

Procedimento para avaliação de ferramentas pneumáticas de parafusamento baseado na norma ISO 5393

Procedure for evaluation of fastening pneumatic tools based on ISO 5393



Augusto Villarino Frischmann¹
Hélio Radke Bittencourt²

RESUMO: A seleção da ferramenta correta para um processo de montagem por parafusamento é uma atividade que pode ser bastante demorada e imprecisa. Isso se deve ao grande número de variáveis que precisam ser analisadas, como o tipo de junta a ser parafusada, a faixa de torque, a precisão necessária, a geometria das peças utilizadas na montagem, entre outras. Este artigo propõe a implantação de um procedimento para seleção de ferramentas de parafusamento pneumáticas em função da sua tolerância de torque, utilizando como base a norma ISO 5393:1994. O objetivo deste procedimento é evitar colocar em operação ferramentas que não tenham condições de realizar o trabalho com a precisão especificada, prevenindo-se, assim, a geração de retrabalho ou falhas no produto e, conseqüentemente, aumentando a competitividade da indústria. Os cálculos necessários são apresentados de maneira didática a partir de um conjunto de dados simulados e uma proposta de redução no número de amostras a serem coletadas é sugerida a partir de um estudo de simulação.

Palavras-chave: ISO 5393; Parafusamento; Avaliação da performance de parafusadeiras; Controle de torque.

ABSTRACT: *The selection of the right bolt tightening tool for an assembly line is an activity that can be quite delayed and imprecise. This is due to the large number of variables that need to be analyzed, such as the type of joint to be screwed, the torque range, the accuracy required, the geometry of the parts used in the assembly, among others. This paper proposes the implementation of a procedure for selecting pneumatic fastening tools depending on their tolerance of torque, by using ISO 5393:1994. This procedure aims to avoid placing tools in operation when they are unable to perform the job with the specified precision, preventing up thus generating rework or defects in the product and, consequently, increasing the competitiveness of the industry. The necessary calculations are presented in a didactic manner from a set of simulated data and a proposed reduction in the number of samples to be collected is suggested from a simulation study.*

Keywords: *ISO 5393; Fastening; Evaluation of fastening tools; torque control.*

1. INTRODUÇÃO

Nas indústrias metal-mecânicas e, principalmente, naquelas onde o processo de montagem está presente, são realizados diferentes processos de fabricação por junção, tais como a rebiteagem, a colagem e a soem, por exemplo. A montagem é geralmente um dos processos finais na manufatura, tendo influência direta na qualidade e no ciclo de vida do produto (LEE *et al.*, 2005). Basicamente, existem dois tipos de elementos fixadores para a união entre duas ou mais partes de uma montagem: o parafuso e o rebite. Além desses fixadores, os acoplamentos entre peças podem ser formadas através dos processos de colagem, soldagem ou brasagem (GRIZA, 2000). Entretanto, de acordo com Milani e Hamedi (2008), dentre todos os processos de montagem existentes, o processo de parafusamento é o que vem sendo cada vez mais largamente utilizado e ganhando espaço nas fábricas.

Apesar da simplicidade e versatilidade, juntas parafusadas possuem a inevitável e inerente limitação de eventualmente afrouxar sob condições de vibração, se submetidas a um torque insuficiente. Isso faz com que as rotinas de manutenção dos componentes parafusados necessitem ter um aumento em sua frequência de inspeção

¹ Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

² Faculdade de Matemática, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - Departamento de Estatística

a fim de prevenir falhas. Sendo assim, o aperto correto é uma característica crítica do processo diretamente relacionada à qualidade do produto. A verificação do torque pode ser feita basicamente de duas maneiras distintas: a verificação estática e a verificação dinâmica. Enquanto que a verificação estática consiste em verificar o torque residual de um parafuso após o mesmo ter sido apertado, a verificação dinâmica, ao contrário, consiste em monitorar o torque durante o parafusamento. Esse segundo método oferece algumas vantagens sobre o método de verificação estática, tanto no que tange à precisão da leitura, pois há uma diminuição da influência do operador, quanto no que se trata de não haver necessidade de se adicionar uma inspeção posteriormente à conclusão do aperto. Por outro lado, como é feito durante o processo de aperto propriamente dito, torna-se impossível repetir a leitura, o que impede, por exemplo, que seja feito um estudo de Repetitividade e Reprodutibilidade (R&R).

Este artigo tem como tema central o procedimento de seleção de ferramentas pneumáticas de parafusamento na indústria metal-mecânica. O estudo foi motivado pelo fato de que o uso de ferramentas com precisão inadequada pode ocasionar apertos fora de especificação e, dada as características do método de monitoramento do processo, pode haver uma demora na detecção deste tipo de problema. Isso se deve a necessidade de uma quantidade razoável de dados para que se note o aparecimento de tendências nas cartas do Controle Estatístico de Processo (CEP). Em situações de frequência de amostragem baixa o problema torna-se mais crítico. Assim, é possível que produtos com não-conformidades tenham sido montados antes que um alerta seja percebido no CEP.

O objetivo central deste estudo é propor um método preventivo de avaliação de ferramentas baseado na ISO 5393 (1994). Além disso, pretende-se adaptar um procedimento normatizado, que possibilite a redução no tamanho amostral com pequena diminuição na confiabilidade, permitindo que um maior número de ferramentas possa ser avaliado num mesmo período de tempo. O estudo limita-se às linhas de montagem onde são utilizadas ferramentas pneumáticas do tipo não-pulsativas nas quais a regulagem se dá durante o processo, diretamente no produto. Além disso, presume-se que a empresa tenha um sistema de qualidade implantado (e.g. ISO 9000) e realize o controle de seus processos através de ferramentas estatísticas, como o CEP e/ou estudos de capacidade.

Não é objetivo deste trabalho, descrever ou discutir os métodos de monitoração do processo, como o CEP e a inspeção 100%, bem como discorrer sobre as características mecânicas dos sistemas parafusados, ou suas propriedades metalúrgicas e efeitos, mas, sim, adequar um procedimento de cálculo de precisão de uma ferramenta normatizada a um processo corrente em uma planta onde o processo de montagem por parafusamento se faça presente.

As seções subsequentes estão assim organizadas: o referencial teórico é apresentado na seção 2; os aspectos metodológicos na seção 3; os resultados e discussão derivados do estudo de simulação na seção 4 e, por fim, as considerações finais na seção 5.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Acredita-se que a história das juntas parafusadas seja oriunda da Grécia antiga, onde as mesmas eram utilizadas na aplicação de força no processo de prensagem das azeitonas (FUJI, 1998). Segundo Bhattacharya *et al.* (2008), a primeira obra de grande porte onde se pode perceber uma larga utilização dos parafusos data de 1779, ocorrido na construção da *Iron Bridge* em Telford na Inglaterra. Desde então, foram desenvolvidos uma ampla gama de parafusos e seu uso começou a ser aplicado na montagem das mais diversas estruturas.

