



Investigação da influência do revestimento de fixadores e condição de lubrificação na relação torque x pré-carga na montagem de Flanges API

Felipe Sarabando D' Oliveira^a <https://orcid.org/0009-0000-7807-1675>

Antonio Lopes Gama^a <https://orcid.org/0000-0002-3493-1159>

^a Universidade Federal Fluminense - UFF, Programa de Pós-Graduação em Montagem Industrial, Niterói, RJ, Brasil

Resumo: O presente trabalho investiga a influência de diferentes tipos de revestimento e condições de lubrificação na relação entre o torque aplicado e a pré-carga gerada em fixadores durante a montagem de flanges API de equipamentos submarinos. Para tal, desenvolveu-se um procedimento experimental, no qual foram realizados diversos ensaios de torque, simulando condições de montagem que utilizaram combinações de amostras de fixadores de dois diâmetros nominais (3/4" e 1.1/2"), com dois tipos de revestimento: cádmio bicromatizado eletrodepositado e revestimento orgânico de bissulfeto de molibdênio. As condições de lubrificação investigadas no experimento foram duas: a seco e com graxa à base de bissulfeto de molibdênio. A medição da pré-carga gerada no fixador foi determinada por meio de células de carga desenvolvidas especificamente para este trabalho. Essas células dispõem de extensômetros para leitura do carregamento axial desenvolvido no fixador mediante à aplicação de valores de torque, de forma controlada com medição por meio de torquímetro digital e transdutores de torque. As mesmas células de carga também foram instrumentadas com extensômetros biaxiais com o objetivo de medir o torque resistivo gerado pelo atrito das faces do fixador com a célula durante a aplicação do torque. Para as amostras de estojos de cádmio e bissulfeto de molibdênio de 1.1/2" com aplicação de graxa, também foi utilizado o método de medição de tensão por ultrassom para verificação da pré-carga, para efeito de comparação com os valores lidos pelas células de carga. Ao realizar a análise dos resultados advindos dos ensaios e de posse das expressões para cálculo do torque x pré-carga presentes na literatura, foi possível calcular o valor do coeficiente de atrito médio para cada condição, permitindo determinar-se, então, a influência de cada fator na relação entre torque e pré-carga.

Palavras-chave: torque, pré-carga, coeficiente de atrito, parafuso, flange api.

Abstract: This study investigates the influence of different types of coating and lubrication conditions on the relation between the torque applied and the preload generated on fasteners during the assembly of API flanges on subsea equipment. To perform such investigation, an experimental procedure was developed in which several torque tests were carried out

simulating assembly conditions using fasteners of two different nominal diameter sizes (3/4" e 1.1/2"), with two types of coating (cadmium dichromate plating and molybdenum disulfide organic coating) and under two lubrication conditions (dry and with molybdenum disulfide based grease). The magnitude of the preload generated on the fastener is obtained by measuring the axial elongation of the fastener using load cells explicitly developed for this work. These load cells have strain gauges attached to them to determine the preload at each torque value applied to the fastener (for the 1.1/2" greased studs condition was also used the ultrasonic method for measurement of the pre-load to compare its results to the preload measured by the load cell). These torque values are, therefore, measured by digital torque wrenches and torque transducers. After performing an analysis of the test results and with the torque-preload formulas provided by the literature in hand, the value of the friction coefficient can be calculated, therefore allowing to determine the influence of each given factor in the torque x preload relation. Biaxial strain gauges installed on the load cells also allowed the gathering of data on the resistive torque generated by the friction between the fastener underhead and the load cell surface to be further investigated.

Keywords: torque: preload, friction coefficient, bolt, api flange.

Como citar: D' OLIVEIRA, F. S., GAMA, A. L., **Investigação da influência do revestimento de fixadores e condição de lubrificação na relação torque x pré-carga na montagem de Flanges API.** *Engevista*, vol. 22, n.1, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, 2024.

Autor para contato: Felipe Sarabando D' Oliveira. E-mail: felipe_sarabando@hotmail.com

Financiamento: Nenhum.

Conflito de interesse: Nada a declarar.

1 INTRODUÇÃO

Um dos métodos de união mais utilizados em tubulações de equipamento de óleo e gás submarinos é a união por junta de flange composta por um anel metálico (responsável por promover a vedação da junta) comprimido pelos dois flanges dos componentes que se deseja conectar. A compressão desta junta se dá por meio da aplicação de uma força compressiva conhecida como pré-carga aos fixadores dos flanges (em geral estojos/prisioneiros e porcas).

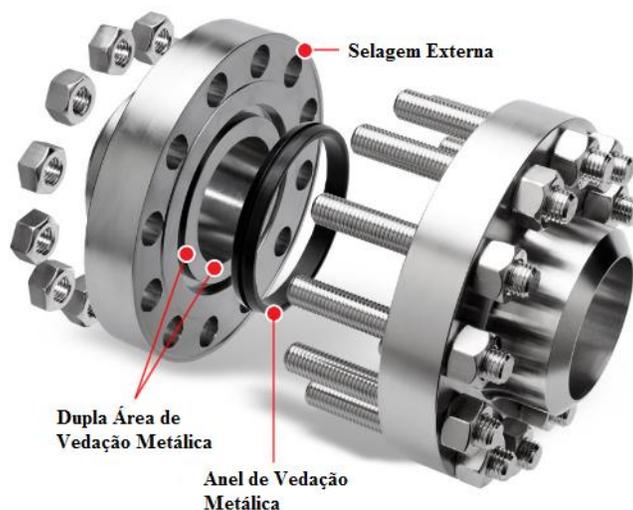


Figura 1. Exemplo de junta de flanges com anel de vedação metálico.

Fonte: Adaptada de <http://www.fogt.com/Compact-Flange-Vector-SPO.html> Acesso em 07/05/2017.

Esta pré-carga pode ser gerada por diversas formas, sendo o tensionamento por aplicação de torque a forma mais empregada devido à sua simples aplicação frente a outros métodos. Embora este método apresente certa simplicidade em sua aplicação, os fenômenos tribológicos que determinam a relação entre o torque e a pré-carga são complexos e demandam por muitas vezes estudos experimentais para aprofundar o seu conhecimento. A definição do torque correto a ser aplicado aos fixadores é de suma importância para garantir a operação segura e eficiente deste tipo de junta tendo em vista que um baixo valor de torque que gere uma pré-carga na junta abaixo da necessária pode levar a vazamentos em campo ou durante testes, bem como um valor excessivo de torque que gere uma pré-carga acima da necessária pode comprometer a integridade da junta levando a falhas catastróficas.

