Anais do Congresso Brasileiro de Iniciação Científica
(https://periodicos.unisanta.br/COB)

ISSN 2317-1316

ANÁLISE ANALÍTICO-EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DETERMINAÇÃO DO TORQUE DE APERTO ADMISSÍVEL EM UNIÕES PARAFUSADAS INDUSTRIAIS

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES AND DETERMINATION OF ALLOWABLE TIGHTENING TORQUE IN INDUSTRIAL BOLTED JOINTS

Caroline Victoria Sousa de Oliveira, Gustavo Carolino Terceiro, João Pedro Barbosa de Almeida, Pedro Barrio Rocha Gomes, Willy Ank de Moraes

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica
E-mail para contato: ja210478@alunos.unisanta.br

RESUMO – Este trabalho apresenta um modelo analítico, implementado em planilha eletrônica, para estimar o torque de aperto admissível em uniões parafusadas industriais, considerando geometria, atrito e propriedades mecânicas dos fixadores. Foram realizados ensaios de dureza e tração para caracterização de parafusos e comparação com requisitos normativos. Para um parafuso M36 × 1,50, classe 8.8, estimou-se torque de 1.596,42 N·m, correspondente à pré-carga de 513,88 kN, com fator de segurança de 1,2. Nas duas amostras ensaiadas à tração, as estimativas de resistência obtidas por conversão de dureza diferiram menos de 0,25% dos valores experimentais. O estudo demonstra a aplicação preliminar da ferramenta, cuja validação requer ensaios específicos de aperto.

Palavras-chave: Torque de aperto; Pré-carga em parafusos; Uniões parafusadas; Modelagem analítica; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT – This work presents an analytical model, implemented in a spreadsheet, to estimate the allowable tightening torque in industrial bolted joints, accounting for fastener geometry, friction, and mechanical properties. Hardness and tensile tests were conducted to characterize the bolts and compare them with regulatory requirements. For an M36 × 1.50, class 8.8 bolt, the estimated torque was 1,596.42 N·m—corresponding to a preload of 513.88 kN—with a safety factor of 1.2. For the two samples subjected to tensile testing, the strength estimates derived from hardness conversions differed by less than 0.25% from the experimental values. The study demonstrates a preliminary application of the tool; validation will require specific tightening tests.

Keywords: Tightening torque; Bolt preload; Bolted joints; Analytical modeling; Mechanical properties.

ISSN 2317-1316

1 INTRODUÇÃO

A determinação adequada do torque de aperto é fundamental para garantir a resistência e a confiabilidade de uniões parafusadas em aplicações industriais. A relação entre o torque aplicado e a pré-carga gerada depende das propriedades mecânicas do parafuso, da geometria da rosca e das condições de atrito entre as superfícies de contato. Esses fatores influenciam diretamente a força de tração desenvolvida durante a montagem e devem ser considerados para estabelecer limites de aperto adequados (BUDYNAS; NISBETT, 2016; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2013).

O problema abordado neste estudo consiste na determinação do torque máximo admissível considerando as características do fixador e as condições de montagem, uma vez que valores genéricos podem não representar adequadamente cada aplicação. Parte-se da hipótese de que a utilização de um modelo analítico associado a uma planilha de cálculo permite relacionar esses parâmetros e estimar o torque de aperto de maneira sistemática. Dessa forma, justifica-se o desenvolvimento de uma ferramenta que facilite os cálculos e auxilie na padronização de procedimentos de montagem e manutenção industrial.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar os parâmetros envolvidos na determinação do torque máximo admissível em parafusos de aplicação industrial e desenvolver uma planilha para automatizar os cálculos. Para avaliar sua aplicação, utiliza-se como estudo preliminar um parafuso M36 × 1,50, classe de resistência 8.8, considerando suas propriedades mecânicas, características geométricas e coeficientes de atrito, de modo a relacionar o torque aplicado à pré-carga resultante.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido por meio de modelagem analítica, implementação de uma planilha eletrônica e caracterização experimental das propriedades mecânicas de parafusos de aplicação industrial. A metodologia compreendeu a identificação dos parâmetros geométricos e das propriedades mecânicas dos fixadores, a realização de ensaios de dureza e tração e a aplicação preliminar de um modelo para estimativa do torque máximo admissível, considerando os requisitos normativos e as condições de atrito.

