



Conceitos Gerais sobre Torque
e Processos de Torque

Conceitos Relevantes sobre
Coeficiente de Atrito

EDITORIAL

Quarenta anos se passaram desde o meu engajamento na General Motors do Brasil. Comecei lavando frascos de laboratório (vidraria) e tirando amostras para que os “Analistas Senior” iniciassem a determinação da composição química dos diversos materiais ferrosos e não ferrosos.

Na sequência natural, a primeira promoção viria para “piloto de Salt-Spray”, o “cara do barbantinho”, pois nos primórdios dos anos 70’s, se amarravam as peças para o ensaio em névoa salina com barbante parafinado.

A primeira grande inquietação, qual a correspondência entre horas de névoa salina e a resistência à corrosão, considerando a “vida útil” do Componente?

Eis que surge um problema de campo. Perda de função devido a corrosão nos terminais (cadmiados !!!) do Relê de Buzina, peça considerada de segurança, pois avisava (aos demais) de risco iminente.

Todas as análises mostravam que os terminais estavam de acordo com a especificação (americana). Contestar a especificação, impensável.

Ousando associar o ensaio de névoa salina com o funcionamento do relê, com carga elétrica na buzina etc, utilizando os parâmetros do teste de durabilidade do relê (50.000 mil acionamentos) uma nova função foi dada ao Salt-Spray..

Após 24 horas de ensaio, a reprodução fiel da corrosão nos terminais do relê, comparando com o campo; a perda de função agora era apenas questão de tempo.

A grande lição, devemos considerar sempre a aplicação dinâmica do Componente.

Próximo desafio, corrosão em Vedador Bomba d’Água. Mesma estratégia, mesmo resultado.

E assim foi. Do “barbantinho” às “engenhocas”, sempre associando o aspecto dinâmico do Componente em questão. Veio então a necessidade de se estudar a compatibilidade dos materiais aos combustíveis alternativos emergente; a evolução natural de Carburadores para Injeção Eletrônica etc e sempre o conceito dinâmico prevalecia.

Ao final, supervisor do “Fastening Engineering Laboratory” – Laboratório de Elementos de Fixação, onde o

tema predominante é aperto, que é todo DINÂMICO. O material que se apresenta aqui, sob os auspícios da METALTORK e TECNOREVEST, é a consolidação de artigos publicados na Revista do Parafuso (www.revistadoparafuso.com) e Tratamento de Superfície (www.abts.org).

A idéia é associar as propriedades dos revestimentos e o comportamento dinâmico dos mesmos na aplicação em Elementos de Fixação.

Da sabedoria popular, pinço alguns conceitos: i) Só damos valor a algo quando o perdemos e ii) Um louco tem um “Parafuso” a menos (isto é, a diferença entre uma pessoa normal e uma “louca” é a falta de um “Parafuso”).

Estes dois conceitos exemplificam o que pretendo divulgar. Só nos lembramos da importância do Parafuso, quando o mesmo falha.

Utilizando-se da mímica, demonstramos um “louco” por um movimento circular, com o dedo indicador apontando para a frente. Uma constatação pessoal, os destros, utilizam a mão direita e o movimento é no sentido horário e os canhotos, a mão esquerda no sentido anti-horário.

Surtando sobre tal evidência, um “louco” não tem um “Parafuso” a menos . . .

O “problema” é de APERTO. Para os destros, o “Parafuso” está solto (falta aperto) enquanto que para os canhotos, o Parafuso está apertado demais.

Ao fundo desta página temos uma figura específica, que entre outras coisas, representa uma Junta.

O arame que fixava a rolha na garrafa de champanhe é a “peça” que representa o Parafuso nesta determinada Junta. Para “abrir” a garrafa, devemos desapertar (desenrolar) o arame e considerando o diâmetro do arame, a dureza do material etc, temos toda uma Engenharia de Fixação.

Aproveitando que o Parafuso (aramé) está desapertado vamos desfrutar do material que agora está à vossa disposição. Um até breve.

Roberto Garcia

roberto.2.garcia@gmail.com

SÚMARIO

3 — METALTORK - A arte de fixar com tecnologia - Ivan Reszecki

5 Conceitos Gerais sobre Toque e Processos de Torque

20 Conceitos Relevantes sobre Coeficientes de Atrito

METALTORK

A ARTE DE FIXAR COM TECNOLOGIA

Nossa historia

A METALTORK superou desafios, surpreendeu as expectativas de seus clientes e nesse ano de 2011 completou 53 anos de historia e inovações, comprovando sua trajetória de sucesso e consolidando sua marca “TORK” como uma das mais importantes no segmento de parafusos especiais e de aplicações criticas (biela, mancal, cabeçote, sistema de direção e parafusos de rodas) da America Latina. Esta localizada em Diadema - São Paulo em uma área de mais de 18.000 m², visite nosso site www.metaltork.com.br

A mais de 20 anos sob o comando dos Diretores: Ivan Reszecki e Paulo Roberto F. Costa, a METALTORK possui certificações em ISO 9001:2008, ISO/TS 16949/09 e ISO 14001/04, assim como é homologada pela Volkswagen, desde 2007, em VDA 6.3 – Norma que homologa Produto & Processo, para parafusos de aplicação critica.

Nosso parque industrial gerenciado pelo Sr. Lindolfo Pascutti é auto suficiente e possuímos: Ferramentaria, Tratamento Térmicos adequados a CQI-9, Prensas de Conformação a Frio de até 6 estágios que possibilitam a conformação de peças de 6 a 30 mm de diâmetro e de 10 a 320 mm de comprimento, Trefilação, Laminação Automática e Manuais de roscas, Máquinas de Seleção Automáticas, Máquina de ultima geração para desempenho (utilizada para pinos esféricos longos, eixos, cabeçotes e etc), assim como Prensas de Conformação a Quente para peças especiais de até 52mm de diâmetro e 450 mm de comprimento. Os diversos processos instalados na METALTORK permitem atender também a lotes de baixo volume assim como peças de conformação mais complexas.

Nosso laboratório (Físico e Químico) é equipado com modernos aparelhos, como: Máquina de Torque Tensão DTT, Analisador de Carbono, Espectrofotômetro para 15 elementos químicos, Microdurometro, Microscópios para análise metalografica e outros. Nossos equipamentos permitem uma total garantia da qualidade das características mecânicas bem como do processo de tratamento térmicos dos produtos fabricados pela METALTORK.

Hoje contamos com a integração de mais de 310 colaboradores, altamente capacitados e constantemente

treinados. Mantemos parcerias com consultores e profissionais com reconhecimento internacional na área de aplicação de fixação e juntas aparafusadas, bem como constantes introduções de novas tecnologias.

Para acompanhar o aumento do mercado e a escassez de mão de obra para o segmento de fabricação de peças e parafusos, a METALTORK investe no talento e capacitação de seus colaboradores, participando de Seminários, Feiras, Congressos e visitas a outros países, buscando novas tecnologias e inovações, tendo por objetivo principal entender a evolução global do negocio.

Para suprir a demanda de mão de obra, possuímos um processo de promoção e capacitação interna, que através da análise do desempenho do colaborador, o mesmo é direcionado as áreas técnicas e passam a atuar como “trainee”, sendo estes orientados por colaboradores com vasta experiência e longos anos de atividade.

Nossa grande virtude é atuar como escola técnica de aprendizagem, pois promovemos a oportunidade de crescimento do colaborador e colhemos os frutos, aumentando o nível profissional e a qualidade de nossos produtos.

Olhando para o Futuro

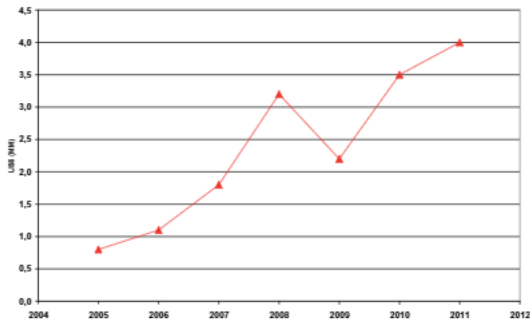
Com a marca “TORK” fortemente consolidada no mercado nacional e no exterior, somos fornecedores direto das principais montadoras automotivas e de veículos pesados, assim como para grandes empresas fornecedoras de autopeças para essas mesmas industrias automotivas e de veículos pesados, como: Mercedes Benz, Scania, MAN, Volkswagen, Iveco, Grupo AGCO, Caterpillar do Brasil, ArvinMeritor, TRW, Empresas do grupo Randon, Magnetti Marelli, ZF do Brasil, Wabco, entre tantas outras.

Nossa meta é conquistar uma fatia cada vez maior nestes segmentos e ampliar nossa linha de produção para conformação de peças tais como: Parafusos, Eixos, Buchas, Pinos e outros. Para tornar realidade, investimos maciçamente em máquinas de 5 e 6 estágios, para conformação de uma gama diversificada de peças, vislumbrando outras aplicações alem de parafusos. Dentro desta filosofia, hoje produzimos em grande escala peças especiais, principalmente as que posteriormente

passam por um processo de usinagem. Agregamos valor no estampado permitindo assim uma maior agilidade para as empresa de usinagem bem como para os fornecedores de auto peças.

Implantamos a Engenharia de Desenvolvimento e Aplicação, onde temos total capacidade de dar suporte a nossos clientes, em relação a necessidade de estudos de aplicação de torque e otimização dos elementos de fixação.

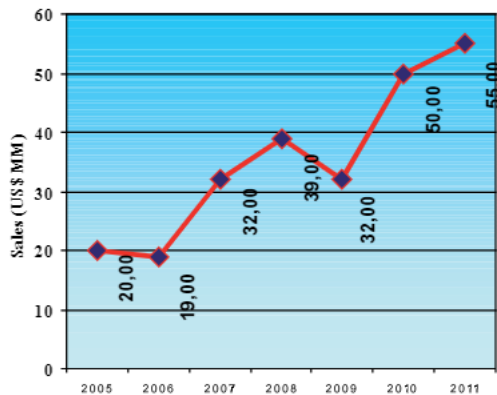
Investimentos



Nosso crescimento

Estamos balizados na perseverança e dedicação de nossos colaboradores. Investimos na própria empresa, através de desenvolvimentos de novos clientes e processos mais eficazes, disseminando o conceito de qualidade para todos, através dos programas 6 Sigmas, Lean, Melhoria Continua, Zero Defeitos, Semana da Qualidade, entre outras técnicas.

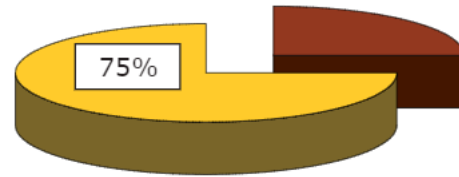
Vendas



No período dessa nova gestão administrativa, obtivemos um crescimento de mais de 600%, saindo de uma produção de 80 toneladas das quais 90% da produção era realizada no processo a quente, para um patamar nos dias de hoje de mais de 550 toneladas mês, realizando 95% desta produção no processo de conformação a frio em prensas de múltiplos estágios.

Atualmente trabalhamos em 2 turnos efetivos de 7:30 hs cada, que nos permite ter um capacidade de ocupação de 75%.

Ocupação do Parque Industrial



Meio Ambiente

Nossa prioridade é a preocupação com o meio ambiente, portanto boa parte de nossos recursos foram empregados para a adequação de todos os setores de nossa fabrica.

Através do empenho, comprometimento e integração de nossos colaboradores, fomos uma das primeiras empresas nacionais a conquistar a ISO 14.001-04, respeitando assim os nossos clientes, colaboradores e toda comunidade.

A grande conquista

Os investimentos realizados em equipamentos, novas tecnologias, parcerias, nos talentos de nossos colaboradores e num parque industrial auto suficiente, nos levou neste mês de Janeiro / 2011 a ser homologado e qualificado para nível "A" da VDA 6.3, pela Volkswagen Brasil, tornando a METALTORK um fornecedor mundial de peças críticas e de segurança.



"Nossa capacidade de geração de recursos e conseqüente crescimento, são suportados exclusivamente pela valorização dos colaboradores e o maciço investimento na capacitação técnica de nosso time, visando à melhoria contínua e a superação de desafios, sempre preservando o meio ambiente".

Ivan Reszecki

"A METALTORK prima por atender o mercado que se inova constantemente, mantendo uma equipe altamente capacitada e com investimentos em novas tecnologias, colocamos neste mercado um produtos de alta confiabilidade."

Paulo R. F. Costa



CONCEITOS GERAIS SOBRE TORQUE E PROCESSOS DE TORQUE

PARTE I

A Revista do Parafuso publicou em quatro edições consecutivas (N#7, 8, 9 e 10, respectivamente em Dezembro-2008/Janeiro-2009, Fevereiro/Março-2009, Abril/Maio-2009 e Junho/Julho-2009) o Curso sobre Torque e Processos de Torque, que agora estão consolidados em uma mesma publicação.

O objetivo desta publicação é continuar na faina para tentar aumentar a massa crítica de pessoas com um maior conhecimento sobre Torque e ao mesmo, buscar desmistificar certos ‘tabus’. Acredito que o material aqui aglutinado possa atender a expectativa de tantos quanto querem se introduzir nesta matéria bem como aqueles que buscam uma reciclagem e rever conceitos que talvez já tenham caído no esquecimento.

