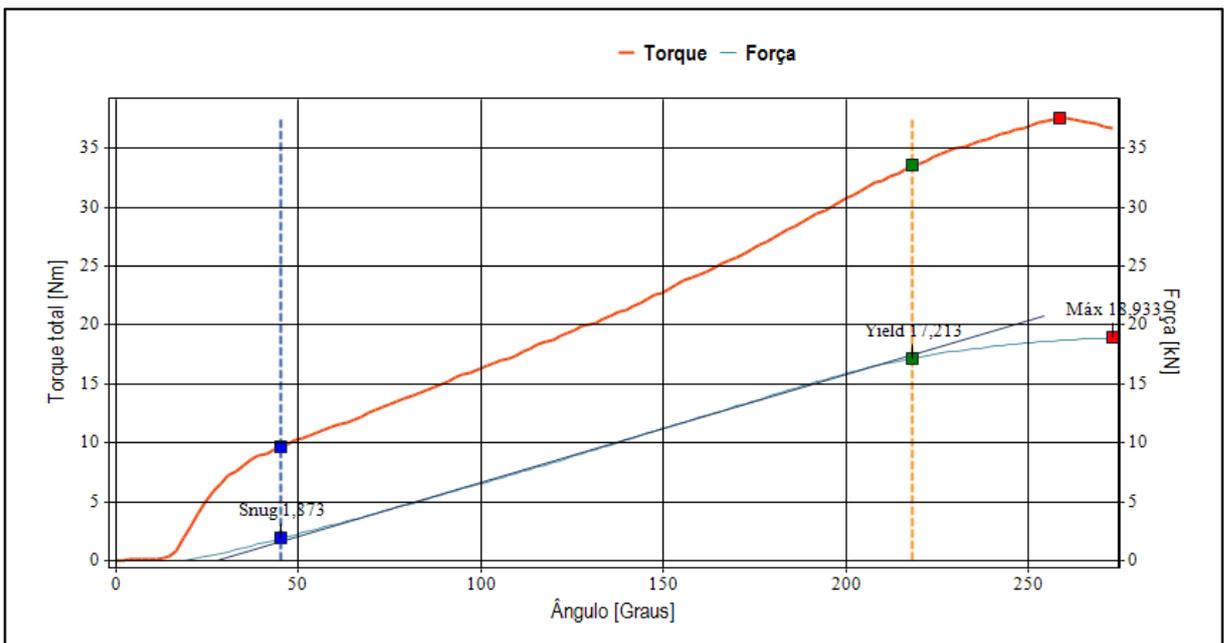
Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).



Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

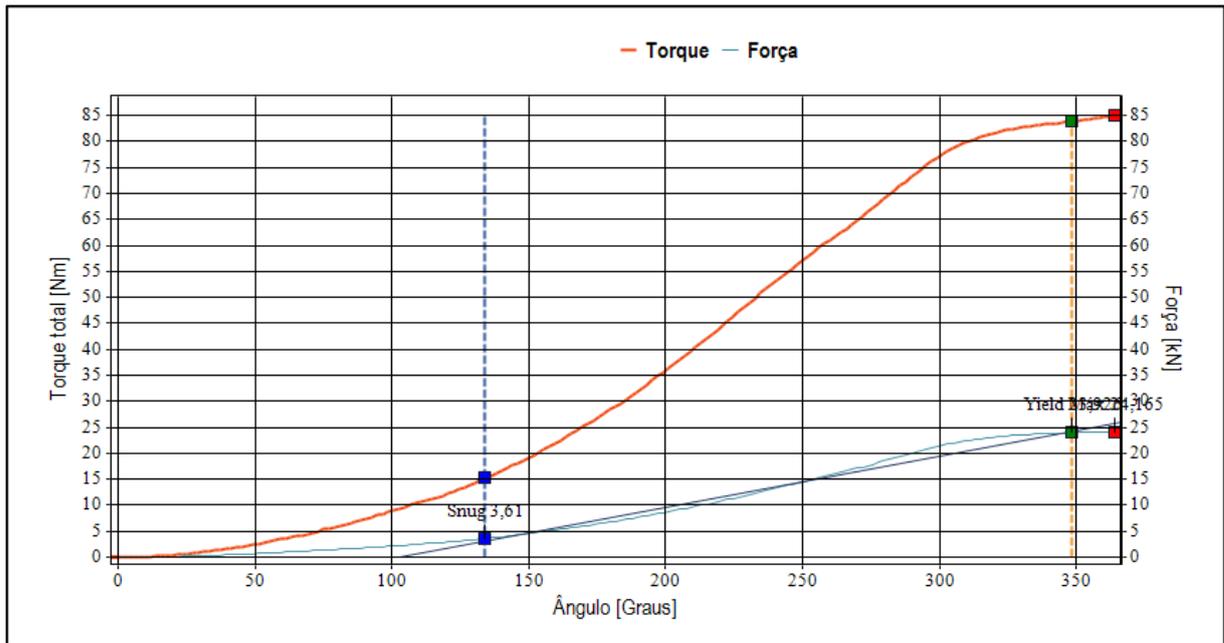


Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

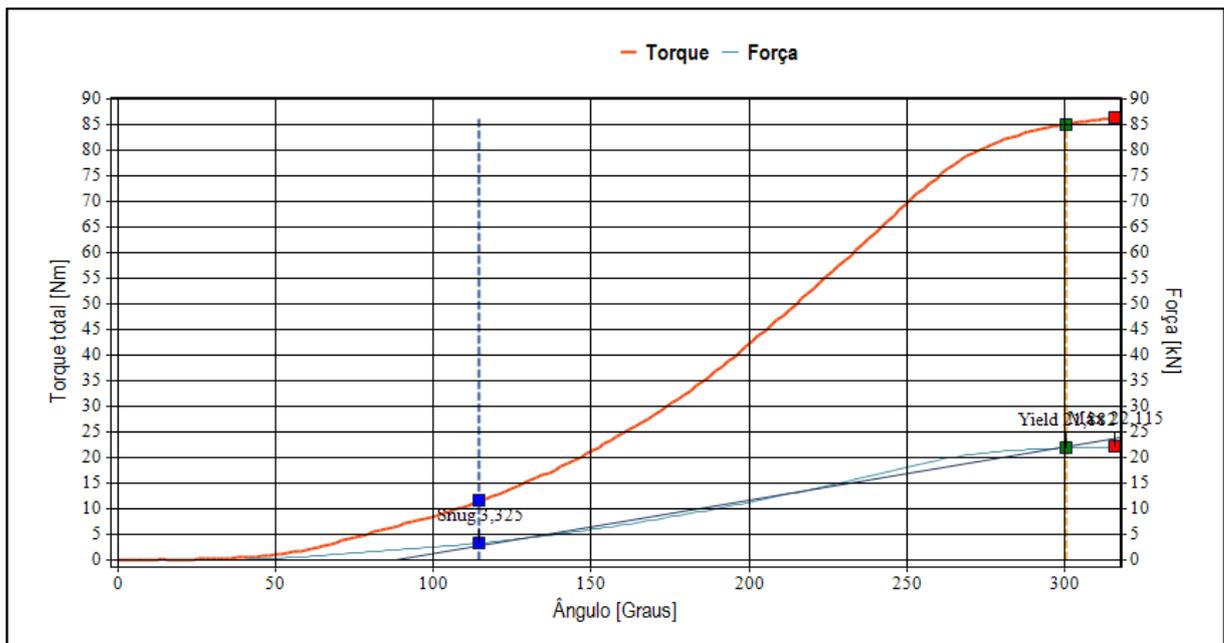


Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

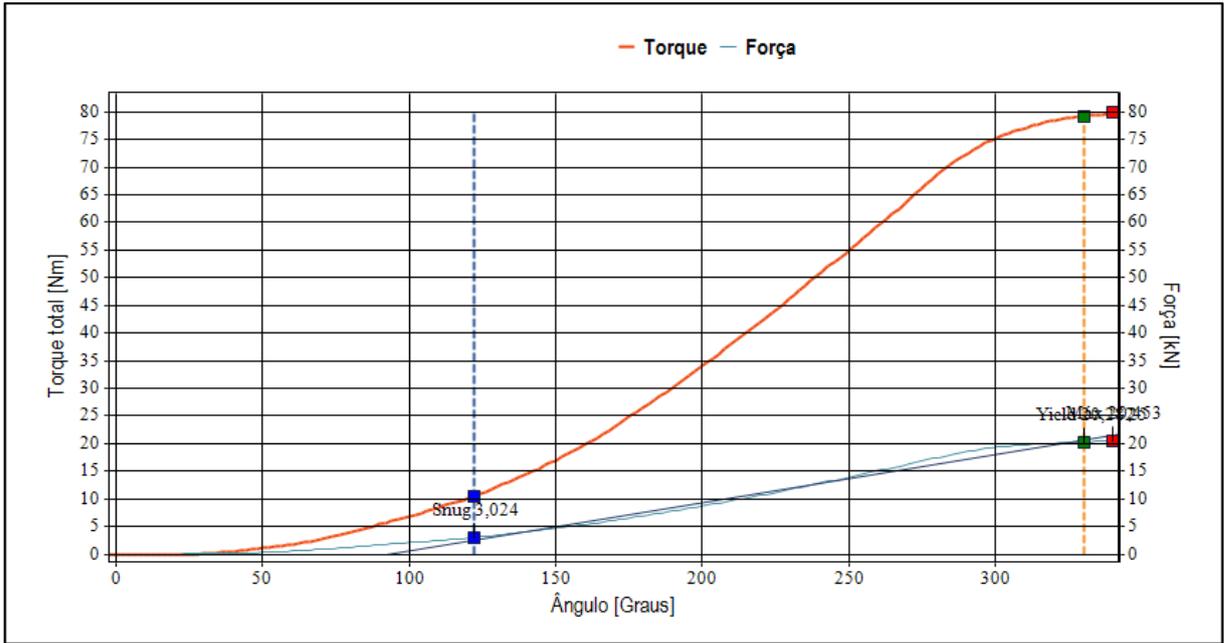
Os gráficos abaixo apresentam os dados obtidos da combinação 4, empregando o calço pintado a pó e a fixação por porca flangeada tratada com revestimento organometálico, estes gráficos estão exibidos conforme a ordem de ensaios apresentada nas tabelas no Apêndice C, com exceção do quinto gráfico que está no corpo do trabalho.