ISSN 2317-1316

Para a caracterização experimental, foram utilizadas amostras de cinco parafusos, identificados como A, B, C, D e E. As amostras A, B e C eram provenientes de uma investigação de falha em uma união estrutural industrial, enquanto D e E foram disponibilizadas pelo laboratório de materiais da Universidade Santa Cecília, sendo utilizadas como referência para a classe de resistência 8.8. A caracterização compreendeu medições de dureza nas cabeças dos parafusos e nos corpos das amostras D e E, além de ensaios de tração realizados em corpos de prova extraídos desses dois últimos parafusos.

As medições de dureza foram realizadas pelo método Rockwell C (HRC), em diferentes regiões das amostras, para identificar possíveis variações das propriedades mecânicas. Os ensaios de tração dos parafusos D e E foram conduzidos conforme procedimentos alinhados às normas ISO 898-1 e SAE J429 (International Organization for Standardization, 2013a; SAE International, 2014), permitindo determinar os limites de escoamento e de resistência à tração, o alongamento e o módulo de elasticidade. Adicionalmente, os resultados de dureza foram utilizados para estimar a resistência à tração por meio das correlações estabelecidas na ISO 18265 (International Organization for Standardization, 2013b), possibilitando a comparação com os valores experimentais obtidos nos ensaios de tração.

Paralelamente, foi desenvolvido um modelo analítico para relacionar o torque de aperto à pré-carga axial, considerando as propriedades mecânicas dos parafusos, a geometria da rosca e os coeficientes de atrito nas superfícies de contato. O modelo foi implementado em uma planilha eletrônica, permitindo a inserção dos parâmetros geométricos e mecânicos e o cálculo do torque correspondente à pré-carga admissível, conforme o critério de resistência adotado.

Para a aplicação preliminar da ferramenta, considerou-se um parafuso M36 × 1,50, classe de resistência 8.8, com os seguintes parâmetros:

$\alpha = 30°$ (ângulo entre filetes),

$\beta = 1{,}19°$ (ângulo de avanço da rosca),

$d_m = 0{,}03503$ m (diâmetro médio) e $d_c = 0{,}05775$ m (diâmetro do colar).

Foram adotados coeficientes de atrito $\mu = \mu_c = 0{,}25$ para a rosca e para a superfície de apoio, representando uma condição de contato entre superfícies de aço sem lubrificação:

O limite de escoamento mínimo considerado foi de 640 MPa, conforme a ISO 898-1 (International Organization for Standardization, 2013a), com fator de segurança de 1,2.