O processo de montagem através de juntas parafusadas é o método de união mais amplamente utilizado em montagens industriais (LEE *et al.* 2005; SENEVIRATNE *et al.*, 2001). Isso se deve ao fato que esse processo possui várias vantagens como a facilidade para montagem e desmontagem (PAI; HESS, 2002) e alto grau de serviçabilidade sem danos às peças desmontadas, com o uso de ferramentas muito simples (BHATTACHARYA *et al.*, 2008). Ainda, segundo Milani e Hamed (2008), outra vantagem deste processo é que os seus elementos principais, os parafusos e porcas, são comercialmente disponíveis em uma grande variedade de tamanhos, modelos e materiais, além de serem em sua maioria normatizados e baratos.

Segundo Walters (2005), o processo de parafusamento consiste em criar uma união que mantenha fixas ou presas utilizando um parafuso, duas ou mais superfícies com uma determinada força, e a característica que se deseja controlar, nesse caso, é a força de união. A Figura 1 mostra a representação dos elementos de uma junta parafusada típica.

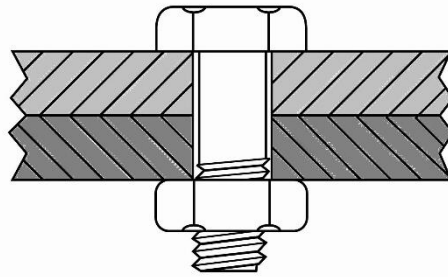


Figura 1 - Junta Parafusada Típica

Quando um parafuso e uma porca são usados para unir mecanicamente duas ou mais peças, a porca é apertada através da aplicação de torque, causando um alongamento axial do parafuso. Quando a cabeça do parafuso e a porca (geralmente com uma arruela) pressionam as peças, o parafuso atinge o estado chamado de pré-carga, ou pré-tensão. Esse alongamento do parafuso tem um efeito de mola sobre a junta, fazendo com que as peças mantenham-se unidas através da tração da mesma (CHAKHERLOU *et al.*, 2010). A Figura 2 mostra uma representação do efeito de mola causado pelo alongamento do parafuso.

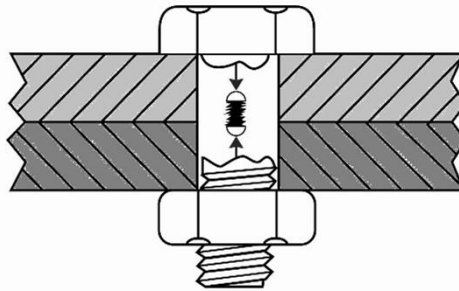


Figura 2 - Representação do efeito de mola causado pelo alongamento do parafuso

A tensão correta de pré-carga aplicada em um processo de montagem por parafusamento é crítica para a confiabilidade da junta. Se a força de união entre as peças for muito baixa e a junta for submetida a tensões de carga cíclicas, o parafuso poderá soltar-se devido à tensão de tração, ou quebrar devido à tensão de cisalhamento, e a integridade da junta ficará comprometida. Por outro lado, se a força de união for muito superior à necessária, poderá ocorrer a quebra do parafuso devido às tensões de tração existentes no parafuso (BAGGERLY, 2001).

Embora a medição da força de união pareça uma tarefa simples de engenharia, atualmente para a produção em larga escala, não foi desenvolvido um método prático que permita fazer o controle da força de união (MILANI; HAMED, 2008). O que se faz nesse caso como alternativa é medir a força de união de maneira indireta, através da medição do torque aplicado no parafuso (WALTERS, 2005). Existem razões históricas para a utilização deste método, pois, antes de as empresas adotarem os programas de controle da qualidade total, havia a tendência de se projetar juntas com altos coeficientes de segurança em comparação com os atuais. Esses coeficientes de segurança, no entanto, implicavam em maiores custos do produto, o que, de acordo com Feigenbaum (1994), exerce um forte impacto sobre a produtividade, e conseqüentemente tem influência direta sobre a lucratividade de uma organização.

Os recursos utilizados na produção são determinantes na qualidade e custo da produção. Se os equipamentos selecionados para o processo forem suficientemente precisos para atender as tolerâncias especificadas no projeto do produto, espera-se custos razoáveis e qualidade aceitável. Por outro lado, se os equipamentos não corresponderem de forma consistente aos objetivos da qualidade, serão observados custos elevados, retrabalhos e refugos em maior quantidade (FEIGENBAUM, 1994).

Em geral, pode-se assumir que o torque aplicado em uma determinada junta pode ser determinado pela Equação 1:

$$\text{Torque} = f \times l \times g \quad (1)$$

Onde, f é o coeficiente de atrito dos elementos da junta, l é a tensão aplicada no parafuso (ou força de união) e g é um parâmetro que representa a geometria do parafuso (WALTERS, 2005).

Se considerarmos que a geometria do parafuso e o coeficiente de atrito são constantes, verifica-se que a força de união é diretamente proporcional ao torque aplicado. Entretanto, o coeficiente de atrito dificilmente é constante, pois o mesmo depende de outras variáveis, como o material utilizado na porca e no parafuso, a geometria da rosca, as superfícies da cabeça do parafuso, da porca e da arruela, da presença de elementos de lubrificação entre outros (MAJZOBI *et al.*, 2005)

De acordo com Walters (2005), estudos têm mostrado que mesmo com a aplicação de torque com precisão de 0,1%, a força de união pode ter variações de até 60% em seu valor devido à influência do coeficiente de atrito. Isso mostra a importância de se manter muito bem controlados os fatores que influenciam o coeficiente de atrito para que o uso do método de aplicação de torque forneça resultados satisfatórios.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo caracteriza-se como quantitativo com a intenção de ser experimental, no que diz respeito ao delineamento. A referência a intenção de ser uma pesquisa experimental é necessária uma vez que não houve condições de realização de testes práticos devido à indisponibilidade de bancada de teste para condução do experimento, conforme sugere Severino (2007). Os dados necessários para realização do estudo foram gerados por simulação através do *software* MATLAB, o que não trouxe prejuízo para que o estudo alcançasse o seu objetivo. Quatro etapas foram necessárias, as quais são listadas abaixo e descritas nas subseções a seguir:

- a) Problemática: abrange os passos de formulação do problema e construção das hipóteses;
- b) Descrição da Norma: refere-se aos passos de operacionalização das variáveis, definição do plano experimental, determinação dos sujeitos e determinação do ambiente;
- c) Simulação: apresenta o processo de simulação substituindo a coleta de dados;
- d) Análise, interpretação dos dados e conclusões: abrange os passos h e i .