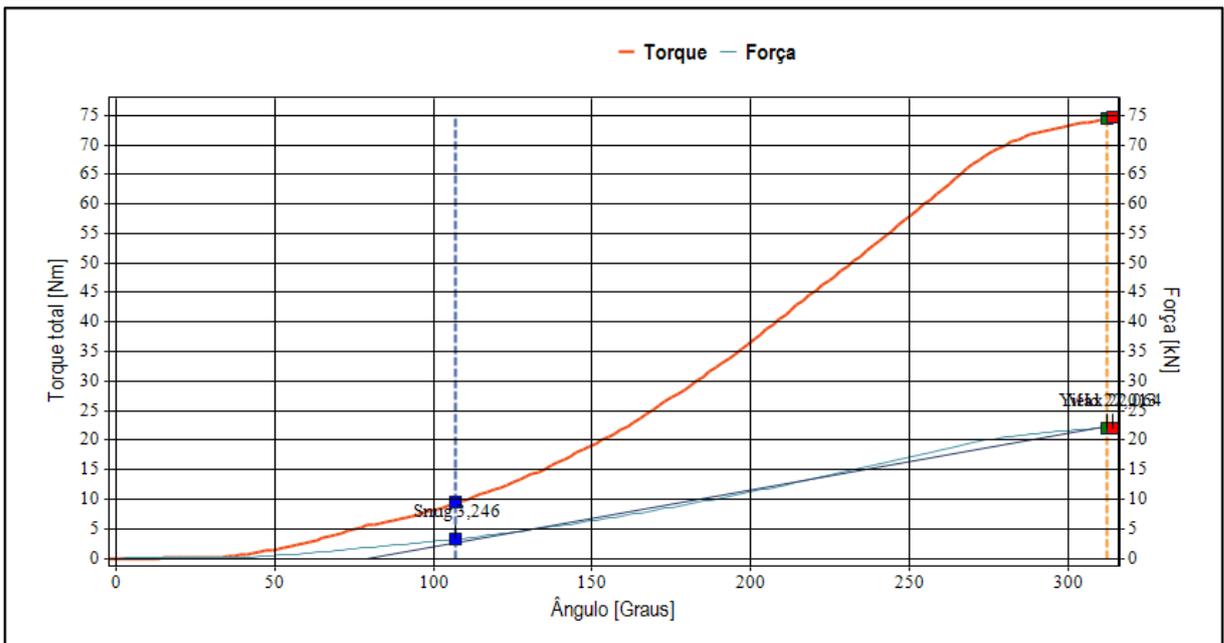
Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).



Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).



Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).



Fonte: Metalúrgica Hassmann, (2021).

APÊNDICE C – TABELAS OBTIDAS NOS TESTES

A tabela abaixo apresenta os cinco testes realizados para a combinação 1, apresentando os valores de torque aplicado, força tensora gerada e seus respectivos coeficientes de atrito.

Relatório do coeficiente de atrito: Porca ZA + arruela ZA e calço ZA								
Amostra	Força tensora (kN)	Torque total (N.m)	Torque na rosca (N.m)	Torque na cabeça (N.m)	K	μ G	μ K	μ Tot
1	10,2	25	15,1	9,9	0,31	0,31	0,18	0,24
2	9,3	25	13,1	11,9	0,34	0,29	0,24	0,26
3	14,2	25	14,7	10,3	0,22	0,2	0,14	0,17
4	11,2	25	16,2	8,8	0,28	0,3	0,15	0,22
5	9,9	25	12,2	12,8	0,31	0,25	0,24	0,24
Mín	9,3	25	12,2	8,8	0,22	0,2	0,14	0,17
Máx	14,2	25	16,2	12,8	0,34	0,31	0,24	0,26
Média	11,2	25	14,3	10,8	0,29	0,27	0,19	0,22

Fonte: Adaptado de Metalúrgica Hassmann, (2021).

A tabela abaixo contempla os cinco experimentos realizados correspondentes à combinação 2, apresentando os valores de torque aplicado, força tensora e os coeficientes de atrito.

