

SERGIO MASSAO HIROTA

**ANÁLISE DO TORQUE DE APERTO DE UMA UNIÃO APARAFUSADA COM
DIFERENTES PORCAS, PARAFUSOS E ARRUELAS**

Guaratinguetá - SP

2016

Sergio Massao Hirota

**ANALISE DO TORQUE DE APERTO DE UMA UNIÃO APARAFUSADA COM
DIFERENTES PORCAS, PARAFUSOS E ARRUELAS**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi

Guaratinguetá

2016

H668a	Hirota, Sergio Massao Análise do torque de aperto de uma união aparafusada com diferentes porcas, parafusos e arruelas / Sergio Massao Hirota – Guaratinguetá, 2016. 41 f : il. Bibliografia: f. 39 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva 1. Resistência de materiais 2. Lubrificação 3. Torque 4. Parafusos e porcas I. Título CDU 620.17
-------	--

SERGIO MASSO HIROTA

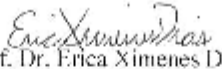
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Erica Ximenes Dias
UNESP-FEG


Prof. Dr. Marcio Augusto Martin
UNESP-FEG

Dezembro/2016

DADOS CURRICULARES

SERGIO MASSAO HIROTA

NASCIMENTO 10.04.1989 – SÃO PAULO/SP

FILIAÇÃO Flavio Tsutomu Hirota
 Regina Kimie Kakihara Hirota

2008/2016 Curso de Graduação
 Faculdade de Engenharia de Guaratingueta – Universidade
 Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho”

Aos pais e irmãs pelo apoio ao estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Flavio e Regina, pelo apoio e ajuda para eu ter essa vida e formação acadêmica.

Aos professores Dr. Fernando de Azevedo Silva e Dr. Erick Siqueira Guidi pela disponibilidade e pela ajuda nesta fase final da minha graduação.

Aos meus colegas de Projeto Formula SAE que devido a este projeto me tornei um engenheiro melhor.

Aos técnicos e funcionários da Faculdade de Guaratinguetá que me ajudaram em tarefas durante a graduação.

As funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

RESUMO

A união de peças por meio de parafusos é uma prática comum no mundo todo. Existem equações na literatura para estimar o torque de aperto de parafusos em juntas aparafusadas e este valor será comparado com casos reais. Neste trabalho será investigado o torque de aperto real aplicado ao parafuso até o escoamento do mesmo usando porcas, parafusos e arruelas diferentes, com e sem lubrificação em uma junta aparafusada. Foram usados parafusos sextavados, parafusos flangeados zincados, arruelas de aço inox 304 e aço carbono, porcas auto-travantes, flangeadas e sextavadas e lubrificante aerossol. Teoricamente, os valores de torque de escoamento calculados estão dentro da faixa de 13,8 N.m. e 24,4 N.m.. Nos experimentos foi encontrados valores entre 14,2 N.m. e 21,4 N.m com o uso de combinações dos elementos descritos anteriormente. Os experimentos mostram que o lubrificante intensifica a resistência do conjunto ao torque aplicado no parafuso, o material da arruela influencia na resistência ao máximo torque de aperto do parafuso, porcas auto-travantes com inserto de nylon são mais frágeis ao torque do que porcas sextavadas.

PALAVRAS-CHAVE: Junta Aparafusada. Torque. Lubrificação. Arruela. Porca

ABSTRACT

The material's assembling by screws is common used around the world. There are equations to determine the theoretical yield strength torque of a bolt. In this study, the torque is compared to real yield torque acquired experimentally of bolts using different nuts, bolts, whether use washers, with or without lubrication in a bolted joint. It was used hex bolt, head flange bolt, head flange nut, hex nut, nylon locknut, stainless steel 304 and carbon steel washer and aerosol lubricant. By yield strength torque theoretical calculations, the results should be between 13,8 N.m. and 24,4 N.m.. The experiments results were between 14,2 N.m. e 21,4 N.m.. It was concluded the yield load torque bolt increased using lubricant. When is used washers, the load on the bolted joint is affected by the washer made material. And bolted joint has a lower yield point using nylon locknut used comparing to hex nut.

KEYWORDS: Bolted Joint. Torque. Lubrication. Washer. Nut

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Representação de aperto de uma junta aparafusada pela porca.....	18
Figura 1 -	Flange com um parafuso flangeado.....	21
Figura 3 -	Flange com um parafuso flangeado – vista superior.....	21
Figura 4 -	Torquímetro com relógio e ponteiro de arraste.....	22
Figura 5 -	Leitor do torquímetro com relógio.....	22
Figura 6 -	Torquímetro de estalo.....	23
Figura 7 -	Leitor do torquímetro de estalo.....	23
Figura 8 -	Parafuso sem lubrificação após aplicação de torque em uma união aparafusada. Ensaio do conjunto.....	29
Figura 9 -	Parafuso flangeado com porca flangeada sem lubrificação após aplicação de torque próximo de 30,0 N.m.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Coeficiente de fricção de rosca.....	14
Tabela 2	-	Coeficiente de fricção sob a cabeça da porca ou parafuso.....	14
Tabela 3	-	Especificações métricas e resistências de parafusos de aço.....	17
Tabela 4	-	Conjuntos de prova do experimento.....	24
Tabela 5	-	Torques obtidos experimentalmente e sua média.....	26
Tabela 6	-	Comparação de torque médio. Variável - arruela de aço inox 304 sem lubrificação.....	28
Tabela 7	-	Comparação de torque médio. Variável- arruela de aço carbono sem lubrificação.....	29
Tabela 8	-	Comparação de torque médio. Variável- arruela de aço inox com lubrificação.....	30
Tabela 9	-	Comparação de torque médio. Variável - arruela aço inox 304 com porca auto-travante.....	30
Tabela 10	-	Comparação de torque médio. Variável- porca flangeada com lubrificação	32
Tabela 11	-	Comparação de torque médio. Variável- porca flangeada sem lubrificação	32
Tabela 12	-	Comparação de torque médio. Variável- lubrificação.....	33
Tabela 13	-	Comparação de torque médio. Variável- porcas auto-travantes com lubrificação.....	33
Tabela 14	-	Comparação de torque médio. Variável- porcas auto-travantes sem lubrificação.....	34
Tabela 15	-	Comparação de torque médio. Variável- porcas auto-travantes com lubrificação.....	35
Tabela 16	-	Valores das variáveis da equação 10.....	35
Tabela 17	-	Propriedades e dimensões do torque de escoamento do parafuso de aço sextavado.....	36

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Considerações gerais.....	11
1.2	Objetivo.....	11
1.3	Estrutura do trabalho de graduação.....	12
1.4	Referencias bibliográficas.....	12
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	13
2.1	O parafuso.....	13
2.2	Coeficiente de atrito	13
2.3	Tensões em roscas.....	15
2.4	Tensão axial.....	15
2.5	Porcas de travamento.....	16
2.6	Arruelas.....	16
2.7	Resistência de parafusos padronizados e parafusos de maquina.....	17
2.8	Pré-carga de junções em tração.....	17
2.9	Controle de pré-carga.....	18
2.10	Torquímetros.....	20
2.11	Tipos de torques.....	20
3	MATERIAIS E METODOS.....	21
4	RESULTADOS.....	26
4.1	Discussão dos Resultados.....	27
4.2	Calculo do coeficiente de torque.....	35
5	CONCLUSÃO.....	37
	REFERÊNCIAS.....	39
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	40
	APENDICE.....	41

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Uma das uniões de peças mais versáteis e conhecidas é a união de peças por meio de parafusos de fixação.