Por isso torna-se importante estudar e conhecer os fenômenos tribológicos intrínsecos à uma operação de montagem de fixadores por aplicação de torque de modo a especificar corretamente o valor de torque a fim de gerar a pré-carga desejada na junta.

Trabalhos prévios de outros autores pesquisaram a relação entre torque e pré-carga em fixadores com revestimentos similares aos deste estudo com destaque para Croccolo *et al.* (2017), que investigou fixadores com revestimento de Zinco eletrodepositado sob diferentes condições de lubrificação e o trabalho de Zou *et al.* (2006) que investigou fixadores revestidos de Bissulfeto de Molibdênio (MoS_2) sob condição seca (i.e. sem adição de lubrificante). Embora as condições de teste e resultados obtidos pelos trabalhos citados forneçam dados importantes para uma discussão posterior sobre os resultados produzidos por este trabalho, não foram encontrados trabalhos que tivessem investigado os aspectos tribológicos dos revestimentos e condições de lubrificação propostos por este estudo.

Portanto, o objetivo deste trabalho é investigar a influência de dois tipos de revestimento (Cádmio eletrodepositado e Bissulfeto de Molibdênio) sob diferentes condições de lubrificação: a seco e com graxa a base de Bissulfeto de Molibdênio.

1.1 Conceitos básicos sobre a relação torque x pré-carga

A influência do atrito na relação torque x pré-carga é comumente expressa de forma simplificada por meio da constante K (usualmente conhecida como Fator Porca) inserida na Equação 1:

$$T = K \cdot F_v \cdot d \quad (1)$$

O valor de K é obtido empiricamente para determinadas condições de material, revestimento, lubrificação, etc, e sua aplicação permite calcular o torque necessário (T) em N.mm para gerar uma pré-carga (F_v) em N para um fixador de diâmetro (d) em mm.

Bickford (1997) e Nassar *et al.* (2004) propõem valores médios de K em função de revestimento e lubrificação do fixador. No entanto, esses valores não podem ser utilizados para determinação do torque em uma junta de aplicação crítica, como um Flange API, dado que sua dispersão é muito alta para a determinação de um torque com a precisão necessária. Além disso, os valores de K propostos pelos autores não levam em consideração as condições de lubrificação e revestimento que serão investigadas pelo presente estudo.

Em busca de uma equação mais precisa para a relação entre torque x pré-carga, estudos prévios de diversos autores como Motosh (1976) e Bickford (2008) demonstraram que o torque aplicado aos fixadores de uma junta é consumido em sua maioria (em torno de 90%) para vencer duas fontes de atrito entre os fixadores roscados e a junta de modo a permitir a rotação de um dos elementos (no caso a porca) que irá gerar o tensionamento do estojo e por consequência a pré-carga na junta. Uma destas fontes é o atrito gerado entre a face das porcas girando em contato direto com a superfície do flange e a outra fonte é o atrito das roscas internas da porca deslizando sobre as roscas externas do estojo. Estima-se que em torno de 50% do torque aplicado aos fixadores seja consumido pelo atrito entre a face da porca em contato com a superfície do flange e em torno de 40% seja consumido no atrito entre as roscas dos fixadores, o que significa que apenas 10% do torque aplicado a um fixador é diretamente transformado em pré-carga conforme mostrado na Figura 2.

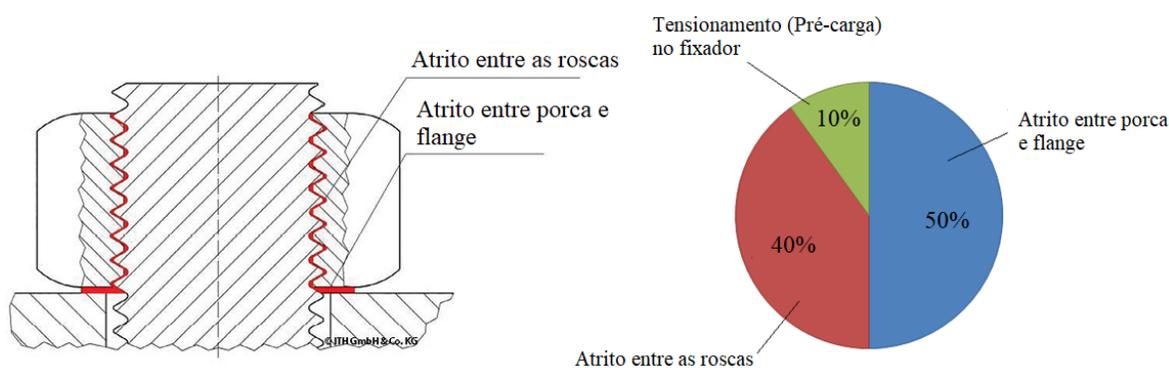


Figura 2. Gráfico da distribuição das fontes de atrito durante o torque de um fixador.

Fonte: Adaptada de <https://www.windpowerengineering.com/> Acesso em 09/01/2019.

Diante disto, Motosh (1976) desenvolveu a Equação 2 capaz de quantificar esta relação entre torque (T_{in}) e pré-carga (F_V) na qual apresenta três parcelas, sendo a primeira relativa à porção de torque convertida em pré-carga, a segunda ao coeficiente de atrito entre as roscas (μ_t) e a última ao coeficiente de atrito entre porca e flange (μ_n):

$$T_{in} = F_V \left(\frac{P}{2\pi} + \frac{\mu_t r_t}{\cos \beta} + \mu_n r_n \right) \quad (2)$$

onde: P = passo das roscas, r_t = raio médio de contato entre as roscas macho e fêmea dos fixadores, r_n = raio médio da área de contato do fixador com o flange; β = metade do ângulo das roscas (unidades em SI).