Relatório do coeficiente de atrito: Porca Geomet e calço ZA								
Amostra	Força tensora (kN)	Torque total (N.m)	Torque na rosca (N.m)	Torque na cabeça (N.m)	K	μ G	μ K	μ Tot
1	8,7	25	9,9	15,1	0,36	0,23	0,27	0,25
2	9,6	25	11,3	13,7	0,32	0,23	0,22	0,23
3	11,1	25	12,8	12,2	0,28	0,23	0,17	0,19
4	9,6	25	11,4	13,6	0,33	0,24	0,22	0,23
5	11,6	25	13,6	11,4	0,27	0,23	0,15	0,18
Mín	8,7	25	9,9	11,4	0,27	0,23	0,15	0,18
Máx	11,6	25	13,6	15,1	0,36	0,24	0,27	0,25
Média	10,1	25	11,8	13,2	0,31	0,23	0,21	0,22

Fonte: Adaptado de Metalúrgica Hassmann, (2021).

A tabela abaixo exhibe os cinco experimentos relacionados à combinação 3, onde apresenta os valores de torque aplicado, força tensora e os coeficientes de atrito.

Relatório do coeficiente de atrito: Porca ZA + arruela ZA e calço pintado a pó								
Amostra	Força tensora (kN)	Torque total (N.m)	Torque na rosca (N.m)	Torque na cabeça (N.m)	K	μ G	μ K	μ Tot
1	10,8	25	14,8	10,2	0,29	0,28	0,18	0,22
2	9,6	25	14,5	10,5	0,32	0,31	0,2	0,25
3	11,4	25	16,8	8,2	0,27	0,3	0,13	0,21
4	8,2	25	16,6	8,4	0,38	0,44	0,19	0,3
5	12,6	25	15,4	9,6	0,25	0,24	0,14	0,19
mín	8,2	25	14,5	8,2	0,25	0,24	0,13	0,19
máx	12,6	25	16,8	10,5	0,38	0,44	0,2	0,3
Média	10,5	25	15,6	9,4	0,31	0,32	0,17	0,24

Fonte: Adaptado de Metalúrgica Hassmann, (2021).

A tabela abaixo apresenta os cinco experimentos referentes à combinação 4, onde são exibidos os valores de torque aplicado, força tensora e os coeficientes de atrito.

Relatório do coeficiente de atrito: Porca Geomet e calço pintado a pó								
Amostra	Força tensora (kN)	Torque total (N.m)	Torque na rosca (N.m)	Torque na cabeça (N.m)	K	μ G	μ K	μ Tot
1	6	25	7	18	0,53	0,23	0,47	0,38
2	7	25	8,7	16,3	0,45	0,25	0,36	0,32
3	6,6	25	8,8	16,2	0,47	0,27	0,38	0,34
4	8	25	8,7	16,3	0,39	0,21	0,31	0,27
5	7,9	25	8,9	16,1	0,4	0,22	0,32	0,28
mín	6	25	7	16,1	0,39	0,21	0,31	0,27
máx	8	25	8,9	18	0,53	0,27	0,47	0,38
Média	7,1	25	8,3	16,7	0,45	0,24	0,37	0,32

Fonte: Adaptado de Metalúrgica Hassmann, (2021).

APÊNDICE D – TABELAS DO PLANEJAMENTO FATORIAL 2²

Os dados necessários para o planejamento fatorial 2² estão apresentados em tabelas descritas abaixo. Uma tabela contendo as informações para o coeficiente de atrito na rosca μ_G foi concebida:

Tabela Fatorial para μ_G				
Testes	x1	x2	x1x2	μ_G
1	-1	-1	1	0,31
2	1	-1	-1	0,23
3	-1	1	-1	0,28
4	1	1	1	0,25
5	-1	-1	1	0,3
6	1	-1	-1	0,23
7	-1	1	-1	0,31
8	1	1	1	0,27
9	-1	-1	1	0,25
10	1	-1	-1	0,24
11	-1	1	-1	0,3
12	1	1	1	0,22
soma[+]	1,44	1,63	1,6	3,19
soma[-]	1,75	1,56	1,59	0,2658
média[+]	0,24	0,27	0,27	0,8603
média[-]	0,29	0,26	0,27	-

Fonte: O autor, (2021).

O efeito de cada fator e o efeito da interação entre os fatores estão apresentados na tabela abaixo:

Cálculo dos efeitos					
x1	média	x2	média	x1x2	média
[-1]	0,29	[-1]	0,26	[-1]	0,27
[+1]	0,24	[+1]	0,27	[+1]	0,27
Ex1	0,05	Ex2	0,01	Ex1x2	0,00

Fonte: O autor, (2021).

A tabela abaixo contém os resultados avaliados para os 12 experimentos realizados, contendo a resposta relacionado ao coeficiente μ_K :

Tabela Fatorial para μ_K				
Testes	x1	x2	x1x2	μ_K
1	-1	-1	1	0,18
2	1	-1	-1	0,22
3	-1	1	-1	0,18
4	1	1	1	0,36
5	-1	-1	1	0,15
6	1	-1	-1	0,17
7	-1	1	-1	0,2
8	1	1	1	0,38
9	-1	-1	1	0,24
10	1	-1	-1	0,22
11	-1	1	-1	0,13
12	1	1	1	0,32
soma[+]	1,67	1,57	1,63	2,75
soma[-]	1,08	1,18	1,12	0,2292
média[+]	0,28	0,26	0,27	0,7039
média[-]	0,18	0,20	0,19	

Fonte: O autor, (2021).