Juntas aparafusadas são constituídas geralmente de três elementos: o parafuso com rosca, a contra peça que é quem sofrerá toda resultante da força aplicada no momento do aperto e que não pode sofrer nenhuma deformação plástica, e por fim a porca com rosca interna (Garcia, 2007).

Esse tipo de união tem duas vantagens: fácil desmontagem da união e aplicação de força nos componentes da união das peças. Esta força é indiretamente relacionada ao torque aplicado à montagem do par parafuso e porca e este tipo de união é influenciada principalmente pelo atrito entre as partes dos membros que se tocam.

Como forma de melhorar o uso de uma união aparafusada, elementos como arruelas e lubrificantes são usados para evitar deformações na contra peça pela concentração de força da cabeça do parafuso ou da porca e maior intensidade de união da contra peça.

Na montagem de uniões aparafusadas, a variável que um operador tem mais controle é o torque de montagem do parafuso. Ele é o que irá gerar toda a sequência de induções de cargas nos elementos envolvidos na fixação. Saber qual o valor máximo de torque aplicado ao parafuso para o conjunto pode determinar se um equipamento irá falhar. A falha de um único parafuso pode gerar o colapso de toda uma estrutura ou máquina.

1.2 Objetivo

O objetivo primário deste trabalho é comparar a mudança de valores do torque de aperto de parafusos em uma união aparafusada com a introdução de arruelas e lubrificação com diferentes tipos de parafusos e porcas.

O objetivo secundário é comparar com valores teóricos e conferir se a teoria abrange os valores do experimento.

1.3 Revisão bibliográfica

J.C. Blake e H.J. Curtz (1965), publicaram resultados de numerosos ensaios de parafusos de porca determinando coeficientes de torque e respectiva pré-carga em parafusos lubrificados e não lubrificados.

D. Croccolo, M. De Agostinis, N. Vincenzi (2011), estudaram uma metodologia útil para determinar o coeficiente de fricção em juntas aparafusadas relacionando o torque de aperto do parafuso com a pré-carga. Foi usado um parafuso usado em suspensões frontais de motocicletas. Foi analisada a influência do recobrimento superficial do parafuso, lubrificação e torque aplicado ao parafuso. Foram feitas análises estatísticas com os resultados e validação por um software de elementos finitos.

1.4 Estrutura do trabalho de graduação

No capítulo 1 é apresentada a introdução, considerações gerais sobre o tema do trabalho, revisão bibliográfica e objetivo do trabalho.

No capítulo 2 são citados os fundamentos teóricos usados para o entendimento do tema.

No capítulo 3 são descritos os materiais e métodos para a realização dos ensaios experimentais.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios e análise de resultados e cálculos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do que foi investigado e sugestões para novos trabalhos sobre o assunto abordado.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 O parafuso

Os parafusos foram padronizados após a Segunda Guerra Mundial. Existem diversas entidades que padronizaram os parafusos. Por exemplo, a “Unified National Standard (UNS)” ou a International Standard Organization (ISO). É importante conhecer como é cada padrão, pois os parafusos seguem um padrão mundial com características definidas, o que o torna um elemento de máquinas fácil de adquirir em todo o mundo (Norton, 2014).

O parafuso é um elemento de fixação que une dois componentes. Ele pode ser dividido em cabeça e corpo. O corpo pode ter rosca no corpo inteiro ou em parte dele.

As roscas são hélices que fazem com que o parafuso avance sobre o material ou porca quando rotacionado. As roscas podem ser externas ou internas. Existem diversos tipos de padrão de rosca e cada um com vários formatos. As roscas podem ser quantificadas por passo. Cada passo é uma volta em torno do corpo do parafuso.

Uma rosca é especificada a partir de um código que define a sua série, diâmetro passo e classe de ajuste. Na norma ISO, ele é especificado no sistema métrico.

Existem diversos tipos de parafusos com diversos tipos formatos de cabeças. Os mais comuns são os de cabeça sextavada, cabeça para chave Allen e chave Philips. Existem outros tipos como o de cabeça flangeada que será usado nos ensaios deste trabalho.

2.1.1 Parafuso com cabeça flangeada

Contem uma flange que aumenta a superfície da cabeça do parafuso. Em materiais relativamente macios, ou quando são usados parafusos de alta tensilidade, deve-se considerar o uso de parafusos e porcas com cabeça flangeada. Estes fixadores reduzem a pressão na superfície sob a porca, reduzindo a quantidade de pré-carga perdida devido a incrustamento. Em virtude do grande diâmetro das faces de contato, em geral é necessário um torque maior, pois mais torque é dissipado por fricção (adaptado do catálogo GEDORE).

2.2 Coeficiente de atrito

Segundo Norton, experimentos indicam que o coeficiente de atrito em uma combinação parafuso-porca lubrificada por óleo vale cerca de $0,15 \pm 0,05$.

2.2.1 Coeficiente de fricção da rosca

Na Tabela 1 é apresentado valores orientativos para o coeficiente de fricção nas roscas para várias condições de acabamento de superfícies.

Tabela 1 - Coeficientes de fricção de rosca

Roscas Externas		Roscas Internas			
Aço		Roscas de Aço		Ferro Fundido	Alumínio
		Sem Cobertura	Zincado		
Sem cobertura ou fosfatizado	Seco	0,10 para 0,16	0,12 para 0,18	0,10 para 0,16	0,10 para 0,16
	Oleado	0,08 para 0,16	0,10 para 0,18	0,08 para 0,18	0,10 para 0,18
Zincado	Seco	0,12 para 0,20	0,12 para 0,22	0,10 para 0,17	0,12 para 0,20
	Oleado	0,10 para 0,18	0,10 para 0,18	0,10 para 0,16	0,10 para 0,18

Fonte: Catálogo GEDORE

2.2.2 Coeficiente da fricção sob a cabeça

Os valores são somente orientativos. Há uma quantidade de efeitos (tais como graxa ou óleo na superfície) que podem fazer com que o valor verdadeiro da fricção sob a cabeça esteja fora dos limites cotados.