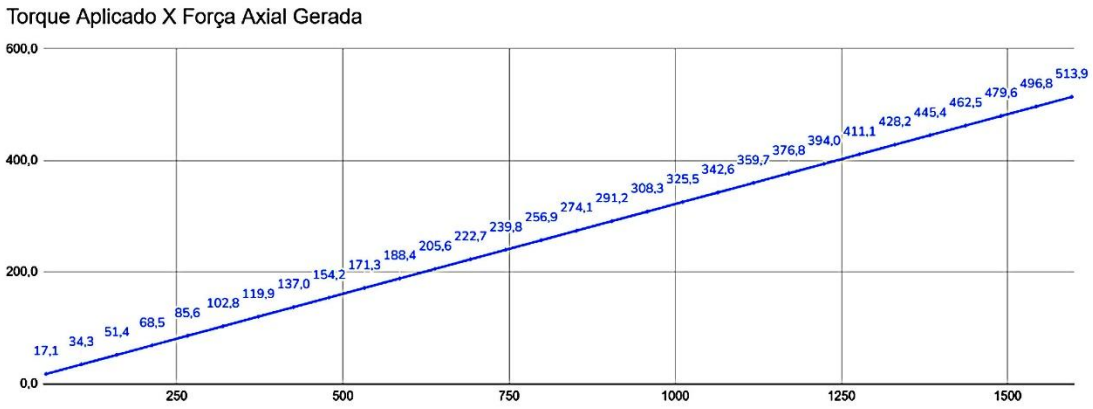
ISSN 2317-1316

Os resultados obtidos pela planilha foram utilizados para avaliar sua aplicação preliminar na estimativa da relação entre torque e pré-carga. Complementarmente, as propriedades mecânicas determinadas experimentalmente para os parafusos D e E foram comparadas com os requisitos normativos da classe 8.8. Essa abordagem permitiu relacionar a caracterização dos materiais aos parâmetros considerados na modelagem, sem pressupor a validação experimental do comportamento dos parafusos durante o aperto.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o parafuso M36 × 1,50, classe 8.8, o modelo analítico apresentou uma relação crescente e linear entre torque e pré-carga como ilustrado na Figura 1 com base nos parâmetros apresentados pela Tabela 1. Considerando uma pré-carga de referência de 513,88 kN — resultante do produto do limite de escoamento mínimo da classe 8.8 ou 640 MPa (International Organization for Standardization, 2013a) pela área resistente à tração do parafuso, aplicando um fator de segurança de 1,2 —, foi obtido um torque máximo admissível de 1596,42 N·m.

Figura 1: Gráfico da relação linear entre o torque aplicado e a força axial (pré-carga) gerada para o parafuso M36 × 1,50



ISSN 2317-1316

Tabela 1. Modelo analítico implementado na planilha de cálculo (relação entre parâmetros geométricos, atrito e propriedades mecânicas).

Parâmetro	***Valor***	***Unidade***		***Parâmetro***	***Valor***	***Unidade***
Diâmetro do parafuso	*36*	*mm*		*Ângulo entre filetes*	*30,00*	*°*
Tipo de rosca	*Métrica*	*—*		*Ângulo de avanço da rosca*	*1,19*	*°*
Passo	*1,5*	*mm*		*Diâmetro médio da rosca*	*35,03*	*mm*
Classe de resistência	*8.8*	*—*		*Área*	*939,85*	*mm²*
Coeficiente de atrito	*0,25*	*—*		*Diâmetro do colar*	*57,75*	*mm*
Chave do parafuso	*55*	*mm*		*Pré-carga axial máxima calculada*	*501,25*	*kN*
Coeficiente de segurança	*1,2*	*—*		*Torque máximo aplicável*	*1596,42*	*N·m*

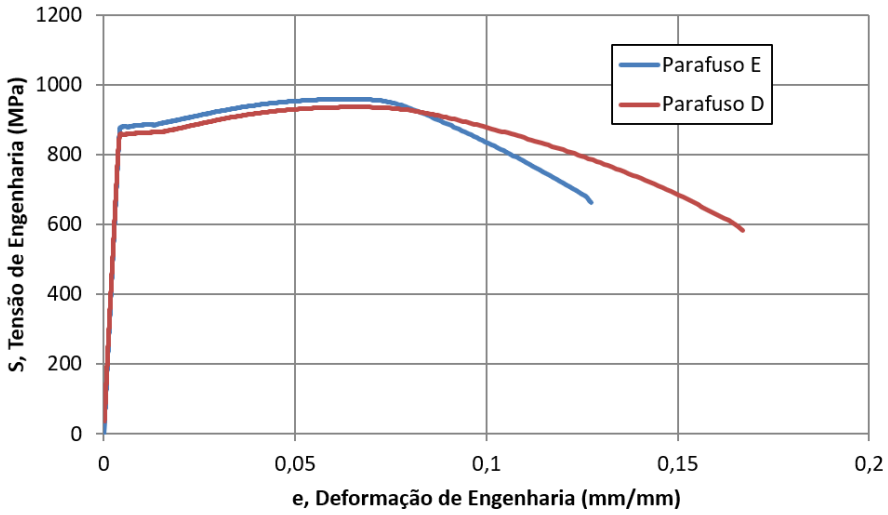
O modelo analítico permitiu relacionar o torque aplicado à pré-carga axial, considerando os parâmetros geométricos e os coeficientes de atrito adotados. Complementarmente, os ensaios de tração realizados nos parafusos D e E forneceram os resultados apresentados na Tabela 2 e as curvas tensão–deformação da Figura 2. Os limites de escoamento obtidos foram de 858,2 e 879,6 MPa, respectivamente, superiores ao valor mínimo de referência de 640 MPa considerado para a classe 8.8.