A tabela abaixo mostra os cálculos dos efeitos para o planejamento fatorial do coeficiente de atrito μ_K :

Cálculo dos efeitos					
x1	média	x2	média	x1x2	média
[-1]	0,18	[-1]	0,20	[-1]	0,19
[+1]	0,28	[+1]	0,26	[+1]	0,27
Ex1	0,10	Ex2	0,07	Ex1x2	0,09

Fonte: O autor, (2021).

ANEXO A – TABELA UTILIZADA NA EMPRESA PARA DIMENSIONAMENTO DE TORQUE EM JUNTAS PARAFUSADAS

Tabela contendo os valores de torques aplicado pela empresa, os valores de torque atingem 90% da tensão de escoamento do parafuso, não devendo ser ultrapassados.

Rosca	μ_{ges}	Torque Máximo de Aperto [N.m]				
		Classe de Resistência				
		4.6	5.8	8.8	10.9	12.9
M3	0,1	0,42	0,53	1,12	1,58	1,9
	0,12	0,48	0,6	1,27	1,79	2,14
	0,14	0,53	0,6	1,41	1,98	2,37
M4	0,1	0,97	1,21	2,6	3,9	4,5
	0,12	1,09	1,37	3	4,6	5,1
	0,14	1,21	1,51	3,3	4,8	5,6
M5	0,1	1,9	2,4	5,2	7,6	8,9
	0,12	2,2	2,7	5,9	8,6	10
	0,14	2,4	3	6,5	9,5	11,2
M6	0,1	3,3	4,1	9	13,2	15,4
	0,12	3,7	4,7	10,1	14,9	17,4
	0,14	4,1	5,2	11,3	16,5	19,3
M8'	0,1	8	10	21,6	31,8	37,2
	0,12	9,1	11,3	24,6	36,1	42,2
	0,14	10,1	12,6	27,3	40,1	46,9
M10	0,1		20,1	43	63	73
	0,12	-	22,9	48	71	83
	0,14		25,3	54	79	93
M12	0,1		34	73	108	126
	0,12	-	39	84	123	144
	0,14		43	93	137	160
M14	0,1		55	117	172	201
	0,12	-	62	133	195	229
	0,14		69	148	218	255
M16	0,1		84	180	264	309
	0,12	-	96	206	302	354
	0,14		107	230	338	395
M18	0,1		117	259	369	432
	0,12	-	133	295	421	492
	0,14		148	329	469	549
M20	0,1	-	164	363	517	605
	0,12		187	415	592	692

	0,14		209	464	661	773
M22	0,1		220	495	704	824
	0,12	-	252	567	807	945
	0,14		282	634	904	1057
M24	0,1		282	625	890	1041
	0,12	-	322	714	1017	1190
	0,14		359	798	1136	1329
M27	0,1		414	915	1304	1526
	0,12	-	474	1050	1496	1750
	0,14		530	1176	1674	1959

Fonte: Macrosul (2011).

ANEXO B – TABELAS ADAPTADAS DA NORMA VDI-2230 (2003)

Tabela 1 da VDI-2230 apresentando pré-carga de montagem F_M e torque de aperto MA com $R_{P0,2} = 0,9$.