De acordo com Croccolo *et al.* (2017) e a norma ISO 16047 (2005), a Equação 2 pode ser simplificada, resultando na Equação 3 a seguir:

$$\mu_{tot} = \frac{\frac{T_{in}}{F_P} - \frac{P}{2\pi}}{0,577d_2 + 0,5D_b} \quad (3)$$

Portanto, as Equações 1 e 3 são utilizadas para apresentar os resultados obtidos dos ensaios de torque realizados neste trabalho em função do coeficiente de atrito (ou fator porca) com a finalidade de se alcançar o objetivo proposto da investigação e eventualmente, permitir a aplicação desses resultados em outros fixadores de diferentes diâmetros sob as mesmas condições de lubrificação e revestimento para gerar tabelas de torque que auxiliem montagens.

2 MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Para o experimento foram selecionados estojos e porcas de dois diâmetros: 3/4"-10UNC e 1.1/2"- 8UNC, em dimensão imperial por ser o padrão para flanges API. Foram utilizadas 5 amostras de fixadores novos para cada condição de teste, resultando em 40 amostras ao todo, conforme exposto na Tabela 1.

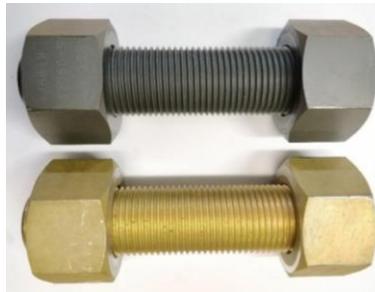


Figura 3. Fixadores de 1.1/2" com revestimento de Bissulfeto de Molibdênio (acima) e de Cádmiio (abaixo) utilizados no experimento.

Fonte: o autor.

Tabela 1. Condições Experimentais e identificação das amostras (IDs).

Revestimento	Diâmetro	Tipo de Lubrificação									
		Com graxa de MoS ₂					A seco				
Cádmio	3/4"-10UNC	ID 11	ID 12	ID 13	ID 14	ID 15	ID 21	ID 22	ID 23	ID 24	ID 25
	1.1/2"-8UNC	ID 31	ID 32	ID 33	ID 34	ID 35	ID 41	ID 42	ID 43	ID 44	ID 45
Bissulfeto de Molibdênio	3/4"-10UNC	ID 51	ID 52	ID 53	ID 54	ID 55	ID 61	ID 62	ID 63	ID 64	ID 65
	1.1/2"-8UNC	ID 71	ID 72	ID 73	ID 74	ID 75	ID 81	ID 82	ID 83	ID 84	ID 85

O grau de resistência selecionado para os estojos foi o L7 (com tensão de escoamento de 105 ksi / 724 MPa) e para as porcas foi selecionado o grau de resistência 2H. Estes são considerados materiais de alto grau de escoamento sendo, portanto, adequados para utilização em flanges API de equipamentos submarinos.

O revestimento metálico de Cádmio Bicromatizado é aplicado aos fixadores por meio de processo de eletrodeposição de acordo com a norma ASTM B766. O revestimento de MoS₂ (Xylan® 1213) é aplicado por pistola de spray e em seguida curado termicamente para garantir a aderência do revestimento ao material de base.

A graxa utilizada para as condições lubrificadas foi a 19B-001 (do fabricante ThreeBond™). Esse lubrificante foi escolhido em acordo com a recomendação da norma API 6A por possuir aditivo de MoS₂ em sua composição, fornecendo significativa redução do coeficiente de atrito e diminuição da dispersão dos valores de pré-carga desenvolvidos durante a aplicação do torque.

2.2 Metodologia experimental

Para medir a pré-carga durante os ensaios foram desenvolvidas duas células de carga (uma para cada diâmetro de fixador) fabricadas em Aço SAE 4340, tendo como referência células desenvolvidas em outros trabalhos, como Croccolo *et al.* (2011), Croccolo *et al.* (2012) e Vand *et al.* (2012). Cada célula foi instrumentada com 4 extensômetros de resistência elétrica (“strain-gages”) uniaxiais para a medição da deformação resultante da pré-carga gerada ao

fixador e dois extensômetros biaxiais para a medição da torsão gerada na célula devido ao torque resistivo do atrito entre a porca e a superfície da célula. Os extensômetros foram colados nas posições demonstradas na Figura 4.

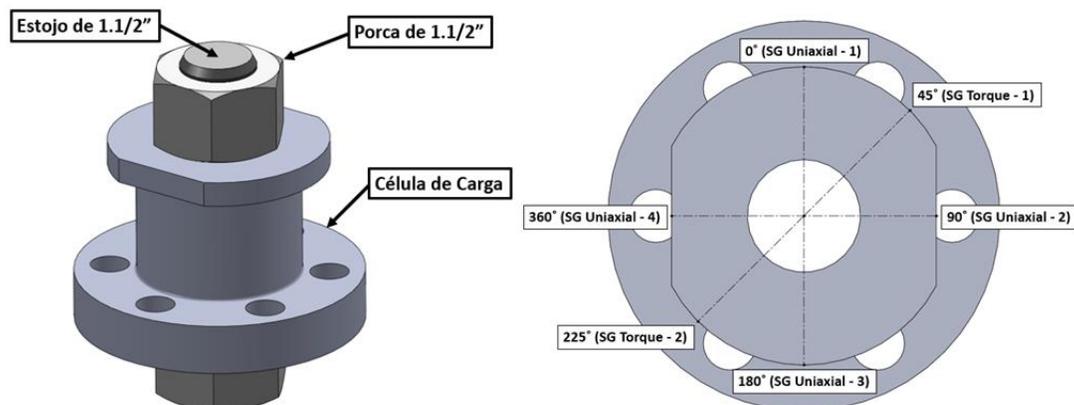


Figura 4. Ilustração da montagem dos fixadores na Célula de Carga e posição dos extensômetros.

Fonte: o autor.

Estas células foram calibradas para gerar curvas de pré-carga (kgf) a partir dos sinais de deformação compressiva (em $\mu\text{m}/\text{m}$) lidos pelos extensômetros uniaxiais e curvas de torque resistivo (lbf.pé) a partir da leitura dos sinais de deformação por torsão (em $\mu\text{m}/\text{m}$) dos extensômetros de torque. Para tal, foi utilizada uma máquina de ensaio de compressão aferida do Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal Fluminense e transdutores de torque digitais calibrados conforme demonstrado na Figura 5.