Intervalos na Tabela 2 indicam a não disponibilidade de dados publicados. Existem poucas informações publicadas sobre o coeficiente de fricção sob a cabeça nos fixadores usados em superfícies cobertas. Um estudo relatou que o valor médio de fricção sob a cabeça em uma superfície coberta era de 0,21 com um limite extremo de 0,10 a 0,32 (GEDORE, 2004).

Tabela 2 - Coeficiente de fricção sob a cabeça da porca ou parafuso

(continua)

Condição da Cabeça ou da Porca do Parafuso	Condição da Peça Fixada pelo Parafuso			
	superfície de aço		ferro fundido	alumínio
	sem cobertura	zincado		
acabamento zincado	seco	0,12 para 0,20	0,16 para 0,22	0,10 para 0,20
	aplicação de óleo leve	0,10 para 0,18	0,10 para 0,18	0,10 para 0,18

Tabela 3 - Coeficiente de fricção sob a cabeça da porca ou parafuso

(conclusão)

Condição da Cabeça ou da Porca do Parafuso	Condição da Peça Fixada pelo Parafuso			
sem cobertura ou acabamento fosfatizado ou em óxido preto	seco	0,10 para 0,18	0,10 para 0,18	0,08 para 0,16
	aplicação de óleo leve	0,10 para 0,18	0,10 para 0,18	0,12 para 0,20

Fonte: Catálogo GEDORE

2.3 Tensões em roscas

Quando uma porca engaja um parafuso, teoricamente todos os filetes fazem com que praticamente toda a carga seja carregada pelo primeiro par de filete.

Na realidade, imprecisões no espaçamento dos filetes fazem com que praticamente toda a carga seja carregada pelo primeiro par de filetes. Assim o procedimento mais conservativo, utilizado no cálculo de tensões em filetes de rosca assume o pior caso em que um par de filetes suporta toda a carga. O outro extremo seria assumir que todos os filetes em contato compartilham a carga igualmente. Ambas as hipóteses podem ser utilizadas para estimar as tensões em filetes de rosca. A tensão verdadeira estará entre esses extremos, mas muito mais provavelmente próxima ao caso de carga compartilhada por um par de filetes apenas (Norton, 2004).

Parafusos de potência utilizados em casos envolvendo cargas altas são normalmente construídos de aço de alta resistência e geralmente são endurecidos. As porcas utilizadas nesses casos também podem ser feitas de material endurecido para modificar a resistência à tração e ao desgaste. Porcas de parafusos de fixação são frequentemente feitas de material mole e, portanto, normalmente mais fraco que aquele do parafuso. Isso causa escoamento local dos filetes de rosca da porca quando o parafuso é apertado, o que pode melhorar o ajuste de rosca e fazer com que os filetes de rosca compartilhem a carga. Porcas endurecidas são utilizadas com parafusos endurecidos de alta resistência (Norton, 2004).

2.4 Tensão axial

Um parafuso de fixação normalmente pode ser submetido a cargas axiais de tração ou compressão. Um parafuso de fixação normalmente sofre apenas carga axial de tração.

2.4.1 Área sob tração

Se uma barra rosqueada é submetida a uma carga de tração pura, é de se esperar que sua resistência seja limitada pela área do seu diâmetro menor ou de raiz d_r . Contudo, testes de barras rosqueadas sob tração mostram que a sua resistência a tração é melhor definida pela média dos diâmetros menor e primitivo. A área sob tração é definida como mostrado na equação 1:

$$A_t = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_p + d_r}{2} \right)^2 \quad (1)$$

Para roscas ISO:

$$d_p = d - 0,649519p \quad (2)$$

$$d_r = d - 1,226869p \quad (3)$$

Com d = diâmetro externo e p = passo em milímetros.

A tensão devido a uma carga axial de tração F é:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_t} \quad (4)$$

2.5 Porcas de travamento

São usadas para prevenir o afrouxamento espontâneo de porcas devido à vibração. Existem diversos tipos de porcas de travamento como por exemplo, porcas com inserto de nylon. O nylon flui nas folgas de rosca e agarra o parafuso (adaptado de Norton, 2014).

2.6 Arruelas

Uma arruela simples é uma parte plana, com forma de anel, que serve para aumentar a área de contato entre a cabeça do parafuso ou porca e a parte sujeitada. Arruelas de aço endurecidas são utilizadas quando a força de compressão da cabeça do parafuso sobre a parte sujeitada necessita ser distribuída sobre uma área maior que a área da cabeça do parafuso ou da porca. Uma arruela mais mole irá escoar em flexão ao invés de efetivamente distribuir a carga. Qualquer arruela simples também evita afundamento da superfície da parte quando a porca é apertada. As arruelas planas têm seus tamanhos idênticos aos padronizados do parafuso.

2.7 Resistência de parafusos padronizados e parafusos de máquina

Parafusos de porca e parafusos de máquina para aplicações estruturais ou casos de cargas pesadas devem ser escolhidos com base na sua resistência de prova S_p como definido nas especificações SAE, ASTM e ISO. Estas organizações definem graus ou classes para parafusos que especificam material, tratamento térmico e uma resistência mínima de prova para o parafuso.

A resistência mínima de prova S_p é a tensão sob a qual o parafuso começa a apresentar deformação permanente, e é próxima, porém inferior, à resistência de escoamento do material. O grau ou a classe de cada parafuso é indicado por marcas (ou a ausência das mesmas) na sua cabeça. Tais propriedades são encontradas em catálogos e livros como os dados apresentados na Tabela 3 (Norton, 2014).