3.1 Problemática

Numa linha de montagem existem situações que fazem com que seja necessária a troca de uma determinada ferramenta da linha. Porém, a troca de uma ferramenta não se dá apenas pela substituição da ferramenta em si, mas também pelo cumprimento de procedimentos de qualidade e normas internas da empresa, especialmente quando se fala de características críticas de processo. No caso específico das parafusadeiras pneumáticas, a faixa de torque desejado deve ser capaz de atender às especificações do produto. Se a real faixa de torque da ferramenta reserva diferir do desejado, será necessário certo tempo para a constatação da capacidade da nova ferramenta em atender especificações.

A medição do torque ocorre no momento de processamento em si, pois o método de verificação utilizado nesse procedimento é o da verificação dinâmica, com um transdutor de torque instalado entre o corpo da ferramenta e o soquete, conforme Figura 3 e um painel de leitura ligado ao transdutor.

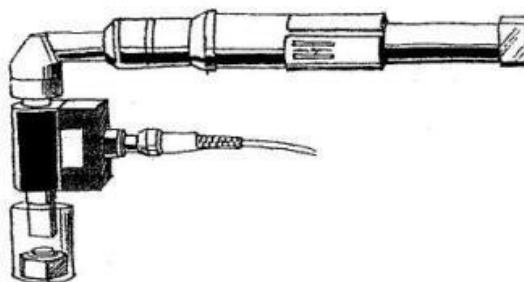


Figura 3 - Representação esquemática da montagem do transdutor na ferramenta
Fonte: Atlas Copco (2003)

A escolha do processo de coleta através da verificação dinâmica em detrimento à verificação estática se dá devido aos manuais de fabricantes recomendarem dessa forma. Atlas Copco (2003) cita que, devido à grande precisão das ferramentas de aperto modernas, o processo de leitura estática pode interferir na qualidade do aperto.

Se for necessária a troca da parafusadeira, a Figura 4 apresenta o fluxograma de um processo hipotético de troca em uma linha de montagem.

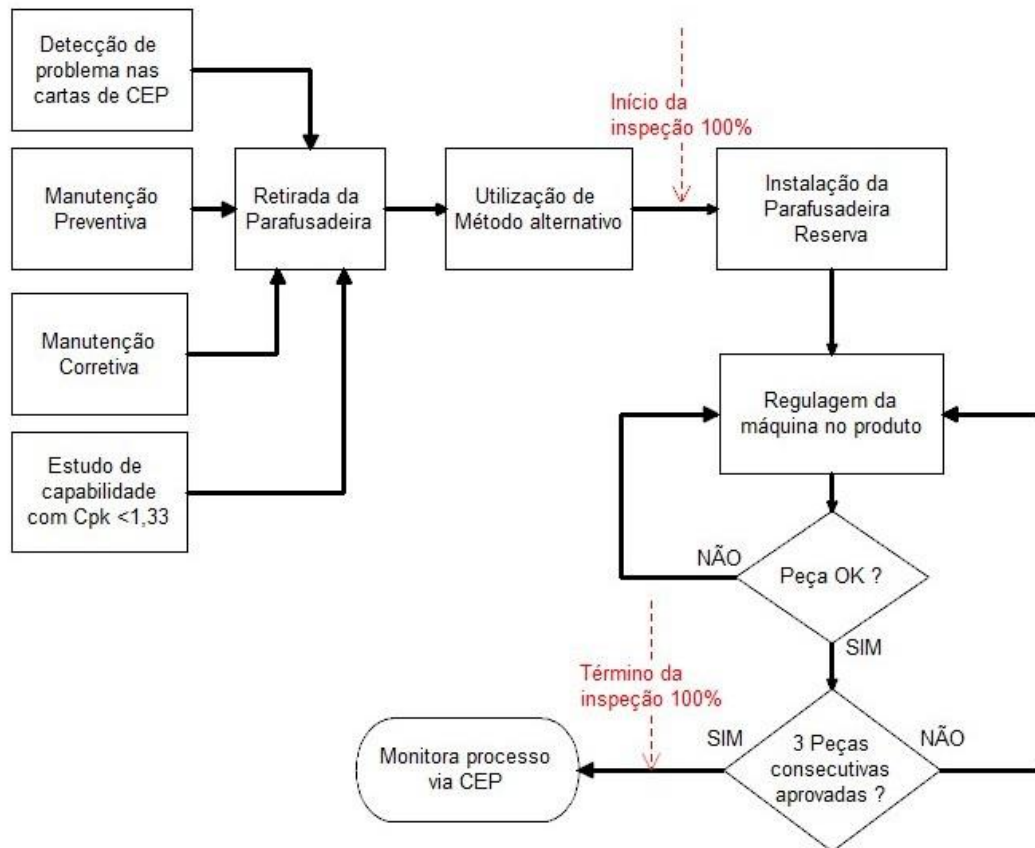


Figura 4 – Descrição do Processo de Troca de Parafusadeira

Pode-se observar que a troca de parafusadeira pode ocorrer por quatro motivos:

1. Detecção de alguma causa especial no método de monitoramento do processo (CEP);
2. Necessidade de manutenção corretiva por falha de máquina;
3. Necessidade de manutenção preventiva (realizada fora da estação);
4. Estudo de capacidade reprovado.

Após a remoção da parafusadeira da linha de montagem é necessário que se implemente um método alternativo para a realização do trabalho. Neste caso, a montagem com torquímetro calibrado pode ser utilizada como método de contenção fornecendo uma segurança razoável em termos de qualidade assegurada do produto e processo, desde que as pessoas envolvidas na operação estejam devidamente treinadas para a utilização da ferramenta. A grande vantagem desse método é que não é necessária uma verificação posterior à montagem, pois o próprio torquímetro é considerado uma ferramenta com método de monitoramento de inspeção 100%. Feigenbaum (1994) sugere que é uma necessidade fundamental no controle do produto que as ferramentas utilizadas tenham sua acurácia regularmente verificada antes e após a produção a fim de se verificar a necessidade de ajuste.

Depois de disponibilizar a ferramenta alternativa, e enquanto a operação prossegue, a instalação da ferramenta reserva (ou *backup*) é realizada. O maior problema de todo esse processo, se dá no próximo passo, a regulagem da parafusadeira. Como a regulagem é feita no produto, essa atividade torna-se muito demorada, e ainda pode gerar retrabalhos, pois temos que lembrar que é somente nas primeiras peças montadas que se poderá ter uma ideia inicial dos parâmetros de regulagem da ferramenta. Outro problema é que mesmo que inicialmente a máquina esteja regulada para seu valor nominal é possível que ela não tenha capacidade de se manter estável

dentro de limites especificados e isso será detectado somente pelo CEP. Nesse caso, uma nova substituição deve ser feita e, assim, mais tempo é perdido.

O procedimento proposto neste estudo, para teste de ferramentas baseado na norma ISO 5393 (1994), visa minimizar os problemas decorrentes da troca de ferramentas, permitindo que seja feita uma regulação adequada da máquina com parâmetros para avaliação da precisão antes de se colocar a ferramenta em operação. Tais parâmetros consistem da faixa de operação de torque da ferramenta em comparação com a especificação nominal e a dispersão do torque em função da tolerância. Isso significa que, além de ser necessário que a especificação nominal do processo se encontre dentro da faixa de utilização da ferramenta, ela seja também capaz de operar dentro da tolerância especificada no produto, o que reflete na qualidade da junta e consequentemente na qualidade do produto.