Figura 5. Calibração das Células de Carga.

Fonte: o autor.

Para a realização dos ensaios de torque foram inicialmente estimados valores de torque calculados com base em valores de coeficiente de atrito de revestimentos e lubrificantes semelhantes encontrados na literatura de modo a atingir os valores de pré-carga equivalentes a 20%, 33%, 67% e 73% da tensão de escoamento do material do fixador. Estes valores foram estabelecidos tomando-se como referência as recomendações das normas API 6A (2010) e ASME PCC-1 (2013) para torque de conexões de flanges.

A partir da aplicação destes valores de torque na primeira amostra de cada condição de revestimento e lubrificação, os resultados prévios foram avaliados, sendo os valores de torque corrigidos para as demais amostras.

Após o ensaio de cada amostra a superfície da célula foi uniformizada utilizando-se lixa para metais 200 para evitar que a alteração de rugosidade superficial após cada ensaio afetasse os resultados dos ensaios seguintes e em seguida a superfície foi limpa com álcool isopropílico para eliminar qualquer resíduo de lubrificante ou revestimento de ensaios anteriores.

Nos ensaios com lubrificação foi aplicada graxa aos fixadores nas regiões das roscas e na face da porca em contato com o flange (Figura 6), conforme orientação da norma ASME PCC-1 (2013).

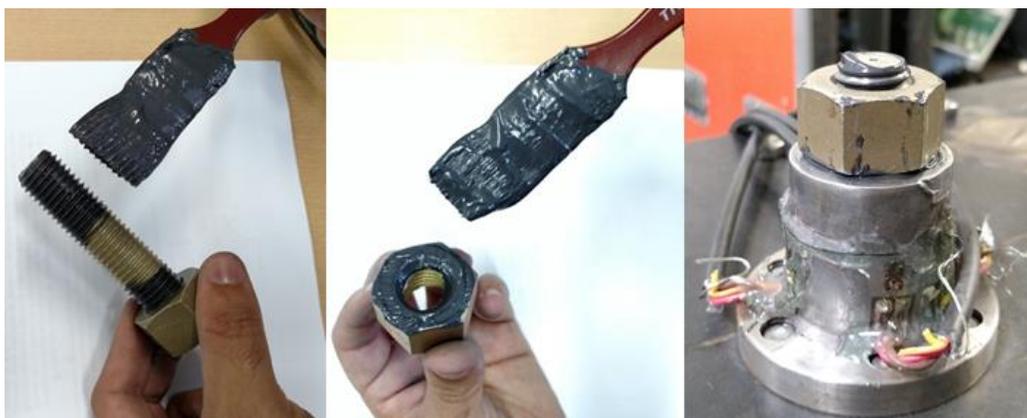


Figura 6. Exemplo de lubrificação dos fixadores de 3/4” com revestimento de cádmio e montagem na Célula de Carga.

Fonte: o autor.

A aplicação de torque nos fixadores de 3/4" foi realizada por meio de torquímetros digitais modelo MMK-220 e MMK-2150 do fabricante MK com capacidades de 150 lbf.pé (200N.m) e 1000 lbf.pé (1350 N.m) respectivamente e para os fixadores de 1.1/2" foi utilizada uma chave pneumática de torque J-Gun 3 do fabricante Hytorc capaz de gerar até 4000 lbf.pé e o torque lido por um transdutor de torque do fabricante Norbar, modelo 50705.LOG com capacidade de leitura de até 3700 lbf.pé (5000 N.m), conforme demonstrado na Figura 7.



Figura 7. Exemplo do aparato experimental para ensaio de torque dos fixadores de 1.1/2".

Fonte: o autor.

A leitura dos sinais de deformação dos extensômetros foi feita utilizando um módulo de aquisição de dados Spider-8 do fabricante HBM.

Nos ensaios dos estojos de 1.1/2" com lubrificação foi utilizado um instrumento de medição de alongamento por ultrassom, modelo Boltscope Pro do fabricante Hydratight para efeito de comparação entre o valor de pré-carga obtido pelas células de carga e o valor de pré-carga obtido a partir do alongamento do estojo medido pelo ultrassom.

O princípio da medição por ultrassom consiste em tomar medições do comprimento inicial do estojo em seu estado relaxado (i.e. sem tensão aplicada), conforme ilustrado na Figura 8 (esquerda). Conforme o torque vai sendo aplicado às porcas, a tensão no material do fixador aumenta por consequência levando a um alongamento do estojo, o qual é registrado pelo aparelho de ultrassom, conforme mostrado na Figura 8 (direita).

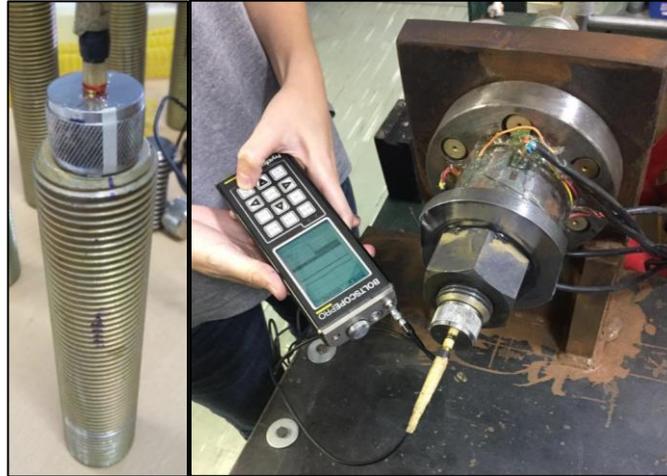


Figura 8. Medição de ultrassom dos fixadores de 1.1/2" na condição relaxada (esquerda) e medição final após aplicação do torque (direita).

Fonte: o autor.

O alongamento medido é então utilizado para calcular a tensão presente no fixador por meio da Lei de Hooke:

$$\sigma = \frac{E(L-L_0)}{L_0} \quad (4)$$

onde: σ = tensão desenvolvida no material (em psi); E = Módulo de Young do material (em psi); L = Comprimento final do fixador (em polegadas); L_0 = comprimento inicial do fixador (em polegadas).