Dimensão	Classe de Resistência	Pré-carga de montagem F_M em kN para $\mu G =$							Torque de aperto MA em N.m para $\mu K = \mu G$						
		0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,2	0,24	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,2	0,24
M 4	8,8	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2	3,9	3,7	2,3	2,6	3	3,3	3,6	4,1	4,5
	10,9	6,8	6,7	6,5	6,3	6,1	5,7	5,4	3,3	3,9	4,6	4,8	5,3	6	6,6
	12,9	8	7,8	7,6	7,4	7,1	6,7	6,3	3,9	4,5	5,1	5,6	6,2	7	7,8
M 5	8,8	7,6	7,4	7,2	7	6,8	6,4	6	4,4	5,2	5,9	6,5	7,1	8,1	9
	10,9	11,1	10,8	10,6	10,3	10	9,4	8,8	6,5	7,6	8,6	9,5	10,4	11,9	13,2
	12,9	13	12,7	12,4	12	11,7	11	10,3	7,6	8,9	10	11,2	12,2	14	15,5
M 6	8,8	10,7	10,4	10,2	9,9	9,6	9	8,4	7,7	9	10,1	11,3	12,3	14,1	15,6
	10,9	15,7	15,3	14,9	14,5	14,1	13,2	12,4	11,3	13,2	14,9	16,5	14,1	20,7	22,9
	12,9	18,4	17,9	17,5	17	16,5	15,5	14,5	13,2	15,4	17,4	19,3	21,1	24,2	26,8
M 7	8,8	15,5	15,1	14,8	14,4	14	13,1	12,3	12,6	14,8	16,8	18,7	20,5	23,6	26,2
	10,9	22,7	22,5	21,7	21,1	20,5	19,3	18,1	18,5	21,7	24,7	27,5	30,1	34,7	38,5
	12,9	26,6	26	25,4	24,7	24	22,6	21,2	21,6	25,4	28,9	32,2	35,2	40,6	45,1
M 8	8,8	19,5	19,1	18,6	18,1	17,6	16,5	15,5	18,5	21,6	24,6	27,3	29,8	34,3	38
	10,9	28,7	28	27,3	26,6	25,8	24,3	22,7	27,2	31,8	36,1	40,1	43,8	50,3	55,8
	12,9	33,6	32,8	32	31,1	30,2	28,4	26,6	31,8	37,2	42,2	46,9	51,2	58,9	65,3
M 10	8,8	31	30,3	29,6	28,8	27,9	26,3	24,7	36	43	48	54	59	68	75
	10,9	45,6	44,5	43,4	42,2	41	38,6	36,2	53	63	71	79	87	100	110
	12,9	53,3	52,1	50,8	49,4	48	45,2	42,4	62	73	93	93	101	116	129
M 12	8,8	45,2	44,1	43	41,9	40,7	38,3	35,9	63	73	84	93	102	117	130
	10,9	66,3	64,8	63,2	61,5	59,8	56,3	52,8	92	108	123	137	149	172	191
	12,9	77,6	75,9	74	72	70	65,8	61,8	108	126	144	160	175	201	223
M 14	8,8	62	60,6	59,1	57,5	55,9	52,6	49,3	100	117	133	148	162	187	207
	10,9	91	88,9	86,7	84,4	82,1	77,2	72,5	146	172	195	218	238	274	304
	12,9	107	104	102	98,8	96	90,4	84,8	171	201	229	255	255	321	356
M 16	8,8	84,7	82,9	80,9	78,8	76,6	72,2	67,8	153	180	206	230	252	291	325
	10,9	124	122	119	116	113	106	99,6	224	264	302	338	370	428	477
	12,9	146	142	139	135	132	124	117	262	309	354	395	433	501	558
M 18	8,8	107	104	102	99	96	91	85	220	259	295	329	360	415	462
	10,9	152	149	145	141	137	129	121	314	369	421	469	513	592	657
	12,9	178	174	170	165	160	151	142	367	432	492	549	601	692	769
M 20	8,8	136	134	130	127	123	116	109	308	363	415	464	509	588	655
	10,9	194	190	186	181	176	166	156	438	517	592	661	725	838	933
	12,9	227	223	217	212	206	194	182	513	605	692	773	848	980	1092

M 22	8,8	170	166	162	158	154	145	137	417	495	567	634	697	808	901
	10,9	242	237	231	225	219	207	194	595	704	807	904	993	1151	1284
	12,9	283	277	271	264	257	242	228	696	824	945	1057	1162	1347	1502
M 24	8,8	196	192	188	183	178	168	157	529	625	714	798	875	1011	1126
	10,9	280	274	267	260	253	239	224	754	890	1017	1136	1246	1440	1604
	12,9	327	320	313	305	296	279	262	882	1041	1190	1329	1458	1685	1877
M 27	8,8	257	252	246	240	234	220	207	772	915	1050	1176	1292	1498	1672
	10,9	367	359	351	342	333	314	295	1100	1304	1496	1674	1840	2134	2381
	12,9	429	420	410	400	389	367	345	1287	1526	1750	1959	2153	2497	2787
M 30	8,8	313	307	300	292	284	268	252	1053	1246	1428	1597	1754	2931	2265
	10,9	446	437	427	416	405	382	359	1500	1775	2033	2274	2498	2893	3226
	12,9	522	511	499	487	474	447	420	1755	2077	2380	2662	2923	3386	3775
M 33	8,8	389	381	373	363	354	334	314	1415	1679	1928	2161	2377	2759	3081
	10,9	554	543	531	517	504	475	447	2015	2392	2747	3078	3385	3930	4388
	12,9	649	635	621	605	589	556	523	2358	2799	3214	3601	3961	4598	5135
M 36	8,8	458	448	438	427	415	392	368	1825	2164	2482	2778	3054	3541	3951
	10,9	652	638	623	608	591	558	524	2600	3082	3535	3957	4349	5043	5627
	12,9	763	747	729	711	692	653	614	3042	3607	4136	4631	5089	5902	6585
M 39	8,8	548	537	525	512	498	470	443	2348	2791	3208	3597	3958	4598	5137
	10,9	781	765	748	729	710	570	630	3345	3975	4569	5123	5637	6549	7317
	12,9	914	895	875	853	831	784	738	3914	4652	5346	5994	6596	7664	8562

Fonte: Adaptado de VDI-2230 (2003).