A norma ISO 5393 (1994) especifica um procedimento básico de teste e análise de resultados para que seja possível avaliar o desempenho de diferentes ferramentas e fazer comparações entre máquinas semelhantes. Este procedimento foi originalmente criado com a intenção de fornecer aos fabricantes de ferramentas uma maneira de expressar a precisão das máquinas de forma normatizada e universal, facilitando as comparações entre os diferentes modelos, mas, neste caso será utilizado como procedimento de apoio ao processo, fornecendo informações de precisão das ferramentas no instante medido. De acordo com a ISO 5393 (1994), o desenvolvimento das ferramentas de parafusamento pneumáticas aumentou rapidamente a partir da década de 80 e, com isso, a precisão dessas máquinas também melhorou. Em algumas ferramentas, a dispersão de torque obtida é menor do que 15%.

3.2 Descrição da Norma

A norma ISO 5393 (1994) prevê que sejam realizados testes em dois tipos de juntas: uma rígida e outra flexível. Junta rígida é definida como o tipo de junta na qual o torque final é alcançado após uma rotação de uma fração de volta a partir do encosto da cabeça do parafuso. Já uma junta flexível pode ser caracterizada por requerer um ângulo de rotação muito maior, geralmente de mais de uma volta completa, até atingir o torque final. É também uma característica deste tipo de junta, a compressão de outros elementos como arruelas e espaçadores (MILANI; HAMED, 2008).

Para a realização do teste, são utilizadas duas juntas-padrão que simulam o comportamento das juntas rígida e flexível. Essas juntas-padrão normalmente podem ser adquiridas junto aos fabricantes das parafusadeiras e podem ter as mais variadas faixas de torque, devendo ser escolhida cada uma das juntas (rígida e flexível) adequadas para a faixa de aplicação da ferramenta.

A norma sugere que o teste consiste na realização de 25 leituras para cada uma das juntas em duas faixas de torque da ferramenta, sendo normalmente utilizadas a mínima e a máxima da faixa de torque. Isso significa que deverão ser realizadas 100 leituras de torque, sendo 50 leituras na junta rígida (25 para a mínima e 25 para a máxima) e 50 leituras na junta flexível (25 para a mínima e 25 para a máxima).

A partir dessas leituras, são então avaliadas as seguintes informações primárias para cada uma das k juntas na faixa de operação M . Neste estudo $M \in \{T_{Min}^{Nom}, T_{Max}^{Nom}\}$, ou seja, o conjunto dos valores extremos da faixa de operação nominal da ferramenta e $k \in \{Rigida; Flexivel\}$

a) Torque Médio (\bar{T}), conforme a equação 2:

$$\bar{T}_k^M = \frac{\sum_{i=1}^n T_{i,k}^M}{n} \quad (2)$$

onde n é o número de leituras totais realizadas e $T_{i,k}^M$ é o torque obtido na i -ésima leitura na junta k , condição M .

b) Amplitude, calculada subtraindo o menor valor obtido na amostra do maior valor mensurado na mesma amostra;

$$R_k^M = \max\{T_{i,k}^M\} - \min\{T_{i,k}^M\} \quad (3)$$

c) Desvio-padrão (S), calculado conforme a equação 4;

$$S_k^M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{i,k}^M - \bar{T}_k^M)^2} \quad (4)$$

d) Dispersão de torque 6S (como estimador da dispersão de torque 6 sigma), calculado como 6S.

e) Dispersão 6S como percentual do torque médio, calculado como (5)

$$DT_k^M = \frac{6S_k^M}{\bar{T}_k^M} \times 100\% \quad (5)$$

f) Deve-se realizar, também, o cálculo do Intervalo de Confiança 99,7% para as juntas rígida e flexível, onde LS_k^M e LI_k^M , denotam, respectivamente, os limites superior e inferior de confiança para a junta k na condição M.

$$\begin{aligned} LS_k^M &= \bar{T}_k^M + 3S_k^M \\ LI_k^M &= \bar{T}_k^M - 3S_k^M \end{aligned} \quad (6)$$

Para a avaliação da performance da ferramenta sobre as faixas de torque nas duas juntas deve-se, ainda, calcular os seguintes parâmetros:

g) Torque médio combinado (\bar{T}_{Comb})

$$\bar{T}_{Comb}^M = \frac{\max\{LS_k^M\} + \min\{LI_k^M\}}{2} \quad (7)$$

h) *Mean Shift*;

$$Mean\ Shift^M = \left| \bar{T}_{Rig}^M - \bar{T}_{Flx}^M \right| \quad (8)$$

i) Dispersão de torque combinado (DT_{Comb});

$$DT_{Comb}^M = \max\{LS_k^M\} - \min\{LI_k^M\} \quad (9)$$

j) Dispersão de torque combinado como percentual do torque médio:

$$\%DT_{Comb}^M = \frac{DT_{Comb}^M}{\bar{T}_{Comb}^M} \times 100\% \quad (10)$$

Por fim, calcula-se a metade do máximo $\%DT_{Comb}$ encontrado, gerando, assim, o principal indicador de qualidade da ferramenta, denominado Tolerância estimada (Tol).

$$Tol = \frac{\max\{\%DT_{Comb}^M\}}{2} \quad (11)$$

A norma indica uma forma de apresentação de relatório a partir dos resultados obtidos nas equações 2 –11. Um exemplo é apresentado no Apêndice A.

3.3 Simulação

O processo de simulação foi adotado para exemplificação e teste devido à indisponibilidade dos equipamentos necessários para o ensaio empírico. Assim, as medidas de torque consideradas neste estudo não foram coletadas em situações reais de parafusamento, mas, sim, geradas computacionalmente a partir da definição de um modelo probabilístico.

A simulação foi inteiramente realizada em ambiente MATLAB. Primeiramente os dados foram simulados utilizando o gerador de números pseudo-aleatórios do referido *software*, o qual permite a escolha do modelo probabilístico adequado. Neste estudo optou-se pelo modelo Normal levando-se em conta que características de qualidade quantitativas tendem a seguir essa distribuição como uma consequência do Teorema do Limite Central (MONTGOMERY, 2004). Os dados simulados foram submetidos aos cálculos descritos na seção anterior e o dado da Tolerância estimada (*Tol*) foi armazenado em uma matriz juntamente com os diferentes tamanhos amostrais *n* considerado ($n=5,10,\dots, 30$). Os gráficos – histogramas e *box-plot* – também foram gerados diretamente em MATLAB. As figuras foram exportadas para o formato *Bitmap* e a matriz de resultados para um arquivo texto o qual pode ser lido em planilha eletrônica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir foram intencionalmente divididos em duas seções. A primeira apresenta uma exemplificação dos cálculos previstos na ISO5393 e já apresentados na seção 3.2. A segunda mostra resultados do estudo de simulação realizado no MATLAB.