Tabela 2. Parâmetros geométricos e propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração.

Propriedade / Parâmetro	**Parafuso D**	**Parafuso E**	**Requisito Mínimo**
Comprimento inicial (L_0)	50,0 mm	50,0 mm	-
Diâmetro inicial (D_0)	10,0 mm	10,0 mm	-
Área da seção transversal (A_0)	78,54 mm²	78,54 mm²	-
Limite de Escoamento (S_{LE})	858,2 MPa	879,6 MPa	640,0 MPa
Limite de Resistência (S_{LR})	935,8 MPa	958,6 MPa	800,0 MPa
Alongamento total (Along. %)	14,26 %	12,73 %	12,0 %
Módulo de Elasticidade (E)	215,8 GPa	216,7 GPa	-
Dureza Brinell (HB)	272 HB	279 HB	-
S_{LR} estimado via HRc (ISO 18265),	962,3 MPa	958,7 MPa	-
Erro relativo (S_{LR} exp. vs HRc)	2,83%	0,01 %	-

ISSN 2317-1316

Figura 2: Diagramas tensão de engenharia × deformação de engenharia dos parafusos D e E.



Complementarmente aos ensaios de tração, foram realizadas medições de dureza Rockwell C (HRC) nas amostras dos parafusos A a E. Os resultados obtidos nas cabeças estão apresentados na Tabela 3, enquanto a Tabela 4 reúne as medições realizadas nos corpos dos parafusos D e E. As amostras A e B apresentaram durezas médias semelhantes, de 26,1 e 25,5 HRC, respectivamente, enquanto a amostra C apresentou o maior valor médio, de 31,9 HRC. Para os parafusos D e E, as durezas médias nos corpos foram de 28,2 e 29,5 HRC, respectivamente.

Tabela 3. Resultados da dureza Rockwell C (HRc) nas cabeças dos parafusos.

Parafuso	**Amostra**	**Lado 1 - Medições (HRc)**	**Lado 2 - Medições (HRc)**	**Média Amostra**	**Média Geral**
Parafuso A	A1	27,0; 26,5; 25,0	26,0; 24,0; 27,0	25,9	26,1
Parafuso A	A2	27,0; 31,0; 25,0	22,0; 27,5; 25,0	26,3	-
Parafuso B	B1	28,0; 25,5; 27,0	28,0; 25,5; 24,0	26,3	25,5
Parafuso B	B2	26,5; 24,0; 25,0	20,5; 25,5; 27,0	24,8	-
Parafuso C	C1	31,5; 36,5; 32,5	31,5; 36,0; 36,5	34,1	31,9
Parafuso C	C2	20,0; 32,0; 26,0; 31,0	34,0; 34,5; 33,0	30,1	-
Parafuso D	D1	30,0; 32,0; 25,0; 27,0	27,0; 30,5; 30,0	28,8	27,6
Parafuso D	D2	29,0; 23,8; 26,0	26,0; 27,0; 25,8	26,3	-
Parafuso E	E1 / E2	Não registradas	Não registradas	-	-