Tabela 5 da VDI-2230 apresentando as faixas dos coeficientes de atrito geralmente obtidas através dos tratamentos utilizados.

Classe de coeficiente de atrito	Faixa para μ_g e μ_k	Seleção de exemplos típicos para	
		Material / Superfícies	Lubrificantes
A	0,04 a 0,10	Revestimentos galvânicos fosfatizados de óxido preto metalicamente brilhantes tais como revestimentos laminados de Zinco	lubrificantes sólidos, tais como MoS ₂ , grafite, PTFE, PA, PE, PI, em vernizes lubrificantes, como top coats (revestimentos finais) ou em pastas;
		Zn, Zn/Fe, Zn/Ni	Cera liquefeita, dispersão em cera.
B	0,08 a 0,16	Revestimentos galvânicos fosfatizados de óxido preto metalicamente brilhantes tais como revestimentos laminados de Zinco Zn, Zn/Fe, Zn/Ni, Al e ligas de Mg	Lubrificantes sólidos, tais como MoS ₂ , grafite, PTFE, PA, PE, PI, em vernizes lubrificantes, como top coats (revestimentos finais) ou em pastas; cera liquefeita, dispersantes de cera.
		galvanizados a quente	Graxas; óleos, condição de entrega
		Revestimentos orgânicos	MoS ₂ ; grafite; dispersantes de cera
		Aço austenítico	Com lubrificante sólido integrado ou Dispersante de cera
C	0,14 a 0,24	Aço austenítico	Lubrificantes sólidos ou graxas: pastas
		brilhante metalicamente fosfatizado	Dispersão em cera, pastas
		revestimentos galvânicos, tais como Zn, Zn/Fe, Zn/Ni, revestimentos laminados de zinco, adesivo	Condição de entrega (levemente oleado) Nenhum
D	0,20 a 0,35	aço austenítico	Óleo
		revestimentos galvânicos, tais como Zn, Zn/Fe: galvanizados a quente	Nenhum
E	0,3	revestimentos galvânicos, tais como Zn/Fe, Zn/Ni, aço austenítico Al, ligas Mg	Nenhum

Fonte: Adaptado de VDI-2230 (2003).

Tabela 8 da VDI-2230 com os valores guia para aplicação do fator de aperto α_A .

Fator de aperto α_A	Dispersão (Δ FM): (2. FMm) = ($\alpha_A - 1$): ($\alpha_A + 1$)	Técnica de aperto	Técnica de ajuste	Observações	
1,05 a 1,2	± 2% a ± 10%	Aperto controlado por alongamento com ultrassom	Eco time	<ul style="list-style-type: none"> * Valores de calibração necessários. * Permitir o aumento progressivo em erros a $lk / d < 2$ * Erros menores com acoplamento mecânico direto, maior com acoplamento indireto 	
1,1 a 1,5	± 5% a ± 20%	Medição de alongamento mecânico	Ajuste através de medição longitudinal	<ul style="list-style-type: none"> * Determinação exata da resiliência elástica axial do parafuso é necessário. A dispersão depende substancialmente da precisão da técnica de medição. * Aguardar o aumento progressivo em erros a $lk / d < 2$ 	
1,2 a 1,4	± 9% a ± 17%	Aperto controlado por escoamento, operado por motor ou manual	Entrada do coeficiente de torque relativo / ângulo de rotação	<p>A dispersão da pré-carga é substancialmente determinada pela dispersão no ponto de escoamento do parafuso. Aqui, os parafusos são dimensionados para FM min, um projeto de parafusos para FM max com o fator de aperto α_A então não se aplica a estas técnicas de aperto.</p>	
1,2 a 1,4	± 9% a ± 17%	Aperto controlado por ângulo, operado por motor ou manualmente	Determinação experimental do torque de pré-aperto e ângulo de rotação (etapas)		
1,2 a 1,6	± 9% a ± 23%	Aperto hidráulico	Ajuste através de medição de comprimento ou pressão	<ul style="list-style-type: none"> * Valores mais baixos para parafusos mais longos ($lk / d \geq 5$) 	
				<ul style="list-style-type: none"> * Valores mais altos para parafusos mais curtos ($lk / d \leq 2$) 	
1,4 a 1,6	± 17% a ± 23%	Aperto controlado por torque com torquímetro., chave indicadora, ou fuso de aperto de precisão com medição de torque dinâmico.	Determinação experimental de torques exigidos de aperto na peça de parafusamento original, por exemplo, por medição do alongamento do parafuso.	Valores mais baixos: exigido grande número de calibração ou testes de verificação (por exemplo 20); necessária baixa dispersão do torque transmitido (por exemplo ±5%).	Valores mais baixos para: * ângulos pequenos de rotação, ou seja, juntas relativamente rígidas. * superfície de junção relativamente macia. * superfícies de junção que não tendem a “emperrar” ou seja, fosfatadas ou com lubrificação suficiente.
1,6 a 2,0 (coeficiente de atrito classe B)	± 23% a ± 33%	Aperto controlado por torque com torquímetro, chave indicadora ou fuso de aperto de precisão com medição de torque dinâmico	Determinação do torque de aperto necessário através da estimativa do coeficiente de atrito (condições de superfície e de lubrificação).	Valores mais baixos para: Medição com torquímetro com aperto firme e para chaves de aperto de precisão.	Valores mais altos para: * ângulos grandes de rotação, ou seja, juntas relativamente resilientes e roscas finas.
1,7 a 2,5 (coeficiente	± 26% a ± 43%			Valores mais altos para: Torquímetro como	* superfície de junção de alta dureza