4.1 Exemplo de aplicação da norma ISO 5393

A fim de ilustrar os cálculos que compõem a ISO apresentadas na seção 3.2, supõe-se que foi testada uma ferramenta de acordo com os procedimentos descritos. Na etapa de preparação, foram selecionados os dados de uma população de forma aleatória e agrupados conforme o Quadro 1.

Quadro 1- Dados hipotéticos de torque para teste do procedimento.

		Tipo de junta do teste									
		Teste na junta rígida					Teste na junta flexível				
Faixa de ajuste da ferramenta	Ajuste no máximo	117,77	116,66	118,77	121,13	122,15	121,88	110,32	114,58	120,1	120,27
		117,36	119,57	119,61	120,36	117,06	119,52	118,59	122,93	117,56	116,42
		126,73	131,18	116,57	125,09	121,51	114,83	116,35	118,91	122,62	122,62
		121,23	118,07	121,14	124,34	114,77	121,86	121,87	119,52	124,87	118,28
		123,97	122,4	125,94	114,96	124,45	116,19	120,47	118,23	122,3	118,59
	Ajuste no mínimo	20,42	19,81	20,89	19,77	20,32	18,85	21,26	20,09	19,22	20,49
		19,74	19,9	20,86	19,09	19,98	20,61	20,75	20,08	19,5	19,97
		19,26	18,93	19,59	20,73	20,36	19,11	19,59	21,05	19,66	19,04
		20,47	20,56	20,42	20,55	19,62	19,4	19,69	19,34	19,61	20,73
		18,82	20,4	19,55	19,96	19,52	20,16	21,17	21,15	20,48	20,43

Em uma primeira etapa, foram calculados os parâmetros individuais de cada teste. Primeiramente, o teste com ajuste na faixa máxima de operação da ferramenta nas juntas rígida e flexível e, depois, o teste na faixa mínima também em ambas as juntas. No primeiro teste, seguindo a equação 2, obtém-se $\bar{T}=120,91$ Nm. A amplitude de 16,41 Nm foi obtida através da diminuição do maior valor (131,18 Nm) pelo menor valor (114,77 Nm). O desvio-padrão (*s*) calculado através da equação 3 é 4,00 Nm e com isso calcula-se a dispersão de torque $6s$ através da multiplicação do desvio padrão (*s*) por 6, obtendo-se uma dispersão de 23,99 Nm. A dispersão como percentual do torque médio calculada como na equação 4, é então 19,84%.

Os cálculos foram repetidos para os demais testes, obtendo-se os valores registrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros calculados nos demais testes.

Parâmetro Calculado	Ajuste Máximo na Junta Rígida		Ajuste Máximo na Junta Flexível		Ajuste Mínimo na Junta Rígida		Ajuste Mínimo na Junta Flexível	
Torque médio:	120,91	N.m	119,93	N.m	19,98	N.m	20,06	N.m
Desvio padrão:	4,00	N.m	2,55	N.m	0,59	N.m	0,73	N.m
Amplitude:	16,41	N.m	6,20	N.m	2,07	N.m	2,41	N.m
Dispersão de Torque:	23,99	N.m	15,31	N.m	3,56	N.m	4,36	N.m
Dispersão percentual:	19,84	%	12,77	%	17,83	%	21,75	%

Na etapa seguinte, são calculados parâmetros referentes aos dados associados à faixa de torque utilizada, observando o comportamento da ferramenta na faixa de ajuste da ferramenta determinada entre os dois tipos de junta. Para o teste com o ajuste de torque mínimo da ferramenta, primeiro foi calculado o torque médio combinado (\bar{T}_{comb}) obtendo-se 120,91 N.m. Depois foi calculado o *Mean Shift*, subtraindo-se o valor do torque médio na junta flexível (118,50 N.m) do valor do torque médio na junta rígida (120,77 Nm) obtendo-se 1,72 Nm. Em seguida, foi calculada a dispersão de torque combinado (DT_{comb}) obtendo-se o valor de 23,99 Nm e, por fim, foi calculada a dispersão de torque combinado como percentual da média combinada ($\%DT_{comb}$) como na equação 5, obtendo-se 19,84%.

Os mesmos cálculos foram repetidos para os dados gerados nos teste com o ajuste mínimo de torque na ferramenta. Os resultados foram organizados na Tabela 2, mostrada abaixo.

Tabela 2 - Parâmetros calculados dos testes com ajuste de torque mínimo da ferramenta

Parâmetros dos testes com ajuste de torque mínimo	
Torque médio combinado:	20,06 N.m
Mean Shift	0,08 N.m
Dispersão de torque combinado:	4,36 N.m
Dispersão de torque combinado como um percentual da média combinada	21,75 %

A última etapa consistiu na comparação dos resultados obtidos de dispersão de torque combinado como percentual da média combinada obtidos para os ajustes de torque mais alto (ajuste máximo) e mais baixo (ajuste mínimo) da ferramenta, nesse caso, 19,84% e 21,75% respectivamente. A meia dispersão da ferramenta foi então calculada como o maior valor dentre esses, dividido por 2, resultando em um valor de $\pm 10,9\%$ de dispersão. Isso significa, que esta ferramenta hipotética em estudo deverá apertar 99,7% de todas as juntas dentro de $\pm 10,9\%$ do seu valor de torque pré-determinado.

4.2 Estudo de Simulação

Os resultados apresentados a seguir são oriundos de uma simulação de 5 mil medidas de torque considerando seis diferentes tamanhos amostrais n para uma ferramenta com faixa de operação de 20-100Nm e 10% de tolerância. A Tabela 3 apresenta estatísticas descritivas para as estimativas de Tolerância (Tol) nos diferentes tamanhos amostrais.

A Figura 7 revela que, à medida que o tamanho amostral aumenta, a mediana (linha central da caixa do *Box-plot*) vai se aproximando da verdadeira tolerância da ferramenta (10%) e, como esperado, a dispersão dos resultados diminui.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas para as estimativas de Tolerância e Intervalo de Confiança 95% para a real tolerância em diferentes tamanhos amostrais

<i>n</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio-padrão</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
5	0,1317	0,0271	0,1309	0,1324	0,0516	0,2312
10	0,1226	0,0172	0,1222	0,1231	0,0766	0,2013
15	0,1186	0,0139	0,1182	0,1190	0,0747	0,2053
20	0,1161	0,0116	0,1158	0,1164	0,0804	0,1706
25	0,1148	0,0104	0,1145	0,1150	0,0817	0,1732
30	0,1135	0,0093	0,1133	0,1138	0,0813	0,1523

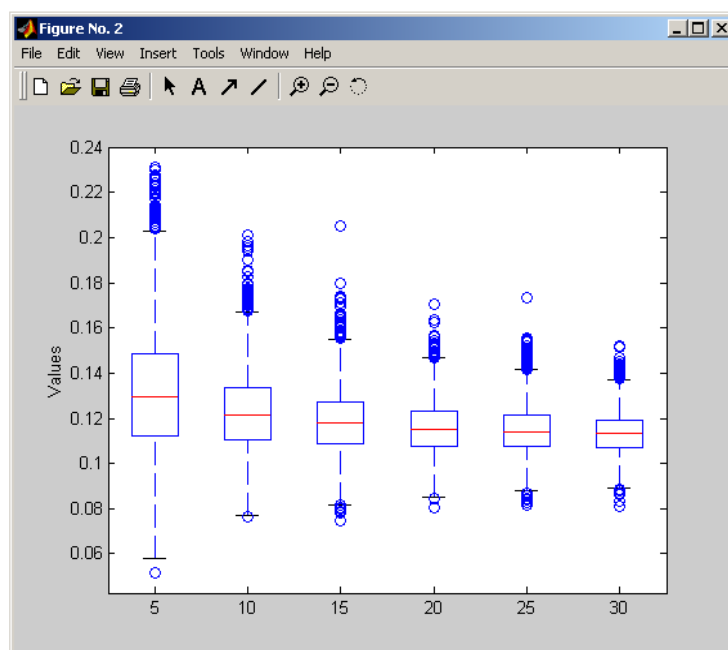


Figura 7 - Gráfico Box-plot para determinação do tamanho amostral otimizado

É possível perceber que a dispersão da tolerância diminui lentamente a partir de 15 unidades amostrais e a mediana permanece praticamente constante a partir de 15 unidades de amostra. Os histogramas da Figura 8 sugerem que o estimador *ToI* tem um comportamento Normal, especialmente para $n \geq 15$. Dessa forma, podemos dizer que é possível reduzir o tamanho amostral de cada teste de 25 para 15 unidades com ligeira perda de confiabilidade nos resultados, em comparação ao sugerido na norma. Com isso, espera-se que o processo de avaliação da ferramenta seja mais ágil, facilitando o uso do teste como parte de um procedimento de inspeção na planta industrial.

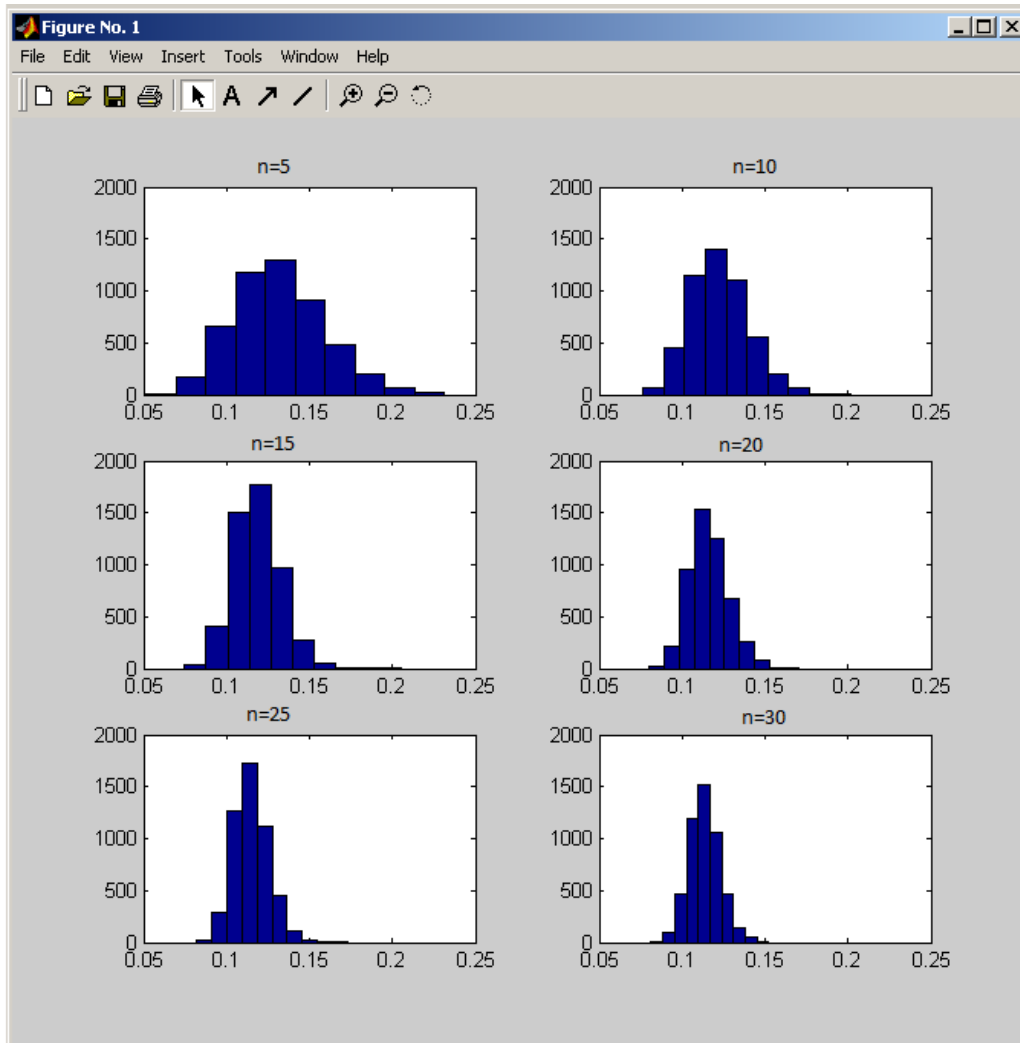


Figura 8 - Histograma para estimativas de Tolerância considerando diferentes tamanhos amostrais

Para ilustrar uma situação de redução do tamanho amostral foi construída uma tabela adaptada da norma utilizando o $n=15$ em cada teste. A estimativa da Tolerância da ferramenta no procedimento adaptado foi de 11,4%, próximo ao valor calculado pela tabela original com 25 amostras por teste, que foi de 10,9%. As planilhas compõem os Apêndices A e B do trabalho.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho procurou descrever um método preventivo de avaliação de ferramentas de aperto pneumáticas. O procedimento, baseado na norma ISO 5393 (1994), foi apresentado e uma planilha eletrônica foi criada de modo à tornar mais simples seu uso num ambiente de chão-de-fábrica com pequena perda de confiabilidade nos resultados, permitindo um aumento na quantidade de máquinas que podem ser avaliadas num mesmo espaço de tempo.

Os resultados obtidos a partir de dados simulados sugerem que, apesar de haver pequena perda de precisão nos resultados, é possível reduzir o número de testes para 15 ensaios em cada uma das quatro condições consideradas. Assim, o número total de testes seria reduzido de 100 para 60. Tal redução no número amostral deverá aumentar a aceitabilidade de aplicação do procedimento para utilização em inspeções de ferramentas de maneira rotineira em uma planta.

Há que se comentar a escassez de bibliografia sobre controle de torque, especialmente na língua portuguesa. Encontram-se muitas referências sobre as propriedades mecânicas e/ou metalúrgicas dos parafusos, e, também, estudos sobre falhas. Contudo, quando se refere ao controle de torque e o processo de parafusamento em si, as bibliografias são raras. Autores como Lee, Griza e Seneviratne fazem referência a essa dificuldade em suas publicações.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o estudo de simulação, considerando diferentes modelos probabilísticos e parâmetros, assim como a aplicação prática em uma situação real de substituição de ferramenta, podendo, assim, avaliar-se também a operacionalização do procedimento.

APÊNDICE A
Planilha original para n=25

Informações da Ferramenta					Informações de Teste		
Modelo:	XYZ4F				Velocidade da Ferramenta	540 RPM	
Fabricante:	Tool Fabricator				Pressão de ar na linha de teste (bar):	6,5 bar	
Nº de série:	6900171				Torque máximo (N.m):	20 N.m	
Data do teste:	18/10/2010				Torque mínimo (N.m):	120 N.m	
Teste no valor Máximo - Junta Rígida							
117,77	116,66	118,77	121,13	122,15	Torque médio:	120,91 N.m	
117,36	119,57	119,61	120,36	117,06	Desvio padrão:	4,00 N.m	
126,73	131,18	116,57	125,09	121,51	Amplitude:	16,41 N.m	
121,23	118,07	121,14	124,34	114,77	Dispersão de Torque:	23,99 N.m	
123,97	122,4	125,94	114,96	124,45	Dispersão percentual:	19,84 %	
Teste no valor Máximo - Junta Flexível							
121,88	110,32	114,58	120,1	120,27	Torque médio:	119,19 N.m	
119,52	118,59	122,93	117,56	116,42	Desvio padrão:	3,25 N.m	
114,83	116,35	118,91	122,62	122,62	Amplitude:	14,55 N.m	
121,86	121,87	119,52	124,87	118,28	Dispersão de Torque:	19,51 N.m	
116,19	120,47	118,23	122,3	118,59	Dispersão percentual:	16,37 %	
a) média da Junta rígida + 3 sigma da junta rígida						132,91	N.m
b) média da Junta flexível + 3 sigma da junta flexível						128,94	N.m
c) média da Junta rígida - 3 sigma da junta rígida						108,91	N.m
d) média da Junta flexível - 3 sigma da junta flexível						109,43	N.m
Torque médio combinado:						120,91	N.m
Mean Shift:						1,72	N.m
Dispersão de torque combinado:						23,99	N.m
Dispersão de torque combinado como um percentual da média combinada:						19,84	%
Teste no valor Mínimo - Junta Rígida							
20,42	19,81	20,89	19,77	20,32	Torque médio:	19,98 N.m	
19,74	19,9	20,86	19,09	19,98	Desvio padrão:	0,59 N.m	
19,26	18,93	19,59	20,73	20,36	Amplitude:	2,07 N.m	
20,47	20,56	20,42	20,55	19,62	Dispersão de Torque:	3,56 N.m	
18,82	20,4	19,55	19,96	19,52	Dispersão percentual:	17,83 %	
Teste no valor Mínimo - Junta Flexível							
18,85	21,26	20,09	19,22	20,49	Torque médio:	20,06 N.m	
20,61	20,75	20,08	19,5	19,97	Desvio padrão:	0,73 N.m	
19,11	19,59	21,05	19,66	19,04	Amplitude:	2,41 N.m	
19,4	19,69	19,34	19,61	20,73	Dispersão de Torque:	4,36 N.m	
20,16	21,17	21,15	20,48	20,43	Dispersão percentual:	21,75 %	
a) média da Junta rígida + 3 sigma da junta rígida						21,76	N.m
b) média da Junta flexível + 3 sigma da junta flexível						22,24	N.m
c) média da Junta rígida - 3 sigma da junta rígida						18,20	N.m
d) média da Junta flexível - 3 sigma da junta flexível						17,88	N.m
Torque médio combinado:						20,06	N.m
Mean Shift:						0,08	N.m
Dispersão de torque combinado:						4,36	N.m
Dispersão de torque combinado como um percentual da média combinada:						21,75	%
Tolerância de torque da ferramenta:					10,9	%	

APÊNDICE B

Planilha Adaptada para n=15

Informações da Ferramenta					Informações de Teste	
Modelo:	XYZ4F				Velocidade da Ferramenta	540 RPM
Fabricante:	Tool Fabricator				Pressão de ar na linha de teste (bar):	6,5 bar
Nº de série:	6900171				Torque máximo (N.m):	120 N.m
Data do teste:	18/10/2010				Torque mínimo (N.m):	20 N.m
Teste no valor Máximo - Junta Rígida						
117,77	116,66	118,77	121,13	122,15	Torque médio:	120,77 N.m
117,36	119,57	119,61	120,36	117,06	Desvio padrão:	4,15 N.m
126,73	131,18	116,57	125,09	121,51	Amplitude:	14,61 N.m
					Dispersão de Torque:	24,89 N.m
					Dispersão percentual:	20,61 %
Teste no valor Máximo - Junta Flexível						
121,88	110,32	114,58	120,1	120,27	Torque médio:	118,50 N.m
119,52	118,59	122,93	117,56	116,42	Desvio padrão:	3,56 N.m
114,83	116,35	118,91	122,62	122,62	Amplitude:	12,61 N.m
					Dispersão de Torque:	21,36 N.m
					Dispersão percentual:	18,03 %
a) média da Junta rígida + 3 sigma da junta rígida						133,22 N.m
b) média da Junta flexível + 3 sigma da junta flexível						129,18 N.m
c) média da Junta rígida - 3 sigma da junta rígida						108,32 N.m
d) média da Junta flexível - 3 sigma da junta flexível						107,82 N.m
Torque médio combinado:						120,52 N.m
Mean Shift:						2,27 N.m
Dispersão de torque combinado:						25,40 N.m
Dispersão de torque combinado como um percentual da média combinada:						21,07 %
Teste no valor Mínimo - Junta Rígida						
20,42	19,81	20,89	19,77	20,32	Torque médio:	19,98 N.m
19,74	19,9	20,86	19,09	19,98	Desvio padrão:	0,62 N.m
19,26	18,93	19,59	20,73	20,36	Amplitude:	1,96 N.m
					Dispersão de Torque:	3,70 N.m
					Dispersão percentual:	18,52 %
Teste no valor Mínimo - Junta Flexível						
18,85	21,26	20,09	19,22	20,49	Torque médio:	19,95 N.m
20,61	20,75	20,08	19,5	19,97	Desvio padrão:	0,76 N.m
19,11	19,59	21,05	19,66	19,04	Amplitude:	2,41 N.m
					Dispersão de Torque:	4,54 N.m
					Dispersão percentual:	22,77 %
a) média da Junta rígida + 3 sigma da junta rígida						21,83 N.m
b) média da Junta flexível + 3 sigma da junta flexível						22,22 N.m
c) média da Junta rígida - 3 sigma da junta rígida						18,13 N.m
d) média da Junta flexível - 3 sigma da junta flexível						17,68 N.m
Torque médio combinado:						19,95 N.m
Mean Shift:						0,03 N.m
Dispersão de torque combinado:						4,54 N.m
Dispersão de torque combinado como um percentual da média combinada:						22,77 %
Tolerância de torque da ferramenta:						11,4 %

APÊNDICE C

Código fonte em MATLAB

```

function simula
% Este função realiza a simulação de Torque e calculo
% da semi-dispersao de Torque de acordo com a ISO5393

% Dados de entrada
n = input ('Entre com o numero de simulacoes =') ;
minimo = input ('Entre com o valor MINIMO da ferramenta=');
maximo = input ('Entre com o valor MAXIMO da ferramenta=');
precisaomin = input ('Entre com a precisao da ferramenta no MINIMO com valor entre 0 e 1=');
precisaomax = input ('Entre com a precisao da ferramenta no MAXIMO com valor entre 0 e 1=');
precision=[];

% Geracao de numeros aleatorios e Calculos
tic
for k = 5 : 5 : 30
    for i = 1 : n

        Rmin = RANDOM('norm',minimo,((minimo*precisaomin)/3),k,2);
        Rmax = RANDOM('norm',maximo,((maximo*precisaomax)/3),k,2);
        media_min_rig = mean(Rmin(:,1));
        media_min_flx = mean(Rmin(:,2));
        media_max_rig = mean(Rmax(:,1));
        media_max_flx = mean(Rmax(:,2));
        std_min_rig = std(Rmin(:,1));
        std_min_flx = std(Rmin(:,2));
        std_max_rig = std(Rmax(:,1));
        std_max_flx = std(Rmax(:,2));
        range_min_rig = max(Rmin(:,1))-min(Rmin(:,1));
        range_min_flx = max(Rmin(:,2))-min(Rmin(:,2));
        range_max_rig = max(Rmax(:,1))-min(Rmax(:,1));
        range_max_flx = max(Rmax(:,2))-min(Rmax(:,2));

        ci_min = [media_min_rig + 3*std_min_rig; media_min_flx + 3*std_min_flx; media_min_rig - 3*std_min_rig;
media_min_flx - 3*std_min_flx];

        ci_max = [media_max_rig + 3*std_max_rig; media_max_flx + 3*std_max_flx; media_max_rig -
3*std_max_rig; media_max_flx - 3*std_max_flx];
    end
end

```

```
mean_comb_min=(max(ci_min)+min(ci_min))/2;
mean_comb_max=(max(ci_max)+min(ci_max))/2 ;
mean_shift_min = abs(media_min_rig-media_min_flx);
mean_shift_max = abs(media_max_rig-media_max_flx);
dispT_min=(max(ci_min)-min(ci_min));
dispT_max=(max(ci_max)-min(ci_max));
prec = [k, max([dispT_min/mean_comb_min;dispT_max/mean_comb_max])/2];
precision=[precision;prec];
end

end

save precision precision
load precision
save precision.txt precision -ascii
figure(1)
subplot(3,2,1)
hist(precision(1:n,2))
subplot(3,2,2)
hist(precision(n+1:2*n,2))
subplot(3,2,3)
hist(precision(2*n+1:3*n,2))
subplot(3,2,4)
hist(precision(3*n+1:4*n,2))
subplot(3,2,5)
hist(precision(4*n+1:5*n,2))
subplot(3,2,6)
hist(precision(5*n+1:6*n,2))
figure(2)
BOXPLOT(precision(:,2),precision(:,1),0,'o',1,1.5)
toc
```


REFERÊNCIAS

- ATLAS COPCO. **Guia de Bolso – Tecnologia de Aperto**. Estocolmo, 2003.
- BAGGERLY, R. G. Evaluating the effects of overtorque in bolts. **Practical Failure Analysis**, v. 1, p. 41-46, 2001.
- BHATTACHARYA, A.; SEN, A.; DAS, S. An investigation on the anti-loosening characteristics of threaded fasteners under vibratory conditions. **Mechanism and Machine Theory**, v.45, p. 1215-1225, 2008.
- CHAKHERLOU, T. N.; MIRZAJANZADEH, A.; VOGWELL, J.; ABAZADEH, B. Investigation of the fatigue life and crack growth in torque tightened bolted joints. **Aerospace Science and Technology**, v. 15, n. 2, p. 304-313, 2011.
- FEIGENBAUM, A. V.; **Controle da qualidade total**. São Paulo, Makron Books, 1994.
- FUJI, H.; SASE, N. *SLB* Concept for screw fastening and its anti-loosening performance. In: ALL INDIA MANUFACTURING TECHNOLOGY, DESIGN AND RESEARCH CONFERENCE, 18. **Proceedings...** Kharagpur, India: IIT Roorkee, p. 25-34, 1998.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3ª edição, São Paulo, Atlas, 1991.
- GRIZA, S. **Efeito do torque na vida em fadiga de uniões parafusadas**. 2000. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- ISO 5393: 1994. Rotary tools for threaded fasteners – Performance test method. Genebra, 1994.
- LEE, N. K. S.; AN, Y.; TSUNG, F. Studying effects of screw-fastening process on assembly accuracy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 25, p. 493-499, 2004.
- MAJZOobi, G. H.; FARRAHI, G. H.; HARDY, S. J.; PIPELZADEH, M. K.; HABIBI, N.. Experimental results and finite-element predictions of the effect of nut geometry, washer and Teflon tape on the fatigue life of bolts. **Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures**, v. 28, n. 6, p. 557-564, Jun 2005.
- MILANI, A. A.; HAMEDI, M. A Knowledge-based System for Selecting Fastening Tools in Automobile Assembly Lines. In: INDUSTRIAL TECHNOLOGY, 2008. **Proceedings of ICIT 2008**. Piscataway: IEEE, p. 1-7, 2008.
- MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatística da Qualidade**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 513p.
- PAI, N. G.; HESS, D. P. Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load, **Engineering Failure Analysis**, v. 9, p. 383-402, 2002.
- SENEVIRATNE, L. D.; NGEMOH, F. A.; EARLES, S. W. E.; ALTHOEFER, K. A. Theoretical modeling of the self-tapping screw fastening process. In: **Proceedings...** of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, v.215, p. 135-137, 2001.
- SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 23ª Ed., São Paulo: Cortez, 2007.
- WALTERS, B. A new approach to tightening bolts. **Sealing Technology**, v. 10, p. 6-8, 2005.