Tabela 4 - Especificações métricas e resistências de parafusos de aço

Número de classe	Intervalo de diâmetro externo (mm)	Resistência mínima de prova (MPa)	Resistência mínima de escoamento (MPa)	Resistência mínima à tração (MPa)	Material
8.8	M3-M36	600	660	830	Carbono médio

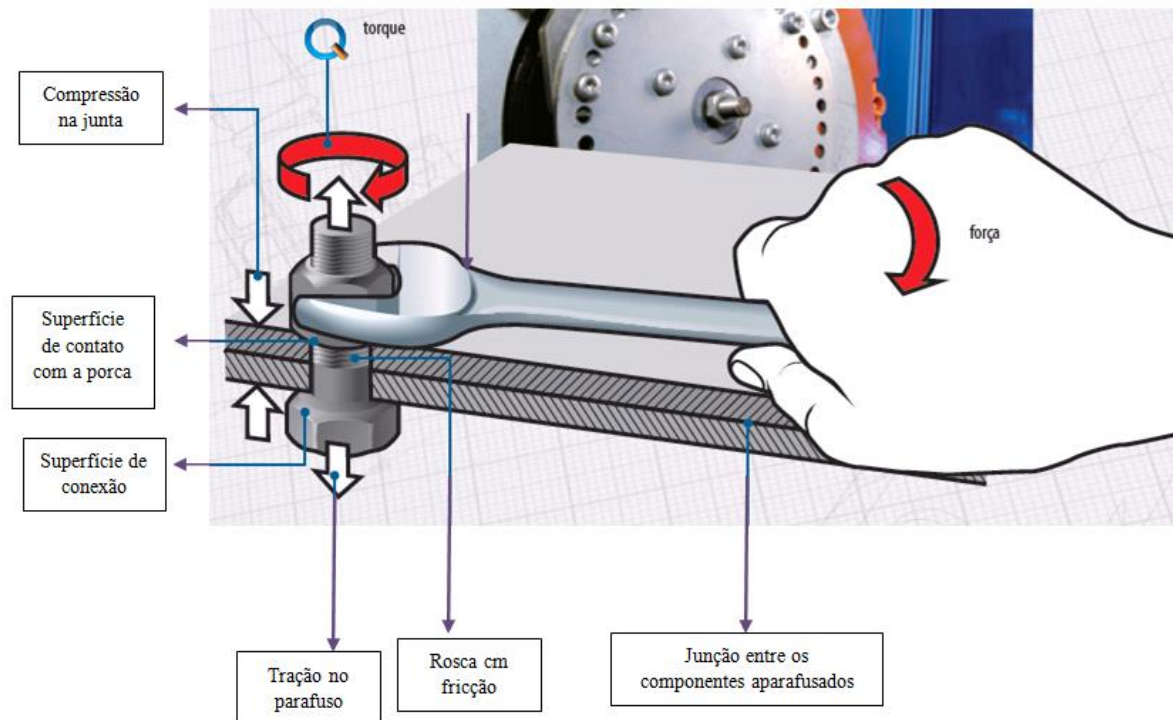
Fonte: Norton (2014)

2.8 Pré-carga de junções em tração

Uma das aplicações de parafusos e porcas é a de juntar peças em situações tais que as cargas aplicadas colocam o parafuso ou os parafusos em tração. Para montagens carregadas de forma estática, uma pré-carga que gera uma tensão no parafuso de até 90% da resistência de prova. Essa pré-carga e um bom dimensionamento do parafuso tornam pouco provável que os parafusos rompam em serviço se não quebrarem quando estão sendo tracionados.

A pré-carga é resultado do torque aplicado. É ilustrado na Figura 1, um torque em uma porca sendo aplicado por uma chave de fenda. Ao girar a porca, a rosca da porca entra em contato com a rosca do parafuso e o parafuso pode sofrer cargas de torção e de tração devido ao ângulo de hélice e geometria da rosca do parafuso.

Figura 2- Representação de aperto de uma junta aparafusada pela porca



Fonte: Adaptado do catálogo GEDORE

2.9 Controle de pré-carga

A quantidade de pré-carga é um fator importante no projeto do parafuso. Dessa forma, necessitamos algum meio de controlar a pré-carga aplicada a um parafuso.

Se a elongação do parafuso puder ser medida, pode ser aplicada a Equação 5 a seguir para achar a pré-carga no parafuso, entretanto não é usual um fácil acesso para ambas as extremidades do parafuso (adaptado de Shigley, 2011).

$$\delta = \frac{F_i \times l}{A_t \times E} \quad (5)$$

Onde:

δ = elongação do parafuso

F_i = pré-carga no parafuso

l = comprimento da haste do parafuso

A_t = área de tração do parafuso

E = módulo de elasticidade do parafuso

Um método conveniente, porém menos preciso, mede ou controla o torque aplicado à porca ou à cabeça de um parafuso de cabeça. Um torquímetro dá uma leitura em visor da quantidade de torque aplicado.

Considera-se que os torquímetros dão em geral um erro de até $\pm 30\%$ da pré-carga. Se for tomado bastante cuidado, e se as roscas forem lubrificadas (o que é sempre desejável), esse erro pode talvez ser diminuído à metade, mas ainda sim é alto (Norton, 2014).

O torque necessário para desenvolver uma pré-carga particular pode ser calculado com a equação 6, desenvolvida para parafusos de potência.

$$T_i = F_i \frac{d_p}{2} \frac{(\mu + \tan \lambda \cos \alpha)}{(\cos \alpha - \mu \tan \lambda)} + F_i \frac{d_c}{2} \mu_c \quad (6)$$

Onde:

λ = Ângulo radial de rosca

α = Ângulo de hélice

O ângulo λ pode ser calculado por meio da equação a seguir:

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{L}{\pi \times d_p} \quad (7)$$

Onde:

L = Passo do parafuso em mm

d_p = diâmetro de raiz em mm

O diâmetro primitivo d_p pode ser aproximado de forma grosseira pelo diâmetro do parafuso d , e o diâmetro médio do colar pode também ser aproximado de forma grosseira pelo diâmetro do parafuso e o tamanho-padrão de cabeça ou de porca de 1,5 d :

$$T_i = F_i \frac{d_p}{2} \frac{(\mu + \tan \lambda \cos \alpha)}{(\cos \alpha - \mu \tan \lambda)} + F_i \frac{1+1,5 d}{4} \mu_c \quad (8)$$

A fatorização da força e do diâmetro do parafuso produz

$$T_i = K_i F_i d \quad (9)$$

Onde:

$$K_i \cong \left[0,50 \frac{(\mu + \tan \lambda \cos \alpha)}{(\cos \alpha - \mu \tan \lambda)} + 0,625 \mu_c \right] \quad (10)$$

K_i é chamado de coeficiente de torque.

O coeficiente de atrito μ_c entre a cabeça do parafuso ou porca e as superfícies, bem como o coeficiente de atrito nas roscas μ , contribuem para o coeficiente de torque K_i . O valor de K_i varia pouco ao longo dos diversos tamanhos de rosca. Assim, o torque de aperto T_i requerido para a obtenção de determinada pré-carga F_i em roscas lubrificadas pode ser aproximado (desde que objeto das hipóteses de atrito listadas acima) como:

$$T_i = 0,21 F_i d \quad (11)$$

2.10 Torquímetros

Existem diversos tipos de torquímetros. Os torquímetros com relógio permitem ao operador observar o torque aplicado do começo ao fim do processo de aperto, diferente de torquímetros que sinalizam quando o torque programado é atingido. Possuem, ainda, ponteiro de arraste que permite ao operador uma leitura precisa do torque máximo aplicado.