de atrito Classe A)				sinalização ou desarme automático.	combinada com superfície rugosa.
2,5 a 4	$\pm 43\%$ a $\pm 60\%$	Aperto com chave de impacto ou chave de impacto com controle de momento	Calibração do parafuso por meio de torque de reaperto, composto do torque de aperto necessário (para o coeficiente de atrito estimado) e um fator adicional.	Valores mais baixos para: * número grande de testes de calibração (torque de reaperto) * no segmento horizontal da característica do parafuso * transferência de momento livre de folga	

Fonte: Adaptado de VDI-2230 (2003).

Tabela 11 da VDI-2230 com os valores nominais para passo, diâmetro de passo, seção transversal ao diâmetro menor.

Dimensão	Passo	Diâmetro do passo	Seção transversal de tensão	Seção transversal no diâmetro menor	Carga no ponto de escoamento mínimo $F_{0,2 \text{ min}} = R_{P0,2 \text{ min}} \cdot A_S$		
					Classe de Resistência		
	P	d_2	A s	A d	8,8	10,9	12,9
	mm	mm	mm	mm ²	N	N	N
Rosca métrica padrão							
M4	0,7	3,545	8,78	7,749	5 600	8 300	9 700
M5	0,8	4,48	14,2	12,69	91 00	13 300	15 600
M6	1	5,35	20,1	17,89	12 900	18 900	22 100
M7	1	6,35	28,9	26,18	18 500	27 000	32 000
M8	1,25	7,188	36,6	32,84	23 400	34 500	40 500
M10	1,5	9,026	58	52,3	37 000	55 000	64 000
M12	1,75	10,863	84,3	76,25	54 000	79 000	93 000
M14	2	12,701	115	104,7	74 000	108 000	127 000
M16	2	14,701	157	144,1	100 000	148 000	173 000
M18	2,5	16,376	193	175,1	127 000	181 000	212 000
M20	2,5	18,376	245	225,2	162 000	230 000	270 000
M22	2,5	20,376	303	281,5	200 000	285 000	335 000
M24	3	22,051	353	324,3	233 000	330 000	390 000
M27	3	25,051	459	427,1	305 000	430 000	500 000
M30	3,5	27,727	561	519	370 000	530 000	620 000
M33	3,5	30,727	694	647,2	460 000	650 000	760 000
M36	4	33,402	817	759,3	540 000	770 000	900 000
M39	4	36,402	976	913	640 000	920 000	1 070 000

Fonte: Adaptado de VDI-2230 (2003).

Tabela 12 da VDI-2230 com os valores nominais para passo, diâmetro menor, diâmetro reduzido da haste e seção reduzida da haste.

Dimensão	Passo p	Diâmetro menor d ₃	Diâmetro reduzido da haste d _T	Seção transversal reduzida da haste A _T	Carga no ponto de escoamento mínimo F _{0,2 min} = R _{P0,2 min} . π / 4 (0,9 . d ₃) ²		
					Classe de Resistência		
					8,8	10,9	12,9
					N	N	N
Rosca métrica padrão							
M4	0,7	3,141	2,83	6,28	4000	5900	6900
M5	0,8	4,019	3,62	10,3	6600	9700	11300
M6	1	4,773	4,3	14,5	9300	13600	15900
M7	1	5,773	5,2	21,2	13600	19900	23300
M8	1,25	6,466	5,82	26,6	17000	25000	29500
M10	1,5	8,16	7,34	42,4	27000	40000	46500
M12	1,75	9,853	8,87	61,8	39500	58000	68000
M14	2	11,546	10,4	84,8	54000	80000	93000
M16	2	13,546	12,2	117	75000	110000	128000
M18	2,5	14,933	13,4	142	94000	133000	156000
M20	2,5	16,933	15,2	182	120000	171000	201000
M22	2,5	18,933	17	228	151000	214000	250000
M24	3	20,319	18,3	263	173000	247000	290000
M27	3	23,319	21	346	228000	325000	380000
M30	3,5	25,706	23,1	420	275000	395000	460000
M33	3,5	28,706	25,8	524	345000	495000	580000
M36	4	31,093	28	615	405000	580000	680000
M39	4	34,093	30,7	739	490000	700000	810000

Fonte: Adaptado de VDI-2230 (2003).