Os valores de tensão calculados através da leitura do ultrassom foram comparados com os valores obtidos pela célula de carga, fornecendo dados úteis que serão avaliados durante a discussão dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção os resultados obtidos nos experimentos serão apresentados e analisados. Os efeitos do revestimento, lubrificação e diâmetro dos fixadores serão investigados.

As leituras de deformação axial (relativa à pré-carga, linha azul da Figura 9) e torcional (relativa ao torque resistivo, linha vermelha da Figura 9) obtidas pelos extensômetros da célula de carga foram plotados em gráficos para cada amostra (ID – Tabela 1). A Figura 9 a seguir ilustra um exemplo para o fixador de ID 31:

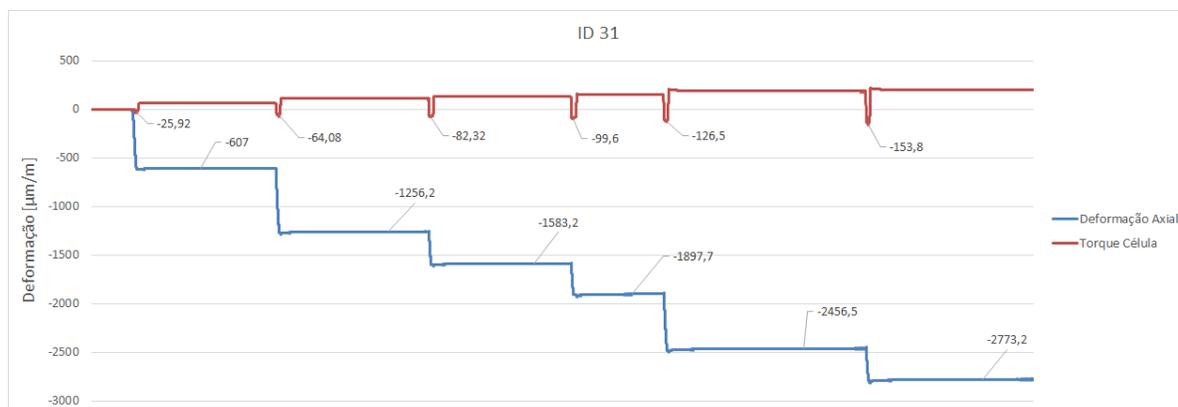


Figura 9. Exemplo de gráfico da aplicação de torque em função do tempo no estojo de Cádmiu com graxa de 1.1/2" (ID 31).

Fonte: o autor.

Nesse gráfico torna-se visível o comportamento de desenvolvimento da pré-carga conforme o torque é aplicado em incrementos. Nota-se que ao aplicar o torque no fixador, ocorre um vale na curva vermelha que representa o valor máximo de torque resistivo lido pela célula de carga (ou seja, o torque de reação gerado pelo atrito da face da porca com a superfície da célula de carga) e no mesmo instante também é possível notar que a deformação axial (curva azul) atinge seu maior valor e mantém-se neste patamar de deformação mesmo após interromper a aplicação de torque, indicando portanto a pré-carga que foi gerada ao fixador.

No momento em que a aplicação do torque no fixador é interrompida, também nota-se que a curva do torque resistivo retorna ao valor inicial e ainda acresce um patamar de deformação positiva, o que indica que o estojo acumulou um certo nível de tensão residual, tendo em vista que a deformação residual assume valor positivo (sentido contrário ao torque aplicado ao fixador) enquanto que a deformação relativa ao torque resistivo apresenta um vale de valor negativo (no mesmo sentido do torque aplicado no fixador).

Com o valor de torque aplicado registrado pelos transdutores de torque e os valores de pré-carga obtidos pelos extensômetros das células de carga foi possível inserir esses valores nas equações de torque x pré-carga (Equações 1 e 3) a fim de descobrir o coeficiente de atrito de cada condição de teste.

Ao analisar os resultados dos valores calculados por essas equações, notou-se que o coeficiente de atrito apresentou variação em função da quantidade de pré-carga aplicada via

torque. Os fixadores de 3/4" e 1.1/2" de Cádmió (IDs 21 a 25 e 41 a 45), por exemplo, apresentaram uma tendência de aumento do coeficiente de atrito conforme a pré-carga aplicada era aumentada. Para os fixadores de 3/4", notou-se um acréscimo de 6% no valor do coeficiente do torque inicial em comparação com o torque final. Para os fixadores de 1.1/2", o acréscimo foi de cerca de 3%.

Esse comportamento é esperado, conforme os resultados experimentais dos trabalhos de Cooper e Heartwell (2011) e Muniz (20007) demonstraram um aumento de 2.2% e 10%, respectivamente.

Portanto, houve a necessidade de aprofundar a análise focando-a apenas nos valores de coeficiente de atrito das faixas de torque mais próximas à pré-carga alvo (67% a 73% da tensão de escoamento do fixador) já que este é o valor do coeficiente de atrito de interesse para a determinação do torque final a ser aplicado ao fixador que irá garantir a montagem eficaz do flange.

3.1 Análise para o coeficiente de atrito de Motosh

Nesta seção serão apresentados os resultados do coeficiente de atrito calculados pela Equação 3 (Motosh). Os resultados para os fixadores de 3/4" são mostrados na Figura 10:

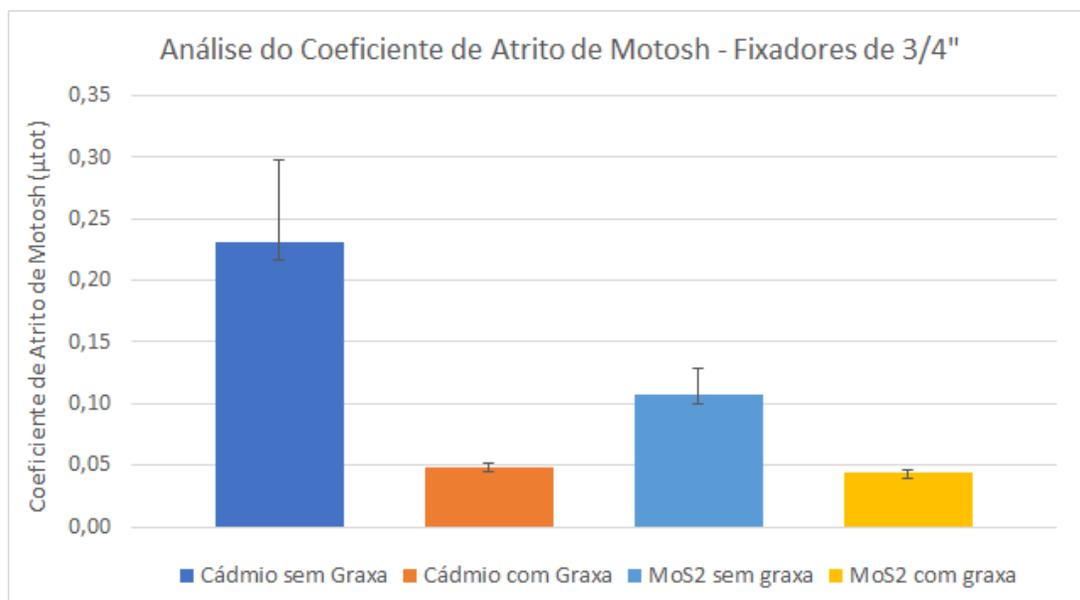


Figura 10. Resultados de coeficiente de atrito de Motosh para fixadores de 3/4".

Fonte: o autor.

Os resultados para as amostras de fixadores de 1.1/2" são apresentados na Figura 11:

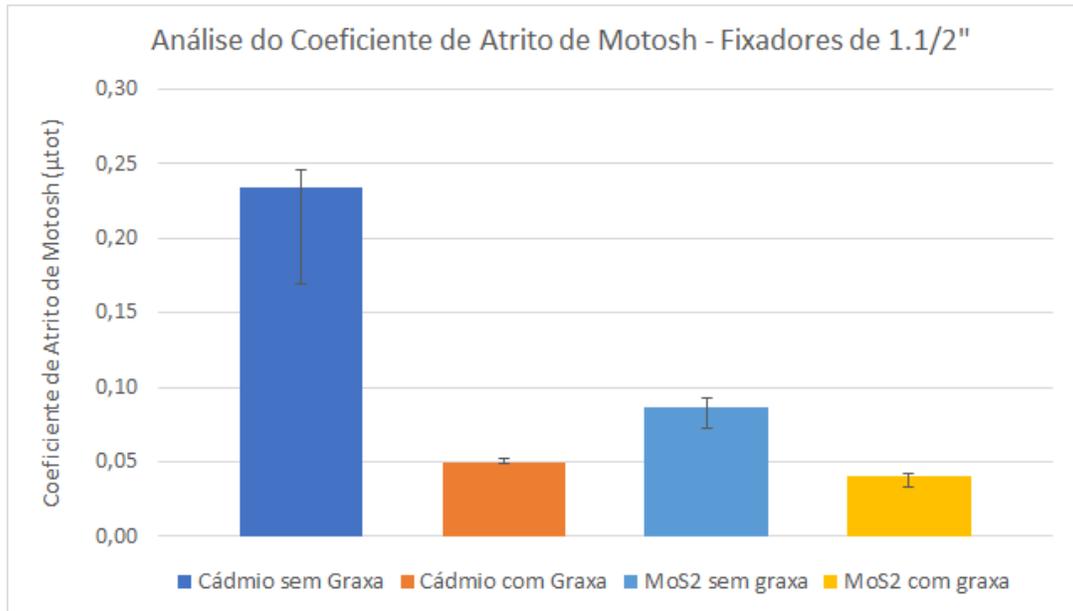


Figura 11. Resultados de coeficiente de atrito de Motosh para fixadores de 1.1/2".

Fonte: o autor.

Os resultados experimentais obtidos demonstram que a aplicação de graxa causou uma redução expressiva do coeficiente de atrito quando comparado com a condição de torque a seco (sem lubrificação): cerca de 80% para os fixadores revestidos com Cádmio e 55% para os revestidos com MoS₂. Este comportamento se encontra alinhado com os resultados obtidos em estudos similares de Crococo *et al.* (2017) e Cooper e Heartwell (2011), cujos trabalhos apresentaram reduções de 32% e 26,4%, respectivamente. Os valores de redução mais acentuados encontrados neste trabalho podem ser atribuídos à maior eficiência do lubrificante usado neste estudo em conjunto com os tipos de revestimento dos fixadores se comparados aos utilizados nos outros estudos citados anteriormente. Além disso, a menor redução do atrito do revestimento de MoS₂ em comparação com o Cádmio é esperada, tendo em vista que o revestimento de Bissulfeto de Molibdênio age como um lubrificante sólido, o que também explica o menor coeficiente de atrito em relação ao Cádmio observados nas condições a seco.

Além da redução do coeficiente de atrito, a graxa também foi responsável por uma notável redução na dispersão dos valores do coeficiente de atrito (redução de 98-91% para fixadores revestidos de Cádmio e 74-48% para os revestidos com MoS₂), o que é desejado em

operações de montagem pois contribui para uma maior precisão e controle do valor da pré-carga gerada. O mesmo comportamento foi encontrado no trabalho de Crococo *et al.* (2017).

Os resultados também permitem notar que houve uma pequena influência dos diâmetros nominais dos fixadores nos resultados de coeficiente de atrito, tendo em vista que os valores de coeficiente encontrados foram similares para ambos os diâmetros.