2.11 Tipos de torques

Torque Dinâmico: É o valor pico de torque medido em tempo real em apertadeira (elétrica-eletrônica) com controle de torque durante a operação de aperto. Os valores de Torque obtidos são registrados eletronicamente na apertadeira. Desta forma, o torque dinâmico não poderá ser checado após sua aplicação (apenas monitorado). Quando empregado em apertadeira sem controle de torque, é conhecido como o ‘torque de “set-up” da apertadeira.

Torque Estático : É o valor de Torque medido em apertadeira sem controle de Torque. O “set-up” da apertadeira corresponde ao valor do torque dinâmico, e na sua ausência, geralmente, ao valor médio do Torque Estático. O torque estático também é aplicado como ‘torque de verificação’ quando da auditagem de torques. Neste caso, corresponde ao torque de Aperto requerido para iniciar a quebra de uma fixação já efetuada. Outra denominação para o torque estático é “torque residual”.

Torque Falso: É quando o equipamento aplica um Torque especificado, sem gerar a respectiva Força Tensora. Isto normalmente acontece quando há um fator agravante, como por exemplo, rosca extremamente deformada, na qual pode ocorrer um pico de torque nominal (Garcia, 2008).

3 MATERIAIS E METODOS

Foram utilizados no experimento: parafusos sextavados M6 x 1,0 grau 8.8 e comprimento de 30,0 mm, parafusos flangeados zincados M6 x 1,0 grau 8.8 com comprimento de 25 mm, porcas sextavada M6 classe 8, porcas auto-travantes com inserto de nylon M6, porcas flangeadas M6 classe 8, arruelas lisas de aço carbono e aço inox 304 para parafusos M6. Foi usado um lubrificante de aerosol. Foi utilizado uma flange usinado em aço SAE 1045 com espessura de 15,5 mm conforme Figura 2 e Figura 3. Ela foi fixada através de uma morsa em uma mesa de bancada.

Figura 3 - Flange com um parafuso flangeado



Fonte: Autor

Figura 3 - Flange com um parafuso flangeado – vista superior



Fonte: Autor

Para a medição do torque foi usado um torquímetro com relógio e ponteiro de arraste marca Torqueleader ads 25 ilustrado na Figura 4 e Figura 5, com capacidade 0-27 N.m e divisão de escala 1,0 N.m e um torquímetro de estalo marca Gedore L120 flex-o-click N° 4566, capacidade 30-160 N.m, divisão da escala 10 N.m com erro máximo de $\pm 7\%$ conforme Figura 6 e Figura 7.

Figura 4 - Torquímetro com relógio e ponteiro de arraste



Fonte: Autor

Figura 5 – Leitor do torquímetro com relógio



Fonte: Autor

Figura 6- Torquímetro de estalo



Fonte: Autor

Figura 7- Leitor do torquímetro de estalo



Fonte: Autor

3.1 Método

Os parafusos, porcas e arruelas foram separados em conjuntos de prova conforme Tabela 4:

Tabela 5 - Conjuntos de prova do experimento

Conjunto	Descrição			
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação
1	Sextavado	Sextavada	-	-
2	Sextavado	Sextavada	Inox 304	-
3	Sextavado	Sextavada	Aço carbono	-
4	Sextavado	Sextavada auto-travante	-	-
5	Sextavado flangeado	Flangeada	-	-
6	Sextavado	Flangeada	Inox 304	-
7	Sextavado	Sextavada	-	Com
8	Sextavado	Sextavada	Inox 304	Com
9	Sextavado	Sextavada auto-travante	-	Com
10	Sextavado flangeado	Flangeada	-	Com
11	Sextavado	Sextavada auto-travante	Inox 304	Com
12	Sextavado	Flangeada	-	Com

Fonte: Autor

Nota: Sinal utilizado:

- Sem o elemento referente á descrição

Cada conjunto foi fixado na flange, sendo que a cabeça do parafuso ficou na parte superior da flange conforme Figura 2. Encostando uma chave de boca sextavada tamanho 10 em um dos pilares da contra peça, a porca foi fixada.

O torque foi aplicado à cabeça do parafuso por meio do torquímetro com relógio até haver um valor fixo ou abaixar o valor de torque. Em casos que o valor atingisse o fundo de

escala do leitor de relógio do torquímetro, foi utilizado o torquímetro de estalo para ter valores de referencia para futuros estudos.

Foram feitos dois ensaios de cada conjunto. Caso houvesse grande divergência, aconteceria um terceiro ensaio. Primeiro foi feito ensaios sem lubrificação que foram os conjuntos de um a seis e em seguida os lubrificados que são os conjuntos de sete a doze.

Foram comparados pelo valor do torque médio das amostras conjuntos dois a dois. Com base no valor do torque obtido foi avaliado o efeito das variáveis: arruela, lubrificação e porca ou parafuso flangeado de forma absoluta e relativa.

Foram feitos cálculos para achar o torque de escoamento teórico para o conjunto e comparados os torques experimentais para cada conjunto para saber se a teoria identificaria o torque de aperto real.

4 RESULTADOS

Na Tabela 5, são mostrados os valores de torque adquiridos para cada conjunto com sua respectiva média do valor do torque.

Os conjuntos 5 e 10 ultrapassaram o limite de escala do torquímetro de relógio que é 27,0 N.m. Posteriormente foram feitos testes com um torquímetro de estalo que o parafuso rompeu com torque abaixo de 30,0 N.m no conjunto 10.

Tabela 6 - Torques obtidos experimentalmente e sua média

(continua)

Conjunto	Descrição			
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação
1	Sextavado	Sextavada	-	-
2	Sextavado	Sextavada	Inox 304	-
3	Sextavado	Sextavada	Aço carbono	-
4	Sextavado	Sextavada auto-travante	-	-
5	Sextavado flangeado	Flangeada	-	-
6	Sextavado	Flangeada	Inox 304	-
7	Sextavado	Sextavada	-	Com
8	Sextavado	Sextavada	Inox 304	Com
9	Sextavado	Sextavada auto-travante	-	Com
10	Sextavado flangeado	Flangeada	-	Com
11	Sextavado	Sextavada auto-travante	Inox 304	Com
12	Sextavado	Flangeada	-	Com

Tabela 7 - Torques obtidos experimentalmente e sua média

					(conclusão)
Conjunto	Descrição				
	Torque (N.m)			Torque Médio (N.m)	
1	17,2	17,2	-	17,2	
2	19,1	18,9	-	19	
3	18,1	16,9	16,1	17	
4	14,2	15	15,6	14,9	
5	-	-	-	-	
6	19,9	20,2	-	20	
7	19,5	20	-	19,7	
8	20,9	21,5	22,4	21,6	
9	17,9	18	18,9	18,3	
10	-	-	-	-	
11	18,5	19	-	18,7	
12	16,9	18,5	-	17,7	

Fonte: Autor

Notas: Sinais utilizados

- Sem o elemento referente á descrição seja medição ou elemento físico

-- Sem medição devido ao valor passar do fundo da escala do torquimetro.