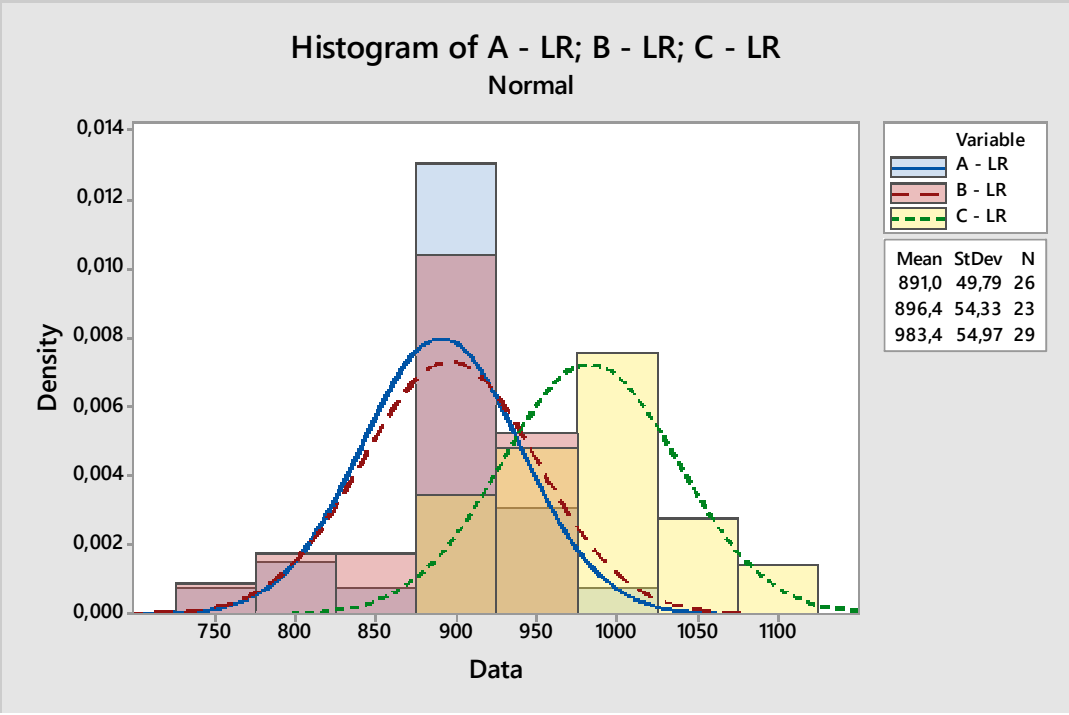
ISSN 2317-1316

Tabela 4. Resultados do ensaio de dureza Rockwell C (HRc) e conversão para dureza Brinell (HB) nos corpos dos parafusos D e E.

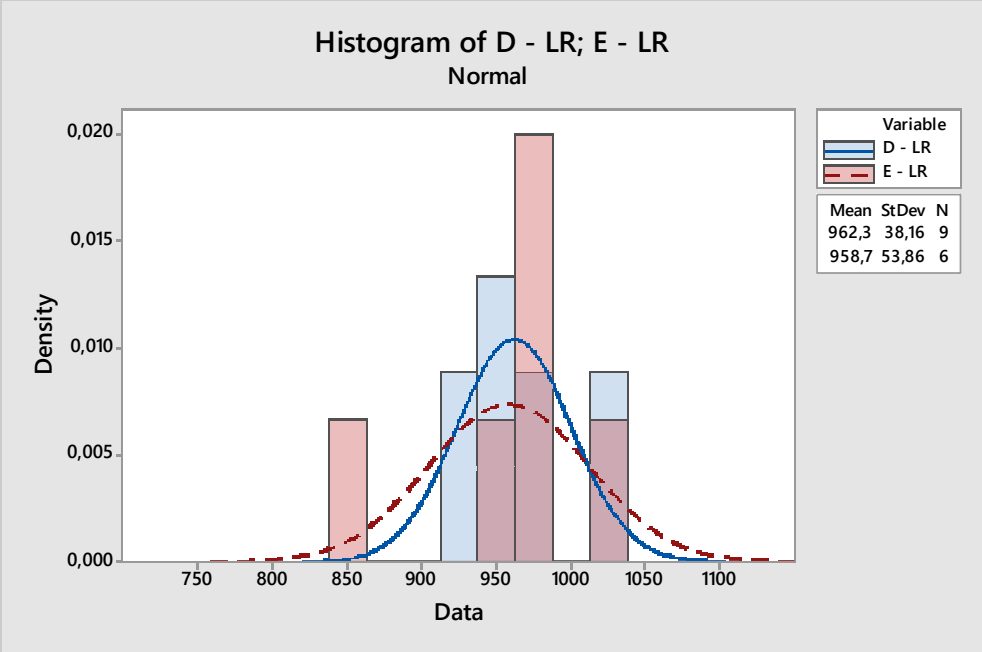
Amostra / Corpo	Face Avaliada	Medições Individuais (HRc)	Média da Face (HRc)	Média Geral / HB
Parafuso D	Com Marcação	31,0; 25,0; 30,0	28,7	28,2 HRc (272 HB)
Parafuso D	Sem Marcação	30,0; 25,0	27,5	-
Parafuso E	Com Marcação	29,0; 32,0; 28,0	29,7	29,5 HRc (279 HB)
Parafuso E	Sem Marcação	26,5; 27,5; 34,0	29,3	-

A partir dos resultados de dureza, foram estimados os limites de resistência à tração por meio das correlações estabelecidas na ISO 18265 (International Organization for Standardization, 2013b). As amostras A e B apresentaram resistências estimadas próximas, enquanto a amostra C apresentou valores superiores, conforme as distribuições mostradas na Figura 3. Para os parafusos D e E, os valores médios estimados a partir da dureza foram de 962,3 e 958,7 MPa, respectivamente.

Figura 3: Histogramas da estimativa do limite de resistência à tração (S_{LR}, MPa) a partir da dureza Rockwell C medidas nas cabeças dos parafusos A, B, C, D e E.



ISSN 2317-1316



A comparação entre as resistências estimadas a partir da dureza e aquelas determinadas nos ensaios de tração evidenciou a possibilidade de utilizar essa correlação como ferramenta auxiliar na caracterização mecânica dos fixadores. Entretanto, as diferenças entre as regiões analisadas e a dispersão das medições devem ser consideradas na interpretação dos resultados.

As diferenças de propriedades mecânicas observadas entre as amostras A, B e C, provenientes de uma investigação de falha estrutural, não permitem determinar isoladamente as causas da ocorrência. Para isso, seria necessário considerar também as características microestruturais, as condições de montagem e os esforços atuantes. Em conjunto, a caracterização experimental das propriedades mecânicas e a modelagem analítica permitiram integrar informações sobre a resistência dos fixadores, suas características geométricas e as condições de atrito, estabelecendo uma abordagem sistemática para a estimativa do torque de aperto admissível em uniões parafusadas industriais.

4 CONCLUSÃO

O trabalho permitiu desenvolver um modelo analítico, implementado em planilha eletrônica, para estimar a relação entre torque de aperto e pré-carga em uniões parafusadas, considerando parâmetros geométricos, condições de atrito e propriedades mecânicas dos fixadores. A caracterização experimental complementou o estudo ao fornecer dados de dureza

ISSN 2317-1316

e resistência mecânica para comparação com os requisitos normativos. A abordagem apresenta potencial para auxiliar na definição de parâmetros de montagem industrial, embora sua aplicação prática ainda dependa da verificação dos cálculos e da validação experimental da relação entre torque aplicado e pré-carga efetivamente obtida.

5 DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Durante a elaboração deste trabalho, utilizou-se a ferramenta ChatGPT para auxiliar na revisão textual, organização das informações e adequação da linguagem acadêmica. O conteúdo gerado foi revisado, editado e validado pelos autores, que assumem total responsabilidade pelo conteúdo final apresentado.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 898-1: Elementos de fixação - Propriedades mecânicas de elementos de fixação de aço-carbono e aço-liga - Parte 1: Parafusos, prisioneiros e pernos com classes de propriedade especificadas - Rosca grossa e rosca de passo fino. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica. 10. ed. [S. l.]: AMGH Editora, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 898-1: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel — Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread. Geneva: ISO, 2013a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 18265: Metallic materials — Conversion of hardness values. Geneva: ISO, 2013b.

SAE INTERNATIONAL. SAE J429: Mechanical and Material Requirements for Externally Threaded Fasteners. Warrendale: SAE, 2014