3.2 Análise para o fator porca K

Nesta seção serão apresentados os resultados do coeficiente de atrito calculados pela Equação 1 (fator porca). Os resultados dos fixadores de 3/4" são mostrados na Figura 12:

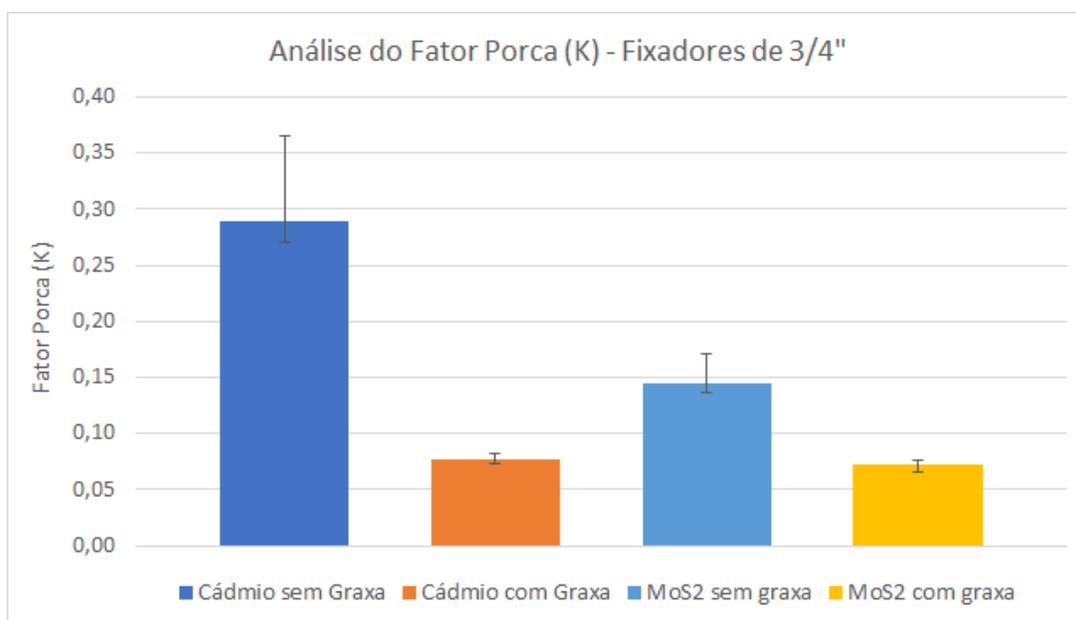


Figura 12. Resultados de fator porca K para fixadores de 3/4".

Fonte: o autor.

Os resultados para as amostras de fixadores de 1.1/2" são apresentados na Figura 13:

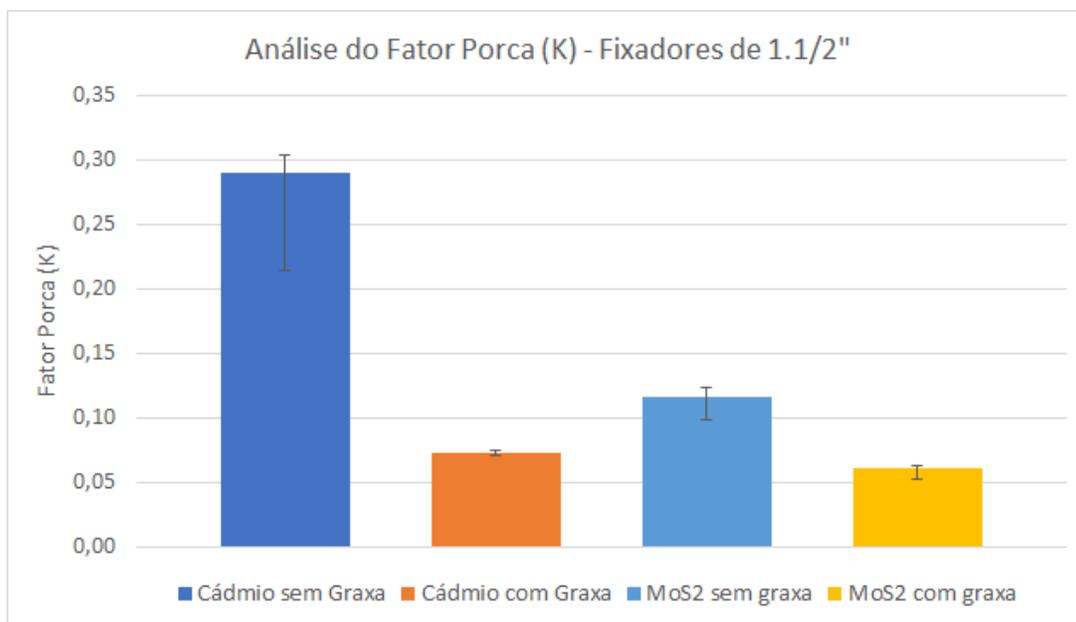


Figura 13. Resultados de fator porca K para fixadores de 1.1/2".

Fonte: o autor.

Os resultados obtidos usando a equação do fator porca (Equação 1) apresentam comportamentos similares aos dos resultados calculados pela equação de Motosh (Equação 3).

Adicionalmente, o trabalho de Zou *et al.* (2006) que investigou um revestimento semelhante de MoS₂ na condição a seco (sem lubrificação), encontrou valores de fator porca K muito similares aos deste estudo para a mesma condição a seco.

3.3 Análise da medição de pré-carga dos fixadores pelo método de ultrassom

Os valores de pré-carga calculados a partir do registro do alongamento do fixador obtido pelo aparelho de ultrassom foram comparados com os dados de pré-carga obtidos pela célula de carga utilizada durante o experimento. Os resultados apresentaram uma diferença média de 11% para os fixadores de 1.1/2" revestidos de Cádmió na condição lubrificada e 6% para os fixadores de 1.1/2" revestidos de MoS₂ na condição lubrificada. Estes resultados são semelhantes aos encontrados no trabalho de Goettems *et al.* (2018), o qual encontrou uma diferença de cerca de 8% comparando os valores do ultrassom versus célula de carga.

3.4 Análise do torque resistivo

Os dados registrados pela célula de carga demonstraram que a proporção de torque resistivo (torque oriundo do atrito entre a face da porca girando sobre a face da célula de carga durante a aplicação o torque) para os fixadores de 3/4" sem lubrificação foi de 48% do valor do torque aplicado ao fixador (para revestimento de Cádmio) e 43% (para os revestidos com MoS₂). Estes resultados são condizentes com os encontrados em outros trabalhos de referência, como Zou *et al.* (2006), Jiang *et al.* (2002) e Jiang *et al.* (2001), que obtiveram valores próximos de 50% para o torque resistivo.