4.1 Discussão dos Resultados

As análises a seguir são em relação ao efeito que arruelas, porcas, parafusos e lubrificação podem causar em uniões aparafusadas, sendo que os focos são: o torque médio de cada situação e quanto cada um dos quatro elementos acima podem alterar o torque.

4.1.1 Análise do efeito da arruela

Um conjunto que não houve a inserção de arruela foi usado como referência. Foram comparados com conjuntos que foram inseridos arruelas.

Houve um aumento de resistência ao torque, ao observar observado o efeito da arruela de aço inox 304 em um conjunto não lubrificado de acordo com os dados da Tabela 6.

Tabela 8 - Comparação de torque médio. Variável: arruela de aço inox 304 sem lubrificação

Conjunto	Descrição				Torque Médio (N.m)
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação	
1	Sextavado	Sextavada	-	-	17,2
2	Sextavado	Sextavada	Inox 304	-	19,0
Variação do Valor do Torque Médio Entre os Conjuntos					
Variação (N.m)			Variação (%)		
1,8			10,5		

Fonte: Autor

Os valores encontrados de torques de escoamento do conjunto contendo arruelas de aço carbono sem lubrificação foram mais dispersos, entretanto a média dos valores foi próxima a média do conjunto sem arruela. Foi observado o efeito da arruela de aço inox 304 em um conjunto não lubrificado de acordo com os dados da Tabela 7. Como os valores de torque adquiridos do conjunto 1 não tiveram variações, é inconclusivo identificar se a arruela faz com que o torque seja maior.

Tabela 9 - Comparação de torque médio. Variável: arruela de aço carbono sem lubrificação

Conjunto	Descrição				Torque Médio (N.m)
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação	
1	Sextavado	Sextavada	-	-	17,2
3	Sextavado	Sextavada	Aço carbono	-	17,0

Variação do Valor do Torque Médio Entre os Conjuntos	
Variação (N.m)	Variação (%)
0,2	1,0

Fonte: Autor

Durante os ensaios, o conjunto 1,2 e 3 tiveram torque seco, com a destruição da rosca do parafuso. A Figura 8 ilustra o que aconteceu com o parafuso e a porca.

Figura 8 - Parafuso sem lubrificação após aplicação de torque em uma união aparafusada.

Ensaio do conjunto 1



Fonte: Autor

Uniões aparafusadas com arruela e lubrificação mostraram ser mais resistentes ao torque de aperto até o escoamento do parafuso do que o mesmo sem lubrificação. Este resultado pode ser observado de acordo com a Tabela 8.

Tabela 10 - Comparação de torque médio. Variável: arruela de aço inox 304 com lubrificação

Conjunto	Descrição				Torque Médio (N.m)
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação	
2	Sextavado	Sextavada	Inox 304	-	19,0
8	Sextavado	Sextavada	Inox 304	Com	21,6
Variação do Valor do Torque Médio Entre os Conjuntos					
Variação (N.m)			Variação (%)		
2,6			13,7		

Fonte: Autor

Em um conjunto sem arruela e sem lubrificação, valores médios de torque de escoamento foram de 17,2 N.m. Após adicionar ambos, usado arruelas de aço inox 304, o valor médio subiu para 21,6 N.m. o que é um aumento de resistência de 4,4 N.m. ou quase 25%.

De acordo com os resultados da tabela 9, a arruela tem pouca influência quando usado porcas com inserto de nylon e lubrificação.

Tabela 11 – Comparação de torque médio. Variável: Arruela aço inox 304 com porca auto-travante

(continua)					
Conjunto	Descrição				Torque Médio (N.m)
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação	
9	Sextavado	Sextavada auto-travante	-	Com	18,3

Tabela 12 – Comparação de torque médio. Variável: Arruela aço inox 304 com Porca auto-travante

(conclusão)					
11	Sextavado	Sextavada auto-travante	Inox 304	Com	18,7
Variação do Valor do Torque Médio Entre os Conjuntos					
Variação (N.m)			Variação (%)		
0,4			2,2		

Fonte: Autor

4.1.2 Análise do efeito da porca e do parafuso flangeado

As análises a seguir são similares aos anteriores só que os elementos analisados são as porcas e parafusos flangeados.

Foi possível constatar que os conjuntos com porca flangeada e parafuso flangeados resistiram a torques maiores que 27,0 N.m independente de lubrificação ou não e que o parafuso se rompeu ao ser aplicado torques abaixo de 30,0 N.m. A Figura 9 ilustra o que aconteceu com o parafuso flangeado.

Figura 9- Parafuso flangeado com porca flangeada sem lubrificação após aplicação de torque próximo de 30,0 N.m.



Fonte: Autor

De acordo com a Tabela 10, houve uma diminuição do torque de escoamento do parafuso com a troca de uma porca sextavada de aço com uma porca flangeada.

Tabela 13 - Comparação de torque médio. Variável: porca flangeada com lubrificação

Conjunto	Descrição				Torque Médio (N.m)
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação	
7	Sextavado	Sextavada	-	Com	19,7
12	Sextavado	Flangeada	-	Com	17,7
Variação do Valor do Torque Médio Entre os Conjuntos					
Variação (N.m)			Variação (%)		
2,0			11,6		

Fonte: Autor

Trocando as arruelas de inox 304 e a porca sextavada por uma porca flangeada, houve um aumento do torque de escoamento do parafuso. Os valores estão descritos na Tabela 11.

Tabela 14 - Comparação de torque médio. Variável: porca flangeada sem lubrificação

Conjunto	Descrição				Torque Médio (N.m)
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação	
2	Sextavado	Sextavada	Inox 304	-	19,1
6	Sextavado	Flangeada	Inox 304	-	20,0
Variação do Valor do Torque Médio Entre os Conjuntos					
Variação (N.m)			Variação (%)		
1,0			5,3		

Fonte: Autor

4.1.3 Análise do efeito da lubrificação

Em princípio, a lubrificação aumenta o valor do torque de escoamento do parafuso. Os resultados podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 15 - Comparação de torque médio. Variável: lubrificação

Conjunto	Descrição				Torque Médio (N.m)
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação	
1	Sextavado	Sextavada	-	-	17,2
7	Sextavado	Sextavada	-	Com	19,7
Variação do Valor do Torque Médio Entre os Conjuntos					
Variação (N.m)			Variação (%)		
2,5			14,5		

Fonte: Autor

O efeito da lubrificação combinado com arruelas é de aumento de resistência de torque. O resultado pode ser visto anteriormente na tabela 8.

Há significativo aumento do torque de escoamento do parafuso sextavado ao aplicar lubrificação ao usar porcas auto-travantes ao ver os resultados da Tabela 13.

Tabela 16 - Comparação de torque médio. Variável: porcas auto-travantes com lubrificação

(continua)

Conjunto	Descrição				Torque Médio (N.m)
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação	
4	Sextavado	Sextavada auto-travante	-	-	14,2
9	Sextavado	Sextavada auto-travante	-	Com	18,3

Tabela 17 - Comparação de torque médio. Variável: porcas auto-travantes com lubrificação

(conclusão)	
Variação do Valor do Torque Médio Entre os Conjuntos	
Variação (N.m)	Variação (%)
3,4	22,8

Fonte: Autor

Durante a realização dos experimentos, os conjuntos lubrificados não tiveram torque seco.

4.1.4 Análise do efeito de porcas auto-travantes

Ao substituir a porca de aço de um conjunto de parafuso e porca por uma porca auto-travante, a resistência do parafuso ao escoamento diminuiu independente de aplicar lubrificação ou não ao parafuso. Isto pode ser notado nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 18- Comparação de torque médio. Variável: porcas auto-travantes sem lubrificação

Conjunto	Descrição				Torque Médio (N.m)
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação	
1	Sextavado	Sextavada	-	-	17,2
4	Sextavado	Sextavada auto-travante	-	-	14,2
Variação do Valor do Torque Médio Entre os Conjuntos					
Variação (N.m)			Variação (%)		
2,3			13,4		

Fonte: Autor

Tabela 19 - Comparação de torque médio. Variável: porcas auto-travantes com lubrificação

Conjunto	Descrição				Torque Médio (N.m)
	Parafuso	Porca	Arruela	Lubrificação	
7	Sextavado	Sextavada	-	Com	19,5
9	Sextavado	Sextavada auto-travante	-	Com	17,9
Variação do Valor do Torque Médio Entre os Conjuntos					
Variação (N.m)			Variação (%)		
1,4			7,1		

Fonte: Autor

4.2 Cálculo do coeficiente de torque teórico

Foram utilizados as informações da Tabela 16 para o cálculo dos possíveis coeficiente K_i teórico, onde λ foi obtido por meio da equação (7) e K_i da equação (10).

Tabela 20 - Valores das variáveis da equação 10

Variável	Valor
α	60°
λ	3,34
$\cos \alpha$	0,5
$\tan \lambda$	0,067

Fonte: Autor

Foram usados as informações do coeficiente de atrito entre rosas (μ) e entre superfícies (μ_c) de acordo com as Tabelas 1 e 2. As faixas de valores foram aplicadas para achar os possíveis valores de K_i . Os resultados dos cálculos estão no apêndice A. Na combinação de conjuntos com parafuso sextavado sem lubrificação, μ varia entre 0,10 e 0,16 e μ_c 0,10 e 0,18. Em conjuntos com lubrificação, μ varia entre 0,08 e 0,16 e μ_c varia entre 0,10 e 0,18.

Para conjuntos sem lubrificação, K_i varia entre 0,194 e 0,306, e para conjuntos com lubrificação, K_i varia entre 0,173 e 0,306.

Foi calculado o torque necessário para o escoamento do parafuso baseado na equação (9) com as variáveis definidas na tabela 17 e dos possíveis coeficientes de torque K_i .

Isolando a força F da equação (4), e usando o valor da resistência mínima de escoamento S_y e da área do parafuso A da Tabela 17 foi encontrado a força teórica de escoamento no parafuso $F_y = 13,3$ kN.

Tabela 21 - Propriedades e dimensões do torque de escoamento do parafuso de aço sextavado

Variável	Valor
S_y (MPa)	660
A (mm ²)	20,12
d (mm)	6,00

Fonte: Autor

Onde:

S_y = tensão de escoamento do parafuso ou resistência mínima de escoamento

Usando a força de escoamento teórico, o diâmetro do parafuso, e os possíveis valores do coeficiente K_i calculados anteriormente foi possível achar o intervalo do torque teórico de escoamento do parafuso sextavado pela equação (8). Os possíveis valores de torque de escoamento teórico em função de μ_c e μ estão calculados e mostrados no anexo B.

Para conjuntos sem lubrificação e usando parafuso sextavado, o torque de escoamento varia entre 15,5 N.m. e 24,4 N.m. sendo que o valor médio é 19,95 N.m. e a variação de valores a partir do valor médio é aproximadamente 22%.

Para conjuntos com lubrificação e usando parafuso sextavado, o torque de escoamento teórico varia entre 13,8 N.m e 24,4 N.m. A média desses valores é 19,1 N.m e a variação de valores a partir deste ultimo valor médio é aproximadamente 28%.

Um fato em destaque é a alta dispersão de resultados teóricos, ou seja, o valor real do atrito define a pré-carga real na junta aparafusada e os elementos que estão sendo usados. Os valores encontrados nos ensaios se encontram nas duas faixas de valor.

5 CONCLUSÃO

Houve dez comparações que avaliaram a influência da adição de lubrificação, de arruelas, porcas e parafusos diferentes do sextavado. Pode-se concluir em termos de torque de escoamento do parafuso:

Ao se analisar arruelas lisas de diferentes materiais, foi observado que arruelas feitas de materiais mais resistentes, mais torque é necessário para o parafuso escoar. Com materiais menos resistentes, a arruela teve pouca influencia ao escoamento do parafuso.

De acordo com os experimentos, o parafuso consegue suportar mais torque ao usar arruelas lisas de aço inox 304.

Em relação á lubrificação, o lubrificante aumenta a resistência do parafuso ao torque.

Em relação ao uso de porcas auto-travantes, foi observado que a união aparafusada resiste menos torque ao usar elas comparado ao uso de porca sextavada. Não há muita diferença ao usar arruelas de aço inox 304 com porcas auto-travantes com inserto de nylon e lubrificante

É necessário mais torque para escoar parafusos flangeados, porém, porcas flangeadas não têm a mesma lógica. Em conjuntos lubrificados a porca flangeada aumentou a resistência ao torque, e a porca flangeada diminuiu em conjuntos não lubrificados.

Os valores experimentais têm variações, por isso não é possível afirmar um valor que aplicando um torque e combinando certos elementos não haverá escoamento do parafuso.

Com o uso de somente um torquímetro não é possível prever qual torque máximo pode ser usado no parafuso, é necessário saber qual o coeficiente de atrito entre os componentes da união aparafusada para cada conjunto.

Os cálculos teóricos de torque para o escoamento do parafuso abrangeram todos os valores obtidos nos experimentos. Os valores de torque de escoamento calculados estão dentro da faixa de 13,8 N.m. e 24,4 N.m. e os torques de escoamento experimentais entre 14,2 N.m. e 21,4 N.m., ou seja, neste caso a equação (8) poderia ser usada para um caso geral de combinações de arruelas, porcas e parafusos em uma junta aparafusada e achar o valor do torque da situação do experimento.

Sugiro alguns estudos que podem melhorar a compreensão do tema abordado:

Avaliar a torção no parafuso com coleta de dados reais de cada conjunto analisado com as deformações do parafuso. Essa informação serviria para obter a tensão combinada no parafuso e estimar a tensão no conjunto através do círculo de Mohr ou usando métodos de elementos finitos.

Aplicar algum método de obtenção do coeficiente de atrito entre a rosca do parafuso e da porca e entre a arruela ou parafuso ou porca e a superfície da junta de cada conjunto para determinar a máxima pré-carga no parafuso e na flange e pode obter outros valores para definir o torque até o escoamento do parafuso sem experimentos adicionais, e fornecer informações para simulação de elementos finitos para futuros estudos.

Fazer mais testes com os conjuntos para saber se os resultados obtidos experimentalmente são confiáveis e diminuir a dispersão de valores de torque de escoamento possíveis.

REFERÊNCIAS

- CROCCOLO, D.; De AGOSTINIS M.; VINCENZI, N. Failure analysis of bolted joints: effect of friction coefficients in torque–preloading relationship. **Engineering failure anaysis**. v.18, n. 1, jan. 2011, p 364-373.
- GARCIA, R. Conceitos gerais sobre torque e processos de torque: parte 1. **Revista do Parafuso**, 7.ed., 2007. Disponível em: <<http://www.revistadoparafuso.com.br/>>. Acesso em: 30 nov. 2016.
- GARCIA, R. Conceitos gerais sobre torque e processos de torque: parte 2. **Revista do Parafuso**, 8.ed., 2008. Disponível em: <<http://www.revistadoparafuso.com.br/>>. Acesso em: 30 nov. 2016.
- GEDORE. **Torquímetros e acessórios**. Disponível em: <<http://www.gedore.com.br/>>. Acesso em: 2 nov. 2016.
- BLAKE, J.C.; CURTZ, H.J. Uncertainties of mesuring fastener preload. **Machine design**, v.37, p. 128-131, set. 1965.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 8.. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 960p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CAVALCA, T.F. **Avaliação da influência do formato da porca e da pré-carga em juntas aparafusadas em tração**. 2015. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

CESTARO, L. F. **Análise da influência do torque de montagem na resistência de parafusos de fixação**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012. CD-Rom.

GUIDI, E. S. **Influência de parâmetros construtivos e operacionais na vida em fadiga de unioes aparafusadas em tração**. 2013. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

APENDICE

Apêndice A– Valores do coeficiente de torque em função do coeficiente de atrito e do coeficiente de atrito da cabeça do parafuso sextavado

Coeficientes de torque K_t em função de $(\mu_c \backslash \mu)$													
$\mu_c \backslash \mu$	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
0,08	0,161	0,171	0,181	0,192	0,202	0,212	0,223	0,233	0,243	0,254	0,264	0,275	0,285
0,09	0,167	0,177	0,188	0,198	0,208	0,219	0,229	0,239	0,250	0,260	0,271	0,281	0,292
0,1	0,173	0,184	0,194	0,204	0,214	0,225	0,235	0,246	0,256	0,266	0,277	0,287	0,298
0,11	0,180	0,190	0,200	0,210	0,221	0,231	0,241	0,252	0,262	0,273	0,283	0,294	0,304
0,12	0,186	0,196	0,206	0,217	0,227	0,237	0,248	0,258	0,268	0,279	0,289	0,300	0,310
0,13	0,192	0,202	0,213	0,223	0,233	0,244	0,254	0,264	0,275	0,285	0,296	0,306	0,317
0,14	0,198	0,209	0,219	0,229	0,239	0,250	0,260	0,271	0,281	0,291	0,302	0,312	0,323
0,15	0,205	0,215	0,225	0,235	0,246	0,256	0,266	0,277	0,287	0,298	0,308	0,319	0,329
0,16	0,211	0,221	0,231	0,242	0,252	0,262	0,273	0,283	0,293	0,304	0,314	0,325	0,335
0,17	0,217	0,227	0,238	0,248	0,258	0,269	0,279	0,289	0,300	0,310	0,321	0,331	0,342
0,18	0,223	0,234	0,244	0,254	0,264	0,275	0,285	0,296	0,306	0,316	0,327	0,337	0,348

Fonte: Autor

Apêndice B – Valores de torque de escoamento do parafuso em função do coeficiente de atrito e do coeficiente de atrito da cabeça do parafuso sextavado

Valores de torques de escoamento do parafuso em função de $(\mu_c \backslash \mu)$													
$\mu_c \backslash \mu$	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
0,08	12,8	13,6	14,5	15,3	16,1	16,9	17,8	18,6	19,4	20,2	21,1	21,9	22,8
0,09	13,3	14,1	15,0	15,8	16,6	17,4	18,3	19,1	19,9	20,7	21,6	22,4	23,3
0,1	13,8	14,6	15,5	16,3	17,1	17,9	18,8	19,6	20,4	21,2	22,1	22,9	23,8
0,11	14,3	15,1	16,0	16,8	17,6	18,4	19,3	20,1	20,9	21,7	22,6	23,4	24,3
0,12	14,8	15,6	16,5	17,3	18,1	18,9	19,7	20,6	21,4	22,2	23,1	23,9	24,8
0,13	15,3	16,1	17,0	17,8	18,6	19,4	20,2	21,1	21,9	22,7	23,6	24,4	25,3
0,14	15,8	16,6	17,5	18,3	19,1	19,9	20,7	21,6	22,4	23,2	24,1	24,9	25,7
0,15	16,3	17,1	17,9	18,8	19,6	20,4	21,2	22,1	22,9	23,7	24,6	25,4	26,2
0,16	16,8	17,6	18,4	19,3	20,1	20,9	21,7	22,6	23,4	24,2	25,1	25,9	26,7
0,17	17,3	18,1	18,9	19,8	20,6	21,4	22,2	23,1	23,9	24,7	25,6	26,4	27,2
0,18	17,8	18,6	19,4	20,3	21,1	21,9	22,7	23,6	24,4	25,2	26,1	26,9	27,7

Fonte: Autor