Para discorrer sobre Torque é necessário primeiro definir Junta, ou seja, apresentar os integrantes fundamentais que fazem parte do cotidiano de um aperto.

Junta

De maneira bem simplificada e genérica, uma Junta é constituída de três elementos básicos, a saber: o Parafuso, aquele que possui rosca externa; a Contra-peça, que sofrerá todas as forças resultantes do processo de aperto; e por último, o elemento mais importante, a Porca, aquela que possui rosca interna.

Enfatizo a importância da Porca, pois em 99 % dos apertos é o elemento que possui maior resistência mecânica e muitas vezes simplesmente ignoramos a sua presença, pois sabemos que com ela dificilmente teremos contratempos. Assim, uma Junta nada mais é que um trio, porém cada qual com atribuições específicas.

Para visualizá-las, lanço mão de uma analogia com um trio de Bossa Nova ou de Jazz. Normalmente nos trios temos o Piano, o Violoncelo (Baixo) e a Bateria.

O Piano é responsável pela melodia e na analogia com Junta, o Parafuso é o responsável pela linha melódica, pelo sucesso no aperto, pois ele é que “trabalhará”, principalmente quando se busca uma maior força de aperto, obtida quando o aperto ocorre na sua região elasto-plástica.

A Contra-peça (por exemplo: Suportes, Blocos, etc.) é responsável pela harmonia. Numa Junta, as Contra-peças não podem sofrer quaisquer deformações plásticas e devem atuar harmoniosamente com os demais componentes. Analogamente, elas são semelhantes ao Violoncelo ou Baixo.



Dr. Roberto Garcia
Pesquisador Colaborador do GEMAT
(Grupo de Eletroquímica e Materiais) - UNESP

Finalmente a Bateria, que é responsável pelo ritmo, pela tal “batida musical”. A Porca também tem a mesma função, pois é o elemento que sabidamente suporta qualquer carga, esta lá “para o que der e vier”. Não por acaso, as duas são os componentes femininos e devemos reconhecer que as mulheres têm uma maior capacidade para suportar as dificuldades do dia-a-dia.

Classe de resistência

O tema central deste curso é Torque, mas devemos entender que é a Força tensora que “segura as coisas”. Cada elemento de uma Junta tem uma resistência mecânica característica e, assim sendo, existe uma classificação particular para os Elementos de Fixação.

Em Elementos de Fixação agrupamos todas as peças que tem por finalidade *fixar*, e entre estes, os mais comuns são as Porcas e os Parafusos. Pinos, Grampos, Abraçadeiras, Clipes, Rebites, dentre outros, também são considerados Elementos de Fixação.

Para as Porcas, a força de teste é função do diâmetro nominal e sua altura (filetes engajados). Considerando porcas (passo normal) grau 8, isto é, porcas que não sofrem tratamento térmico, temos os seguintes valores:

Até M4	=	800 N/mm ²
M4 ⇨ M7	=	855 N/mm ²
M7 ⇨ M10	=	870 N/mm ²
M10 ⇨ M16	=	880 N/mm ²
M16 ⇨ M39	=	920 N/mm ²

Para Porcas que são tratadas termicamente (grau 10 e grau 12), com passo normal, as forças de testes são:

	<u>10</u>	<u>12</u>
Até M4	1040	1140
M4 ➔ M7	1040	1140
M4 ➔ M10	1040	1140
M10 ➔ M16	1050	1140
M16 ➔ M39	1060	1200

(valores em N/mm²)

Outra característica importante é a Dureza Vickers e de acordo com o grau das Porcas temos:

<u>8</u>	<u>10</u>	<u>12</u>
180 ~ 353	272 ~ 353	295 ~ 353

Para obter as propriedades citadas, o material (aço) para as Porcas grau 8, 10 e 12 devem possuir teor médio de Carbono ou ser aço ligado. Para Porcas grau 4, 5 e 6, que não sofrem tratamento térmico, o aço pode ser baixo Carbono.

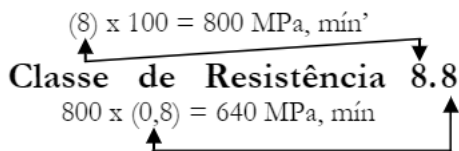
Com relação aos Parafusos, a classificação da resistência segue uma terminologia particular. Quanto à classe de resistência de Parafusos, os mesmos são identificados como: 4.8, 5.8, 6.8, 8.8, 10.9 e 12.9.

Os Parafusos 4.8, 5.8 e 6.8 não sofrem tratamento térmico. Já os Parafusos 8.8, 10.9 e 12.9 precisam de tratamento térmico (têmpera e revenimento). Existe também a classe 9.8, que não é mais utilizada em projetos novos, por estar em fase de extinção em algumas montadoras.

A melhor maneira de entender esta terminologia é utilizar um exemplo e daí extrair a regra operante.

Se considerarmos um Parafuso com classe de resistência 8.8, o que significam estes números?

Valor da Resistência à Tração, Nominal



Valor da Resistência ao Escoamento, Nominal

Analogamente, os valores nominais para Parafusos

	<u>9.8</u>	<u>10.9</u>	<u>12.9</u>	são:
Resistência à Tração =	900	1.000	1.200	
Limite de Escoamento =	720	900	1.080	

(Valores em MPa =N/mm²)

Outras propriedades também devem ser consideradas, pois têm valores (e limites) bem definidos conforme a especificação ISO 898 Parte I, tais como: Limite de Resistência à Tração (LRT), em MPa, Limite de Escoamento (LE), em MPa, Dureza Rockwell "HRB" (para

Parafusos não tratados termicamente), Dureza Rockwell "HRC" (para Parafusos temperados e revenidos).

Classe	<u>5.8</u>	<u>6.8</u>	<u>8.8</u>	<u>10.9</u>	<u>12.9</u>
LRT (min)	540	600	800	1.040	1.220
LE (min)	420	480	640	940	1.110
HR" B"	82~99,5	89~99,5	- o -	- o -	- o -
HR "C"	- o -	- o -	22~32	32~39	39~44

O material (aço) para os Parafusos 4.8, 5.8 e 6.8 podem ser de Baixo ou Médio Carbono.

Para as classes de resistência 8.8, 10.9 e 12.9 o aço deve ser Médio Carbono ou Aço Ligado.

Força Tensora

Conhecendo-se a classe de resistência de um Parafuso e utilizando os seus fatores geométricos, é possível calcular a capacidade de geração de Força que se pode obter do mesmo.

Tomando como exemplo um Parafuso M12 x 1,5, classe 10.9, vimos que a Resistência à Tração (LRT) está entre 1.040 a 1.220 MPa, valor nominal 1.000 MPa, ou seja, o limite superior da classe 10.9 nada mais é do que o limite inferior da classe imediatamente acima, no caso 12.9.

$$LRT = \frac{\text{Força}}{\text{Área}}$$

Como o LRT é da ordem de 1.040 a 1.220 MPa e para um parafuso M12 com passo 1,5 a área é de 88,1 mm², temos que:

$$LRT_{1.040}^{1.220} = \frac{\text{Força}}{88,1}$$

A Força que se pode obter deste Parafuso estará entre 91.624N (91,6 kN) e 107.482N (107,5 kN), respectivamente.

Considerando o Limite de Escoamento, temos respectivamente que este Parafuso começa a escoar entre 82,4 kN e 96,7 kN. Lembrar que estes valores referem-se a Força Axial (tração pura).

Num processo de aperto, temos um esforço combinado, pois simultaneamente ocorrem esforços axial e torsional.

Na Figura 1, podemos representar graficamente as distintas regiões de forças que se obtém de um Parafuso, considerando o seu grau de deformação.

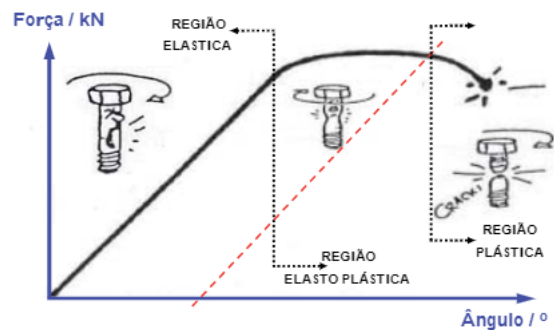


Figura 1.- Gráfico Força (de união) em relação ao aperto (em ângulo) do parafuso

Na região denominada “elástica”, o parafuso se comporta como se fosse uma Mola, isto é, o comportamento é linear e a deformação não é permanente. Ou seja, se pararmos de apertar, ao desapertar o Parafuso retornará às suas dimensões originais.

A partir de uma certa Força, começa o processo de alongamento do Parafuso e a partir deste ponto entramos na região denominada “elasto-plástica”, isto é, o Parafuso entre em uma zona de deformação que não é totalmente permanente.

Ao desapertar este Parafuso, o seu comprimento será maior que o original, mas ainda não há estricção considerável.

Ao final da zona elasto-plástica, chegamos à máxima deformação permanente, pois o Parafuso estará nas proximidades do seu Limite de Ruptura, condição inaceitável em qualquer processo de aperto.

Na Figura 1 mostramos Força (kN) em função do aperto (ângulo, em graus). Nesta condição, estamos considerando o esforço combinado tração-torção e, desta forma, os valores de Força sofrem uma certa redução.

Esta redução por sua vez é função exclusiva do coeficiente de atrito de rosca (μ_G), que será explicado com mais detalhes a partir da página 10.

A função acima citada é mostrada na Equação 1 abaixo:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left[\frac{4}{1 + (d_3/d_2)} \cdot \left[\frac{p}{\pi \cdot d_2} + 1.155 \cdot \mu_G \right] \right]^2}}$$

Esta equação revela que o rendimento (η) é função inversa do coeficiente de atrito de rosca (μ_G). Ou seja, quanto menor μ_G , maior será o rendimento.

Para o Parafuso M12 x 1,5 com classe de resistência 10.9, assumindo uma faixa de $0,10 \leq \mu_G \leq 0,16$, temos que o rendimento variará de 86,7 % a 77,2 %, respectivamente.

Assim sendo, o Limite de Resistência à Tração, que no esforço axial era de 91,6 a 107,5 kN, agora passa a ser de 70,7 a 93,2 kN respectivamente, contemplando o menor rendimento para a menor Resistência à Tração e o maior rendimento para a maior Resistência à Tração.

De maneira similar, o Limite de Escoamento que situava-se entre 82,4 e 96,7 kN, agora são respectivamente iguais a 63,6 e 83,8 kN.

Estes números nos indicam qual é a faixa de trabalho de um Parafuso M12, passo 1,5 - com classe de resistência 10.9. Devemos lembrar que o Parafuso pode entrar na sua região elasto-plástica, entretanto esta condição poderá ser inaceitável para a Contra-peça.

Esquecemos de falar da Porca? Como foi dito, ao utilizar um Parafuso M12 com tratamento térmico (8.8, 10,9 ou 12.9), no projeto também se especificará uma Porca M12, com tratamento térmico; neste caso, a prova de carga da porca é da ordem de 1.050 a 1.140 MPa, suficientemente capaz de resistir às Forças geradas pelo Parafuso (lembrando



Fixando com qualidade e tecnologia




Empresa certificada:
 ISO 9001:2008 - cert. 40656
 TS 16949:2009 - cert. 38672
 ISO 14001:2004 - cert. 42156





FIXAMOS ESSA IDÉIA

que a Porca somente recebe esforço axial) e sempre terá que ter um mínimo de filetes engajados (geralmente 0,6 vezes o diâmetro e sua altura da ordem de 0,8 vezes o diâmetro).

Exemplificando graficamente o que foi dito acima, podemos montar um diagrama com os limites de deformação plástica, quer seja do Parafuso, quer seja da Contra-peça.

De maneira conservadora, a intersecção das linhas na região elástica nos define a máxima Força Tensora ("Clamping Load") que a Junta pode suportar.

Na Figura 2 temos o diagrama acima citado.

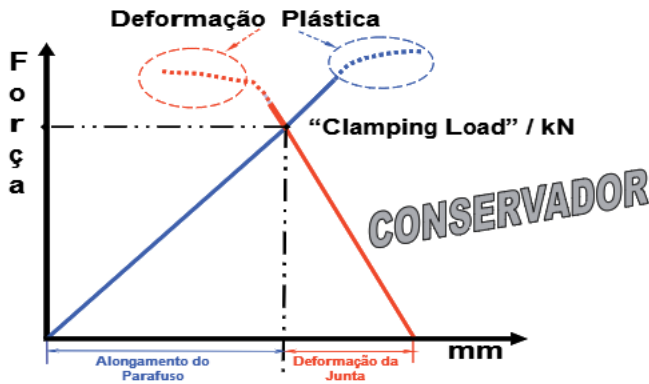


Figura 2 – Diagrama mostrando o comportamento do Parafuso bem como da Contra-peça, em condições conservadoras.

Na Figura 3, é apresentado o mesmo tipo de diagrama, porém na condição inaceitável, isto é, quando o aperto acontece na região plástica da Contra-peça.

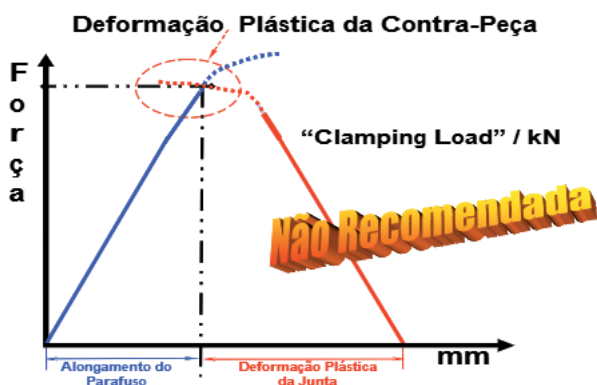


Figura 3 – Diagrama mostrando uma condição inaceitável.

Na Figura 4, o diagrama mostra a condição mais recomendável quando se deseja obter a maior Força Tensora do Elemento de Fixação. Podemos citar como exemplo, os requisitos necessários para um Parafuso de Biela, onde ultrapassamos o Limite de Escoamento do Parafuso, mas preserva-se o limite de deformação plástica da Biela (em geral Bielias forjadas).



Figura 4 – Diagrama mostrando a condição mais recomendável, quando se quer obter a máxima Força do Elemento de Fixação

Torque

Antes de discorrer sobre Torque, algumas definições da Física Clássica se faz necessário.

Força = É a grandeza fundamental que relaciona a massa e a aceleração da gravidade. Como tudo que nos cerca está sob o efeito da gravidade (terrestre), a Força comumente é expressa em N (Newton) ou em seu múltiplo kN. Também pode ser expressa em kg (Quilograma), etc.

Alavanca = É uma barra rígida, móvel em torno de um obstáculo denominado "ponto de apoio". Quando em equilíbrio, temos a expressão:

$$F \cdot x = P \cdot y$$

onde **F** é a Força atuante, **x** corresponde à distância atuante; **P** é a Força resistente e **y** é a distância referente à Força resistente, como detalhado na Figura 5 abaixo.

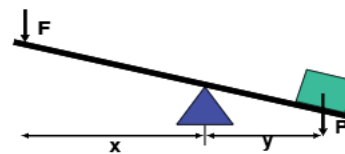


Figura 5 – Esquemática de uma Alavanca

Momento = É o produto da intensidade de uma Força pela distância desta a um ponto referenciado. O resultado deste produto é "Trabalho", que no mundo dos apertos é denominado **Torque**, cuja grandeza mais usual é Nm (Newtons metro).

Nm é uma grandeza de Energia (1 Nm equivale a 1 Joule).

A equação básica para Torque, envolvendo Elementos de Fixação é a seguinte:

$$\text{Torque} = M_A = F_V \cdot d \cdot k$$

onde: M_A = Momento de Aperto, em Nm,

F_V = Força Tensora, em kN e

d = Diâmetro do Elemento de Fixação, em mm.

k = Fator de Torque ("k_{factor}")

CONCEITOS GERAIS SOBRE TORQUE E PROCESSOS DE TORQUE

PARTE II

O que se espera de um Elemento de Fixação é que o mesmo gere uma Força Tensora suficiente para atender às necessidades do projeto, isto é, um parâmetro de Engenharia.

Pela equação básica, Força é a variável independente e o Torque é a variável dependente, ou seja, o Torque aplicado, parâmetro de Manufatura, deve corresponder à Força requerida em projeto.

Além do diâmetro nominal do Elemento de Fixação, a equação básica apresenta um fator constante (K), conhecido como “ k_{factor} ”, normalmente tabelado em função do material e do revestimento dos componentes da Junta.

A equação básica permite calcular o Torque, a partir da Força Tensora, porém não incorpora a capacidade do equipamento a ser utilizado pela Manufatura.

Convencionalmente atribui-se que a capacidade para equipamentos pneumáticos é da ordem de $\pm 15\%$, para eletro-eletrônicos ao redor de $\pm 5\%$ e equipamentos por impacto em torno de $\pm 35\%$.

Graficamente podemos expressar a variação do Torque em função da Força, tomando como eixo principal o ângulo de aperto, como mostra a Figura 6.

Como citado na Parte I, existe uma condição linear, denominada região elástica (até o Limite de Escoamento) e a partir deste limite, um comportamento não linear, que até a Força máxima denominado região elasto-plástica. A partir da Força máxima, adentramos na região de deformação permanente, até a condição de ruptura do Elemento de Fixação.

Para exemplificar o uso da equação básica, vamos utilizar um Parafuso M12x1,5, classe de resistência 10.9 e como Força Tensora necessária, 47,7 kN, isto é, 75 % da mínima capacidade de geração de Força do Elemento de Fixação, ou seja 63,6 kN multiplicado por 0,75.

Também vamos assumir que o fator K varia de 0,10 a 0,20 ($0,15 \pm 0,05$), valor arbitrário. Convém salientar que o “ k_{factor} ” depende principalmente do atrito das peças envolvidas na Junta, irregularidades dimensionais, empenamento do Parafuso, roscas deformadas e/ou com sujeiras, etc.

O Torque a ser aplicado para que se obtenha a Força necessária é mostrado abaixo:

$$\text{Torque} = M_A = 47,7 \cdot 12 \cdot k_{0,10}^{0,20} = 57 \text{ a } 114 \text{ Nm}$$

ou seja, $85,5 \pm 28,5 \text{ Nm}$.

A seguir, algumas definições dos termos normalmente utilizados quando se aborda o tema Torque :

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 auditoragem 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).

Gráfico M_A (Torque) x F_V (Força) x Ângulo

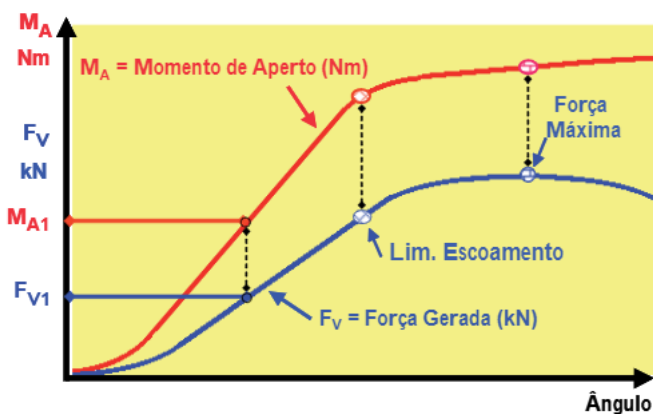


Figura 6 – Gráfico Torque e Força em relação ao aperto do Parafuso (em ângulo).

Na Figura 6, são apresentados os conceitos de Força e Torque, ressaltando o Limite de Escoamento e a Força máxima, além da aplicação da equação básica, isto é, para uma dada Força Tensora F_{V1} , conseqüentemente, temos um Torque M_{A1} .

Caso ocorra nos primórdios do aperto, quando não há um assentamento perfeito, esta condição pode ser perceptível visualmente. Caso ocorra na fase linear do aperto, sua detecção visual é impossível. Somente com os recursos da mecânica este fenômeno pode ser detectado e com possibilidade de rejeição e re-trabalho do processo de aperto propriamente dito.

EXPRESSÃO GERAL

Na equação básica, temos um fator constante, muito abrangente, denominado “ k_{factor} ”. Através da **Norma DIN 946 - Determination of coefficient of friction of bolt/nut assemblies under specified conditions**), temos um melhor detalhamento de alguns dos aspectos mais relevantes do “ k_{factor} ”.

A expressão matemática constante na DIN 946 é:

$$\text{onde: } M_A = F_V \cdot \left(0,159 \cdot p + 0,578 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} \cdot \mu_K \right)$$

- M_A = Momento de Aperto (Nm)
- F_V = Força Tensora (kN)
- p = Passo (mm)
- d_2 = Diâmetro interno (mm)
- μ_G = Coeficiente de Atrito da Rosca (adimensional)
- D_{Km} = Diâmetro Médio - superfície contacto (mm)
- μ_K = Coeficiente de Atrito da Cabeça (adimensional)

(*) = A Norma DIN 946 está sendo substituída pela Norma DIN ISO 16047.

Comparando a Equação Básica com a Expressão Geral, temos que:

$$M_A = F_V \cdot \left(0,159 \cdot p + 0,578 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} \cdot \mu_K \right)$$

$$M_A = F_V \cdot d \cdot k$$

O multiplicando F_V (Força Tensora) é o mesmo, porém o fator geométrico d (diâmetro nominal) foi substituído por d_2 (diâmetro interno) e o “ k_{factor} ” ficou mais explícito, detalhando-se os coeficientes de atrito de rosca e de cabeça, o passo e o diâmetro médio da superfície de contacto.

Também é possível comparar numericamente a aplicação da expressão geral.

Considerando o mesmo Parafuso M12x1,5, 10.9, Força Tensora de 47,7 kN e D_{Km} igual a 20,58 mm, $d_2 = 11,026$ mm e μ_G e μ_K com limites inferiores e superiores respectivamente iguais a 0,10 e 0,16, temos:

$$M_A = 47,7 \cdot \left(0,159 \cdot 1,5 + 0,578 \cdot 11,026 \cdot \mu_{G0,10}^{0,16} + \frac{20,58}{2} \cdot \mu_{K0,10}^{0,16} \right)$$

Desta forma, o Torque a ser aplicado para que se obtenha a Força necessária é da ordem de 91 a 139 Nm, ou seja, 115 ± 24 Nm.

Utilizando a expressão geral, com fatores geométricos e coeficientes de atrito mais refinados, temos que o Torque é aproximadamente 34% maior que o calculado pela equação básica.

Da mesma Norma DIN 946 obtém-se as seguintes expressões para coeficientes de atrito de rosca (μ_G), de cabeça (μ_K) e total (μ_{GES}).

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

onde M_G é o Torque dissipado na rosca.

$$\mu_K = \frac{2 \cdot M_K}{D_{Km} \cdot F_V}$$

onde M_K é o Torque dissipado na cabeça.

$$\mu_{GES} = \frac{M_A / F_V - 0,159 \cdot p}{0,578 \cdot d_2 + \frac{D_{Km}}{2}}$$

Hoje o coeficiente de atrito total (μ_{GES}) já é parte integrante das especificações de revestimentos, quer sejam eletrodepositados ou não, num mesmo nível de importância como aparência e resistência à corrosão.

EQUAÇÃO APERFEIÇOADA

Se considerarmos um aperto no regime elástico do Parafuso, é possível substituir a Força Tensora por uma expressão matemática que relaciona o ângulo de aperto e as resiliências dos componentes da Junta, expressão esta baseada na Lei de Hooke.

Como condição fundamental para utilização desta expressão é que no intervalo de trabalho considerado não ocorra qualquer deformação permanente, quer seja dos Elementos de Fixação, quer seja das Contra-peças.

$$\hat{\alpha} = \frac{360^\circ}{p} \cdot (\partial_s + \partial_p) \cdot F_V$$

onde:

- $\hat{\alpha}$ = Ângulo de deslocamento (graus)
- ∂_s = Resiliência do Elemento de Fixação (mm/N)
- ∂_p = Resiliência da Junta (mm/N)

Desta expressão, podemos concluir que existe uma relação direta entre o ângulo de deslocamento que ocorre durante o aperto e a Força Tensora gerada neste mesmo intervalo de aperto.

Consolidando o valor de F_V da equação acima na expressão geral, temos uma nova expressão, que denominaremos como Equação Aperfeiçoada, porém com utilização limitada ao regime elástico dos componentes da Junta.

$$M_A = \frac{\hat{\alpha}}{360^\circ} \cdot p \cdot \frac{1}{(\partial_s + \partial_p)} \cdot \left(0,159 \cdot p + 0,578 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} \cdot \mu_K \right)$$

A expressão acima será de grande valia quando da discussão das vantagens e desvantagens dos diversos processos de Torque disponíveis.

Aperto por Torque

Com os conceitos de Torque e Capacidade de Geração de Força do Elementos de Fixação já apresentados, é possível discorrer sobre processos de Torque e a melhor maneira é fazendo uso de um exemplo específico.

O primeiro processo a ser apresentado é Aperto por Torque, também conhecido como Torque Simples ou Torque ‘Seco’.

A partir de um Torque Alvo, o equipamento, pneumático ou eletroeletrônico é ajustado a este valor, também conhecido como Torque Dinâmico.

Neste exemplo, a especificação de Torque solicita um Torque de 20 Nm e um intervalo de 18 a 22 Nm.

De maneira geral, denominamos 20 Nm como o Torque Dinâmico, que será o Torque Alvo a ser consolidado no equipamento de aperto (Torque de “Set-Up”) e os limites serão 18 e 22 Nm. Estes limites balizarão a janela de Torque, tanto do equipamento, bem como, dos valores de Torque de Verificação (Torque Estático), quando das referidas atividades de auditoria.

Esquemáticamente, este processo pode ser representado pela Figura 7.

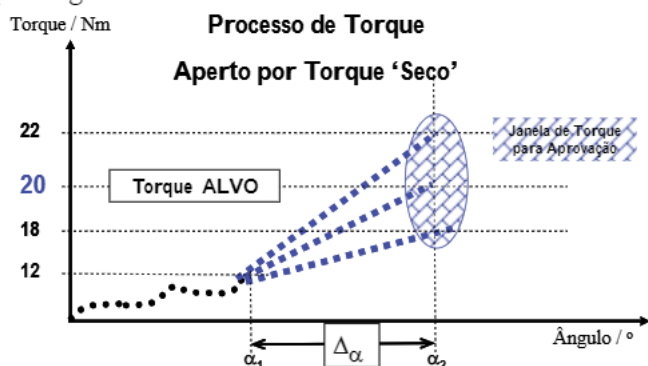


Figura 7 – Esquemática de um Processo de Torque, denominado Torque Simples ou Torque ‘Seco’.

Pela especificação, 20 ± 2 Nm, isto é, $\pm 10\%$, obrigatoriamente o equipamento deve ser eletroeletrônico, por razões de capacidade.

Neste exemplo, a partir de 12 Nm considera-se que a Junta está perfeitamente assentada. Definimos então Torque de Assentamento como sendo 12 Nm, máximo. O Torque de Assentamento também é conhecido como “Snug Torque”.

Fisicamente, admite-se que se gasta esta Energia para assentar os componentes da Junta e a partir deste valor, o aperto ocorre de forma linear, em relação ao deslocamento angular do Elemento de Fixação. Na Figura 7, também está assinalado que para o Torque de Assentamento, temos um valor de ângulo igual a α_1 .

A partir deste assentamento (α_1), até o Torque Alvo, no caso 20 Nm, teremos um ângulo de deslocamento até α_2 .

Por se tratar de equipamento eletroeletrônico é possível registrar os valores de α_1 e α_2 e, desta forma, mapear $\Delta\alpha$ (intervalo de deslocamento angular) entre 12 Nm e 20 Nm (o Torque Alvo).

53 anos fixando com arte, tecnologia e qualidade

TORK

METALTORK

Rua Brejaúva, 400
Diadema - SP - 09950-630
(11) 4070-5511
www.metaltork.com.br

Como já mencionado, no equipamento normalmente será consolidado os limites de 18 e 22 Nm, como janela de Torque porém rigorosamente, estes limites deveriam ser da ordem de 19 Nm e 21 Nm, respeitando-se assim a capacidade do equipamento (eletro-eletrônico) de aperto.

Para ilustrar este Processo, lanço mão de dados reais e a partir deles, tecer considerações sobre as vantagens e desvantagens deste Processo de Aperto.

Na Figura 8, temos o Histograma dos 11.674 apertos realizados.

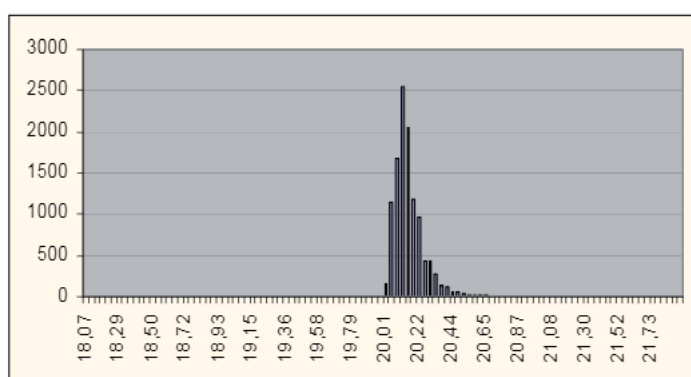


Figura 8 – Histograma Aperto por Torque ‘Seco’.

Observa-se uma mínima dispersão. O desvio padrão é da ordem de 0,14 Nm. Por este Histograma, conclui-se que se trata de um Processo de Torque perfeitamente confiável.

Na realidade, o que é confiável é o equipamento de aperto. Como também foi mapeado α_1 e α_2 , torna-se possível construir um Histograma de $\Delta\alpha$, para os 11.674 apertos, conforme mostrado na Figura 9.

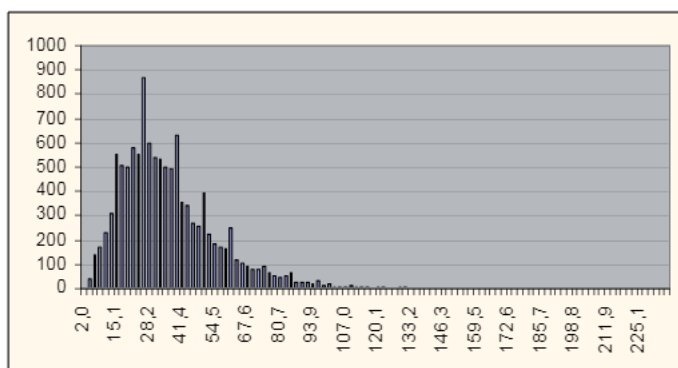


Figura 9 – Histograma de $\Delta\alpha$, entre 12 e 20 Nm, considerando o Aperto por Torque Simples ou Torque ‘Seco’.

A Figura 9 já nos revela uma maior (e preocupante) dispersão de $\Delta\alpha$, principalmente porque o processo é considerado estável, em relação ao Torque aplicado.

Os seguintes valores foram observados: Ângulo Médio = 35°, Ângulo Máximo = 236°, Ângulo Mínimo = 2°, Desvio Padrão = 20,3°. Aproximadamente 1 % dos apertos (103 casos) geraram “Torque Falso”, com um $\Delta\alpha$ menor que 5°.

Numa análise mais detalhada do Histograma mostrado na Figura 9, constatamos uma elevada frequência de apertos com valores de $\Delta\alpha$ iguais a 15°, 28°, 40° e 52°.

Considerado que o Ângulo Médio é 35°, temos uma grande população de apertos com $\Delta\alpha$, aquém e além do Ângulo Médio, revelando que a Força Tensora aplicada, durante o Processo por Torque ‘Seco’, não está estável.

De maneira análoga, podemos salientar a existência de inúmeros apertos com $\Delta\alpha$ superior a 70°, ou seja, com o dobro da Força Tensora média.

A afirmação acima é baseada na expressão oriunda da Lei de Hooke, na qual temos uma relação proporcional entre ângulo aplicado e Força Tensora gerada.

Assim sendo, podemos sumarizar o Processo de Aperto por Torque ‘Seco’:

VANTAGENS

- i) O equipamento é simples (pode ser pneumático ou eletroeletrônico);
- ii) É de fácil entendimento.

DESVANTAGENS

- a) Elevada dispersão do Torque, considerando a sofisticação (ou não) do equipamento de aperto;
- b) Não é apropriado para aplicações consideradas críticas;
- c) Elevado risco de ocorrência de “Torque Falso”;
- d) Não garante uma Força Tensora constante (sequer é estável);
- e) Risco de alongamento do Elemento de Fixação e/ou deformação permanente das Contra-peças.

CONCEITOS GERAIS SOBRE TORQUE E PROCESSOS DE TORQUE

PARTE III

O segundo processo a ser discutido é o Aperto por Torque e Monitoramento do Ângulo.

Como o próprio nome diz, aperta-se por Torque e monitora-se o ângulo (na realidade, uma janela de ângulo). Necessariamente este Processo requer um equipamento eletroeletrônico e esquematicamente é representado pela Figura 10.

Processo de Torque - Aperto por Torque e Monitoramento do Ângulo

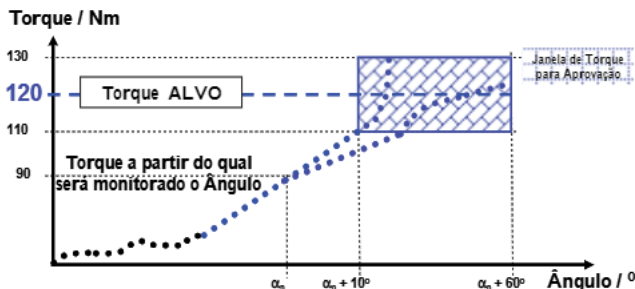


Figura 10 – Esquemática de um Processo de Torque denominado Aperto por (ou Contrôlo de) Torque e Monitoramento do Ângulo.

No diagrama mostrado, (exemplo real), o Processo de Aperto é desenvolvido em duas etapas (Fases) bem distintas.

Na Fase I, temos o Torque de Assentamento e em seguida, uma condição de Torque Alvo Intermediário, no caso da ordem de 90 Nm.

A Fase II, que considera como Torque Alvo 120 Nm, inclui o monitoramento do intervalo de deslocamento angular ($\Delta\alpha$) a partir de 90 Nm e estipula um $\Delta\alpha$ mínimo de 10° e máximo de 60° .

Como janela de Torque, os limites são 110 e 130 Nm, valores a serem consolidados no equipamento de aperto e que serão também utilizados como Torque de Verificação.

Este tipo de processo permite que para um dado aperto, no caso Torque Alvo de 120 Nm (Fase II – Final), a dispersão do intervalo de ângulo seja mais restrita, que no exemplo ilustrado é da ordem de 10 a 60° .

O intervalo especificado foi devidamente estudado, baseando-se que quando o processo atinge um $\Delta\alpha$ de 10° , o mesmo é suficiente para gerar uma Força Tensora mínima necessária. Da mesma forma, quando $\Delta\alpha$ é da ordem de 60° , a Força Tensora agora gerada é máxima, porém inferior àquela que poderia causar deformações permanentes nos componentes da Junta.

Este tipo de Processo permite uma certa versatilidade nas células de aperto, pois possibilita que um mesmo equipamento possa ser utilizado em Juntas diferentes entretanto estas Juntas devem apresentar uma certa similaridade, como por exemplo Coxins.

Ao estabelecer uma janela de ângulo, para um mesmo Torque Alvo, estamos especificando uma Força Tensora mínima, condição que torna este processo habilitado para Juntas críticas.

Da mesma forma, como a Fase I assegura um bom assentamento e uma Força Tensora parcial, e a seguir, como temos uma condição e ângulo mínimo até o Torque Alvo (Fase II), podemos afirmar que este ângulo final também garante uma condição de Risco Zero para “Torque Falso”.

Assim sendo, podemos sumarizar o Processo de Aperto por Torque com Monitoramento de Ângulo:

DESVANTAGENS

- i) O equipamento não é tão simples (deve ser eletroeletrônico);
- ii) Para multi-uso (diferentes Juntas em uma mesma Estação de Aperto), as Juntas devem ter uma certa similaridade.

VANTAGENS

- a) Garante uma Força Tensora mínima e estável;
- b) É adequado para Juntas consideradas críticas;
- c) Risco Zero para “Torque Falso”;
- d) Permite um controle das condições de contorno da Junta devido ao baixíssimo risco de alongamento do Elemento de Fixação e/ou deformação das Contra-peças.

O terceiro processo a ser descrito é o Processo de Aperto por Torque e Ângulo de Deslocamento.

Utilizando um diagrama esquemático, o Processo de Aperto por Torque & Ângulo é mostrado pela Figura 11.

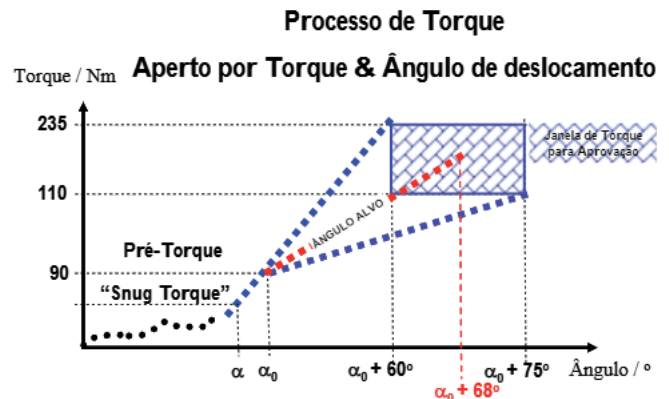


Figura 11 – Esquemática de um Processo de Torque denominado Aperto por Torque & Ângulo de Deslocamento

Literalmente, temos um processo constituído por Torque ‘Seco’ e uma posterior etapa de Ângulo de Deslocamento. A primeira parte deste processo denomina-se Pré-Torque, a qual garante ademais de um bom assentamento, uma Força Tensora parcial, inferior à Força Tensora exigida pelo projeto. Uma Força adicional será provida pelo ângulo de deslocamento e a Força Tensora Total poderá estar aquém (ou além) do Limite de Escoamento do Elemento de Fixação, em geral o Parafuso.

Para discorrer sobre estes processos, utilizaremos dois exemplos, o primeiro **teórico/numérico**, onde necessariamente estamos na região elástica do Elemento de Fixação e o segundo, real, onde adentramos na região elasto-plástica do Elemento de Fixação e em ambos os casos o aperto é efetuado pela Porca e o Parafuso é o já considerado M12x1,5, classe de resistência 10.9.

Exemplo Teórico / Numérico => Aperto na Região Elástica do Elemento de Fixação

As condições deste processo são as constantes na Figura 11, ou seja: Pré-Torque = 90 Nm e Ângulo de Deslocamento Alvo = 68°.

Os valores dos fatores geométricos referente à Junta são: passo = 1,5 mm; $d_2 = 11,025$ mm e $D_{Km} = 18,4$ mm.

As grandezas intensivas, tais como a: Resiliência do Parafuso: $\partial_s = 1,2 \cdot 10^{-5}$ mm/N; a Resiliência da Junta: $\partial_p = 2,1 \cdot 10^{-6}$ mm/N; o Coeficiente de Atrito da Rosca (máximo): $\mu_G = 0,16$; e o Coeficiente de Atrito da Cabeça (máximo): $\mu_K = 0,16$.

Como Torque de Assentamento (“Snug Torque”), vamos assumir como sendo da ordem de 40 Nm, logo a segmento linear de Torque, referente a esta primeira fase de aperto é igual a $(90 \text{ Nm} - 40 \text{ Nm}) = 50 \text{ Nm}$.

A partir da Equação Aperfeiçoada:

$$M_A = 50 \text{ Nm} = \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot p \cdot \frac{1}{(\partial_s + \partial_p)} \cdot \left(0,159 \cdot p + 0,578 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} \cdot \mu_K \right)$$

e substituindo os fatores geométricos e as grandezas intensivas, calculamos o valor de $\Delta\alpha$, no intervalo de 50 Nm, que corresponde a aproximadamente 62°.

É possível calcular a mínima Força Tensora gerada nesta fase do aperto, utilizando a expressão baseada na Lei de Hooke, que pode ser usada, pois este Processo de Torque ocorre na região elástica do Elemento de Fixação

$$62^\circ = \frac{360^\circ}{p} \cdot (\partial_s + \partial_p) \cdot F_V$$

o que resulta em $F_V = 18,3$ kN.

É importante ressaltar que nesta fase de Pré-Torque, os coeficientes de atrito são de suma importância.

A mesma expressão permite calcular a Força gerada na segunda fase do aperto, quando da aplicação de um Ângulo de Deslocamento Alvo, da ordem de 68°.

Considerando 68°, temos:

$$68^\circ = \frac{360^\circ}{p} \cdot (\partial_s + \partial_p) \cdot F_V$$

que corresponde a 20,09 kN.

A Força Tensora gerada nesta fase independe dos coeficientes de atrito.

Assim sendo, a Força Tensora Total obtida neste Processo de Aperto por Torque & Ângulo de Deslocamento, é a soma das duas Forças obtidas por diferentes mecanismos, um totalmente dependente dos coeficientes de atrito e assentamento e um outro, linear com o ângulo aplicado.

$$F_{V_{TOTAL}} = F_{V_{PRÉ-TORQUE}} + F_{V_{ÂNG. DESLOCAMENTO}} = 18,31 + 20,09 = 38,4 \text{ kN}$$

Para minimizar os efeitos dos coeficientes de atrito, podemos diminuir o valor de Pré-Torque (porém sempre acima do “Snug Torque”) e aumentar o Ângulo de Deslocamento.

Se consideramos um Pré-Torque igual a 60 Nm, um Ângulo de Deslocamento da ordem de 105° e mantendo todos os outros valores constantes, a Força Tensora Total gerada neste processo, **aprimorado**, é a seguinte:

$$F_{V_{TOTAL}} = F_{V_{PRÉ-TORQUE}} + F_{V_{ÂNG. DESLOCAMENTO}} = 7,39 + 31,03 = 38,4 \text{ kN}$$

ou seja, a Força Tensora Total é a mesma, mas a forma como a mesma foi obtida é muito mais estável e confiável, pois apenas 19,2 % desta força tem dependência dos coeficientes de atrito e assentamento (enquanto que nas condições de aperto mostrados na Figura 11, esta dependência é da ordem de 47,7%).

Como estamos num Curso sobre Torque, proponho um exercício numérico, cuja solução está na página 19.

A partir da Figura 11 e os fatores geométricos, calcular as Forças Tensoras geradas, considerando as mesmas resiliências, porém os valores dos coeficientes de atrito de rosca e de cabeça no seu mínimo, isto é 0,08. Sugerir também um processo, aprimorado, com Pré-Torque de 60 Nm e defina o novo Ângulo de Deslocamento, que gere a mesma Força Tensora Total.

Uma outra possibilidade que um Processo de Aperto por Torque & Ângulo permite, é gerar uma Força Tensora inerente a deformação elasto-plástica do Parafuso, ou seja, superior à do Limite de Escoamento do mesmo.

Relembrando a Figura 1:

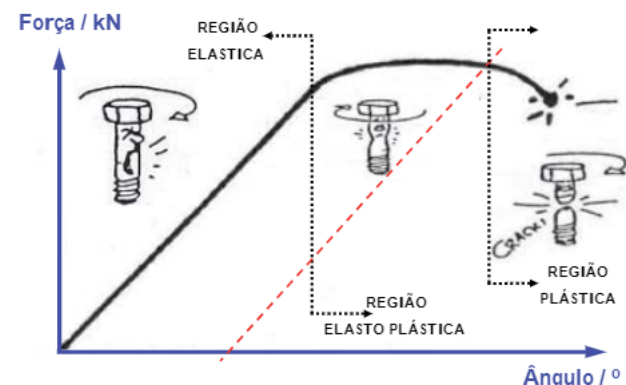


Figura 1.- Gráfico Força (de união) em relação ao aperto (em ângulo) do Parafuso

Com os conceitos já emitidos, podemos quantificar os limites assinalados na Figura 1, quer dizer, a região elasto-plástica, para um Parafuso M12 x 1,5 – 10.9, começa em 67,7* kN (podendo atingir até 80,3* kN). De maneira similar, podemos dizer que a região plástica começa em 75,7* kN (até um valor máximo de 87,5* kN).

Nota: (*) = Valores experimentais.

Estes valores indicam que se o objetivo do Processo por Aperto por Torque & Ângulo é extrair do Elemento de Fixação uma Força Tensora além do seu Limite de escoamento, devemos considerar como Força mínima 67,7 kN e como Força máxima 87,5 kN.

Observamos também na Figura 1, a existência de uma linha pontilhada, paralela ao segmento linear da zona elástica e que intercepta o segmento não linear da região elasto-plástica.

A distância entre estas duas linhas paralelas, com dimensão em graus, denomina-se Ductilidade, uma propriedade importante dos Elementos de Fixação, que de maneira bem simplificada significa “capacidade à deformação permanente” e usualmente é representada pela letra β .

No caso particular deste Parafuso, o valor de β , especificado em desenho, é 440° mínimo; cujo significado prático é: após o Parafuso ultrapassar o seu Limite de escoamento, é possível “apertá-lo” mais 440°, sem adentrar na zona de deformação plástica permanente. Experimentalmente, temos encontrado valores de Ductilidade entre $520^\circ \leq \beta \leq 770^\circ$,

O diagrama esquemático mostrado na Figura 12, ressalta o Processo de Aperto por Torque & Ângulo de Deslocamento, no qual necessariamente o Torque Final ocorre na zona elasto-plástica e os valores (mínimo e máximo) dependerão da variação do Limite de escoamento do Elemento de Fixação bem como dos coeficientes de atrito que atuam na Junta propriamente dita.

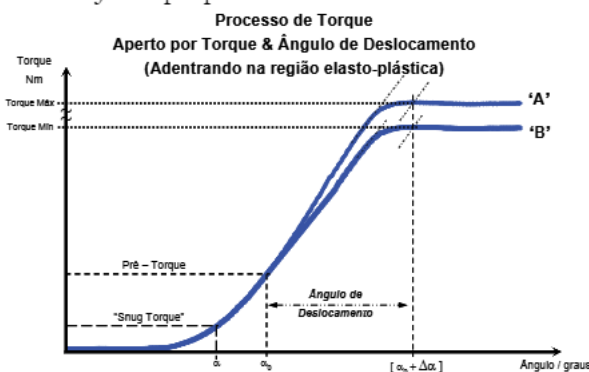


Figura 12 – Esquemática de um Processo de Torque, denominado Aperto por Torque & Ângulo de Deslocamento, avançando na região elasto-plástica do Parafuso.

É possível apresentar um exemplo real deste tipo de aperto. Considerando um Pré-Torque de 60 Nm e um Ângulo de Deslocamento da ordem de 230°, no processo ora considerado buscou-se obter uma Força Tensora mínima de 70 kN e nenhum risco de ocorrência de deformação permanente do Elemento de Fixação.

A dispersão da Força Tensora é minimizada quando se utiliza o Processo Torque & Ângulo e se adentrarmos na região elasto-plástica do Parafuso, esta dispersão será função direta da capacidade de geração de Força do Elemento de Fixação, cujas variáveis assinaláveis são o Tratamento Térmico e o coeficiente de atrito de rosca (μ_G), pois este afeta o Rendimento, devido ao esforço combinado tração-torsão.

Por outro lado, a dispersão com relação ao Torque Final é muito grande, devido à variação (permitida) dos coeficientes de atrito de rosca e de cabeça dos Elementos de Fixação e a interação destes Elementos com as Contra-pecas onde, via de regra, não se especifica nenhuma condição de superfície tais como planicidade, paralelismo, compatibilidade dos revestimento, etc.

A dispersão acima citada pode ser visualizada através do Histograma mostrado no Figura 13, referente ao Processo 60 Nm + $\Delta\alpha$ de 230°.

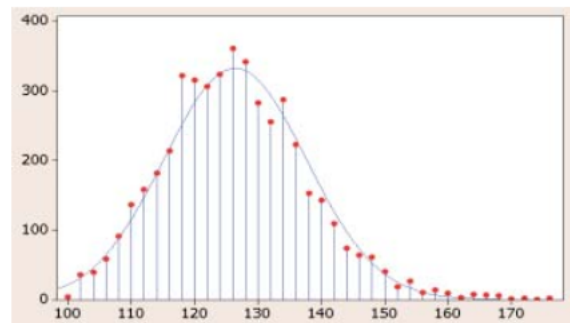


Figura 13 – Histograma do Torque Final alcançado no Processo de Torque denominado Aperto por Torque & Ângulo de Deslocamento, na região elasto-plástica (60 Nm + $\Delta\alpha$ igual a 230°)

Sumarizando o Processo de Aperto por Torque & Ângulo de Deslocamento, temos:

VANTAGENS

- Garante uma Força Tensora estável;
- É adequado para Juntas consideradas críticas;
- Risco Zero para “Torque Falso”;
- Cada Junta permite uma Estratégia de Aperto particular e específica.

DESVANTAGENS

- O equipamento não é tão simples (deve ser eletro-eletrônico);
- Não é possível auditar o Ângulo de Deslocamento.

CONCEITOS GERAIS SOBRE TORQUE E PROCESSOS DE TORQUE

PARTE IV - Final

E eis que chegamos a Parte IV do Curso sobre Torque.

Aperto por Controle de Força - "Yield"

No quarto processo a ser apresentado, discorreremos sobre Aperto por Controle de Força, no Limite de Escoamento, também chamado de Aperto no 'Yield', cujo embasamento é o acompanhamento da variação da inclinação, em tempo real, dos valores de Torque versus Ângulo. Esta variação é denominada Gradiente de Torque".

Fisicamente, ao acompanhar um aperto pelas variáveis Torque e Ângulo, na região elástica, este gradiente é constante. Na interface Zona Elástica ↔ Zona Elasto-plástica, este gradiente começa a diminuir, pois o avanço do ângulo está gerando pequenas deformações do Elemento de Fixação, isto é, não está respeitando a Lei de Hooke.

Mecanicamente, a transição acima referida depende exclusivamente da Classe de Resistência do Elemento de Fixação, por exemplo 8.8, 10.9 ou 12.9. Por outro lado, a Força Tensora ("Clamping Load") obtida dependerá também do Rendimento (η), que como já foi mencionado, só depende do Coeficiente de Atrito da Rosca (μ_G).

As Figuras 14 e 15 ressaltam exatamente este limiar:

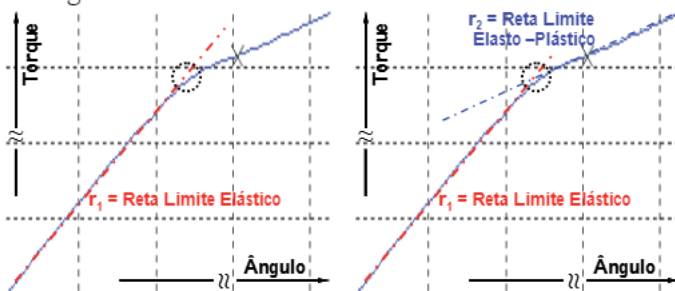


Figura 14

Figura 15

Figuras 14 e 15 – Esquemática da região elástica (reta r_1) e região elasto-plástica (reta r_2). É evidente o menor gradiente da reta r_2 .

O equipamento eletroeletrônico de aperto detecta esta variação e ASSUME que o Elemento de Fixação está nas vizinhanças do seu Limite de Escoamento.

A Força Tensora gerada estará relacionada com a Classe de Resistência e o Torque Final será consequência desta Força e das propriedades tribológicas da Junta.

Como a detecção é a partir da variação do Gradiente de Torque, este processo de aperto fica vulnerável à qualidade da aquisição do binário 'Torque e ângulo'. Qualquer ruído, quer seja físico, eletrônico ou mecânico poderá afetar a linearidade da curva e o sistema então presumirá (erroneamente) que está na transição inerente ao "Yield".

Podemos então sumarizar o Processo de Aperto por Torque (com controle de Força), no 'Yield':

DESVANTAGENS

- O equipamento deve ser eletroeletrônico (e sofisticado);
- Não é possível auditar o Limite de Escoamento

VANTAGENS

- Garante uma Força Tensora Elevada e estável;
- É adequado para Juntas consideradas críticas;
- Risco Zero para "Torque Falso";
- Permite um controle das condições de contorno da Junta pois o alvo do aperto é o limiar da região elástica do Elemento de Fixação.

Aperto por Controle de Força - Ângulo de Torção

O quinto (e último) processo a ser destacado é o Processo de Aperto por Torque e Ângulo de Torção, uma novíssima tecnologia que está em fase de implementação, mas creio que deva aqui ser apresentado.

Este processo de aperto permite apertar uma Junta, buscando-se alcançar uma específica Força Tensora. A metodologia necessária para o referido processo leva em conta a variável "ângulo de torção", que é simbolizado por $[\theta]$, o qual é gerado devido à reação que o Elemento de Fixação exerce para que uma dada Força seja alcançada.

Como o "ângulo de torção" é uma característica particular daquela Junta que está sendo especificadamente apertada, para a sua definição necessita-se que durante o processo de aperto sejam efetuadas três etapas, a saber: *i*) pré-aperto, *ii*) desaperto e *iii*) re-aperto.

A origem física desta metodologia de aperto é suportada pela equação abaixo:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{p} \cdot F_V \cdot (\partial_s + \partial_p) + \theta$$

Consolidando as três etapas: *i*) pré-aperto, *ii*) desaperto e *iii*) re-aperto numa mesma esquematização, é possível construir a Figura 16:

A Figura 16 sumariza quais os parâmetros necessários para a definição do ângulo de torção θ , de maneira que todas as 'contaminações' devido as folgas oriundas do equipamento de aperto sejam minimizadas.

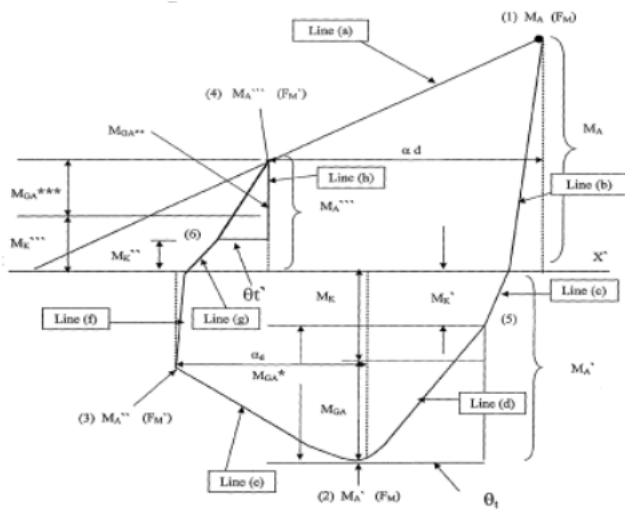


Figura 16 – Esquematisação das grandezas mensuráveis nas etapas de aperto, desaperto e reaperto.

A Figura 17 mostra a curva Torque versus Ângulo, segundo esta metodologia, ressaltando os ângulos θ , quando do desaperto e do reaperto.

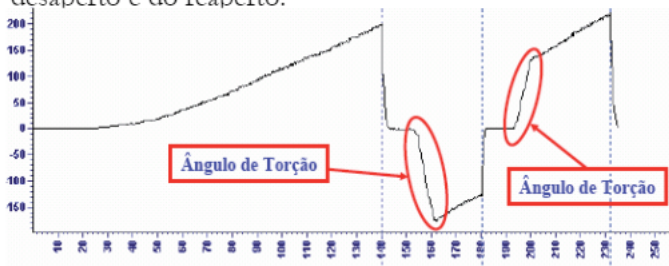


Figura 17 – Curva Torque – Ângulo, quando da aplicação da referida metodologia.

Com as grandezas obtidas (conforme mostra a Figura 16), as seguintes propriedades são determinadas: Coeficiente de Atrito de Cabeça (μ_K), Coeficiente de Atrito de Rosca (μ_G), Força Tensora (num determinado segmento linear, já na condição de re-aperto), “ k_{factor} ”, o Torque Útil, o Torque dissipado na Rosca e o Torque dissipado na Cabeça.

Também é possível calcular outras propriedades, tais como o Gradiente de Torque, o Gradiente de Força e a Resiliência da Junta.

Como esta técnica se propõe a garantir uma Força Tensora específica, determinada pela Engenharia de Produtos, as propriedades acima citadas permitem uma decisão lógica do equipamento de aperto, ou seja, qual o Torque Final necessário para obter tal Força ou qual ângulo de deslocamento deverá ser aplicado, a partir de um dado pré-torque, também na condição de re-aperto, para atingir a mesma finalidade, ou seja, uma perfeita consonância entre o que é requerido pela Engenharia de Produtos e o que é exequível pela Engenharia de Processos (Manufatura).

A aplicabilidade desta metodologia é total, tanto para Juntas críticas como não críticas, quer sejam juntas rígidas ou juntas ‘flexíveis’ (juntas que perdem pré-carga) além da garantia de que a força aplicada não ultrapassará a capacidade da Junta.

Podemos exemplificar a aplicação desta metodologia, tomando uma dada Junta que contém uma Contra-peça de material não ferroso, com possibilidade de deformação permanente, a partir de uma força de 17,0 kN. Esta condição passa a ser um limite fundamental de contorno.

Os seguintes dados foram obtidos na condição de re-aperto: Torque Total = 17,03 Nm; Segmento Linear (Angular) = 50,39°.

Utilizando o conceito de “ângulo de torção”, as seguintes grandezas foram determinadas: Força Tensora (inerente aos 17,03 Nm) = 13,25 kN, Coeficiente de Atrito de Cabeça (μ_K) = 0,124, Coeficiente de Atrito de Rosca (μ_G) = 0,083.

A partir destas valores torna-se possível determinar o “ k_{factor} ” (0,161), o Gradiente de Torque (0,338 Nm/grau), o Gradiente de Força (0,263 kN/grau) e a Resiliência da Junta ($1,32 \cdot 10^{-5} \text{ mm N}^{-1}$).

Como a Força Tensora está limitada a 17 kN máximo, a Estratégia do Processo de Aperto pode ser: i) Torque Seco [neste caso, o equipamento definirá como o Torque Alvo o valor de 22,0] ou ii) Torque & Ângulo de Deslocamento, que para as condições deste aperto será de um Pré-Torque de 10 Nm e um ângulo de Deslocamento de 35°.

Como já ressaltado, esta metodologia permite apertar uma Junta a uma determinada Força Tensora e desta forma, podemos assim caracterizar o Processo de Aperto por Torque (com controle de Força) via ângulo de torção:

DESvantagens

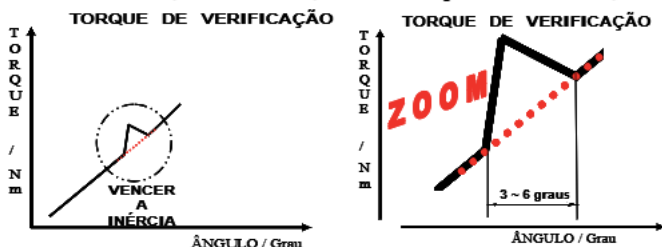
- O equipamento deve dispor de um transdutor de Ângulo e um transdutor de Torque;
- Não é possível auditar a Força Tensora gerada;
- Trata-se de uma novíssima tecnologia

Vantagens

- Garante uma Força Tensora Específica (com uma dispersão máxima de $\pm 4\%$);
- É adequado também para Juntas consideradas críticas;
- Risco Zero para “Torque Falso”;
- Permite um controle total NAQUELE aperto e para AQUELA Junta em particular;
- O aperto pode ser tanto na região elástica como na região elasto-plástica do Parafuso.

Controle do Torque de Verificação

Como definido na Parte I deste Curso, o Torque de Verificação também é aplicado na Auditoria de Processos de Torque. Relembramos que é o Torque, de Aperto, requerido para iniciar a quebra de uma fixação já efetuada, ou seja, devemos vencer a inércia do sistema. As Figuras 18 e 19 detalham esta “quebra” e o quanto (em graus) devemos avançar na definição do Torque de Verificação.



Figuras 18 e 19 – Esquematisação da condição do “Torque de Verificação”, ressaltado a “quebra” da inércia, aproximadamente 5 graus.

Outra denominação, mais apropriada, é Torque Residual, pois permite avaliar qual é o Torque Real que está na Junta, considerando que pode ocorrer um relaxamento natural da mesma.

O Torque de Verificação (ou Residual) deve ser sempre analisado em relação ao Torque Dinâmico aplicado.

Variáveis assinaláveis do Processo

As Velocidades das etapas de aperto em um Processo de Torque são variáveis muito significativas. Na etapa de aproximação, é possível uma maior velocidade mas não tão elevadas que possam causar “empastamento” (“stick-slip”), como mostrado na Figura 20 abaixo.

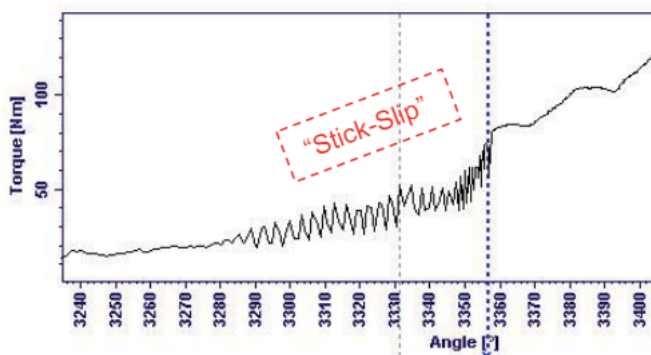


Figura 20 – Curva Torque&Ângulo, detalhando o “empastamento”, fenômeno denominado “stick-slip”.

Desta forma, recomenda-se que na fase final do aperto, em geral a fase angular, a velocidade seja bem menor do que na fase de aproximação.

O aperto pela Porca é o mais adequado, pois minimiza a possibilidade de Torque Parasita.

Quando o acesso da Ferramenta é difícil, a utilização de dispositivos tais como Junta Universal, “Crowfoot”, etc. é justificada, mas a qualidade do Aperto ficará questionável.

Os fatores geométricos inerentes ao Elemento de Fixação são bem definidos. Por outro lado, condições de superfície das Contra-peças nem sempre são explícitas.

Podemos ressaltar que a Planicidade, a Perpendicularidade, a Rugosidade, etc., têm relevância quanto ao assentamento dos componentes de uma Junta.

A existência de rebarbas, devido ao processo de corte / extrusão de furos pode influir no Processo de Aperto. Para minimizar tal efeito é possível especificar raio embutido no Parafuso, ou seja, agrega-se mais uma particularidade no Elemento de Fixação.

Com relação aos revestimentos dos Elementos de Fixação os mesmos possuem características específicas quanto aos coeficientes de atrito, quer seja de rosca quer seja de cabeça, porém o mesmo não ocorre com as Contra-peças.

É sabido que o comportamento de certos revestimentos dependem não só da superfície da Contra-peça bem como do tipo de revestimento, ou seja, existe comportamento diferenciado se a peça é pintada, zincada, etc.

A compatibilidade entre estes diferentes revestimentos, associados aos agentes modificadores de Torque tem se mostrado uma das principais variáveis do Processo.

Processo Ideal de Aperto e Monitorização, através do Gradiente de Torque

Uma das maneiras de monitorar um Processo de Torque é utilizar a razão da diferença entre o Torque Final e o Pré-Torque (ou um dado Torque de Monitoramento) e a respectiva diferença entre os Ângulos de Aperto.

Definimos γ como Gradiente de Torque, expresso em Nm/grau. A aquisição constantes deste dado permitirá avaliar a amplitude e a dispersão do valor de γ , e uma análise profunda das suas possíveis causas poderá ser feita.

A Figura 21 ilustra as velocidades recomendadas, na fase de aproximação e na fase de aperto. Também mostra o conceito de Gradiente de Torque em função do Torque Final obtido, bem como da janela de Torque de aprovação.

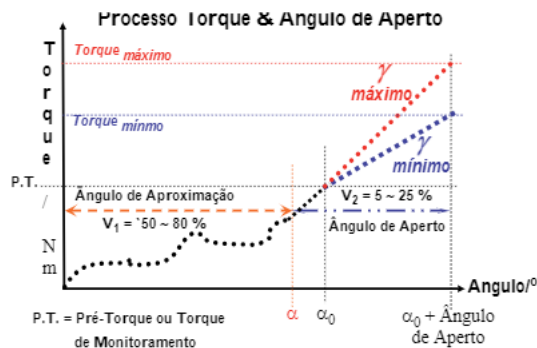


Figura 21 – Curva Torque & Ângulo, nas suas diversas etapas (aproximação e aperto final), as respectivas velocidades, bem como os gradientes de Torque (γ).

LEIA MAIS SOBRE TORQUE

■ DIN 946 – Determination of Coefficient of Friction of Bolt/Nut Assemblies under specified conditions, 1991.

■ CIOTO, R., Comportamento das Juntas Rigidamente Fixadas por Parafusos, publicação da METALAC – SP, 1995.

■ GENERAL MOTORS TECHNICAL BULLETIN N# 002 – Friction Coefficients Considerations, 1999.

■ BARBOZA, J., GARCIA, R., CIOTO, R., COLLARES, A. R., Fastener True Elongation Threshold as a Function of Thread Length and Tensile Strength, SAE TECHNICAL PAPER SERIES, 2001 – 01- 3826 E, 2001

■ VDI 2230 – Systematic calculation of high duty bolted joints, 2003.

■ GÖRAN, R. T., Controlled Tightening Over the Yield Point of a Screw: Base don Taylor's Series Expansions, Journal of Pressure Vessel Technology, v. 125, 2003.

■ DIN ISO 16047:2005(E) – Fasteners – Torque /Clamp Force Testing, 2005.

■ CIOTO, R., COLLARES, A. R., ZUFFO, C. H., Method for Attaining a Predetermined Clamping Force in Threaded Joints, Patent Cooperation Treaty (PCT) N# WO 2007 / 028218 A 1, 2007.

Resposta do Exercício proposto na página 14:

Foi visto que, considerando o Processo Torque e Ângulo de Deslocamento igual a $90\text{Nm}+68^\circ$, 'Snug Torque' de 40 Nm e $(\mu_K) = (\mu_G) = 0,16$ a Força Tensora Total é da ordem de 38,4 (18,3 + 20,1) kN. A mesma força pode ser obtida com um processo Torque & Ângulo do tipo: 60 Nm + 105° .

Na condição de menor valor dos coeficientes de atrito, isto é $(\mu_K) = (\mu_G) = 0,08$, o Processo Torque e Ângulo de Deslocamento: $90\text{Nm}+68^\circ$, com o 'Snug Torque' de 40 Nm gerará uma Força Tensora Total da ordem de 53,8 kN, isto é 33,7 + 20,1 kN (40% maior comparando quando os valores de $\mu_K = \mu_G = 0,16$).

Para o processo: $60\text{Nm}+105^\circ$, nas mesmas condições acima, a Força Tensora será de 44,5 (13,5 + 31,0) kN, evidenciando a importância dos coeficientes de atrito, na Fase do Pré-Torque.

Já o valor de 53,8 (13,5 + 40,3) kN poderá ser obtido, mantendo-se o pré-torque em 60 Nm porém aumentando o ângulo de deslocamento para 136° , isto é, um processo Torque & Ângulo de Deslocamento do tipo: $60\text{Nm}+136^\circ$.



CONCEITOS RELEVANTES SOBRE COEFICIENTE DE ATRITO

Este artigo, se aprofundará nos aspectos físicos e matemáticos que norteiam a propriedade coeficiente de atrito e a sua contribuição na capacidade de geração de força de um Elemento de Fixação, bem como na partição da Energia empregada/dissipada num processo de aperto. Todos os revestimentos aqui citados são isentos de cromo hexavalente.

Fundamentação Científica

A seguir, serão apresentados e discutidos os fundamentos envolvidos no processo de aperto de elementos de fixação.

A) Fenômenos Atuantes no Parafuso durante um Processo de Aperto

A.I. - Tensões Torsionais

Durante o aperto, o Parafuso estará sujeito à tensão de torção em adição à tensão axial, o que se denomina esforço combinado tração Força de Montagem [F_M] e o momento torsional [M_G] na rosca do parafuso pode ser derivada da mecânica dos planos inclinados^[Ref.1]:

$$M_G = F_M \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\varphi + \rho') \quad \text{Eq. 1}$$

onde

$$\tan(\varphi) = \frac{p}{\pi \cdot d_2} \quad \text{[Ref.2]} \quad \text{Eq.2}$$

onde

p = passo
 d_2 = diâmetro menor no fundo da rosca

e

$$\tan(\rho') = \mu'_G = \frac{\mu_G}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad \text{[Ref.3]} \quad \text{Eq.3}$$

Para uma rosca com ângulo do flanco igual a 60°, condição da maioria dos Elementos de Fixação, tem-se que:

$$\cos \frac{\alpha}{2} = 0,8658$$

logo

$$\mu'_G = 1,155 \cdot \mu_G \quad \text{Eq. 4}$$

Com ângulos φ e ρ normalmente pequenos, a Eq. 1 pode ser escrita^[Ref.4]:

$$M_G = F_M \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left(\frac{p}{\pi \cdot d_2} + 1,155 \cdot \mu_G \right) \quad \text{Eq. 5}$$

A Tensão Torsional [τ_M] é dada por^[Ref.5]:

$$\tau_M = \frac{M_G}{W_p} \quad \text{Eq. 6}$$

onde

W_p é o momento resistente

Combinando as Eq. 5 e 6 tem-se a expressão final para a Tensão Torsional [τ_M]:

$$\tau_M = \frac{F_M \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left(\frac{p}{\pi \cdot d_2} + 1,155 \cdot \mu_G \right)}{W_p} \quad \text{Eq. 7}$$

Pela equação 7 pode-se compreender que durante o processo de aperto do Parafuso é gerada uma Tensão Torsional cuja grandeza depende do coeficiente de atrito das roscas (μ_G). Quanto maior for o coeficiente de atrito na interação rosca do parafuso - rosca fêmea da contra-peça, maior será a Tensão Torsional [τ_M], em função de uma dada força de união alcançada.

A.II.- Tensões Axiais

A Tensão Axial [σ_M] é dada por^[Ref.6]:

$$\sigma_M = \frac{F_M}{A_s} \quad \text{Eq. 8}$$

A área da secção transversal [A_s] é dada por^[Ref.7]:

$$A_s = \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad \text{Eq. 9}$$

Combinando as Eq. 8 e 9 tem-se a expressão final para a Tensão Axial [σ_M]:

$$\sigma_M = \frac{F_M}{\left(\frac{d_2 + d_3}{2}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{4}}$$

A.III.- Relação entre Tensões Torsionais e Axiais

Pela combinação das equações 6 e 8, a relação entre Tensões Torsionais [τ_M] e Axiais [σ_M] é a seguinte:

$$\frac{\tau_M}{\sigma_M} = \frac{M_G \cdot A_S}{W_P \cdot F_M} \quad \text{Eq. 11}$$

Por sua vez, pode-se considerar W_P , para roscas métricas igual a^[Ref.8]:

$$\frac{\tau_M}{\sigma_M} = \frac{M_G \cdot A_S}{W_P \cdot F_M} \quad \text{Eq. 12}$$

Consolidando as equações 7, 10, e 12 e algumas simplificações, tem-se que^[Ref.9]:

$$\frac{\tau_M}{\sigma_M} = \frac{M_G \cdot A_S}{W_P \cdot F_M} \approx 2 \cdot \frac{d_2}{d_3} \left(\frac{p}{\pi \cdot d_2} + 1,155 \cdot \mu_G \right) \quad \text{Eq. 13}$$

Pela equação 13 ressalta-se que a relação entre Tensão Torsional e Tensão Axial é extremamente dependente do coeficiente de atrito das roscas (μ_G) e dos fatores geométricos d_2 e d_3 .

A.IV.- Capacidade de geração de força de um Parafuso

É possível calcular a tensão de um Elemento de Fixação, no seu estado combinado, levando-se em consideração o Limite de Escoamento ($R_{p0,2}$) e o coeficiente de atrito de rosca (μ_G). A esta tensão denomina-se Capacidade de Geração de Força, representada por σ_{Mzul} .

A expressão matemática para σ_{Mzul} é a seguinte^[Ref.10]:

$$\sigma_{Mzul} = \frac{v \cdot R_{p0,2}}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left[\frac{4}{1 + \left(\frac{d_3}{d_2}\right)} \cdot \left[\frac{p}{\pi \cdot d_2} + 1,155 \cdot \mu_G \right] \right]^2}} \quad \text{Eq. 14}$$

onde

v = Grau de exploração do limite de escoamento durante o aparafusamento

B) Grandezas Relevantes durante um Processo de Aperto

B. I. - Força Tensora e Torque Total

A equação genérica^[Ref.11] (e muito simplista) para o cálculo do torque de aperto é a seguinte:

$$M_A = F_V \cdot d \cdot k \quad \text{Eq. 15}$$

M_A = Torque (total) de aperto Nm

F_V = Força Tensora kN

d = Diâmetro nominal do elemento de fixação mm

k = Coeficiente ou fator de torque adimensional

Considerando os diversos revestimentos e materiais normalmente utilizados, os valores de fator de torque (k) normalmente utilizados^[Ref.12] são mostrados na Tabela 1:

Revestimento / Material	Fator de Torque (k)
Fosfato mais óleo	0.12 ± 0.072
Zincado	0.17 ± 0.03
Zincado mais cera	0.16 ± 0.02
Oleado	0.20 ± 0.03
Aço Inoxidável	0.40 ± 0.10

Tabela 1. Valores de fator de torque em função do revestimento e/ou materiais.

O fator k incorpora diversas variáveis, tais como coeficiente de atrito, tolerâncias dimensionais, tipo de revestimento, processo etc. É importante ressaltar que o fator k não é o coeficiente de atrito propriamente dito, mas por outro lado, o mesmo está considerado nele.

Uma expressão mais detalhada que relaciona não só o Torque Total e Força Tensora como também os coeficientes de atrito, é mostrada abaixo^[Ref.13]:

$$M_A = F_V \cdot \left(0,16 \cdot p + 0,58 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{km}}{2} \cdot \mu_K \right) \quad \text{Eq. 16}$$

onde

P = passo mm

d_2 = diâmetro nominal do elemento de fixação mm

μ_G = coeficiente de atrito da rosca adimensional

D_{km} = diâmetro médio da superfície de assentamento mm

μ_K = coeficiente de atrito da cabeça adimensional

$$D_{Km} = \frac{d_w + d_h}{2} \text{ [Ref.14]} \quad \text{Eq. 17}$$

onde:

d_w = diâmetro de assentamento

d_h = diâmetro do furo

A expressão mostrada pela Eq. 16 permite calcular o Torque de Aperto necessário ou a Força Tensora gerada, utilizando parâmetros mais específicos em relação aos componentes da junta, com uma maior precisão quando comparada com a equação 15.

É possível expandir a Eq. 16 e discorrer sobre a partição do Torque Total

$$M_{A_{TOTAL}} = \left[(F_V \cdot 0.16 \cdot p) + (F_V \cdot 0.58 \cdot d_2 \cdot \mu_G) + \left(F_V \cdot \frac{D_{Km}}{2} \cdot \mu_K \right) \right]$$

$$M_{A_{TOTAL}} = M_{A_1} + M_{A_2} + M_{A_3} \quad \text{Eq. 18}$$

Onde:

$M_{A_{TOTAL}}$ = Torque Total

M_{A_1} = Torque Útil

M_{A_2} = Torque Dissipado na Rosca

M_{A_3} = Torque Dissipado na Cabeça

A equação 18 mostra que ao se buscar minimizar a dissipação de Energia na Cabeça e na Rosca, através de valores (sob controle) de μ_G e de μ_K , tenta-se maximizar a Energia Útil, que independe do atrito.

B. II. - Coefficientes de Atritos e Rendimento

O coeficiente de atrito de rosca pode ser expresso por^[Ref.15]:

$$\mu_G = \frac{M_G / F_V - 0.159 \cdot P}{0.578 \cdot d_2} \quad \text{Eq. 19}$$

sendo:

M_G = Torque na Rosca Nm

OBS.: Comparando-se os valores das constantes na Eq. 16 e 19 nota-se que na Norma DIN 946 estes valores são expressos com maior precisão.

Na mesma Norma^[Ref.15] encontra-se a expressão para o coeficiente de atrito da cabeça:

$$\mu_K = \frac{2 \cdot M_K}{D_{Km} \cdot F_V} \quad \text{Eq. 20}$$

sendo:

M_K = Torque na Cabeça Nm

A expressão para o coeficiente de atrito total (μ_{GES})^[Ref.15] é a seguinte:

$$\mu_{GES} = \frac{M_A / F_V - 0.159 \cdot p}{0.578 \cdot d_2 + \frac{D_{Km}}{2} \cdot \mu_K} \quad \text{Eq. 21}$$

Outra expressão matemática muito importante é a que relaciona o Rendimento [η] com o coeficiente de atrito da rosca [μ_G]^[Ref.16] que é uma adequação de uma outra expressão mais geral^[Ref.17]. Esta expressão é a seguinte:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left[\frac{4}{1 + \left(\frac{d_3}{d_2} \right)} \cdot \left[\frac{p}{\pi \cdot d_2} + 1.155 \cdot \mu_G \right] \right]^2}} \quad \text{Eq. 22}$$

A expressão acima define que o rendimento [η] é uma função exclusiva (e inversa) do coeficiente de atrito de rosca (μ_G), com relação aos respectivos parâmetros geométricos. Matematicamente, quanto maior μ_G menor será o rendimento [η].

B. III. - Força adicional gerada pela aplicação de um ângulo

A expressão que relaciona ângulo, resiliências e força tensora^[Ref.18,19] é a seguinte:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{p} \cdot F_M \cdot (\delta_S + \delta_P) \quad \text{Eq. 23}$$

onde:

F_M = Força Tensora

δ_S = Resiliência do Elemento de Fixação

δ_P = Resiliência da Junta

A expressão acima, válida apenas para a região elástica de uma Junta, mostra que a aplicação de um ângulo (após um torque de pré-aperto) num processo de

aperto de um elemento de fixação gera uma força tensora adicional, força essa que independe dos coeficientes de atrito de rosca e de cabeça. Um fator preponderante a ser considerado é a resiliência dos componentes da junta^[Ref.20], isto é, não só do elemento de fixação como de todos os demais componentes da junta (contra-peça, etc).

Aplicação dos conceitos acima em revestimentos

Podemos afirmar que o coeficiente de atrito de rosca (μ_G) pode ser considerado uma propriedade intensiva do revestimento, pois as grandezas geométricas p e d_2 (vide Eq. 19), por suas características têm especificações dos valores de tolerâncias dimensionais bem exíguos.

Esta nova realidade nas especificações de requisitos de desempenho dos revestimentos aplicados em elementos de fixação trouxe ao segmento um grande desafio, pois esta propriedade era bem difundida na Engenharia Mecânica e pouco disseminada em outros setores. Atualmente, as especificações só abrangem valores específicos para μ_{GES} onde os fatores geométricos que afetam D_{km} são muito significativos.

Em resumo, μ_G é uma propriedade intensiva do revestimento (só depende dele mesmo) e μ_{GES} é uma propriedade extensiva, pois depende também dos fatores geométricos. Podemos então considerar μ_G como uma espécie de impressão digital ('*finger print*') do revestimento considerado.

Ao analisar a expressão mostrada na Eq. 19, μ_G será constante desde que o Torque dissipado na rosca (M_G) seja proporcional à Força Tensora (F_t) aplicada:

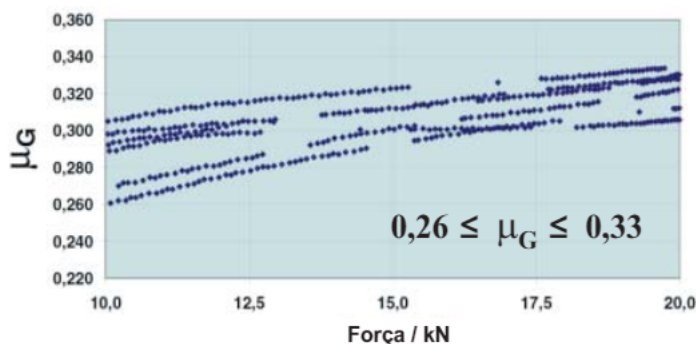
$$\mu_G = \frac{M_G}{0.578 \cdot d_2} \cdot \frac{1}{F_V} - \frac{0.159 \cdot p}{0.578 \cdot d_2} \quad \text{Eq. 24}$$

Espera-se que esta proporcionalidade ocorra, pois caso contrário, indica que o revestimento interfere na dissipação de Energia, pois a Força (na realidade, a Pressão nos flancos da rosca) modifica sua natureza tribológica.

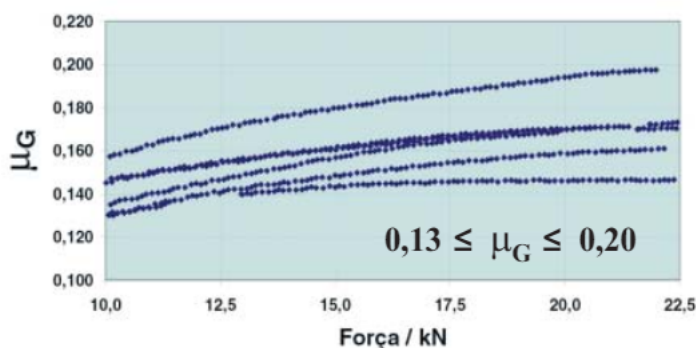
Considerando que o Elemento de Fixação seja um Parafuso revestido, os filetes externos interagem com os filetes internos do Inserto Roscado (ou Porca), no caso não revestido. Desta forma na interface entre os filetes internos/externos sempre ocorrerá a referida interação, principalmente com o último componente do revestimento (em geral o "Top Coat").

Os gráficos mostrados a seguir ressaltam a Grandeza Intensiva (μ_G) de vários revestimentos, considerando o Revestimento propriamente dito, os Apassivadores e os Selantes.

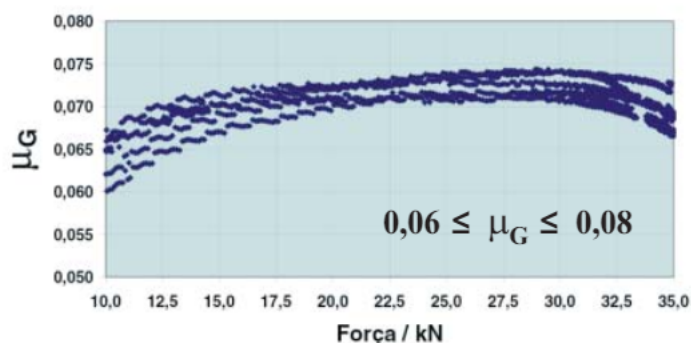
COEFICIENTE DE ATRITO DE ROSCA - μ_G
Zinco + Apassivação (sem Selante)



COEFICIENTE DE ATRITO DE ROSCA - μ_G
Zinco + Apassivação + "Selante Alto Atrito"

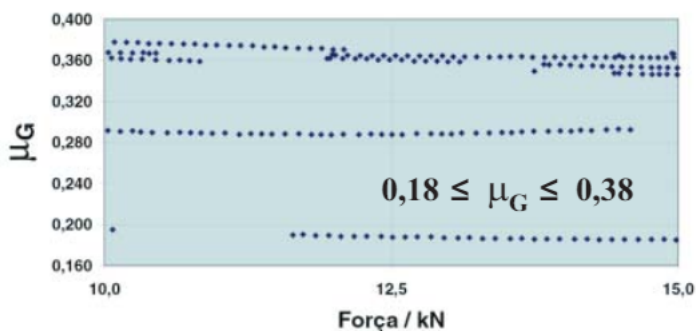


COEFICIENTE DE ATRITO DE ROSCA - μ_G
Zinco + Apassivação + "Selante Baixo Atrito"



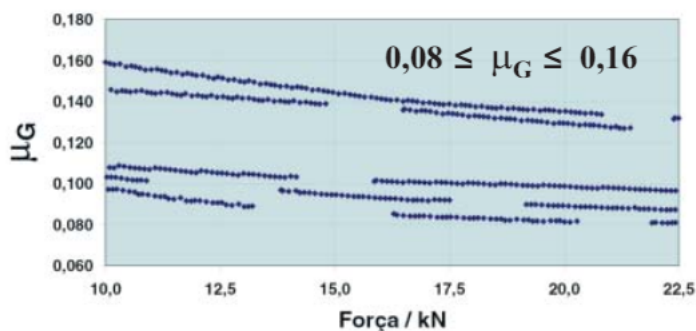
Comparando os três gráficos acima percebe-se a influência do Selante, bem como a importância do mesmo, em nivelar o coeficiente de atrito aos valores desejados.

COEFICIENTE DE ATRITO DE ROSCA - μ_G
Zinco + Apassivação (Negra) sem Selante



O gráfico acima revela que a apassivação (negra) do Zinco, devido à reatividade das substâncias enegrecedoras atribuem uma maior dispersão (comparando-se com a apassivação normal).

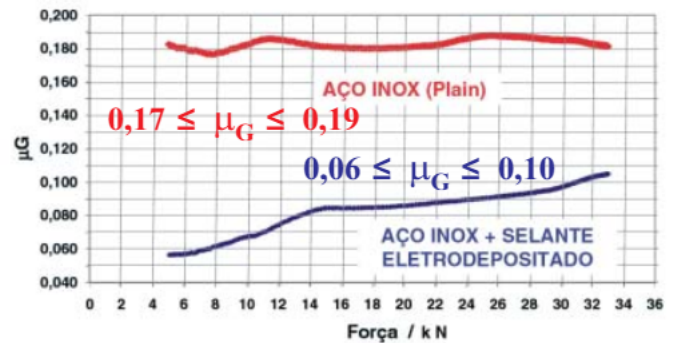
COEFICIENTE DE ATRITO DE ROSCA - μ_G
Zinco + Apassivação (Negra) + Selante



A dispersão dos valores do coeficiente de atrito, com a aplicação do Selante depende da camada de conversão, lembrando que o Selante também reage com a camada apassivada.

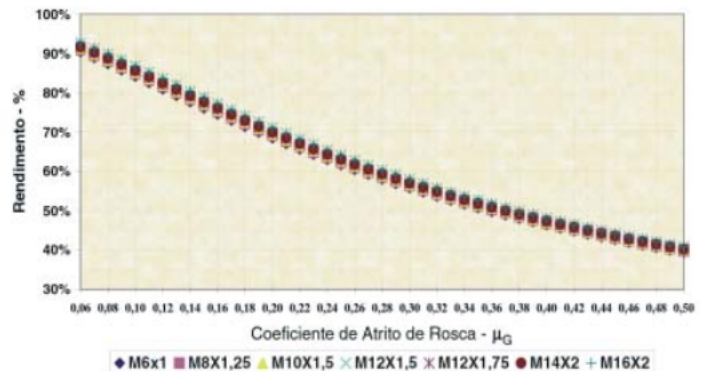
Uma nova geração de Selante já está disponível no Brasil. Trata-se de substâncias de carácter orgânico/polimérico, aplicado eletroliticamente (em meio aquoso), resultando numa camada única e uniforme, com baixo peso molecular (1.000 a 10.000 Daltons) com o objetivo de potencializar propriedades específicas, tais como elevadíssima resistência à corrosão, ao intemperismo e baixo coeficiente de atrito, atribuindo também características de superfície auto-lubrificante. Exemplificando a atuação deste Selante, selecionou-se Parafusos confeccionados em Aço Inoxidável, que sabidamente em processos de aperto se comportam de maneira randômica, e que em situações extremas causam a destruição da Junta, devido ao caldeamento do mesmo na Contra-peça.

COEFICIENTE DE ATRITO DE ROSCA - μ_G



Finalmente, após discorrer sobre o comportamento dos diversos revestimentos na propriedade intensiva coeficiente de atrito de rosca (μ_G) é possível, aplicando a expressão mostrada na Eq. 22 e através de simulação matemática utilizando valores reais de μ_G , avaliar o quão importante é esta propriedade, pois influe diretamente no rendimento e na capacidade de geração de Força de um Elemento de Fixação.

Rendimento em função de μ_G



O maior rendimento, em torno de 93%, ocorre no menor valor possível de μ_G (0,06). A medida que o coeficiente de atrito aumenta, o rendimento cai e, numa condição limite de elevado atrito na rosca, o Elemento de Fixação quebrará por torção.

Outra constatação é que, ao transformar termicamente o material de fabricação de Elementos de Fixação, busca-se aumentar suas propriedades mecânicas, por exemplo de 500 para 1.000 MPa. Ao aplicar um revestimento a um Elemento de Fixação e não levar em consideração o coeficiente de atrito de rosca, perde-se parte substancial deste ganho, ou seja, o revestimento aumenta a resistência à corrosão, atribue um melhor aspecto ao Elemento de Fixação, mas diminua a sua capacidade de geração de Força.

Referências Bibliográficas

- 1.- Norma VDI 2230 – Systematic calculation of high duty bolted joints , pg 67, eq. 5.4/14, 2003.
- 2.- *ibid*, eq. 5.4/15.
- 3.- *ibid*, eq. 5.4/16.
- 4.- CIOTO, R., Comportamento das Juntas Rigidamente Fixadas por Parafusos, publicação da METALAC, Sorocaba – SP, Parte II, Aperto de Juntas Aparafusadas, pg. 3 , eq. 81.
- 5.- Norma VDI 2230 – Systematic calculation of high duty bolted joints, pg 74, eq. 5.5/3, 2003.
- 6.- *ibid*, eq. 5.5/2.
- 7.- Norma VDI 2230 – Systematic calculation of high duty bolted joints, pg 68, eq. 5.4/25, 2003.
- 8.- Norma VDI 2230 – Systematic calculation of high duty bolted joints, pg 75, 2003.
- 9.- *ibid*, eq. 5.5/5.
- 10.- CIOTO, R., Comportamento das Juntas Rigidamente Fixadas por Parafusos, publicação da METALAC, Sorocaba – SP, Parte II, Aperto de Juntas Aparafusadas, pg. 4 , eq. 86.
- 11.- General Motors Technical Bulletin N# 002/1999 – Friction Coefficients Considerations, pg. 1, eq. 1, 1999.
- 12.- General Motors Technical Bulletin N# 002/1999 – Friction Coefficients Considerations, pg. 1, table 1, 1999.
- 13.- Norma VDI 2230 – Systematic calculation of high duty bolted joints , pg 67, eq. 5.4/20, 2003.
- 14.- *ibid*, eq. 5.4/21.
- 15.- Norma DIN 946 – Determination of Coefficient of Friction of Bolt / Nut Assemblies under specified conditions, 1991.
- 16.- BARBOZA, J., GARCIA, R., CIOTO, R., COLLARES, A. R., Fastener True Elongation Threshold as a Function of Thread Length and Tensile Strength, SAE TECHNICAL PAPER SERIES, 2001–01- 3826 E, eq.3, 2001.
- 17.- Norma VDI 2230 – Systematic calculation of high duty bolted joints , pg 75, eq. 5.5/7, 2003.
- 18.- BARBOZA, J., GARCIA, R., CIOTO, R., COLLARES, A. R., Fastener True Elongation Threshold as a Function of Thread Length and Tensile Strength, SAE TECHNICAL PAPER SERIES, 2001–01- 3826 E, eq.1, 2001.
- 19.- GÖRAN, R. T., Controlled Tightening over the Yield Point of a Screw: Base on Taylor's Series Expansions, Journal of Pressure Vessel Technology, v. 125, p. 462, 2003.
- 20.- Norma VDI 2230 – Systematic calculation of high duty bolted joints , cap. 5.1.1, pg 77, 2003.



Dr. Roberto Garcia
Pesquisador Colaborador do GEMAT
(Grupo de Eletroquímica e Materiais) - UNESP
roberto.2.garcia@gmail.com

Apoio:
METALTORK IND. E COM. DE AUTO PEÇAS LTDA.
Rua Brejaúva, 400 - Vl. Santa Rita - Diadema - SP
Tel.: 55 11 4070.5511
www.metaltork.com.br