Para os fixadores de 3/4" na condição lubrificada, os valores de torque resistivo decresceram em aproximadamente 50% em relação à condição não-lubrificada. Os fixadores revestidos de Cádmio apresentaram torque resistivo médio de 24% em relação ao torque aplicado enquanto os fixadores de MoS₂ apresentaram valor médio similar, de 26%. Este resultado leva à conclusão de que, para os fixadores de 3/4", a inclusão de lubrificante reduziu de forma significativa o atrito entre as superfícies deslizantes proporcionando, portanto, um aumento considerável na porção do torque transformada em pré-carga, se comparada com a condição não-lubrificada.

Para os fixadores de 1.1/2" sem lubrificação verificou-se que os fixadores revestidos de Cádmio apresentaram torque resistivo significativamente alto, em média 83%, enquanto para a mesma condição (a seco) os fixadores de MoS₂ apresentaram um valor médio menor, de 44%, valor este muito próximo do que foi encontrado para a mesma condição dos fixadores de 3/4".

Por fim, os fixadores de 1.1/2" com revestimento de Cádmio e com lubrificação apresentaram valor médio de torque resistivo de 45% em relação ao torque aplicado ao fixador, levando à mesma conclusão obtida para os fixadores de cádmio de 3/4" de que há uma redução expressiva do torque resistivo (em torno de 50%) quando há a aplicação de lubrificante proporcionando também um aumento na quantia de torque que é transformada em pré-carga.

4 CONCLUSÕES

Neste estudo foi proposta uma abordagem experimental para estudo da influência do revestimento e da lubrificação na relação torque x pré-carga de fixadores de flange API.

Os resultados ressaltaram a importância da utilização de lubrificação em operações de torqueamento de juntas pois o lubrificante permite um controle mais preciso da relação entre torque e pré-carga além de reduzir o valor de torque necessário para se obter a pré-carga desejada o que se traduz em menor esforço físico ou máquinas de torque menos potentes e mais compactas para o torqueamento. Todos estes benefícios contribuem para um aumento significativo na confiabilidade da montagem de uma junta de flange API evitando possíveis vazamentos ou falhas estruturais.

Importante ressaltar que os valores de coeficiente de atrito encontrados neste trabalho foram consideravelmente inferiores aos valores encontrados em outros estudos (em torno de 0,08 para condições lubrificadas) e que estes resultados possuem uma incerteza associada que não foi avaliada.

Além disso, as condições praticadas no experimento foram em um ambiente controlado de laboratório. Em condições reais de montagem em campo estes valores de coeficiente de atrito tendem a ser maiores devido a diversos fatores como maior rugosidade superficial da face do flange, contaminação do lubrificante, aplicação falha da lubrificação (pouco lubrificante ou falta de lubrificante nos locais corretos), falta de qualificação e treinamento dos operadores que aplicarão torque, entre outros.

Portanto, recomenda-se a utilização de valores de coeficiente de atrito mais elevados de acordo com estudos realizados por outros autores, como Croccolo *et al.* (2017) e Zou *et al.* (2006), até que os valores apresentados neste trabalho sejam validados em testes de campo sob condições reais de montagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API SPECIFICATION 6A. Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment. 20. Ed. American Petroleum Institute, Washington, DC, 2010.

ASME PCC-1-2013. Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly. The American Society of Mechanical Engineers, Nova Iorque, NY, 2013.

BICKFORD, J. H. Introduction to the design and behavior of bolted joints. 4. Ed. Florida: CRC Press, 513 p., 2008.

COOPER, W.G.; HEARTWELL, T.M. Variables affecting nut factors for field assembled joints. Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference - PVP2011, Baltimore, Maryland, 2011.

CROCCOLO, D.; DE AGOSTINIS, M.; FINI, S.; OLMI, G. Tribological properties of bolts depending on different screw coatings and lubrications: An experimental study. Tribology International, v. 107, p. 199-205, 2017.

CROCCOLO, D.; DE AGOSTINIS, M.; VINCENZI, N. Failure analysis of bolted joints: Effect of friction coefficients in torque-preloading relationship. Engineering Failure Analysis, v. 18, p. 364-373, 2011.

GOETTEMS, F.S.; DE BRAGA, R.M.; REGULY, A. Controle da pré-carga em parafusos: Correlação entre o método do torque e o alongamento medido por ultrassom. Tecnologia Metalúrgica, Material e Mineral, v. 15, n. 1, p. 43-48, São Paulo, 2018.

JIANG, Y.; CHANG, J.; LEE, C.H. An experimental study of the torque-tension relationship for bolted joints. International Journal of Materials and Product Technology, v. 16, p. 417-429, 2001.

JIANG, Y.; ZHANG, M.; PARK, T.W. An experimental investigation on frictional properties of bolted joints. ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2002-1083, 8 p., 2002.

MOTOSH, N. Development of design charts for bolts preloaded up to the plastic range. Journal of Engineering for Industry, v. 98, p. 849-851, 1976.

MUNIZ, J. M. Fenômenos tribológicos intrínsecos ao travamento de juntas de engenharia aparafusadas. São Paulo, 2007. 17 p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

VAND, E.H.; OSKOU EI, R.H.; CHAKHERLOU, T.N. An experimental method for measuring clamping force in bolted connections and effect of bolt threads lubrication on its value. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, v. 2, n. 10, p. 1136-1139, 2008.

ZOU, Q.; SUN, T.S.; NASSAR, S.A.; BARBER, G.C.; GUMUL, A.K. Effect of lubrication on friction and torque-tension relationship in threaded fasteners. Proceedings of IJTC2006 STLE/ASME International Joint Tribology Conference, San Antonio, Texas, 2006.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antonio Lopes Gama, pela orientação e auxílio no desenvolvimento deste trabalho compartilhando seu conhecimento e sabedoria, demonstrando sempre grande dedicação e empenho em me guiar por todo processo. Ao professor José Luiz Ferreira Martins da Universidade Federal Fluminense pela dedicação de seu tempo em auxiliar a calibração das células de carga em seu laboratório e a todos os colaboradores da corporação TechnipFMC que me prestaram grande suporte com a disponibilização dos recursos para realização dos experimentos.

Contribuição dos autores: D' OLIVEIRA, F. S : Metodologia, realização de experimentos, análise de resultados e redação. GAMA, A. L.: Supervisão, metodologia experimental, conceituação.

Editores: Bruno Campos Pedroza, Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro.