

DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA METODOLOGIA DE ENSAIO DE
TORQUE EM PARAFUSOS

MATHEUS PAES PEÇANHA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
JUNHO - 2018

DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA METODOLOGIA DE ENSAIO DE TORQUE EM PARAFUSOS

MATHEUS PAES PEÇANHA

“Dissertação de mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.”

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Atem de Carvalho

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
JUNHO - 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

68/2018

Peçanha, Matheus Paes

Desenvolvimento de uma nova metodologia de ensaio de torque em parafusos /
Matheus Paes Peçanha. – Campos dos Goytacazes, 2018.
x, 103 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) --
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência
e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes,
2018.

Orientador: Eduardo Atem de Carvalho.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

Bibliografia: f. 99-103.

1. PARAFUSOS 2. COEFICIENTE DE TORQUE 3. FORÇA DE APERTO
4. TRIBOLOGIA I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados
II. Título

CDD 624.176

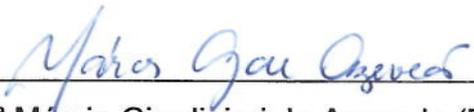
DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA METODOLOGIA DE ENSAIO DE
TORQUE EM PARAFUSOS

MATHEUS PAES PEÇANHA

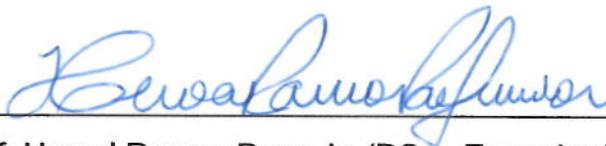
“Dissertação de mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.”

Aprovada em 21 de Junho de 2018.

Comissão Examinadora:



Prof.^a Márcia Giardinieri de Azevedo (DSc., Engenharia Química) - UENF



Prof. Herval Ramos Paes Jr. (DSc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - UENF



Prof. Michel Picanço Oliveira (DSc., Engenharia e Ciência dos Materiais) - UFES



Prof. Eduardo Atem de Carvalho (Ph.D., Engenharia Mecânica) - UENF
(Orientador)

Dedico este trabalho à minha esposa, aos meus pais, à minha irmã e ao meu cunhado que sempre me incentivaram a superar as dificuldades e atingir meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Deus trino, meu Criador, por ter me proporcionado a oportunidade de realizar o mestrado e por todas as portas de emprego que Ele abriu para mim durante o mestrado e que Ele abrirá devido ao mestrado.

Agradeço a minha esposa pela grande demonstração de amor por mim ao compreender a minha ausência, estando nós recém-casados, para me dedicar aos experimentos finais e à escrita da dissertação.

Agradeço aos meus pais pela criação que me deram e por sempre me apoiarem em tudo me proporcionando condições para que eu alcançasse meus objetivos.

Agradeço à minha irmã e ao meu cunhado por todo o carinho e por sempre acreditarem em mim, me incentivando e me impulsionando a ser uma pessoa cada vez melhor.

Agradeço ao meu orientador por todas as conversas que tivemos, por todos os conselhos e ensinamentos que me deu e por sempre estar solícito a me ajudar.

Agradeço aos membros da banca por aceitarem meu convite e disporem do seu tempo para avaliarem meu trabalho.

Agradeço à Fernando, um grande amigo que o mestrado me proporcionou, por sempre ter acreditado em mim e por toda ajuda que me deu, principalmente na fabricação e calibração das células de carga.

Agradeço à empresa Júnior Engloba pelos serviços prestados com excelência nos ensaios de dureza, tratamentos térmicos e análises metalográficas.

Agradeço ao meu amigo João Marcos pelo auxílio com as análises de rugosidade no microscópio Confocal.

Agradeço a Djalma, coordenador da pós-graduação, por sempre estar disponível para tratar de assuntos relacionados ao mestrado.

Agradeço a Silvio, técnico do LAMAV, por ter me auxiliado com a preparação da superfície das matrizes de aperto para a colagem do strain gage.

Agradeço aos meus colegas de trabalho Gisele, Maria Clara, André e Ana Luisa por todo o apoio e incentivo para terminar o mestrado.

Agradeço a todos os familiares por acreditarem em mim e sempre me incentivarem a investir na minha formação acadêmica e profissional.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 Aspectos gerais.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Justificativas.....	2
1.3.1 Importância científica	2
1.3.2 Importância econômica e tecnológica.....	3
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Junta aparafusada	4
2.1.1 A rosca.....	6
2.1.1.1 Nomenclatura das roscas no padrão UNS	9
2.1.1.2 Nomenclatura das roscas no padrão ISO	10
2.1.2 O parafuso	10
2.1.2.1 Quanto ao uso pretendido	11
2.1.2.2 Quanto à classe de resistência.....	12
2.1.3 A porca	13
2.1.4 A arruela	14
2.2 Propriedades mecânicas.....	16
2.2.1 Propriedades mecânicas dos metais	16
2.2.2 Tensões no parafuso e suas nomenclaturas	17
2.2.2.1 Tensões trativas	17
2.2.2.2 Tensões de cisalhamento.....	19
2.2.2.3 Tensões torcionais.....	19
2.2.3 Propriedades de um parafuso segundo a norma ISO 898-1.....	20
2.3 Materiais para fabricação dos parafusos	21

2.4 Métodos de aplicação e controle da pré-carga	26
2.4.1 Controle de torque de aperto	27
2.4.2 Controle do ângulo de aperto	28
2.4.3 Controle de aperto ao escoamento.....	29
2.4.4 Método do estiramento do parafuso	29
2.5 Tribologia	30
2.5.1 Rugosidade.....	31
2.5.2 O atrito	33
2.5.3 Atritos e forças que atuam nos parafusos.....	37
2.6 Técnicas para realização do ensaio de torque.....	44
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1 Aquisição dos materiais	49
3.2 Fabricação da célula de carga	49
3.3 Usinagem das matrizes de aperto.....	49
3.4 Tratamento térmico das matrizes de aperto.....	50
3.5 Dureza	53
3.6 Microscopia confocal.....	58
3.7 Microscopia óptica	59
3.8 Colagem dos strain gages	60
3.9 Calibração das células de carga	61
3.10 Ensaio de torque	63
3.11 Rugosidade.....	68
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
4.1 Dureza	70
4.2 Microscopia óptica	74
4.3 Calibração das células de carga	77
4.4 Ensaio de torque.....	84

4.5 Rugosidade	89
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES	96
CAPÍTULO 6: SUGESTÕES	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Junta (a) de tração e (b) de cisalhamento (Fonte: Aragão, 2017).....	4
Figura 2.2 - Esquema de molas rígidas para representar parafusos e contra peças deformados elasticamente (Fonte: Bickford, 2008).	5
Figura 2.3 - Representação da rosca como uma hélice (Fonte: Pauli <i>et al.</i> , 1996).....	6
Figura 2.4 - Terminologia de roscas de parafusos, com pontas em “v” (Fonte: Budynas e Nisbett, 2011).	7
Figura 2.5 - As formas de roscas mais empregadas no mundo ocidental atualmente. As letras UN são utilizadas para definir o padrão UNS e a letra M para definir o padrão ISO (Fonte: Adaptado de Bickford, 2008).	8
Figura 2.6 - Parafuso de porca (a), parafuso de máquina (b) e prisioneiro (c) (Fonte: Norton, 2013).	11
Figura 2.7 - Parafuso sextavado com rosca inteira (a) e com rosca parcial (b) (Fonte: Aragão, 2017).....	12
Figura 2.8 - Porcas: hexagonal padronizada ou sextavada (a); hexagonal de pressão (b); hexagonal de castelo (c); de cúpula ou cega (d); de borboleta (e) (Fonte: Norton, 2013).	13
Figura 2.9 - Arruelas: de travamento bipartida ou de pressão (a), de dentes internos (b), de dentes externos (c), de dentes internos e externos ou denteado duplo (d) e de dentes em cone (e) (Fonte: Norton, 2013).	15
Figura 2.10 - Diagrama tensão-deformação de um parafuso A325 com comprimento inicial de 5 polegadas (Fonte: Adaptado de Bickford, 2008).	17
Figura 2.11 - Marcação da classe de resistência na cabeça do parafuso (Fonte: Adaptado de Oberg <i>et al.</i> , 2008).	24
Figura 2.12 - Vista em corte de um tensionador hidráulico (Fonte: Adaptado de Bickford, 2008).	30
Figura 2.13 - Tipos de imperfeições superficiais (Adaptado de Ettl <i>et al.</i> , 1998).....	32
Figura 2.14 - Experimento para determinação da força de atrito (Fonte: Adaptado de Levinson, 1968 apud Stoeterau, 2004).	34
Figura 2.15 - Forças atuando no plano inclinado da rosca (Fonte: Adaptado de Eccles, 2010).	37
Figura 2.16 - Forças atuando no filete de rosca (Adaptado de Eccles, 2010).....	39

Figura 2.17 - Quantidade relativa das três componentes do torque de reação (Adaptado de Bickford, 2008).....	43
Figura 2.18 - Equipamentos utilizados no experimento: torqueadeira eletrônica (a), visor da arruela de carga (b), arruela de carga (c) e soquete digital (d) (Fonte: Rolin, 2014).....	45
Figura 2.19 - Equipamento fabricado para ensaios de torque (Fonte: Rodrigues, 2015).	46
Figura 2.20 - Bancada para realização dos experimentos (Fonte: Adaptado de Croccolo <i>et al.</i> , 2017).	47
Figura 3.1 - Organograma das etapas do estudo.....	48
Figura 3.2 - Dimensional das matrizes de aperto.....	50
Figura 3.3 - Dimensional dos corpos de prova.....	51
Figura 3.4 - Sequência do tratamento de têmpera: colocação da cesta metálica com as matrizes de aperto e os corpos de prova (a), aquecimento na temperatura e no tempo programados (b), abertura do forno (c), retirada da cesta do forno (d), mergulho da cesta no óleo de têmpera HYDRATEMP AC (e), matrizes e corpos de prova temperados (f).....	52
Figura 3.5 - Lixadeira manual AML4.	53
Figura 3.6 - Microscópio óptico Olympus.	54
Figura 3.7 - Esquemático do ensaio de dureza Brinell (Fonte: Garcia, 2012).	55
Figura 3.8 - Durômetro PANTEC RBS.	55
Figura 3.9 - Distribuição das endentações nos corpos de prova.....	56
Figura 3.10 - Microscópio Confocal Olympus LEXT.....	58
Figura 3.11 - Alumina de 1 µm da Arotec (a) e pano de polimento (b).....	59
Figura 3.12 - Microscópio óptico Neophot 32.....	60
Figura 3.13 - Acoplamento dos strain gages nas matrizes de 68 mm e 75 mm.....	61
Figura 3.14 - Máquina universal de ensaios INSTRON, modelo 5582.	62
Figura 3.15 - Calibração das células de carga.	63
Figura 3.16 - Máquina de torção, modelo TNS-DW5.	65
Figura 3.17 - Dimensional dos parafusos, das porcas e das arruelas.....	66
Figura 3.18 - Parafuso classe M12 x 1,75 com o trecho rosqueado lubrificado com graxa Lubrax Autolith 2.	67
Figura 3.19 - Dimensões do rolamento axial modelo STB 51202 (Fonte: Adaptado de SKF, 2018).	68

Figura 4.1 - Corpo de prova temperado com a camada superficial de óxido (a) e com a camada superficial de óxido removida com lixa de 600 mesh.....	70
Figura 4.2 - Dureza Brinell média para as três condições de ensaio do corpo de prova.	73
Figura 4.3 - Endentação no corpo de prova sem tratamento térmico (a), temperado (b) e temperado e revenido (c).	74
Figura 4.4 - Microestrutura de um aço SAE 4140 como recebido no aumento de 500x. Ataque: Nital 2%.....	75
Figura 4.5 - Microestrutura de um aço SAE 4140 temperado no aumento de 500x. Ataque: Nital 2%.....	76
Figura 4.6 - Microestrutura de um aço SAE 4140 temperado e revenido no aumento de 500x. Ataque: Nital 2%.....	77
Figura 4.7 - Curvas da 1ª calibração das matrizes de aperto.....	78
Figura 4.8 - Curvas da 2ª calibração das matrizes de aperto.....	79
Figura 4.9 - Curvas da 3ª calibração das matrizes de aperto.....	80
Figura 4.10 - Curvas da 4ª calibração das matrizes de aperto.....	81
Figura 4.11 - Curvas da 5ª calibração das matrizes de aperto.....	82
Figura 4.12 - Filetes de rosca de um parafuso como recebido.....	90
Figura 4.13 - Filetes de rosca de um parafuso torquado a seco.	90
Figura 4.14 - Filetes de rosca de um parafuso torquado com lubrificante.....	91
Figura 4.15 - Arruela como recebida (a), arruela utilizada no parafuso que foi torquado a seco sem rolamento (b) e a arruela utilizada no parafuso que foi torquado a seco com o rolamento (c).	91
Figura 4.16 - Região das medições de rugosidade em três filetes do parafuso como recebido.....	93
Figura 4.17 - Região das medições de rugosidade em três filetes do parafuso torquado a seco.....	93
Figura 4.18 - Região das medições de rugosidade em três filetes do parafuso torquado com lubrificante.	94
Figura 4.19 - Região das medições de rugosidade das arruelas nas três condições de ensaio.....	95

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos parafusos segundo a ISO (Fonte: Garcia, 2007).....	13
Tabela 2.2 - Cargas de teste das porcas (Fonte: Garcia, 2007).....	14
Tabela 2.3 - Dureza Vickers das porcas (Fonte: Garcia, 2007).....	14
Tabela 2.4 - Composição química de aços para a fabricação de parafusos classe 10.9 (Fonte: Adaptado de ISO 898-1, 2009).	20
Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas de parafusos classe 10.9 (Fonte: Adaptado de ISO 898-1, 2009).....	21
Tabela 2.6 - Identificação e propriedades mecânicas de parafusos (Fonte: Adaptado de Oberg <i>et al.</i> , 2008).	23
Tabela 2.7 - Precisão dos métodos de aplicação de pré-carga nos parafusos (Fonte: Adaptado de Oberg <i>et al.</i> , 2008).	27
Tabela 3.1 - Parâmetros dos tratamentos térmicos.....	52
Tabela 3.2 - Comparação entre as escalas HR e HB.....	57
Tabela 3.3 - Tempo de ataque químico para cada tipo de amostra.	60
Tabela 3.4 - Dados dos parafusos classe 10.9 fornecidos pelo fabricante.	64
Tabela 3.5 - Condições dos ensaios de torque.	66
Tabela 4.1 - Resultados do ensaio de dureza na escala HR do equipamento.	71
Tabela 4.2 - Dureza HB a partir do diâmetro médio do corpo de prova sem tratamento.	71
Tabela 4.3 - Dureza HB a partir do diâmetro médio do corpo de prova temperado. .	71
Tabela 4.4 - Dureza HB a partir do diâmetro médio do corpo de prova temperado e revenido.....	72
Tabela 4.5 - Comparação entre os resultados de dureza obtidos pela tabela de conversão do equipamento e pela medição dos diâmetros para o corpo de prova sem tratamento.	72
Tabela 4.6 - Resultado da 1ª calibração das matrizes de aperto.	78
Tabela 4.7 - Resultado da 2ª calibração das matrizes de aperto.	79
Tabela 4.8 - Resultado da 3ª calibração das matrizes de aperto.	80
Tabela 4.9 - Resultado da 4ª calibração das matrizes de aperto.	81
Tabela 4.10 - Resultado da 5ª calibração das matrizes de aperto.	82

Tabela 4.11 - Desenvolvimento da equação da força de aperto para a matriz de 68 mm.	83
Tabela 4.12 - Desenvolvimento da equação da força de aperto para a matriz de 75 mm.	84
Tabela 4.13 - Resultados obtidos para parafusos ensaiados na condição de torque a seco.....	85
Tabela 4.14 - Resultados obtidos para parafusos ensaiados na condição de torque lubrificado.....	85
Tabela 4.15 - Resultados obtidos para parafusos ensaiados na condição de torque a seco com rolamento.	86
Tabela 4.16 - Resultados obtidos para parafusos ensaiados na condição de torque lubrificado com rolamento.	86
Tabela 4.17 - Média e desvio padrão das propriedades obtidas no ensaio.	87
Tabela 4.18 - Variação das propriedades em relação à condição de torque a seco.	89
Tabela 4.19 - Rugosidade dos filetes nas três condições de ensaio.....	92
Tabela 4.20 - Rugosidade das arruelas nas três condições de ensaio.	94

RESUMO

As juntas aparafusadas se encontram presentes em diversas situações e seu desempenho depende da força de aperto que está atuando e da estabilidade desta força, sendo estes parâmetros vinculados ao torque aplicado, diâmetro do parafuso selecionado e coeficiente de torque, que está relacionado ao coeficiente de atrito. Diversos ensaios foram utilizados para simular o aperto provido por um parafuso. No entanto, a aplicação do torque é intermitente, dependendo da habilidade do profissional que manuseia a torqueadeira, logo comprometendo a precisão. O presente trabalho apresentou uma nova proposta para ensaios de torque. Parafusos classe 10.9 foram ensaiados em uma máquina de ensaios de torção, modelo TNS-DW5, responsável por aplicar o torque. Para mensurar a força de aperto, foi fabricada uma célula de carga que consistia em uma matriz de aperto com strain gage acoplado a fim de medir a deformação da matriz. Essa matriz primeiramente foi temperada e revenida para aumentar sua resistência mecânica e, para comprovar a eficiência do tratamento térmico, ensaios de dureza e análise metalográfica foram realizados. Após a fabricação da célula de carga, ela foi calibrada na máquina universal de ensaios INSTRON, modelo 5582, através de carregamentos compressivos sucessivos e da medição da deformação para cada carregamento. Os ensaios de torque foram realizados em quatro condições: a seco, lubrificado, a seco com rolamento e lubrificado com rolamento. Após os ensaios, medições de rugosidade foram realizadas para auxiliar na análise dos resultados obtidos. A fabricação da célula de carga ocorreu com êxito e houve um aumento de sua resistência mecânica comprovada pelo aumento da dureza e pela formação da microestrutura martensítica. Através das equações obtidas pela calibração das células de carga foram obtidas as propriedades de fricção onde foi constatado que o lubrificante causa um maior impacto que a utilização do rolamento. A mesma conclusão foi obtida das medições de rugosidade. A utilização da máquina de ensaios de torção foi adequada para este tipo de ensaio, pois, além dos resultados supracitados, a precisão de obtenção da pré-carga foi de $\pm 16\%$, coerente com a precisão de $\pm 15\%$ dos outros métodos através do giro da porca.

Palavras-chave: Parafuso, coeficiente de torque, força de aperto, tribologia.

ABSTRACT

Bolted joints have been present in several situations, however their performance depends on the clamping force that is acting and its stability, being these parameters linked to the applied torque, the diameter of the selected bolt and the torque coefficient, which is related to the coefficient of friction. Lots of tests have been conducted to simulate the clamp provided by a bolt. However, the torque application is intermittent, depending on the skill of the professional that is handling the nutrunner, soon compromising the precision. The present work introduces a new proposal for torque tests. Class 10.9 bolts were tested in a torsion machine, model TNS-DW5, that played a role of applying the torque. In order to measure the clamping force, it was made a load cell that consisted in a tightening matrix coupled with a strain gage to measure the matrix strain. The matrix was primarily quenched and tempered in order to improve the mechanical properties and to prove the efficiency of the heat treatments, it was carried out hardness tests and metallographic analysis. After the fabrication of the load cell it was calibrated in a universal testing machine INSTRON, model 5582, where successive compressive tightening was realized and the matrix strain for each tightening was recorded. The torque test was carried out in four conditions: dry torque, lubricated torque, dry torque with bearing and lubricated torque with bearing. After the tests, measures of the rugosity were carried out. The fabrication of the load cell occurred successfully and there was an improvement of its mechanical properties proved by the increase of the hardness and the formation of martensite. By means of the equations determined by the calibration of the load cells it was measured the friction properties finding that the lubricant has a greater impact than the bearing. The same conclusion was obtained by the rugosity. The usage of the torsion test machine is adequate to this kind of testing, because, in addition to the above results, the accuracy of the preload obtained was $\pm 16\%$, consistent with the accuracy of $\pm 15\%$ of the other methods that use the turn of the nut.

Keywords: Bolt, torque coefficient, clamping force, tribology.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais

O parafuso é considerado por alguns autores ter sido inventado em torno de 400 a.C. pelo grego Archytas de Tarentum. Por volta de 250 a.C., Arquimedes criou o princípio da rosca, que veio a ser o componente mais importante do parafuso (Anônimo, 2006). Este elemento de máquina tornou-se universalmente empregado pelo seu poder de fixação, pela facilidade de ser remontado e também pela possibilidade de ser reutilizado. Devido a esta versatilidade, o parafuso se encontra presente em aplicações das mais simples, como em móveis ou eletrodomésticos, até aplicações que envolvem a vida de pessoas e muito capital, como nas grandes construções civis e em equipamentos industriais.

Uma junta aparafusada é composta de parafuso, porca e contra peça. O parafuso é o elemento principal, pois é através dele que é gerada a força de aperto que mantém peças unidas. Dentre todos os métodos utilizados para gerar essa força de aperto, o torqueamento é o mais utilizado. Neste método, o parafuso ou porca é girado e, devido à ação da rosca, o parafuso é tracionado, causando o aperto. Para realizar o torqueamento, podem ser utilizados diversos tipos de equipamentos, como: chave mecânica, chave hidráulica, apertadeiras, parafusadeiras etc.

Quando se estuda o aperto de parafusos através do torqueamento, o parâmetro que deve ser ajustado é o torque aplicado e o parâmetro que deve ser verificado é a força de aperto. Isto pode ser feito tanto em campo, durante a montagem de uma junta aparafusada, quanto em laboratório, durante ensaios utilizados no estudo dos parafusos. Para este último caso, utilizam-se dispositivos que consistem em um suporte para o parafuso ser montado e uma célula de carga acoplada ao parafuso. No entanto, são necessários um aparelho para aplicação do torque e uma pessoa que saiba manuseá-lo adequadamente.

1.2 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo primário o desenvolvimento de uma metodologia de ensaio de torque empregando uma máquina de ensaio de torção presente na Oficina de Ensaio Mecânicos e Metrologia (OEMM) do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV). Como objetivo secundário, foram estudadas as propriedades tribológicas de parafusos, como coeficiente de atrito, coeficiente de torque e rugosidade das superfícies das roscas e da face da porca ou da cabeça do parafuso.

1.3 Justificativas

1.3.1 Importância científica

No LAMAV, os ensaios de torque realizados anteriormente utilizavam um aparato construído no próprio laboratório. No entanto, fazia-se necessária a utilização de uma parafusadeira elétrica à bateria cedida por alguma empresa para realizar os estudos. Este tipo de parafusadeira é muito sensível às variações de corrente elétrica, influenciando, portanto, na precisão do torque aplicado. Para resolver este problema, poderia ser utilizada uma chave de torque ou uma parafusadeira pneumática. No primeiro caso, tanto a quantidade quanto a precisão do torque dependeriam da pessoa que estivesse manuseando a chave. No caso de uma parafusadeira pneumática, o laboratório precisaria de uma instalação própria para um sistema pneumático, contando com um compressor. Esta opção demandaria uma grande quantidade de capital, tornando-a, momentaneamente, inviável.

Uma máquina de ensaios de torção foi adquirida pelo LAMAV no ano de 2015 para estudos na área da mecânica da fratura. Este equipamento possui uma capacidade de aplicar um torque consideravelmente elevado, com alta precisão e com uma ampla faixa de velocidades de rotação, permitindo que sejam variadas durante o próprio processo de aperto. Sua adaptação para ensaios de torque em parafusos

ampliará a variedade de estudos que poderão ser realizados com parafusos, além de tornar o laboratório totalmente independente para este tipo de estudo.

1.3.2 Importância econômica e tecnológica

Na região fluminense, há uma diversidade industrial, contando com as empresas de petróleo e gás em Macaé e, mais recente, com o Porto do Açu, em São João da Barra, que possui atualmente indústrias no ramo de metal-mecânica, mineradora, petrolífera e naval. Em todas estas empresas, o parafuso está presente. Sua falha depende totalmente da força de aperto gerada e da sua manutenção e é de grande importância que seja evitada, sendo responsável por grandes perdas financeiras.

Com um laboratório devidamente equipado para o estudo de torque em parafusos, a UENF se tornará um polo nesse ramo da ciência e tecnologia e, futuramente, poderá prestar suporte para as empresas da região.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Junta aparafusada

De uma forma abreviada, uma junta aparafusada é composta de três elementos: parafuso, contra peça e porca. O parafuso é o elemento que possui rosca externa, a contra peça sofrerá todas as forças resultantes do processo de aperto e a porca é o elemento que possui a rosca interna (Garcia, 2007).

Dependendo da direção das cargas externas que atuam na junta, esta pode ser classificada em dois tipos: de tração e de cisalhamento (Aragão, 2017). No primeiro tipo, a linha de ação da carga externa é aproximadamente paralela ao eixo do parafuso e, no segundo tipo, a linha de ação é aproximadamente perpendicular. Quando uma junta é exposta a cargas combinadas, seu tipo é definido de acordo com o maior carregamento (Bickford, 2008). Os tipos de juntas supracitados estão representados na Figura 2.1.

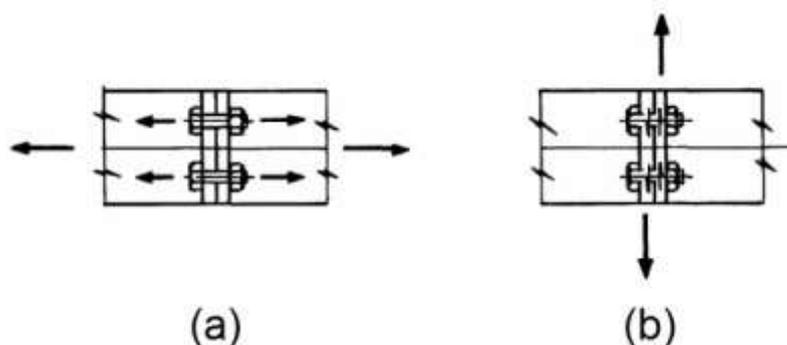


Figura 2.1 - Junta (a) de tração e (b) de cisalhamento (Fonte: Aragão, 2017).

O papel do parafuso em uma junta de tração e na maioria das juntas de cisalhamento é criar uma força compressiva, também chamada de força de aperto, que mantenha as contra peças unidas (Bickford, 2008). Essa força é obtida através do giro da cabeça do parafuso (ou da porca, enquanto a cabeça é mantida fixa) que causa um alongamento no parafuso e, portanto, cria uma tensão. A força de

alongamento do parafuso é igual em magnitude à força de aperto (Croccolo *et al.*, 2010; Roy, 2014).

Este efeito pode ser comparado a um esquema com molas rígidas (Figura 2.2). Enquanto as molas que representam o parafuso são alongadas, a mola que representa as contra peças é comprimida. As molas armazenam energia potencial quando deformadas (alongadas ou comprimidas) e retornam às suas posições iniciais, caso essa energia seja liberada. É esta energia potencial armazenada que permite que os parafusos exerçam uma força compressiva nas contra peças. (Bickford, 2008).

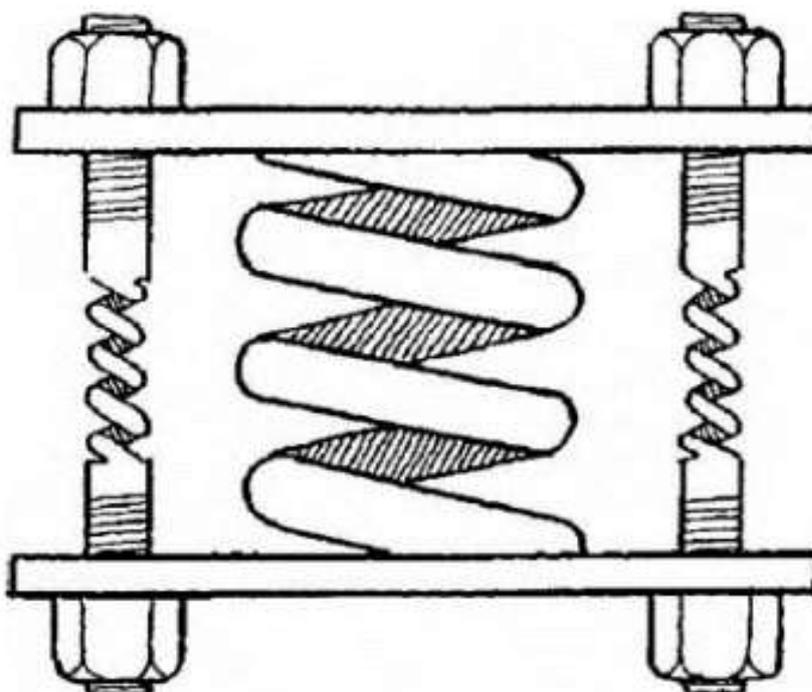


Figura 2.2 - Esquema de molas rígidas para representar parafusos e contra peças deformados elasticamente (Fonte: Bickford, 2008).

O sucesso de uma junta aparafusada não depende somente da força de aperto obtida, mas também da estabilidade da mesma. A tensão no parafuso e, portanto, a força de aperto pode ser alterada devido a fatores como: superposição com as cargas externas, vibrações, corrosão, expansão diferencial em altas temperaturas, fadigas etc. Apesar de poder haver um aumento da força de aperto, esses fatores frequentemente levam a uma diminuição dessa força (Bickford, 2008).

Como o parafuso e a porca têm papel fundamental em uma junta aparafusada, eles serão analisados separadamente. No entanto, antes de adentrarmos nestes dois elementos, uma característica comum a ambos deve ser apresentada: a rosca.

2.1.1 A rosca

A rosca é uma saliência de perfil constante desenvolvido uniformemente e de forma helicoidal sobre uma superfície cilíndrica ou cônica (Pauli *et al.*, 1996). Ela também pode ser definida como uma hélice (Figura 2.3) que faz com que o parafuso, após ser rotacionado, avance sobre o material ou porca (Norton, 2013).

As roscas podem ser externas ou internas. Parafusos contêm roscas do primeiro tipo, enquanto porcas contêm roscas do segundo tipo (Norton, 2013).

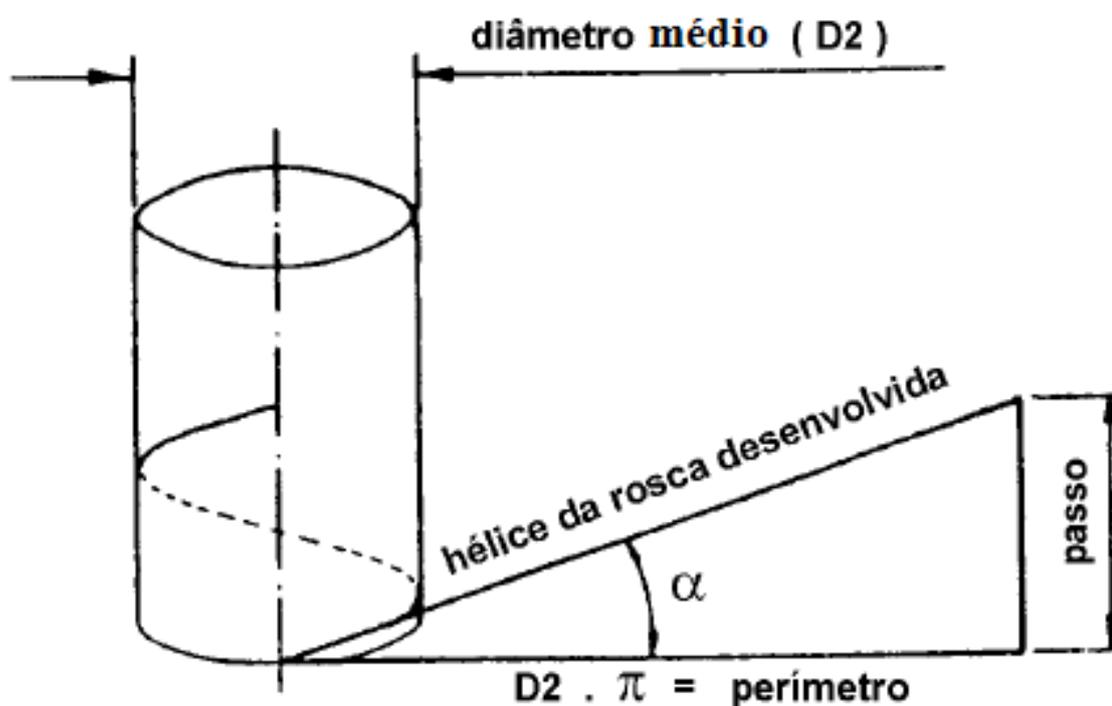


Figura 2.3 - Representação da rosca como uma hélice (Fonte: Pauli *et al.*, 1996).

A terminologia das roscas em um parafuso é apresentada na Figura 2.4.

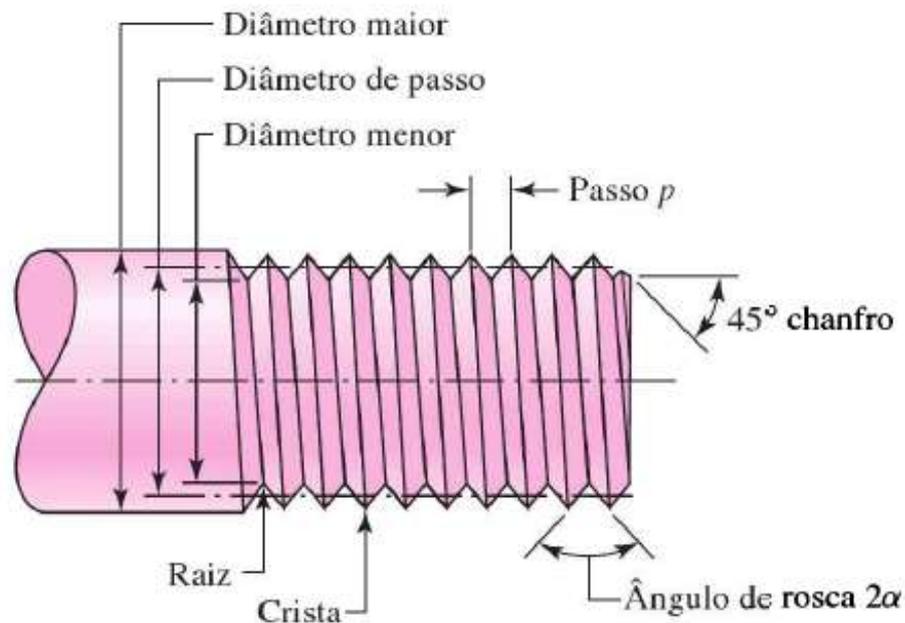


Figura 2.4 - Terminologia de roscas de parafusos, com pontas em “v” (Fonte: Budynas e Nisbett, 2011).

- Passo = distância entre duas roscas adjacentes ou avanço após uma volta completa do cilindro, também representado na Figura 2.3;
- Diâmetro maior = também denominado diâmetro máximo, é o maior diâmetro de uma rosca de parafuso;
- Diâmetro menor = é o menor diâmetro de uma rosca de parafuso;
- Diâmetro de passo = também denominado diâmetro primitivo, é o diâmetro teórico entre o menor e o maior.

A definição apresentada de avanço é válida para uma rosca simples. No entanto, existem casos em que a rosca pode ser múltipla. Por exemplo, em uma rosca dupla que tem dois filetes de rosca um ao lado do outro, o avanço é igual ao dobro do passo. Parafusos de porca e porcas têm apenas uma rosca (Budynas e Nisbett, 2011; Norton, 2013).

Na Figura 2.4, as cristas e as raízes têm um formato em “v” apenas com intuito ilustrativo. Entretanto, elas são planas, a fim de reduzir a concentração de tensões que ocorre em um canto vivo, como demonstrado na Figura 2.5. Deve-se ressaltar, ainda, que todas as roscas são feitas com a regra da mão direita (RH - right hand), a

menos que seja especificado o contrário com adição das letras LH (left hand) (Norton, 2013).

Inicialmente, as roscas não eram padronizadas e, portanto, havia diferenças para cada país fabricante. Após a Segunda Guerra Mundial, países como Estados Unidos, Canadá e Reino Unido padronizaram as roscas em uma série atualmente conhecida como Unified National Standard (UNS), com dimensões em polegadas. O padrão europeu, definido pela ISO, tem a mesma forma de seção transversal da rosca, porém com dimensões métricas (Norton, 2013).

Ambos os padrões têm o ângulo de rosca de 60° e o tamanho da rosca especificado pelo diâmetro nominal externo. Como as unidades utilizadas são diferentes, os padrões ISO e UNS não são intercambiáveis (Norton, 2013).

Algumas variações de formas de roscas nos padrões ISO e UNS são mostradas na Figura 2.5.

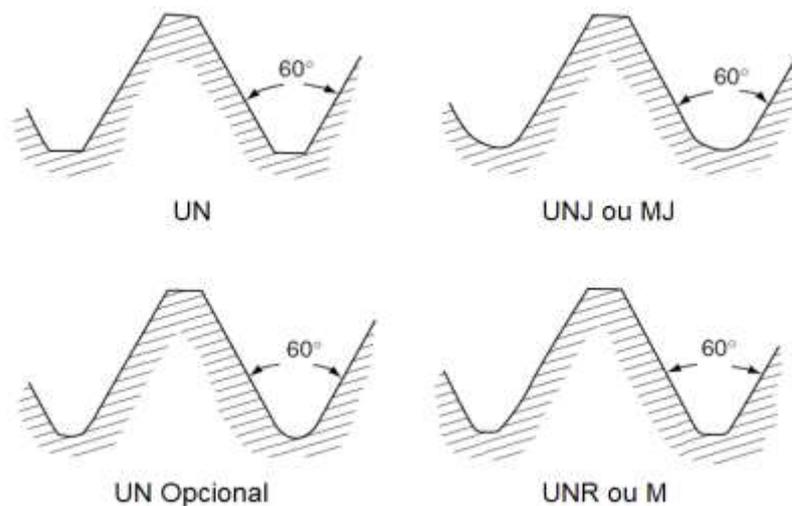


Figura 2.5 - As formas de roscas mais empregadas no mundo ocidental atualmente.

As letras UN são utilizadas para definir o padrão UNS e a letra M para definir o padrão ISO (Fonte: Adaptado de Bickford, 2008).

- UN = tem cristas e raízes planas;
- UNR = tem raízes levemente arredondadas;
- UNJ = tem raízes bem arredondadas.

De acordo com o número de roscas por polegadas determinado para um diâmetro estabelecido do parafuso, três séries são definidas: grossa (UNC, UNCR e UNCJ), onde a letra “C” significa “coarse”, fina (UNF, UNFR e UNFJ), onde a letra “F” significa “fine”; e ultrafina (UNEF, UNEFR e UNEFJ), onde as letras “EF” significam “extra fine”. Por exemplo, para um diâmetro especificado, uma rosca UNC contém menos roscas por polegada que uma rosca UNF que por sua vez contém menos roscas por polegada que uma rosca UNEF (Bickford, 2008).

Com o intuito de controlar o ajuste, os padrões UNS e ISO definem intervalos de tolerância para roscas internas e externas. O padrão UNS especifica três classes: 1, 2 e 3. A classe 1 possui tolerâncias mais largas (parafusos de pouco valor comercial), enquanto a classe 2 possui tolerâncias mais estreitas, proporcionando um melhor encaixe e a classe 3 possui as menores tolerâncias (maior precisão). A letra “A” designa roscas externas e a letra “B” roscas internas (Norton, 2013).

Antes de explicar a especificação do ajuste para o padrão ISO, dois termos devem ser definidos: afastamento e tolerância. O afastamento determina a distância mínima entre roscas internas e externas quando ambos os parafusos e porcas estão na condição de mais material: parafusos mais largos e porcas mais grossas. A tolerância representa a diferença entre o tamanho na condição de mais material e o tamanho real. Quanto maior a tolerância, maior a folga entre as roscas internas e externas. O afastamento é indicado pelas letras “G” ou “H” para roscas internas e “e”, “f”, “g” ou “h” para roscas externas. “H” e “h” definem afastamento zero e “G” define uma rosca interna com um afastamento pequeno para acomodar algum tipo de revestimento. As tolerâncias são determinadas para roscas externas através de um grau que varia de 3 a 9. O grau 3 define o ajuste mais apertado e grau 9 o ajuste mais folgado (Bickford, 2008).

2.1.1.1 Nomenclatura das roscas no padrão UNS

Uma rosca UNS é especificada a partir de um código alfanumérico. Um exemplo de uma rosca externa de parafuso seria o código $\frac{1}{4}$ - 20UNC 1A, onde:

- $\frac{1}{4}$ = diâmetro nominal em polegadas;

- 20 = número de roscas por polegada;
- UNC = mostra que essa rosca pertence à série grossa;
- 1A = mostra que é uma rosca externa (A) e pertence a classe 1 de ajuste (Bickford, 2008).

2.1.1.2 Nomenclatura das roscas no padrão ISO

Uma rosca métrica também é especificada a partir de um código alfanumérico. Um exemplo de uma rosca externa de parafuso seria o código MJ6 x 1 - 4h6h, onde:

- M = mostra que essa é uma rosca métrica;
- J = mostra que as raízes são bem arredondadas;
- 6 = diâmetro nominal em milímetros;
- 1 = passo em milímetros;
- 4h = mostra um afastamento zero (h) e uma tolerância de grau 4 para o diâmetro do passo;
- 6h = mostra um afastamento zero (h) e uma tolerância de grau 6 para o diâmetro maior.

A letra “h” minúscula indica que é uma rosca externa (Bickford, 2008).

2.1.2 O parafuso

Um parafuso basicamente pode ser definido como uma barra cilíndrica roscada com uma cabeça em uma das extremidades. Esta cabeça pode ser hexagonal (sextavada), quadrada ou redonda, dentre muitas outras opções (Pauli *et al.*, 1996).

Um parafuso de fixação pode ser classificado das seguintes maneiras:

- Quanto ao uso pretendido;
- Quanto à classe de resistência.

2.1.2.1 Quanto ao uso pretendido

Dependendo da aplicação, um parafuso pode ser classificado como: parafuso de porca, parafuso de máquina e prisioneiro. O parafuso de porca, como o próprio nome já diz, utiliza uma porca para manter as partes de um conjunto unidas. O parafuso de máquina, também chamado de parafuso de cabeça, é rosqueado a um furo em vez de ser engajado a uma porca. Ambos os tipos são fixadores compostos de uma cabeça e um corpo reto com filetes de rosca (Norton, 2013).

Os prisioneiros, também conhecidos como estojos, são parafusos sem cabeça e com ambas as extremidades roscadas. Eles podem ser utilizados com uma porca em cada extremidade ou com uma extremidade engajada a um furo roscado e a outra a uma porca. As extremidades podem conter roscas com classes diferentes (Norton, 2013). Os tipos de parafusos supracitados estão representados na Figura 2.6.

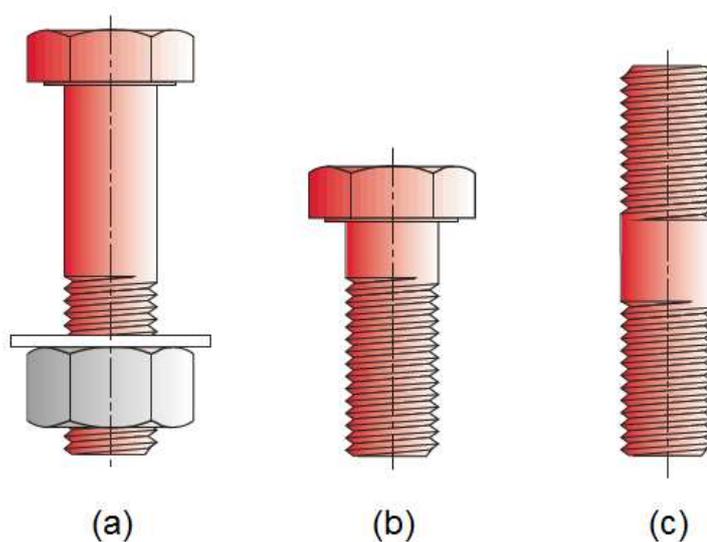


Figura 2.6 - Parafuso de porca (a), parafuso de máquina (b) e prisioneiro (c) (Fonte: Norton, 2013).

Deve-se ressaltar que o parafuso de cabeça pode ter rosca inteira ou rosca parcial, conforme a Figura 2.7.

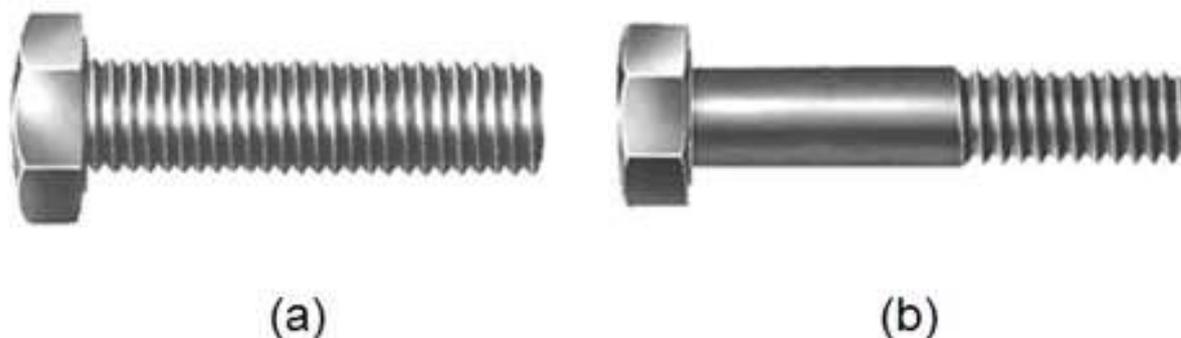


Figura 2.7 - Parafuso sextavado com rosca inteira (a) e com rosca parcial (b) (Fonte: Aragão, 2017).

2.1.2.2 Quanto à classe de resistência

A classificação da resistência do parafuso segue a seguinte terminologia: 4.8, 5.8, 6.8, 8.8, 10.9 e 12.9. As três primeiras classes se referem a parafusos que não sofreram tratamento térmico e as três últimas se referem a parafusos que foram temperados e revenidos. Existe também a classe 9.8, porém está em fase de extinção (Garcia, 2007).

Pode-se notar que cada classe utiliza um algarismo com uma parte inteira e uma decimal. A parte inteira multiplicada por 100 fornece o valor do limite de resistência à tração (LRT) nominal. O limite de escoamento (LE) nominal pode ser obtido multiplicando a parte decimal pelo LRT (Böllhoff, 2009; Garcia, 2007).

Como exemplo, vamos analisar um parafuso classe 5.6:

- Limite de resistência à tração: $5 \times 100 = 500$ MPa;
- Limite de escoamento: $0,6 \times 500 = 300$ MPa.

Vale a pena ressaltar que esses valores são nominais. Valores reais dessas duas propriedades e de outras propriedades como dureza Rockwell B (para parafusos não tratados termicamente) e dureza Rockwell C (para parafusos tratados termicamente) são fornecidas pela especificação ISO 898 parte I (Garcia, 2007). A Tabela 2.1 mostra alguns desses valores.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos parafusos segundo a ISO (Fonte: Garcia, 2007).

Classe	5.8	6.8	8.8	10.9	12.9
LRT (mín)	540	600	800	1040	1220
LE (mín)	420	480	640	940	1110
HRB	82 - 99,5	89 - 99,5	---	---	---
HRC	---	---	22 - 32	32 - 39	39 - 44

2.1.3 A porca

A porca é uma peça com formato prismático ou cilíndrico, contendo um furo roscado através do qual o parafuso é engajado. Ela é uma peça fundamental, pois, na maioria dos casos, é através dela que o torque é aplicado para prover a força de aperto. Os formatos mais comuns para porcas são: hexagonal (sextavado), quadrado ou redondo (Pauli *et al.*, 1996).

Além desses formatos citados, existem outros estilos de porca para atender a uma finalidade específica. A porca de castelo tem sulcos para a inserção de um pino que atravessa um furo passante ao parafuso, evitando seu afrouxamento. Além deste tipo de porca, quando a preocupação é o travamento, pode ser utilizada uma porca padrão em conjunto a uma porca de pressão. A porca cega é utilizada para fins decorativos e a porca borboleta possibilita uma remoção manual (Norton, 2013). A Figura 2.8 apresenta os tipos de porca citados acima.

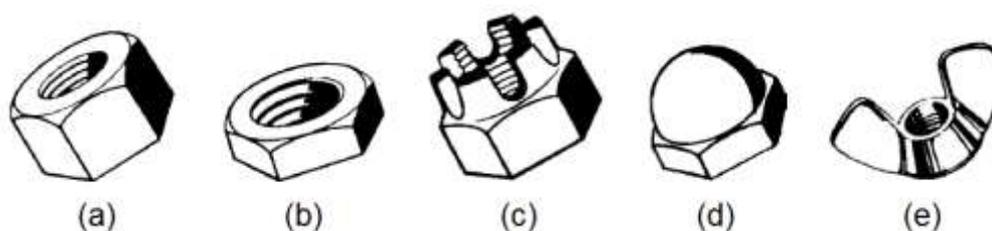


Figura 2.8 - Porcas: hexagonal padronizada ou sextavada (a); hexagonal de pressão (b); hexagonal de castelo (c); de cúpula ou cega (d); de borboleta (e) (Fonte: Norton, 2013).

As porcas são classificadas por graus, sendo alguns deles: 8, 10 e 12. O primeiro grau representa porcas que não foram tratadas termicamente. Os graus 10 e 12 representam porcas que foram tratadas termicamente. A carga de teste das porcas varia com o grau, o diâmetro nominal e o número de filetes engajados, de acordo com a Tabela 2.2 (Garcia, 2007).

Tabela 2.2 - Cargas de teste das porcas (Fonte: Garcia, 2007).

Diâmetro nominal	Carga de teste (N/mm ²)		
	Grau 8	Grau 10	Grau 12
Até M4	800	1040	1140
M4 → M7	855	1040	1140
M7 → M10	870	1040	1140
M10 → M16	880	1050	1140
M16 → M39	920	1060	1200

Outra propriedade mecânica importante é a Dureza Vickers, conforme a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Dureza Vickers das porcas (Fonte: Garcia, 2007).

Grau	8	10	12
Dureza Vickers	180 - 353	272 - 353	295 - 353

2.1.4 A arruela

A arruela simples é uma peça plana de pequena espessura que contém em seu centro um orifício pelo qual passa o parafuso (Pauli *et al.*, 1996). Ela provê um aumento da área de contato entre a cabeça do parafuso ou a porca e área sujeitada (contra peça) (Norton, 2013).

Dentre as funções deste elemento da junta, as principais são (Kulak *et al.*, 2001; Pauli *et al.*, 1996):

- Proteger a superfície das peças enquanto o parafuso ou a porca é torquado;
- Auxiliar na manutenção de uma força de aperto elevada na montagem do parafuso;
- Evitar o afrouxamento da porca;
- Suprimir folgas axiais na montagem das peças;
- Evitar o desgaste da porca ou da cabeça do parafuso.

Quando a força de compressão que a cabeça do parafuso exerce sobre a parte solicitada precisa ser distribuída sobre uma área maior que a área da cabeça, utilizam-se arruelas de aço endurecido, pois uma arruela mais mole irá escoar em vez de distribuir a carga. Quando é necessário isolamento elétrico do parafuso com relação à peça, arruelas de materiais não metálicos são empregadas (Norton, 2013).

Quando o problema é o afrouxamento espontâneo das porcas, arruelas especiais são utilizadas. A arruela de travamento bipartida, ou de pressão, feita de aço endurecido, funciona como uma mola sob a porca. Para ajudar no travamento, seus cantos vivos tendem a cravar na superfície das peças. A arruela dentada, disponível em formatos variáveis é uma ótima escolha contra o afrouxamento. Seus dentes posicionados para cima cravam na superfície das peças durante o aperto (Norton, 2013). Os tipos de arruelas mencionados estão representados na Figura 2.9.

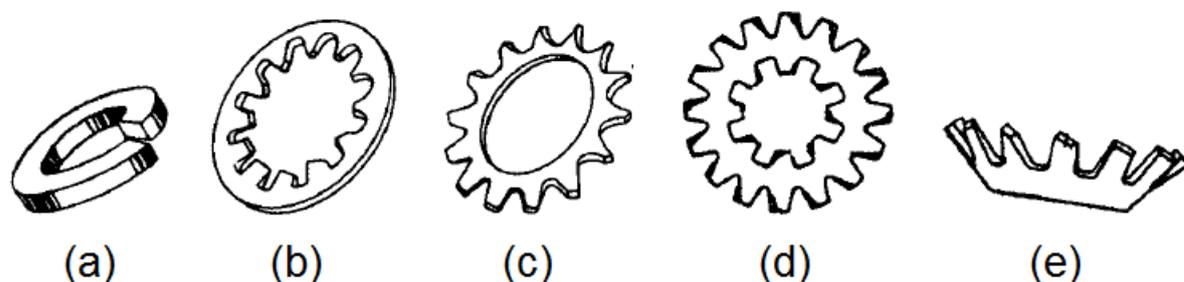


Figura 2.9 - Arruelas: de travamento bipartida ou de pressão (a), de dentes internos (b), de dentes externos (c), de dentes internos e externos ou denteado duplo (d) e de dentes em cone (e) (Fonte: Norton, 2013).

2.2 Propriedades mecânicas

2.2.1 Propriedades mecânicas dos metais

Muitos materiais estão sujeitos a forças ou cargas, quando em serviço. Como exemplo, podem ser citados a liga de alumínio que é utilizada na fabricação da asa de um avião e o aço no eixo de um automóvel. Em tais situações, faz-se necessário compreender as características do material e projetar o elemento estrutural, a partir do qual ele é feito, de forma que qualquer deformação resultante não seja excessiva e não cause fratura. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação em relação a uma carga ou força aplicada (Callister, 2008).

De uma maneira sucinta, as principais propriedades mecânicas são:

- Resistência mecânica = representada por tensões, que são determinadas em condições particulares;
- Elasticidade = propriedade através da qual a deformação desaparece após a tensão ser retirada e o material retorna a sua dimensão original;
- Plasticidade = capacidade que o material tem de deformar-se plasticamente sem se romper;
- Resiliência = capacidade de um material absorver energia no seu regime elástico;
- Tenacidade = representa a energia total absorvida pelo material até a fratura.

Deve-se destacar que cada uma dessas propriedades está relacionada à habilidade do material de resistir a forças mecânicas (Van Vlack, 2014).

As propriedades mecânicas dos metais são verificadas pela realização de experimentos de laboratório cuidadosamente projetados, que reproduzem o mais fielmente as condições de serviço previstas. Esses experimentos são comumente chamados de ensaios mecânicos (Callister, 2008).

Em um ensaio mecânico dois fatores devem ser considerados: a natureza da carga e a velocidade de aplicação. A carga pode ser de tração, compressão, torção,

cisalhamento e flexão. O tempo de aplicação pode ser de apenas uma fração de segundos ou de anos (Callister, 2008; Souza, 2014).

A escolha de um ensaio adequado para cada produto metálico depende do tipo de esforços que esse material vai sofrer, da aplicação e das propriedades a serem medidas (Souza, 2014).

2.2.2 Tensões no parafuso e suas nomenclaturas

2.2.2.1 Tensões trativas

Uma das principais propriedades mecânicas em um parafuso é a resistência que, como mencionado acima, é representada pelas tensões. No caso específico de um parafuso, as tensões axiais durante o aperto são trativas e sua determinação ocorre através de um ensaio de tração. A Figura 2.10 mostra um diagrama tensão-deformação.

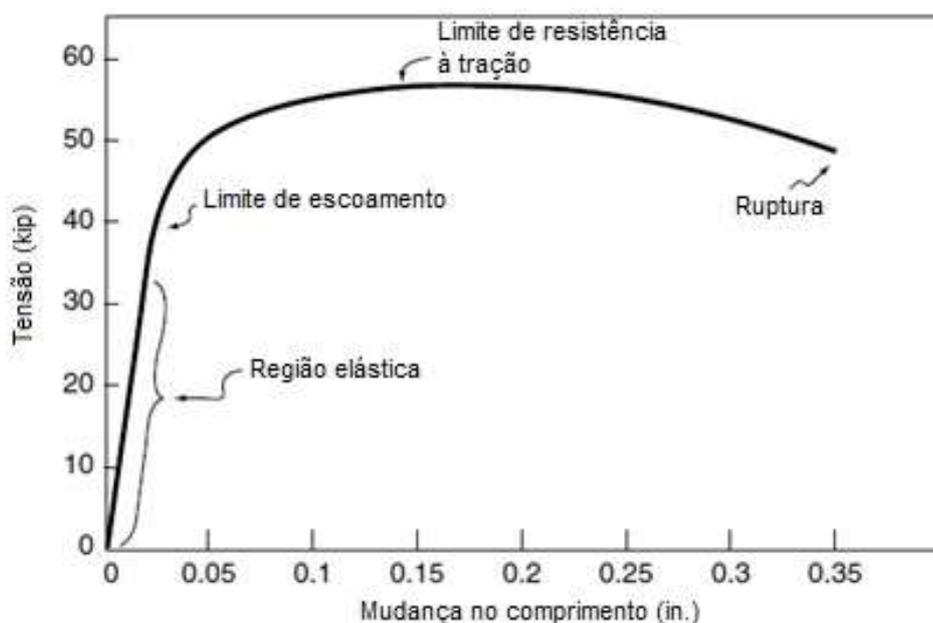


Figura 2.10 - Diagrama tensão-deformação de um parafuso A325 com comprimento inicial de 5 polegadas (Fonte: Adaptado de Bickford, 2008).

As três tensões principais obtidas neste ensaio são (Bickford, 2008):

- Resistência de prova (ou carga de prova) = a tensão máxima que o parafuso pode suportar sem deformação permanente. Encontra-se no final da região elástica;
- Limite de escoamento = a carga máxima que um parafuso pode suportar durante seu uso e provavelmente envolve uma pequena quantidade de deformação plástica;
- Limite de resistência à tração (LRT) = uma tensão a partir da qual o parafuso irá fraturar.

Acreditava-se que, para medir as tensões em um parafuso, deveria ser utilizada a área de seu diâmetro menor (Norton, 2013). No entanto, após testes em parafusos, constataram que se dividissem a carga no escoamento pela área calculada com a média entre o diâmetro menor e o primitivo, o resultado seria uma tensão teórica que estaria de acordo com a tensão de escoamento calculada em ensaios com corpos de prova cilíndricos do mesmo material (Bickford, 2008).

A área sob tração (A_t) é definida como:

$$A_t = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_p + d_r}{2} \right)^2 \quad (2.1a)$$

onde d_p é o diâmetro primitivo e d_r é o diâmetro menor.

Para roscas UNS:

$$d_p = d - 0,649519/N \quad d_r = d - 1,299038/N \quad (2.1b)$$

Para roscas métricas:

$$d_p = d - 0,649519p \quad d_r = d - 1,226869p \quad (2.1c)$$

onde d é o diâmetro externo, N é o número de filetes por polegada e p é o passo em milímetros (Norton, 2013).

2.2.2.2 Tensões de cisalhamento

Quando os filetes de rosca de um parafuso e de uma porca ou furo roscado estão engajados, tensões cisalhantes são geradas devido ao contato e, portanto, ao atrito entre os filetes.

Essas tensões podem causar o cisalhamento de filetes de rosca tanto da porca quanto do parafuso, fato que depende das resistências relativas entre esses dois elementos. Se o parafuso é o elemento menos resistente, pode ter seus filetes cisalhados ao longo de seu diâmetro menor. Se a porca é o mais fraco, o cisalhamento ocorre ao longo de seu diâmetro maior. Se a resistência de ambos é a mesma, o rasgamento dos filetes ocorre ao longo do diâmetro primitivo (Norton, 2013). A resistência ao cisalhamento depende do comprimento engajado e, segundo Bickford (2008), é mais aconselhável que o parafuso falhe, pois é mais fácil de detectar.

2.2.2.3 Tensões torcionais

Outro tipo de tensão gerada pelo atrito na interface parafuso-porca é a tensão torcional. Quando uma porca é girada para alongar um parafuso, uma tensão torcional pode ser desenvolvida no mesmo. Se o grau de lubrificação entre o parafuso e a porca é adequado, uma porção menor do torque aplicado é transmitida ao parafuso e uma porção maior é absorvida entre a porca e a superfície engastada. Se houver ferrugem e, por isso, a porca estiver agarrada ao parafuso, todo torque aplicado irá torcê-lo. Este fato explica porque parafusos enferrujados cisalham quando tentam afrouxar a porca (Norton, 2013).

2.2.3 Propriedades de um parafuso segundo a norma ISO 898-1

A norma ISO 898-1 (2009) trata das propriedades mecânicas de parafusos feitos de aço carbono e aço liga. Inicialmente essa norma correlaciona as propriedades mecânicas e a composição do material com a classe de resistência do parafuso. Logo após, ela trata dos ensaios realizados para mensurar tais propriedades.

A Tabela 2.4 apresenta a composição química requerida por essa norma para parafusos classe 10.9. A norma abrange as classes 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.8, 8.8, 9.8, 10.9, 12.9, porém só serão apresentados dados da classe 10.9, pois o escopo deste trabalho engloba esta classe.

Tabela 2.4 - Composição química de aços para a fabricação de parafusos classe 10.9 (Fonte: Adaptado de ISO 898-1, 2009).

Classe	Material e tratamento térmico	Limites de composição química (%)				Temperatura de revenimento (°C)	
		C		P	S		B
		Mín.	Máx.	Máx.	Máx.		Máx.
10.9	Aço carbono com aditivos (ex. B ou Mn ou Si) temperado e revenido	0,20	0,55	0,025	0,025		
	Aço carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,025	0,025	0,003	
	Aço liga temperado e revenido	0,20	0,55	0,025	0,025	425	

A Tabela 2.5 apresenta algumas propriedades mecânicas para parafusos classe 10.9 especificadas pela norma.

Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas de parafusos classe 10.9 (Fonte: Adaptado de ISO 898-1, 2009).

Propriedade mecânica	Classe 10.9	
Limite de resistência à tração (MPa)	Nom.	1000
	Mín.	1040
Limite de escoamento (MPa)	Nom.	900
	Mín.	940
Carga de prova (MPa)	Nom.	830
	Mín.	32
Dureza Rockwell (HRC)	Mín.	32
	Máx.	39

A norma apresenta diversos testes para determinação das propriedades mecânicas especificadas. Para todos os testes tratados na norma, são apresentados o propósito do teste, a aplicabilidade, o dispositivo de teste, os resultados e a metodologia para tratar esses resultados. Para informações detalhadas sobre os testes, a norma deve ser consultada.

2.3 Materiais para fabricação dos parafusos

Os parafusos podem ser fabricados em uma ampla gama de materiais. A seleção do material mais adequado toma como considerações o peso, o ambiente (corrosivo ou temperaturas extremas), propriedades magnéticas, reusabilidade, tensões, vida útil etc. (Machine design, 2017).

Alguns dos materiais utilizados na fabricação dos parafusos e suas particularidades são citados abaixo (Machine design, 2017):

- Aço = a maioria dos parafusos é feita deste material. As especificações cobrem uma grande quantidade de propriedades mecânicas que são indicadas por um sistema de marcação na cabeça que identifica a classe do parafuso;
- Alumínio = as ligas deste metal são as de menor custo/volume de todos os metais. Parafusos de alumínio são classificados como endurecíveis e não endurecíveis e pesam cerca de um terço em relação aos aços;
- Bronze = esta liga é facilmente usinada na forma e resistência desejadas. Alguns bronzes têm um limite de escoamento maior que o aço carbono doce, acompanhado de uma elevada resistência à corrosão;
- Cobre = este é o mais maleável de todos os metais, possui uma boa resistência à corrosão e alta condutividade. Geralmente é ligado com silício e manganês para obter uma maior resistência;
- Níquel = parafusos podem ser fabricados com níquel comercialmente puro (99.4%), monel ou inconel. São utilizados quando houver necessidade de tenacidade, resistência em altas temperaturas e imunidade à corrosão e descoloração;
- Titânio = parafusos fabricados com este material são utilizados principalmente em aeronaves. O titânio tem uma excelente resistência à corrosão e um bom desempenho em altas temperaturas;
- Berílio = este metal excepcionalmente leve tem seu uso limitado devido à fragilização. Parafusos feitos deste material são utilizados principalmente quando necessita de uma resistência ao cisalhamento de pelo menos 60 ksi (413,7 MPa).

De todos os materiais, o aço é o que oferece alta resistência a baixo custo. Por isso, é o material mais utilizado na fabricação de parafusos para uso estrutural. A indústria automotiva, que usa cerca de 25% de todos os parafusos, usa porcas e parafusos de aço carbono e aço liga na fabricação de automóveis e caminhões (Bickford e Nassar, 1998). A utilização dos variados tipos de aços está diretamente ligada aos processos de tratamento térmico, que são, em parte, dependente da presença de determinados elementos de liga para a obtenção das propriedades mecânicas necessárias ao produto final (Krauss, 1995).

Aços carbono são os mais utilizados na fabricação de parafuso, pois de todos os aços são os de menor custo. Aços carbono laminados a quente com baixo teor de

carbono são utilizados na manufatura de parafusos de máquinas. Eles são a base da escala de resistência (Bickford e Nassar, 1998).

Os aços são classificados de acordo com classes estabelecidas pela AISI e SAE, para parafusos com padrão de rosca UNS. No caso de parafusos métricos, as entidades normatizadoras que os especificam são ISO e SAE. Como já mencionado, as classes são marcadas na cabeça do parafuso. A Tabela 2.6 e a Figura 2.11 mostram alguns exemplos desta classificação (Oberger *et al.*, 2008).

Tabela 2.6 - Identificação e propriedades mecânicas de parafusos (Fonte: Adaptado de Oberger *et al.*, 2008).

Identificador	Grau	Dimensão (pol.)	Resistência mín. (10 ³ psi)			Material e tratamento
			Prova	LRT	Escoamento	
A	SAE Grau 1	1/4 a 1 1/2	33	60	36	1
	ASTM A307	1/4 a 1 1/2	33	60	36	3
	SAE Grau 2	1/4 a 3/4	55	74	57	1
		7/8 a 1 1/2	33	60	36	
B	SAE Grau 4	1/4 a 1 1/2	65	115	100	2, a
	SAE Grau 5	1/4 a 1	85	120	92	2, b
	ASTM A449	1 1/8 a 1 1/2	74	105	81	
C	SAE Grau 5.2	1 3/4 a 3	55	90	58	4, b
		1/4 a 1	85	120	92	
D	ASTM A325, Tipo 1	1/2 a 1	85	120	92	2, b
		1 1/8 a 1 1/2	74	105	81	
E	ASTM A325, Tipo 2	1/2 a 1	85	120	92	4, b
		1 1/8 a 1 1/2	74	105	81	
F	ASTM A325, Tipo 3	1/2 a 1	85	120	92	5, b
		1 1/8 a 1 1/2	74	105	81	
G	ASTM A324, Grau BC	1/4 a 2 1/2	105	125	109	5, b
		2 3/4 a 4	95	115	99	
H	SAE Grau 7	1/4 a 1 1/2	105	133	115	7, b
		1/4 a 1 1/2	120	150	130	
I	SAE Grau 8	1/4 a 1 1/2	120	150	130	6, b
		ASTM A354, Grau BD	1/4 a 1 1/2	120	150	
J	SAE Grau 8.2	1/4 a 1	120	150	130	4, b
K	ASTM A490, Tipo 1	1/2 a 1 1/2	120	150	130	6, b
L	ASTM A490, Tipo 3	1/2 a 1 1/2	120	150	130	5, b

Material: 1 - Baixo ou médio carbono; 2 - Médio carbono; 3 - Baixo carbono; 4 - Baixo carbono martensítico; 5 - Aço patinável* ou aclimável; 6 - Aço ligado; 7 - Liga de médio carbono. **Tratamento:** a - Estirado a frio; b - Temperado e revenido.

* Aços patináveis ou aclimáveis são aços que, quando submetidos a determinadas condições, se recobrem de ferrugem protetora, não necessitando da aplicação de tintas ou revestimentos. Eles não têm uma resistência à corrosão como a dos aços inoxidáveis ou dos aços de alta liga, no entanto, apresentam uma resistência à corrosão maior que a dos aços carbono (Gentil, 2011).

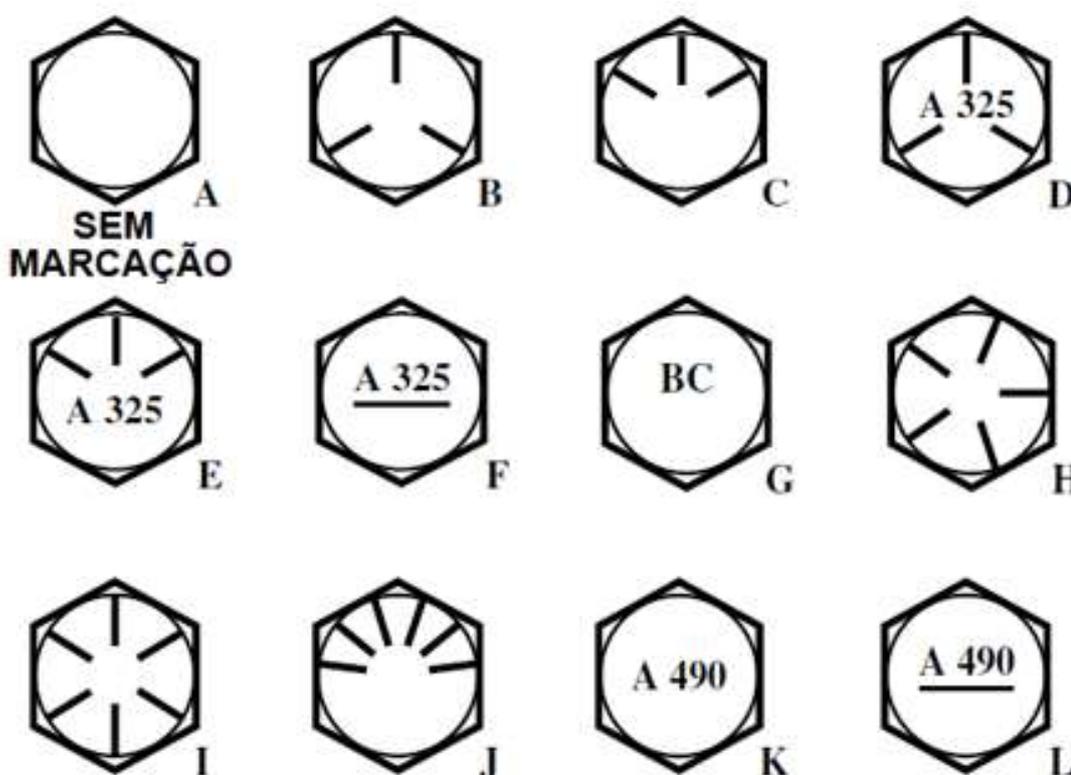


Figura 2.11 - Marcação da classe de resistência na cabeça do parafuso (Fonte: Adaptado de Oberg *et al.*, 2008).

Não é recomendado que parafusos sejam fabricados com um teor de carbono maior que 0,45%, pois acarretaria uma perda de ductilidade e suscetibilidade à fragilização por hidrogênio e à corrosão sob tensão fraturante. Algumas classes foram criadas com teor maior que 0,45%, mas requerem técnicas de fabricação especiais (Bickford e Nassar, 1998).

Para as classes que especificam um tratamento de têmpera, o parafuso deve ser totalmente endurecido. Isto provê propriedades uniformes ao longo da seção transversal. A resistência da seção transversal não é apenas importante nos casos em que o parafuso está sob tração. Uma grande quantidade de parafusos sofre cisalhamento e a resistência ao cisalhamento precisa ter uma relação consistente com a resistência à tração. Isto não é possível com uma seção transversal parcialmente endurecida (Bickford e Nassar, 1998).

Por causa da temperabilidade limitada, os aços carbono têm seu diâmetro limitado à medida que a resistência aumenta. Quando o diâmetro se torna muito grande, para que o aço carbono seja totalmente endurecido durante um tratamento térmico, deve ser escolhido um aço ligado. A escolha de qual aço ligado deve ser feita na habilidade de prover um maior endurecimento, porém também deve ser levado em conta o alto custo (Bickford e Nassar, 1998).

Na fabricação de parafusos de alta resistência, os aços ao boro são largamente utilizados, principalmente para a indústria automotiva. Quando comparado com os aços sem boro e de igual temperabilidade, estes aços apresentam uma conformabilidade superior; igual, ou melhor, usinabilidade e menor tendência à formação de trincas de têmpera (Suski, 2007).

O boro quando adicionado em pequenos teores (3 a 5 ppm) em aços com 0,2 a 0,4% C permite obter uma temperabilidade média, que fornece valores adequados de dureza e resistência após a têmpera, principalmente em parafusos de pequena seção. Este elemento forma com os aços uma solução sólida intersticial e possui baixa solubilidade na ferrita (<0,003%). Apesar dos teores de boro nos aços variar de 5 a 30 ppm, uma variação de apenas 3 a 5 ppm provê um aumento substancial da temperabilidade quando submetidos à têmpera convencional (Suski, 2007).

Mesmo com o aumento da temperabilidade devido à presença de boro, o excesso deste elemento forma borocarbonetos, eliminando seu efeito sobre a temperabilidade. Há uma divergência entre os teores ótimos de boro, principalmente devido à formação de carbonetos e nitretos, diminuindo a quantidade de boro em solução sólida. Uma prática comum para evitar este problema é adicionar elementos que são fortes formadores de nitretos, como titânio e zircônio (Suski, 2007).

Após a fabricação dos parafusos, revestimentos podem ser aplicados a fim de melhorar as propriedades. Estes revestimentos podem fornecer resistência à corrosão aos parafusos e reduzir o torque necessário durante a instalação, além de outras vantagens. Alguns exemplos de revestimentos são:

- Misturas de revestimentos/lubrificantes de fluoropolímero = diminui a fricção durante a instalação;
- Bissulfeto de molibdênio = tem a mesma função que o anterior, porém é mais adequado para aplicações onde há carregamento a altas pressões;
- Epóxi = adequado para prover uma maior resistência ao impacto além de servir como proteção para corrosão e abrasão;
- Inorgânico a base de zinco = provê uma excelente resistência à corrosão para parafusos de aço e são ideais para aplicações ao ar livre;
- Fenólicos = provê a melhor proteção em ambientes com baixo pH e altas temperaturas;
- Fosfato a base de metais ferrosos = provê proteção anti-desgaste e uma menor resistência à corrosão (Herring, 2016).

Como parafusos de aço ou alumínio geralmente são tratados termicamente, o revestimento é realizado após o tratamento. Os revestimentos podem ser à base de água ou de solvente, dependendo da formulação. A fim de proporcionar um acabamento consistente e manter as taxas de produção desejadas, os parafusos revestidos são geralmente curados em um forno de carga ou forno com esteira transportadora a temperaturas de 95-205 °C durante um período de 15-45 minutos. O tempo e a temperatura são dependentes do revestimento e, portanto, especificado pelo fabricante do revestimento (Herring, 2016).

2.4 Métodos de aplicação e controle da pré-carga

A quantidade de pré-carga certamente é um fator importante no projeto de um parafuso e na vida em serviço de uma junta aparafusada. Desta maneira, é necessário algum meio de controlar a pré-carga. A maioria dos métodos de controle é indireta,

pois é usualmente difícil ou não é prático medir a tensão em cada parafuso durante a montagem (Oberger *et al.*, 2008; Norton, 2013).

Um dos maiores problemas com a utilização de uniões aparafusadas é a precisão, no que diz respeito a conseguir uma pré-carga exata com o método de aperto escolhido. Uma pré-carga insuficiente causada por um método de aperto inadequado é uma causa frequente da falha em parafusos (Pizzio, 2005). Dependendo do método de aperto escolhido, a precisão pode variar de 25% ou até mais (Oberger *et al.*, 2008). A Tabela 2.7 mostra alguns exemplos.

Tabela 2.7 - Precisão dos métodos de aplicação de pré-carga nos parafusos (Fonte: Adaptado de Oberger *et al.*, 2008).

Método	Precisão
Pelo tato	±35%
Chave de torque	±25%
Giro de porca	±15%
Arruela indicadora de pré-carga	±10%
Strain gages	±1%
Chave controlada por computador - abaixo do escoamento (Giro de porca)	±15%
Chave controlada por computador - sensor de ponto de escoamento	±8%
Alongamento do parafuso	±3-5%
Sensor ultrassônico	±1%

2.4.1 Controle de torque de aperto

Este método também é conhecido como método de aperto por torque, torque simples ou torque “seco”. Como o torque está diretamente relacionado com a força de aperto, para obtenção da força desejada, determina-se um torque alvo (Garcia, 2007).

O problema inicial deste método é que a força de tração do parafuso (ou pré-carga), gerada como resultado de um torque aplicado, é dependente do projeto do parafuso e das condições de atrito (Pizzio, 2005). Testes de laboratório mostraram que, considerando que uma relação satisfatória de torque e tensão pode ser estabelecida para um dado conjunto de condições, uma mudança de algumas das variáveis, tal como material do parafuso, acabamento superficial e a presença ou ausência de lubrificante, pode alterar severamente a relação. Isto ocorre pelo fato de que muito do torque aplicado é absorvido na fricção intermediária, então, uma mudança na rugosidade superficial da superfície de rolamento ou uma mudança na lubrificação afetará drasticamente a fricção e a relação torque e tensão (Oberg *et al.*, 2008).

O torque necessário (torque alvo) para uma determinada pré-carga pode ser definido através de tabelas ou calculado diretamente usando a relação entre torque e a tensão resultante do parafuso. O grande problema das tabelas é que a maioria delas ignora a tensão de torção nos parafusos (Garcia, 2007).

2.4.2 Controle do ângulo de aperto

Este método, também conhecido como método do giro de porca ou método de aperto de porca, foi introduzido logo após a Segunda Guerra Mundial quando um determinado ângulo de aperto foi especificado (Pizzio, 2005).

Como o avanço do parafuso é conhecido, girar a porca certo número de vezes irá tensionar o parafuso de uma quantidade conhecida, desde que o ponto de início seja tal que toda a volta da porca contribua para o alongamento do parafuso. Primeiramente, a porca é girada até esse ponto inicial, denominado ajuste-apertado, definido como o aperto obtido a partir de uns quantos golpes de uma chave de impacto, ou, se feito manualmente, tão apertado quanto uma pessoa possa apertar uma porca com uma chave-padrão. A porca é então girada (com uma chave mais comprida) um número adicional de voltas, ou frações, calculadas de modo a estender o parafuso até a quantidade desejada (Norton, 2013).

A principal desvantagem deste método é que o ângulo deve ser precisamente determinado e, se possível, de maneira experimental. Também, o fixador pode apenas sustentar um número limitado das reaplicações antes que falhe (Pizzio, 2005).

2.4.3 Controle de aperto ao escoamento

Este método é também denominado “método do controle da união”. Pré-cargas muito exatas podem ser conseguidas por este método, minimizando a influência da fricção e da flutuação. O método tem raízes em um especialista, o qual lhe permitia que detectasse o ponto de escoamento do parafuso através do sentido (tato) com precisão razoável (Pizzio, 2005).

Como equivalente eletrônico deste método, um sistema de controle que seja sensível ao gradiente de torque do parafuso que está sendo apertado é usado. Este gradiente é detectado pela variação da inclinação da curva Torque versus Ângulo. A detecção rápida da mudança na inclinação deste gradiente indica que o ponto de escoamento está sendo alcançado e para-se o processo de aperto. Desde que o ângulo de rotação e do torque seja medido pelo sistema de controle, valores permissíveis podem ser usados para detectar os parafusos que se encontram fora de sua especificação (Garcia, 2007; Pizzio, 2005).

2.4.4 Método do estiramento do parafuso

Um problema relacionado ao aperto de grandes parafusos é que torques muito elevados são requeridos. Apesar disto ser em parte superado pelo uso de chaves de torque hidráulicas (a reação do torque, entretanto, pode ser um problema), o uso de dispositivos tensionadores hidráulicos (Figura 2.12) é comum para os parafusos acima de 20 mm de diâmetro. O método utiliza um pequeno pistão hidráulico o qual é ajustado sobre a porca. A parcela roscada do parafuso projeta-se bem após a porca e um inserto roscado é acoplado. O óleo hidráulico de uma bomba pequena empurra o pistão hidráulico e, portanto, o inserto roscado. Isto é transmitido ao parafuso tendo

por resultado a extensão. A porca pode então ser girada pela mão com a ajuda de um soquete integral auxiliado por uma barra (Pizzio, 2005).

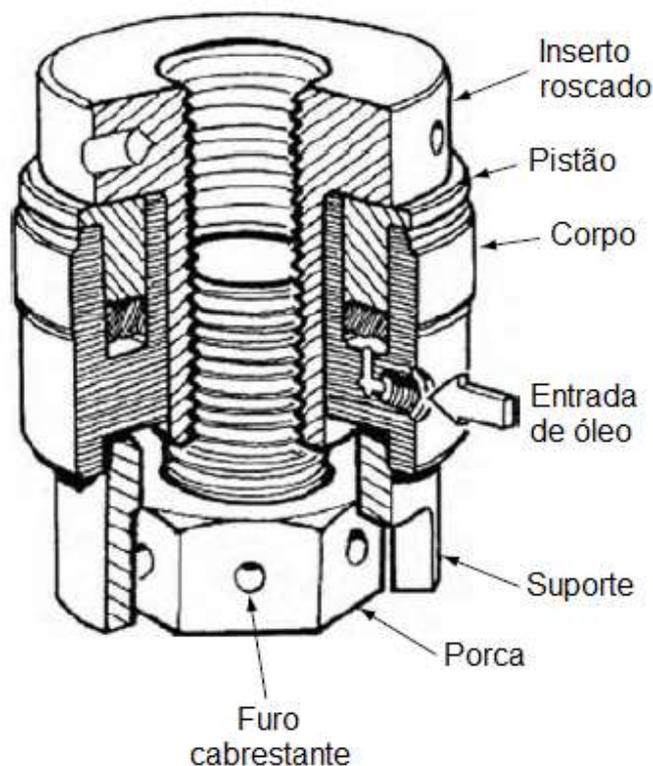


Figura 2.12 - Vista em corte de um tensionador hidráulico (Fonte: Adaptado de Bickford, 2008).

2.5 Tribologia

Segundo Hutchings (1992), tribologia pode ser definida como “a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo”, englobando estudos sobre fricção, desgaste e lubrificação. A palavra tribologia vem do grego “τριβοζ” que significa esfregar ou atritar. Ela foi utilizada pela primeira vez pelo comitê governamental Inglês atualmente conhecido como “Jost Report” (Anônimo, 2018).

Durante a interação entre duas superfícies, ocorre a transmissão de força, conversão de energia e alteração das propriedades mecânicas e químicas dos materiais, incluindo a topografia das superfícies (Bhushan, 1999).

Em muitos casos, uma baixa fricção é desejada, como em dobradiças de portas ou em articulações do quadril. O trabalho realizado na superação do atrito em rolamentos ou outros componentes mecânicos de máquinas é dissipado em calor e sua redução levará geralmente a um aumento na eficiência. Contudo, uma baixa fricção não é benéfica em todas as aplicações. Em freios e embreagens, a fricção é fundamental. De uma maneira semelhante, uma alta fricção é desejável entre o pneu de um automóvel e a superfície do asfalto, assim como entre a sola de um sapato e o chão (Hutchings, 1992).

Quando aplicamos o conceito de tribologia no estudo das juntas aparafusadas, algumas considerações devem ser tomadas:

- Não existe um desgaste abrasivo constante das superfícies, já que o movimento entre elas não é constante e, na maior parte do tempo, as superfícies ficarão em repouso relativo;
- No rosqueamento, o movimento relativo entre as superfícies é apenas inicial e a deformação devido ao contato se dá por pressão e não por desgaste, como acontece na maior parte dos casos estudados pelos diversos autores que escrevem sobre tribologia;
- O desgaste sempre ocorre quando a lubrificação ou proteção superficial for deficiente. Surgem, então, os fenômenos conhecidos por “*galling*”, “*scuffing*” ou “*scoring*”. Na verdade, estes são fenômenos de soldagem a frio causada pela alta pressão resultante do rosqueamento, caso as superfícies em contato não sejam suficientemente separadas por algum elemento lubrificante ou pelos elementos presentes no tratamento superficial dos componentes das juntas roscadas (Hutchings, 1992).

2.5.1 Rugosidade

Todos os processos de fabricação induzem erros que são interpretados como desvios dimensionais e na geometria das peças. Portanto, nenhuma peça fabricada apresenta uma superfície perfeitamente lisa. Mesmo que tenha uma aparência lisa,

ao serem observadas no microscópio as superfícies apresentam regiões com diferentes planicidades (DIN 4760, 1982 apud Stoeterau, 2004).

As imperfeições de menor escala na superfície são denominadas rugosidade e os desvios mais grosseiros são denominados desvios de forma, ou seja, são medidas do afastamento da peça de sua superfície ideal (plana, cilíndrica ou esférica). Também existe o desvio periódico da superfície chamado ondulações e que, em escala, situa-se entre a rugosidade e o desvio de forma (Hutchings, 1992). Todas essas imperfeições estão representadas na Figura 2.13.

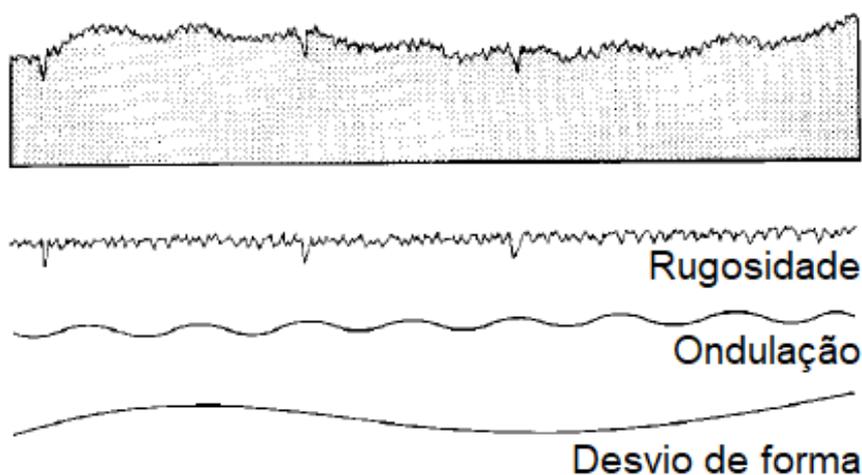


Figura 2.13 - Tipos de imperfeições superficiais (Adaptado de Ettl *et al.*, 1998).

O perfil de uma superfície pode ser determinado por vários métodos. Um método muito comum é aquele através do qual um apalpador é arrastado suavemente sobre a superfície. Durante este movimento, o apalpador é deslocado para cima e para baixo e estes deslocamentos são armazenados através de um transdutor. Os resultados podem ser ampliados para facilitar a interpretação. Existem também métodos ópticos em que não há o contato com a superfície a ser examinada (Hutchings, 1992).

Em ambos os métodos de examinação da superfície, as ondulações e os desvios de forma podem ser retirados do resultado a fim de se examinar apenas a rugosidade. Para o método do apalpador, pode-se utilizar uma estrutura acoplada ao apalpador que se desloca no sentido da superfície. O deslocamento do apalpador é

relativo ao deslocamento da estrutura acoplada ao mesmo. Desta maneira, é recordada apenas a rugosidade. Já para métodos ópticos, podem ser utilizados filtros que eliminem a leitura das irregularidades superficiais em escalas maiores que a rugosidade (Hutchings, 1992).

Segundo a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), existem 14 parâmetros utilizados para quantificar a rugosidade e estes são divididos nos seguintes grupos: parâmetros de amplitude (pico e vale), parâmetros da amplitude (média das ordenadas), parâmetros de espaçamento, parâmetros híbridos e curvas e parâmetros relacionados. De acordo com Gadelmawla *et al.* (2002), o parâmetro universalmente utilizado no controle de qualidade é a rugosidade média, pois é fácil de definir, fácil de medir e fornece uma boa descrição geral das variações de altura. Este parâmetro se enquadra no grupo parâmetro de amplitude (média das ordenadas) e pode ser definido da seguinte maneira:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (2.2)$$

onde l é o comprimento de avaliação (ou comprimento ao longo do perfil) e $z(x)$ é a altura do perfil avaliado em qualquer posição x ao longo de l (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

A rugosidade é de grande importância para entender o atrito entre duas superfícies. Como o atrito entre os filetes e sob a cabeça do parafuso (ou a porca) e a superfície de aperto são primordiais para obter-se um aperto eficiente, destaca-se ainda mais a importância da rugosidade.

2.5.2 O atrito

O atrito pode ser definido como uma força de resistência que atua em um corpo, cessando ou retardando seu movimento em relação a outro corpo ou a uma superfície com a qual ele está em contato. Essa força sempre atua tangencialmente à superfície

de contato, tendo seu sentido oposto a um possível ou existente movimento de um corpo em relação aos pontos de contato com outros corpos (Hibbeler, 2005).

Um experimento simples pode ser realizado para demonstrar a definição de atrito. Se colocarmos um corpo sólido sobre uma superfície e a esse, fixarmos de forma rígida uma escala de mola e imprimirmos uma força F , pode-se obter um registro da variação da força com o movimento, conforme a Figura 2.14.

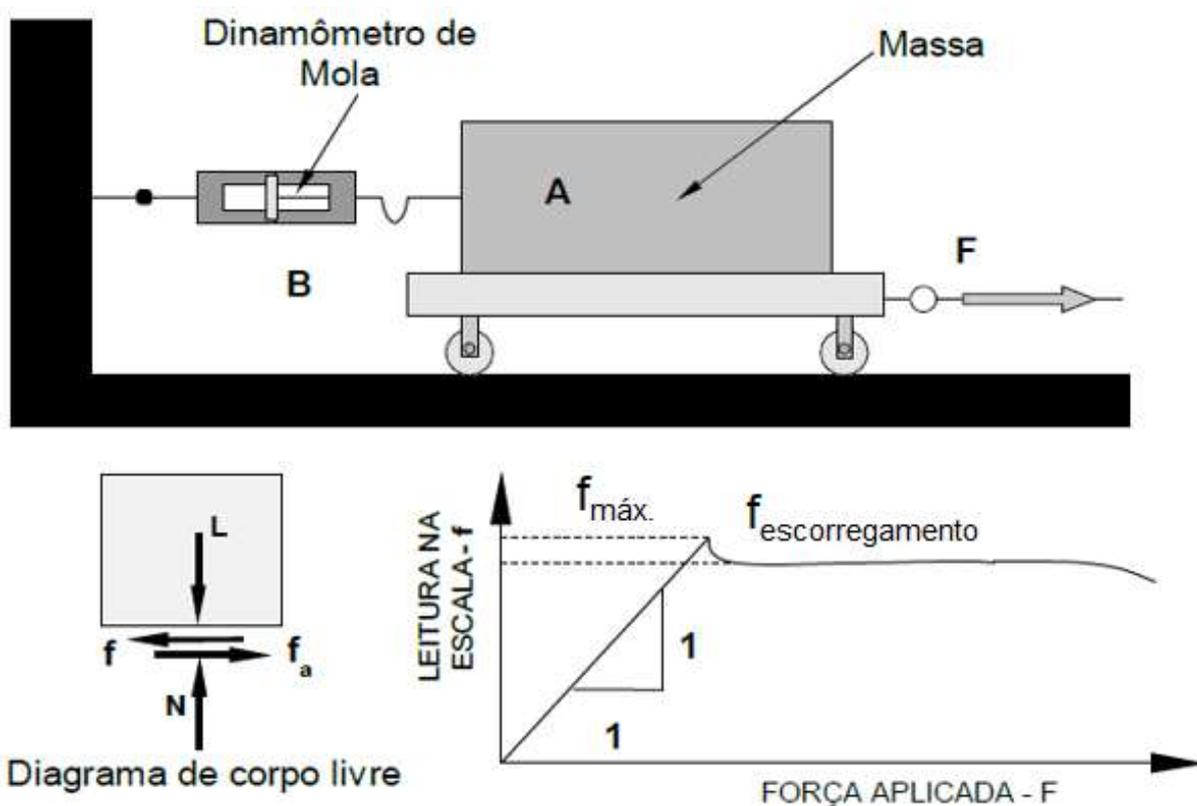


Figura 2.14 - Experimento para determinação da força de atrito (Fonte: Adaptado de Levinson, 1968 apud Stoeterau, 2004).

Ao aplicarmos uma força F no corpo B, e realizarmos leituras da força f no dinamômetro de mola, observamos que f aumenta proporcionalmente com o aumento de F , até o momento em que ocorre o escorregamento. Uma vez que o escorregamento entre os blocos se inicia, o valor de f sofre uma pequena queda, permanecendo constante e independente da força F , que atua sobre o corpo B (Levinson, 1968 apud Stoeterau, 2004).

Observando a relação entre as forças f e F , conforme o gráfico da Figura 2.14, pode-se extrair que a relação entre a máxima força de atrito que age na interface das duas superfícies e a força normal é denominada de coeficiente de atrito estático (Levinson,1968 apud Stoeterau, 2004).

$$\mu_e = \frac{f_{m\acute{a}x}}{N} \quad (2.3)$$

O valor de $f_{m\acute{a}x}$ significa a força necessária para evitar o movimento relativo entre dois corpos (Blau, 2001).

Já o coeficiente de atrito dinâmico é definido como a relação entre a força de atrito durante o escorregamento e a força aplicada (Levinson,1968 apud Stoeterau, 2004).

$$\mu_d = \frac{f_{esc}}{N} \quad (2.4)$$

O valor de f_{esc} representa a força necessária para manter dois corpos em movimento relativo. Essas relações são conhecidas há muitos anos e permanecem aceitáveis para muitos propósitos. Como exemplo, esses coeficientes são amplamente utilizados como um parâmetro quantitativo relacionado ao atrito no projeto de máquinas e estruturas (Blau, 2001; Levinson,1968 apud Stoeterau, 2004).

Alguns dos tipos de atrito são: seco, lubrificado, deslizante, rolante, dinâmico ou cinético, estático ou inicial ou limite, externo e viscoso. Cada tipo de atrito depende das condições em que as superfícies estão, como: presença de um fluido entre as superfícies, presença de movimento relativo, tipo de movimento relativo (Booser, 1983).

Esta quantidade adimensional chamada de coeficiente de atrito evoluiu dos trabalhos de muitos filósofos, cientistas e engenheiros, como: da Vinci, Amontons e Coulomb. Por exemplo, Amontons é reconhecido pelas suas duas leis sobre atrito:

- A força de atrito é diretamente proporcional ao carregamento aplicado;
- A força de atrito é independente da área aparente de contato (Blau, 2001).

Como a diversidade de materiais cresceu e a faixa de velocidades e forças normais utilizada nos experimentos sobre atrito aumentou, as leis introduzidas por Amontons, Kotel'nikov e Coulomb se tornaram inadequadas em muitas ocasiões. Mais tarde, os coeficientes μ_e e μ_d foram reconhecidos como sendo dependentes tanto do material quanto do sistema. As implicações dessa descoberta foram decepcionantes para aqueles que acreditavam que o atrito era uma propriedade intrínseca dos dois materiais em contato. A abordagem sistêmica tornou-se uma ferramenta de interpretação e uso dos dados sobre atrito na modelagem de atrito, no desenvolvimento de materiais antifricção, no desenvolvimento de metodologia de ensaios e no projeto de máquinas (Blau, 2001).

No caso específico dos parafusos, o coeficiente de atrito mais relevante é o dinâmico, pois é ele que aparece nos cálculos de confiabilidade das juntas aparafusadas. No entanto, o travamento final das juntas é feito pelo atrito estático. Ele é o responsável pelo torque final de desaperto da junta (Muniz, 2007).

Como mencionado, a mudança das condições de um sistema pode influenciar significativamente o coeficiente de atrito. Morgan e Henshall (1996) estudaram o comportamento do torque versus pré-carga de parafusos M22 x 1,5 mm empregados na fixação de rodas de veículos comerciais pesados. Este trabalho teve como objetivo a avaliação do efeito do atrito na pré-carga. Nos experimentos conduzidos, foram utilizados parafusos nas condições: “como recebido”, desengraxado e re-lubrificado, com torques aplicados na faixa de 400 a 800 Nm \pm 10 Nm. Os resultados mostram uma redução de 60 a 70% na tensão axial para os parafusos desengraxados, em relação ao desempenho dos parafusos “como recebidos”. No caso dos parafusos “como recebidos”, o coeficiente de atrito apresentou uma variação de 0,12 a 0,17 e os parafusos desengraxados apresentaram uma variação de 0,24 a 0,71.

Estudos realizados por Sakai (1978) e Jiang *et al.* (2002) constataram que o coeficiente de atrito varia substancialmente para baixas velocidades de rotação, diminuindo esta variação à medida que a velocidade aumenta.

2.5.3 Atritos e forças que atuam nos parafusos

A movimentação da porca ao longo da rosca pode ser considerada como um corpo num plano inclinado sujeito a ação de forças horizontais aplicadas no raio médio da rosca. O desenvolvimento de um parafuso roscado é análogo ao de um plano inclinado no qual a altura é igual ao passo p e a base igual à circunferência média $\pi \cdot d_2$, onde d_2 é o diâmetro primitivo de base da rosca. A força F é a força no parafuso (Eccles, 2010). Na Figura 2.15 estão representadas as forças que atuam no plano inclinado da rosca.

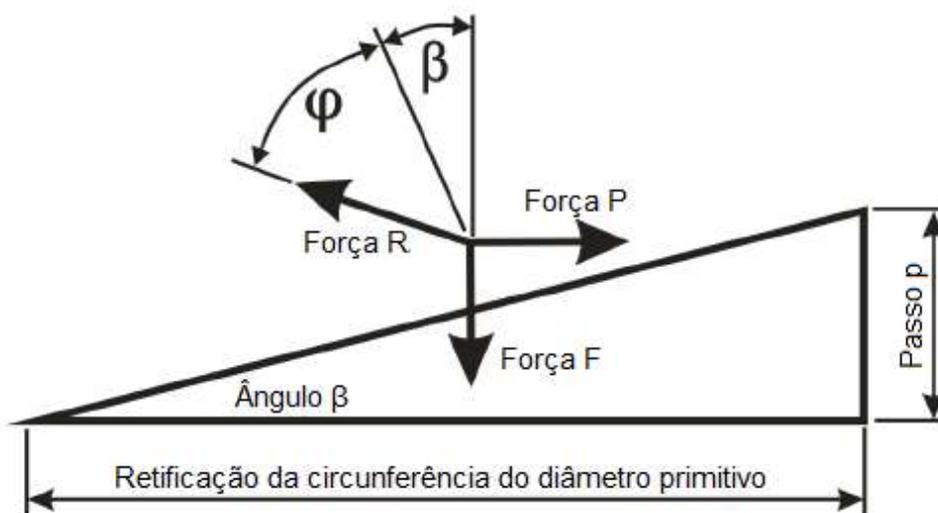


Figura 2.15 - Forças atuando no plano inclinado da rosca (Fonte: Adaptado de Eccles, 2010).

Ao observar a Figura 2.15, quando a força “P” está na horizontal, a força de reação “R” deve estar em um ângulo φ da normal.

$$\tan\varphi = \frac{\text{Força } P}{\text{Força } F} = \mu_t \quad (2.5)$$

onde μ_t é o coeficiente de atrito nas roscas.

O diagrama de força para o plano inclinado permite que uma relação entre a força P e F possa ser formulada:

$$P = Ftan(\beta + \varphi) \quad (2.6)$$

Como o torque atuando nas roscas é $T_{tm}=P.d_2/2$, seu valor pode ser substituído em P .

$$P = \frac{2T_{tm}}{d_2} = Ftan(\beta + \varphi) \quad (2.7)$$

Então:

$$T_{tm} = (Fd_2/2)tan(\beta + \varphi) \quad (2.8)$$

A Figura 2.16 mostra a seção de um filete de rosca com as forças que atuam nele. O ângulo formado pelas laterais do filete é denominado 2α . A fim de explicar a inclinação da força normal no plano, segue:

$$N\cos\alpha = F \quad \text{ou} \quad N = \frac{F}{\cos\alpha} \quad (2.9)$$

A força de atrito é:

$$\mu_t N = \frac{\mu_t F}{\cos\alpha} = \mu' F \quad (2.10)$$

Onde:

$$\mu' = \frac{\mu_t}{\cos\alpha} \quad (2.11)$$

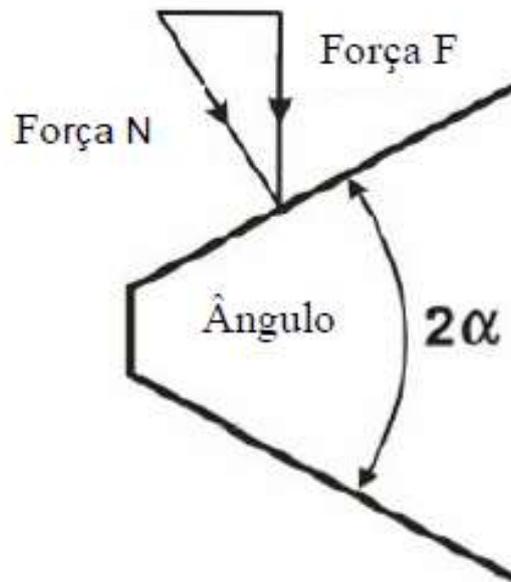


Figura 2.16 - Forças atuando no filete de rosca (Adaptado de Eccles, 2010).

Da Equação 2.8, expandindo o termo da tangente, resulta em:

$$T_{tm} = F \frac{d_2}{2} \left(\frac{\tan\beta + \tan\varphi}{1 - \tan\beta \tan\varphi} \right) \quad (2.12)$$

Da Figura 2.15:

$$\tan\beta = \frac{p}{\pi d_2} \quad (2.13)$$

Das Equações 2.5 e 2.11:

$$\tan\varphi = \mu' = \frac{\mu_t}{\cos(\alpha/2)} \quad (2.14)$$

Substituindo este valor na Equação 2.12:

$$T_{tm} = F \frac{d_2}{2} \left(\frac{\frac{p}{\pi d_2} + \frac{\mu_t}{\cos\alpha}}{1 - \frac{P}{\pi d_2} \frac{\mu_t}{\cos\alpha}} \right) \quad (2.15)$$

Como o produto no denominador resulta em um valor muito pequeno, uma aproximação pode ser feita:

$$T_{tm} = F \frac{d_2}{2} \left(\frac{p}{\pi d_2} + \frac{\mu_t}{\cos\alpha} \right) \quad (2.16)$$

O torque de atrito que é desenvolvido pela porca ou pela cabeça do parafuso (dependendo do que está sendo girado) durante o aperto é:

$$T_{nut} = F \mu_n \frac{D_e}{2} \quad (2.17)$$

onde:

μ_n = coeficiente de atrito sob a porca;

D_e = diâmetro da circunferência onde o atrito está atuando.

Combinado o torque nas roscas e sob a porca, obtemos:

$$T = F \left(\frac{p}{2\pi} + \frac{d_2}{2} \frac{\mu_t}{\cos\alpha} + \mu_n \frac{D_e}{2} \right) \quad (2.18)$$

O ângulo de rosca tanto no padrão métrico quanto no unificado é 60° , portanto a Equação 2.18 pode ser simplificada para:

$$T = F \left(0,159p + 0,578\mu_t d_2 + \frac{D_e}{2} \mu_n \right) \quad (2.19)$$

O valor de D_e pode ser tomado como:

$$D_e = \frac{d_o + d_i}{2} \quad (2.20)$$

Os testes conduzidos consistiram no aperto da porca no dispositivo de teste enquanto media-se o torque aplicado T , o torque de reação nas roscas T_{tm} e a força de aperto F , gerada pelo processo de aperto. A Equação 2.19 pode ser reformulada como:

$$T = F(0,159p + 0,578\mu_t d_2) + F \left(\frac{D_e}{2} \mu_n \right) \quad (2.21)$$

Esta última equação pode ser representada como:

$$T = T_{tm} + (T - T_{tm}) \quad (2.22)$$

A partir deste ponto, é fácil mostrar que os coeficientes de atrito da rosca μ_t e da face da porca μ_n são:

$$\mu_t = \frac{\frac{T_{tm}}{F} - 0,159p}{0,578d_2} \quad (2.23)$$

$$\mu_n = \frac{2(T - T_{tm})}{D_e F} \quad (2.24)$$

onde:

- T = torque aplicado (ou de entrada);
- F = pré-carga;
- d_2 = diâmetro do passo da rosca;
- p = passo da rosca;
- D_e = diâmetro do carregamento efetivo da porca;
- d_o = diâmetro externo de carregamento da porca;
- d_i = diâmetro interno de carregamento da porca.

A norma ISO 16047 (2005) apresenta um coeficiente de atrito total que é determinado pela suposição de que os coeficientes de atrito na face da porca e nas roscas são equivalentes. No entanto, esse coeficiente serve apenas para comparação de diferentes condições de atrito de juntas aparafusadas. Segue abaixo a equação do atrito total:

$$\mu_{tot} = \frac{\frac{T}{F} - \frac{P}{2\pi}}{0,577d_2 + 0,5D_b} \quad (2.25)$$

A partir da Equação 2.18, constata-se que o torque aplicado é resistido por três torques de reação ou três componentes do lado direito da equação. A primeira componente é o torque produzido pela ação do plano inclinado da rosca da porca na rosca do parafuso, sendo este torque denominado a componente de alongamento do parafuso. Ele é responsável por produzir a força que comprime a junta e a porca e também é uma parte do torque que gira o parafuso (Bickford, 2008).

$$T_{tm1} = F \frac{P}{2\pi} \quad (2.26)$$

A segunda componente é o torque de reação que representa a restrição causada pelo atrito entre as roscas da porca e do parafuso. Esta é a parte restante do torque necessário para girar o parafuso (Bickford, 2008).

$$T_{tm2} = \frac{d_2}{2} \frac{\mu_t}{\cos \alpha} \quad (2.27)$$

A terceira componente é o torque de reação criado pela restrição causada pelo atrito entre a face da porca e a face da junta ou da arruela (Bickford, 2008).

$$T_n = F \frac{D_e}{2} \mu_n \quad (2.28)$$

Se a magnitude de cada componente do torque de reação for computada, chega-se a uma relação como a representada na Figura 2.17 (Bickford, 2008).

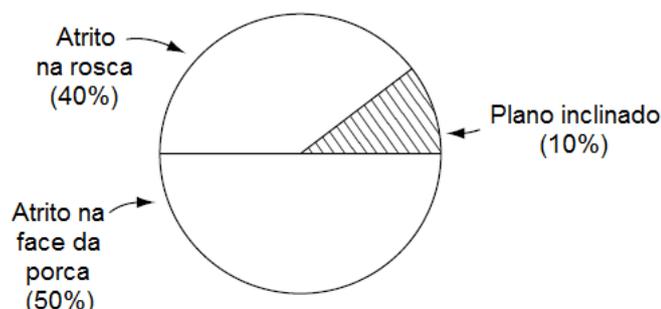


Figura 2.17 - Quantidade relativa das três componentes do torque de reação (Adaptado de Bickford, 2008).

Analisando a Figura 2.17, chega-se à conclusão de que 90% do trabalho introduzido pelo torque aplicado é convertido em calor por causa do atrito, sendo que 40% devido ao atrito da rosca e 50% devido ao atrito na face da porca. Apenas 10% do trabalho de entrada são convertidos em energia potencial no parafuso, terminando em pré-carga e, portanto, em força de aperto (Bickford, 2008).

A Equação 2.18 é conhecida como equação de forma longa do torque versus a pré-carga. Existe outra equação que é muito mais utilizada que esta, chamada de equação de forma curta:

$$T = FKD \quad (2.29)$$

onde:

D = diâmetro nominal;

K = coeficiente de torque.

Note que K não é um coeficiente de atrito. Ao invés disso, ele é uma constante adimensional determinada experimentalmente (Bickford, 2008).

A vantagem de utilizar esta equação é que K resume tudo que afeta a relação entre o torque e a pré-carga durante o experimento, incluindo fricção, torção, dobramento, deformação plástica das roscas e outros fatores que não foram previstos antecipadamente. Um ponto negativo ao utilizar K é que este coeficiente apenas pode ser determinado experimentalmente e a experiência adquirida mostra que essa constante deve ser determinada a cada nova aplicação (Bickford, 2008).

A experiência também mostra que, para uma predição acurada, deve ser realizada uma quantidade de experimentos para determinar o valor médio de K e o desvio padrão. Sendo assim, pode-se determinar a pré-carga mínima e máxima que pode ser obtida para um determinado torque de entrada. Isto não pode ser realizado utilizando a equação de forma longa (Bickford, 2008).

2.6 Técnicas para realização do ensaio de torque

O ensaio de torque consiste em aplicar um torque à porca ou cabeça do parafuso e monitorar a força de aperto. Este ensaio pode ser realizado em campo ou em laboratório.

O ensaio em campo é realizado durante a montagem de uma junta aparafusada. Para aplicar o torque é utilizada uma ferramenta adequada, como uma torquedeira manual ou hidráulica, uma apertadeira ou uma parafusadeira. A escolha da ferramenta depende de fatores como: quantidade de torque, durabilidade, manutenção, se o torque é aplicado intermitentemente ou continuamente etc. Sob a porca ou a cabeça do parafuso é colocada uma arruela de carga para medir a força de aperto que o parafuso está gerando.

Um exemplo deste tipo de ensaio pode ser visualizado na Figura 2.18.

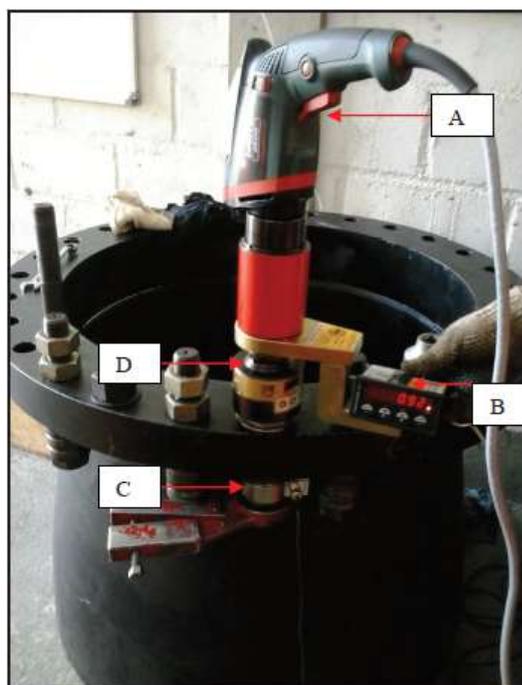


Figura 2.18 - Equipamentos utilizados no experimento: torquedeira eletrônica (a), visor da arruela de carga (b), arruela de carga (c) e soquete digital (d) (Fonte: Rolin, 2014).

Este arranjo foi preparado por Rolin (2014) e a função de cada componente é a seguinte: a torquedeira eletrônica aplica o torque, o soquete digital consiste em uma célula de carga de torção para mensurar o torque de entrada, a arruela de carga mede a força de aperto, que é monitorada através de um visor de cristal líquido. Segundo o autor, este tipo de arranjo é sugerido pela norma ISO 16047.

Os ensaios realizados em laboratórios constam de uma estrutura metálica, onde é acoplada uma célula de carga para calcular a força de aperto, um suporte onde

ocorre o parafusamento, uma ferramenta para aplicar torque e visores nos quais é feita a leitura dos valores mensurados.

Um exemplo de um aparato para ensaios de torque presente no LAMAV é apresentado na Figura 2.19.

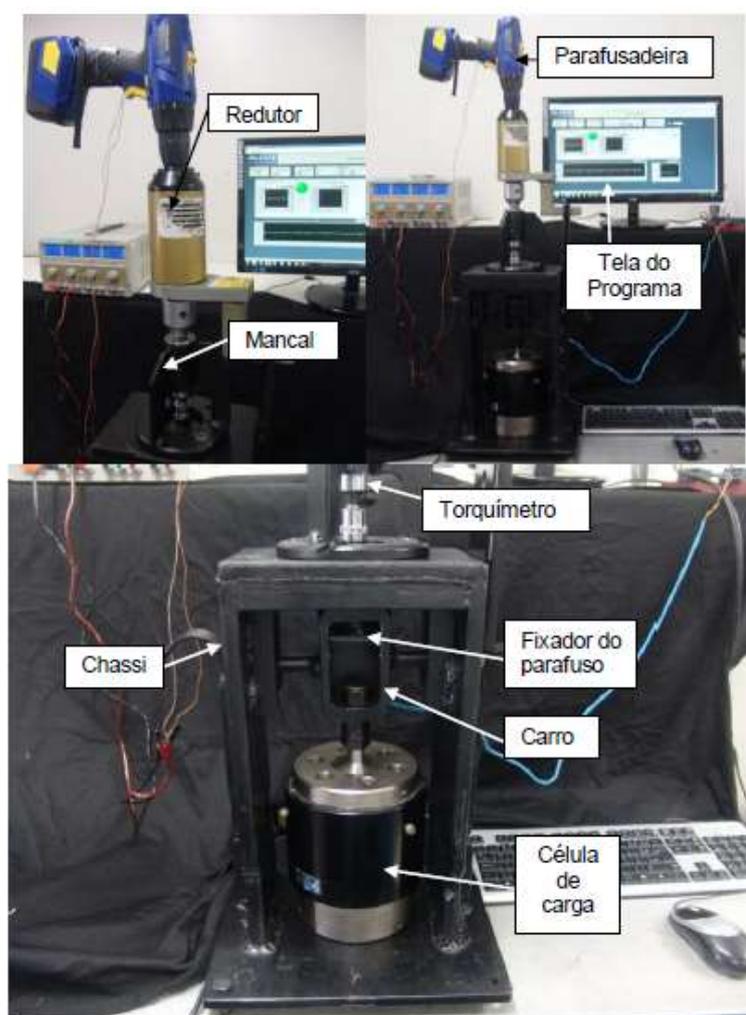


Figura 2.19 - Equipamento fabricado para ensaios de torque (Fonte: Rodrigues, 2015).

Este equipamento foi fabricado por Rodrigues (2015) e a função de cada componente é a seguinte: o chassi feito de aço SAE 1020 acopla todos os componentes e suporta os esforços gerados durante o ensaio, a parafusadeira aplica o torque, o carro e o fixador do parafuso transmitem a força de aperto para a célula de carga, que realiza sua mensuração, o mancal com rolamentos evita a flexão do

parafuso e o torquímetro instrumentado fornece os dados de deformação por torção que são tratados em um computador, permitindo a identificação do torque aplicado.

Outros aparatos montados em laboratórios apresentam cada um uma estrutura distinta, porém o modo de funcionamento é similar ao anteriormente citado. Por exemplo, Croccolo *et al.* (2017) apresenta um aparato com dispositivos para medição do torque e carregamento axial no parafuso (pré-carga). Essas medidas são realizadas simultaneamente e o torque é aplicado manualmente. Este aparato está representado na Figura 2.20.

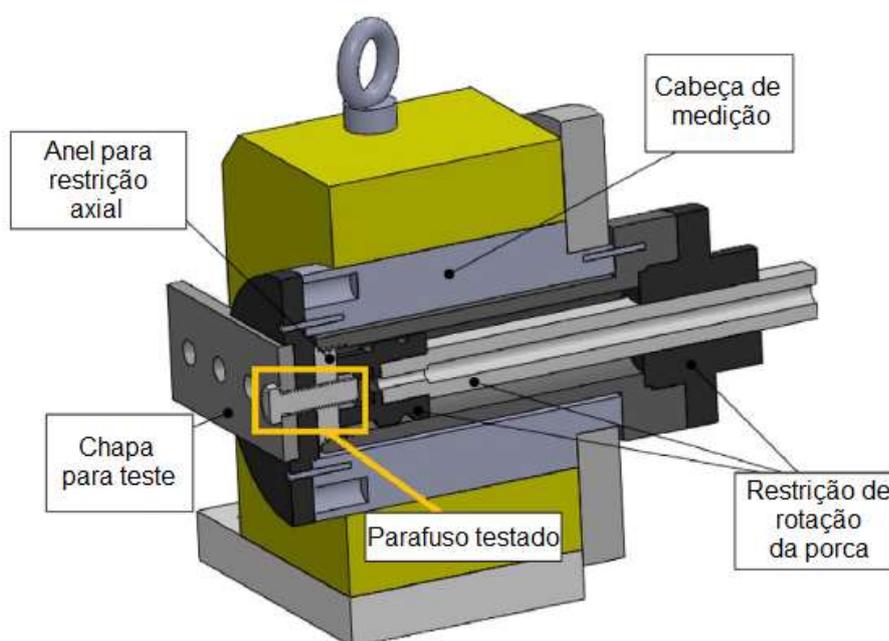


Figura 2.20 - Bancada para realização dos experimentos (Fonte: Adaptado de Croccolo *et al.*, 2017).

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo tem como objetivo avaliar a adequação da máquina de ensaios de torção controlada por computador, modelo TNS-DW5, para a realização de ensaio de torque em parafusos. Este estudo visa obter o coeficiente de torque K e, através dele, os coeficientes de atrito, como ferramenta de avaliação da metodologia proposta.

Para este estudo, foram necessários um aparato para aplicar o torque, uma célula de carga para mensurar a força de aperto e parafusos para serem testados. O equipamento responsável pela aplicação do torque foi a TNS-DW5 e a célula de carga foi fabricada parte no SEUMA - Serviços de Usinagem e Manutenção e parte no LAMAV - Laboratório de Materiais Avançados.

A Figura 3.1 apresenta um organograma com as etapas do estudo.

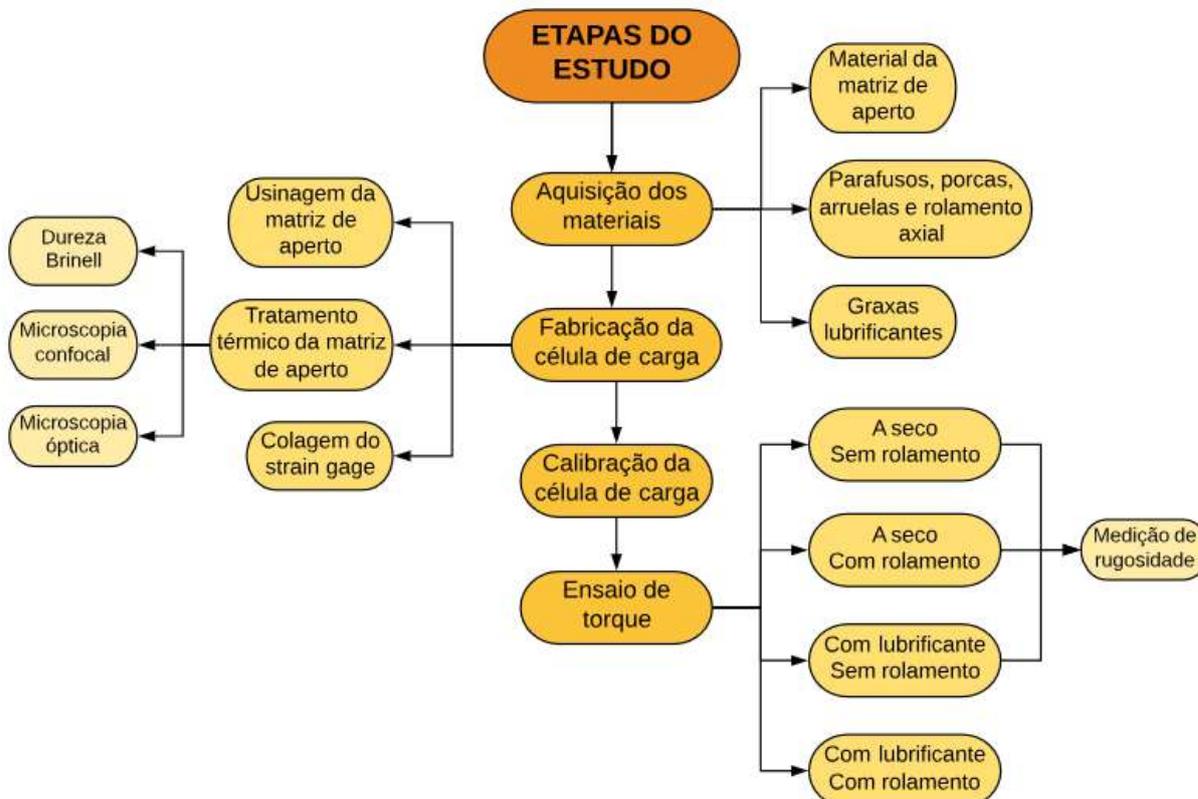


Figura 3.1 - Organograma das etapas do estudo.

3.1 Aquisição dos materiais

Para este projeto foram utilizados os seguintes materiais:

- 40 parafusos M12 x 1,75 x 100 mm de cabeça sextavada, rosca parcial e classe 10.9;
- 80 porcas classe 10;
- 80 arruelas de pressão F-436M;
- Barra sextavada de aço SAE 4140;
- Rolamento axial de esferas de escora simples, modelo STB 51202;
- Graxa lubrificante a base de sabão de lítio Lubrax Autolith 2;
- Graxa branca (5% dióxido de titânio);
- Strain gage.

3.2 Fabricação da célula de carga

A célula de carga é um transdutor que tem a função de converter força mecânica em sinais elétricos (Dally e Riley, 1991). O tipo de célula utilizado neste projeto é o com strain gage, que usa uma matriz de aperto para sofrer a atuação de uma força compressiva e deformar. Com a deformação da matriz, o gage, colado em uma superfície escolhida também se deforma proporcionalmente à força aplicada, tornando possível mensurá-la.

3.3 Usinagem das matrizes de aperto

A partir da barra sextavada de aço SAE 4140, duas matrizes de comprimentos diferentes foram usinadas: uma de 75 mm e outra de 68 mm. Esses comprimentos foram determinados para que o parafuso passasse pela matriz e tivesse seu trecho roscado exposto e no caso da matriz de 68 mm o menor comprimento é devido ao uso rolamento sob a arruela. Ambas possuindo a mesma seção transversal e com um furo

passante de 15 mm de diâmetro, suficiente para que os parafusos atravessassem a matriz sem interferência com as paredes do furo. Na Figura 3.2 está a representação das matrizes após a usinagem.

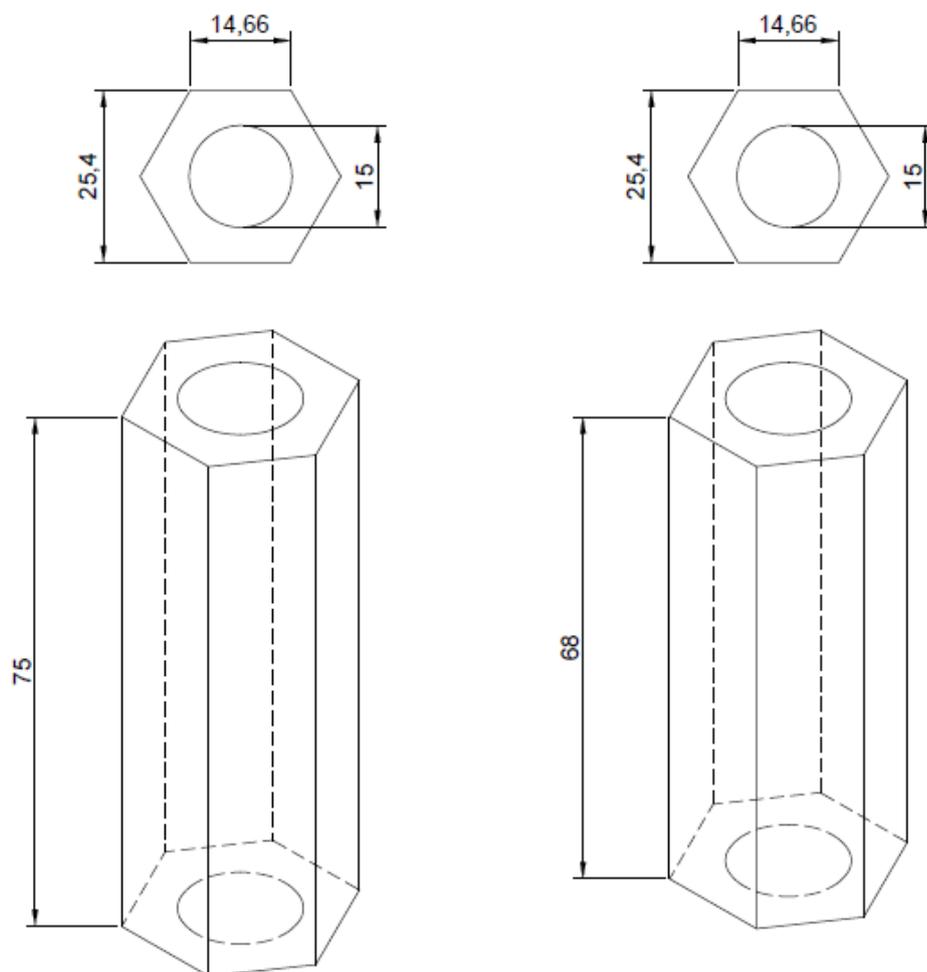


Figura 3.2 - Dimensional das matrizes de aperto.

3.4 Tratamento térmico das matrizes de aperto

Como a função das matrizes é resistir à atuação de uma força compressiva, elas deveriam apresentar uma dureza adequada. Para isso, elas foram tratadas termicamente. Foi realizado um tratamento de têmpera para elevar a dureza das matrizes e, em sequência, um tratamento de revenido para garantir uma boa tenacidade.

As matrizes foram tratadas térmica e simultaneamente com dois pedaços da barra sextavada (Figura 3.3), cuja função é de serem utilizados para ensaios de dureza e análises metalográficas. Desta maneira, a mesma condição de tempo e temperatura foi garantida para ambas as matrizes e os corpos de prova.

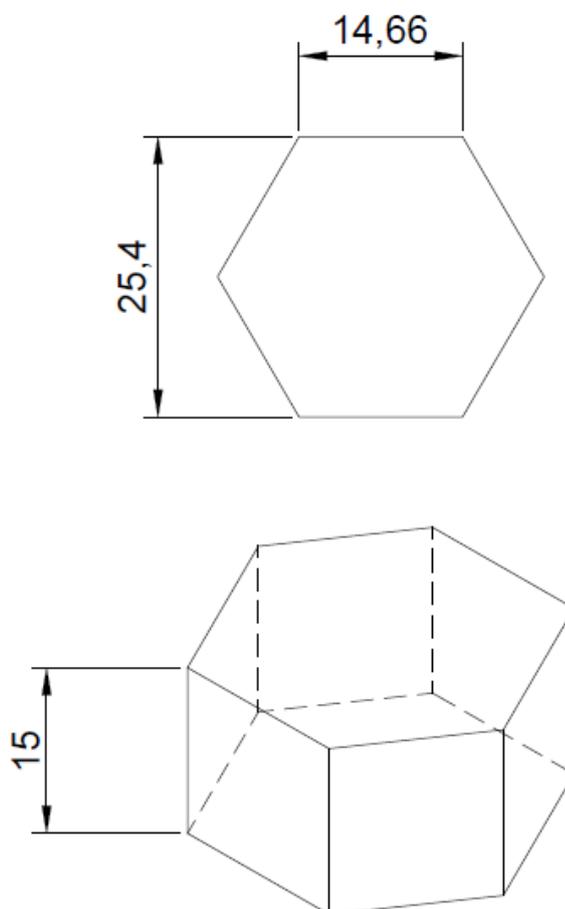


Figura 3.3 - Dimensional dos corpos de prova.

Durante os tratamentos, o aquecimento das peças ocorreu em um forno mufla, modelo EDG 7000, e, para possibilitar que todas fossem tratadas ao mesmo tempo, fez-se o uso de uma cesta metálica.

Apenas um dos dois pedaços da barra sextava foi revenido. Foi necessário um pedaço apenas temperado para testificar a evolução da microestrutura e, portanto, a eficácia dos tratamentos térmicos.

Seguem na Figura 3.4 a sequência do tratamento de têmpera e na Tabela 3.1 os parâmetros utilizados para a têmpera e o revenido.



Figura 3.4 - Sequência do tratamento de têmpera: colocação da cesta metálica com as matrizes de aperto e os corpos de prova (a), aquecimento na temperatura e no tempo programados (b), abertura do forno (c), retirada da cesta do forno (d), mergulho da cesta no óleo de têmpera HYDRATEMP AC (e), matrizes e corpos de prova temperados (f).

Tabela 3.1 - Parâmetros dos tratamentos térmicos.

TRATAMENTO TÉRMICO	TÊMPERA	REVENIDO
Temperatura de aquecimento	870 °C	200 °C
Rampa de aquecimento	15 °C/min	15 °C/min
Tempo de permanência no forno	60 min	30 min
Meio de resfriamento	Óleo de têmpera	Dentro do forno
Realizado nas amostras	75 mm, 68 mm, 15 mm, 15 mm	75 mm, 68 mm, 15 mm

3.5 Dureza

Os ensaios de dureza visam confirmar a eficiência dos tratamentos térmicos através do endurecimento das matrizes, ou seja, do aumento da resistência à compressão.

Antes dos ensaios de dureza, as amostras foram lixadas em uma lixadeira AML4 (Figura 3.5) até a lixa de granulometria 600 mesh, seguindo a sequência de lixamento: 100, 220, 400 e 600 mesh. O lixamento foi manual e a úmido com utilização de água corrente. Esta etapa preliminar foi necessária a fim de retirar a carepa formada pelos tratamentos.



Figura 3.5 - Lixadeira manual AML4.

Entre a passagem de uma lixa de uma granulometria maior para uma de granulometria menor foi utilizado o microscópio óptico Olympus (Figura 3.6) para observar se os riscos da lixa anterior haviam sumido. As observações foram em

campo claro com aumentos de 50x a 1000x. O sentido do lixamento era sempre 90° em relação à lixa anterior.



Figura 3.6 - Microscópio óptico Olympus.

A fim de comparar os resultados de dureza com a literatura, foi escolhido o ensaio de dureza Brinell que consiste em comprimir uma esfera metálica padronizada na superfície do material a ser ensaiado, formando uma calota esférica. A escolha do tipo de dureza foi devido à possibilidade de ser realizado no LAMAV e ao fato de o fornecedor da barra de aço SAE 4140 disponibilizar a dureza na escala Brinell.

A dureza é o quociente da carga pela área da calota esférica. Segue na Figura 3.7 um esquemático do ensaio de dureza Brinell.

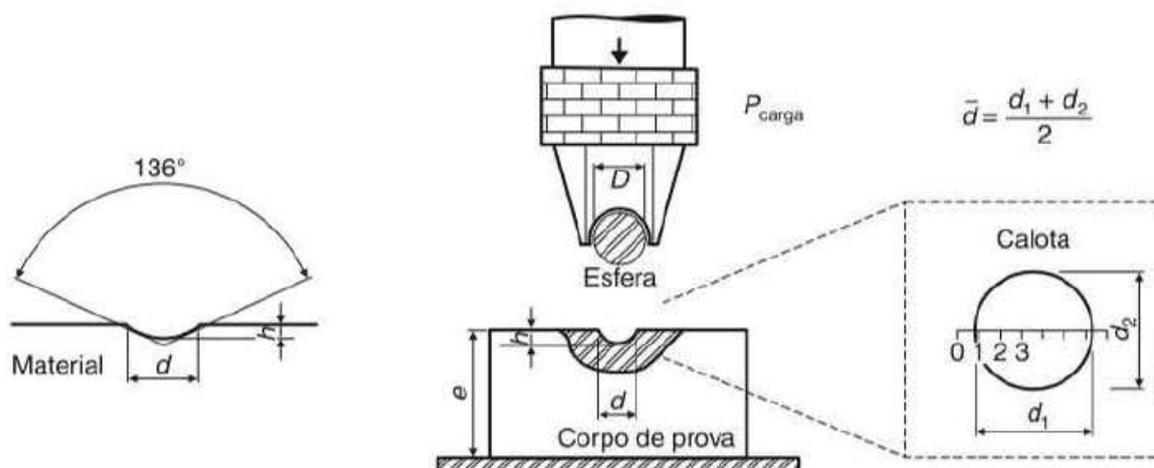


Figura 3.7 - Esquemático do ensaio de dureza Brinell (Fonte: Garcia, 2012).

Os ensaios foram realizados no durômetro PANTEC RBS (Figura 3.8), utilizando um carregamento de 187,5 kgf e uma esfera de aço de 2,5 mm de diâmetro.



Figura 3.8 - Durômetro PANTEC RBS.

Segundo Garcia (2012), a carga utilizada depende do material a ser ensaiado e a escolha é feita a partir de uma constante chamada grau de carga.

$$\frac{P}{D^2} = \text{grau de carga} \quad (3.1)$$

onde P é a carga aplicada em kgf e D é o diâmetro da esfera em mm.

Quando se calcula a carga através do grau de carga, é garantido um ângulo de 136° entre as tangentes da calota esférica da impressão (Figura 3.7). Como o material a ser ensaiado é um aço SAE 4140, foi escolhido um grau de carga de 30 kgf/mm^2 e como a esfera tem $2,5 \text{ mm}$ de diâmetro, encontrou-se um carregamento de $187,5 \text{ kgf}$.

Para cada corpo de prova, foram realizadas cinco endentações com uma distribuição em forma de cruz (Figura 3.9).

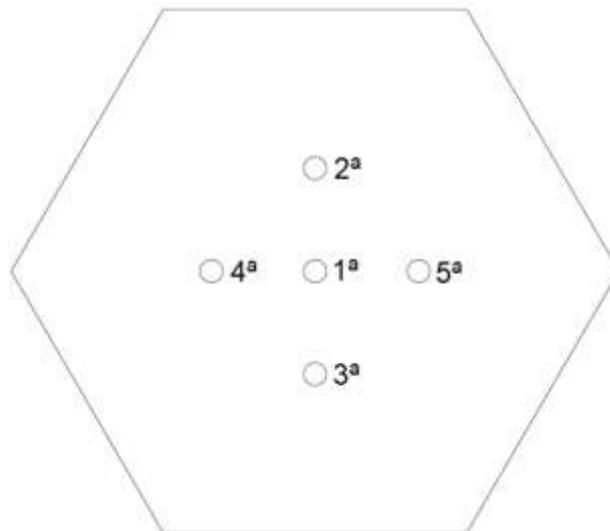


Figura 3.9 - Distribuição das endentações nos corpos de prova.

O durômetro PANTEC RBS fornece os resultados de dureza na escala HR. O fabricante do durômetro fornece uma tabela de conversão de dureza HR para dureza HB. No entanto, essa tabela é limitada, visto que sua escala só vai até 80 HR . Segue abaixo a Tabela 3.2 com uma escala fornecida pelo fabricante do durômetro.

Tabela 3.2 - Comparação entre as escalas HR e HB.

Rockwell HR 2,5/187,5						Brinell HB 2,5/187,5		
D = 2,5 mm			Para aços carbono			D = 2,5 mm		
F0 = 10 kgf						F = 187,5 kgf		
Z = 100								
F = 187,5 kgf								
HR 2,5/187,5	HR 2,5/187,5	σ_B N/mm ²	HR 2,5/187,5	HR 2,5/187,5	σ_B N/mm ²	HR 2,5/187,5	HR 2,5/187,5	σ_B N/mm ²
1	104,8	370	31	139	491	55,5	212	750
2	105,6	373	32	141	498	56	215	759
3	106,4	375	33	143	505	56,5	217	768
4	107,2	379	34	145	513	57	220	778
5	108	381	35	147	519	57,5	223	788
6	109	385	36	149	526	58	226	799
7	110	388	37	151	534	58,5	229	808
8	111	392	38	153	541	59	232	819
9	112	395	39	155	547	59,5	235	829
10	113	399	40	158	558	60	238	840
11	114	402	41	161	569	61	243	858
12	115	406	42	164	580	62	249	879
13	116	410	43	167	590	63	255	901
14	117	414	44	170	600	64	262	925
15	118	417	45	173	611	65	269	945
16	119	420	46	176	622	66	277	978
17	120	424	47	179	633	67	285	1007
18	121	428	48	182	643	68	293	1035
19	122	431	49	186	656	69	301	1063
20	123	435	50	190	671	70	309	1091
21	124	438	50,5	192	678	71	318	1123
22	125	441	51	194	685	72	328	1159
23	126	445	51,5	195	692	73	338	1194
24	127	449	52	198	699	74	348	1229
25	128	452	52,5	200	706	75	359	1267
26	130	459	53	202	713	76	370	1307
27	131	463	53,5	204	720	77	382	1349
28	133	469	54	206	727	78	395	1395
29	135	477	54,5	208	734	79	409	1444
30	137	484	55	210	742	80	424	1497

3.6 Microscopia confocal

Com a finalidade de mensurar a dureza de maneira mais precisa, fez-se o uso do microscópio confocal Olympus LEXT (Figura 3.10) para obter-se imagens das endentações e, por fim, medir os diâmetros, conforme Figura 3.7. O microscópio confocal permite focar diferentes planos da amostra e, portanto, gerar uma imagem com alta qualidade da superfície.



Figura 3.10 - Microscópio Confocal Olympus LEXT.

O diâmetro médio das endentações foi utilizado para calcular a dureza HB a partir da seguinte fórmula:

$$HB = \frac{2.P}{\pi.D.\left(D - \sqrt{D^2 - d_c^2}\right)} \quad (3.2)$$

onde D é o diâmetro do penetrador (mm), d_c é o diâmetro médio da calota (mm) e P é a carga aplicada (kgf).

3.7 Microscopia óptica

Da mesma maneira que a dureza, a análise metalográfica por microscopia óptica visa atestar a eficácia dos tratamentos térmicos, só que através da evolução da microestrutura dos corpos de prova.

Antes de serem realizadas as análises, as superfícies dos corpos de prova que tinham sido lixadas até 600 mesh para o ensaio de dureza agora foram lixadas até 1200 mesh. Deve-se deixar claro que elas não foram relixadas novamente a partir dos 100 mesh, mas o lixamento prosseguiu do estado em que elas se encontravam. Do mesmo modo que ocorreu na preparação para os ensaios de dureza, o microscópio óptico Olympus (Figura 3.6) foi utilizado para observar se os riscos da lixa anterior haviam sumido.

Após o lixamento, as amostras foram polidas manualmente com alumina de 1 μm (Figura 3.11) e depois foi realizado ataque químico por pincelamento com Nital 2%. O tempo de ataque para cada amostra é apresentado na Tabela 3.3.

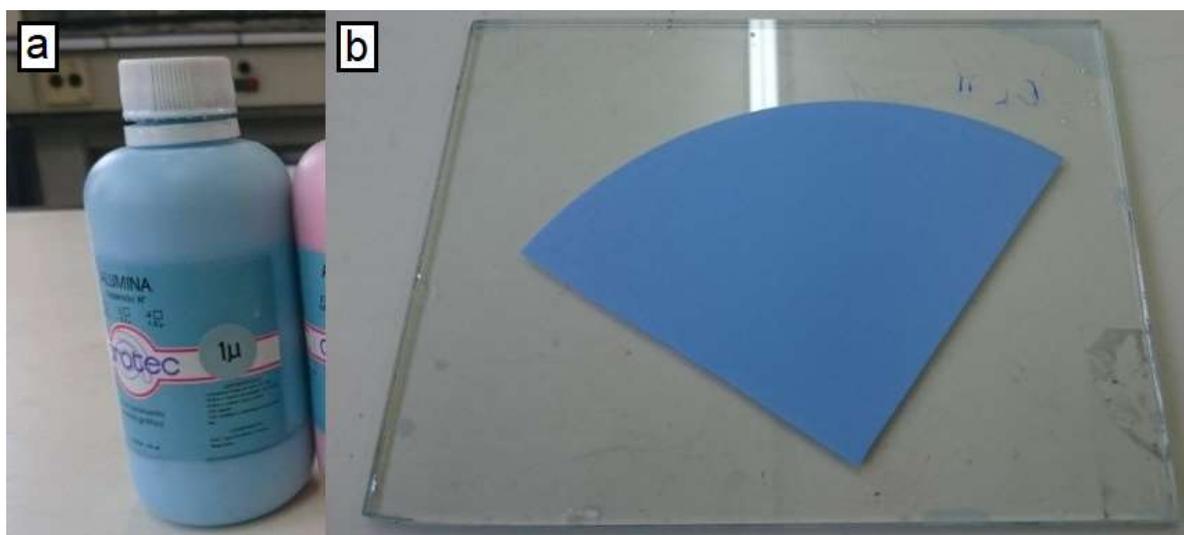


Figura 3.11 - Alumina de 1 μm da Arotec (a) e pano de polimento (b).

Tabela 3.3 - Tempo de ataque químico para cada tipo de amostra.

Amostra	Tempo de ataque (s)
Sem tratamento	3
Temperada	6
Temperada e revenida	5

Após toda a preparação metalográfica, as amostras foram analisadas no microscópio óptico Neophot 32 (Figura 3.12). As observações foram em campo claro e nos seguintes aumentos: 50x, 125x, 320x e 500x, para cada tipo de amostra.



Figura 3.12 - Microscópio óptico Neophot 32.

3.8 Colagem dos strain gages

A última etapa da fabricação das células de carga é a colagem dos strain gages. Antes da colagem, a superfície escolhida foi lixada com lixa de 100 mesh para remover as marcas de usinagem, pois a barra foi sextavada por fresamento.

Após a preparação da superfície, foi colado um strain gage axial no centro geométrico da mesma, posicionado paralelo à direção longitudinal da matriz, pois sua função é medir a deformação compressiva.

Para dar continuidade elétrica, os fios metálicos foram soldados no strain gage com estanho. Para isso, foi utilizado um rolo de fio de estanho e um ferro de solda. Com a finalidade de evitar a soltura dos fios metálicos do strain gage, caso ocorresse movimento da matriz, os mesmos também foram colados na mesma superfície onde foi colado o strain gage e foi utilizada uma capa plástica, colada em outra superfície da matriz, por onde passavam os fios conectados ao gage. Desta maneira, foi criada uma região fixa trazendo maior segurança para a célula de carga. A Figura 3.13 mostra o strain gage acoplado à matriz.

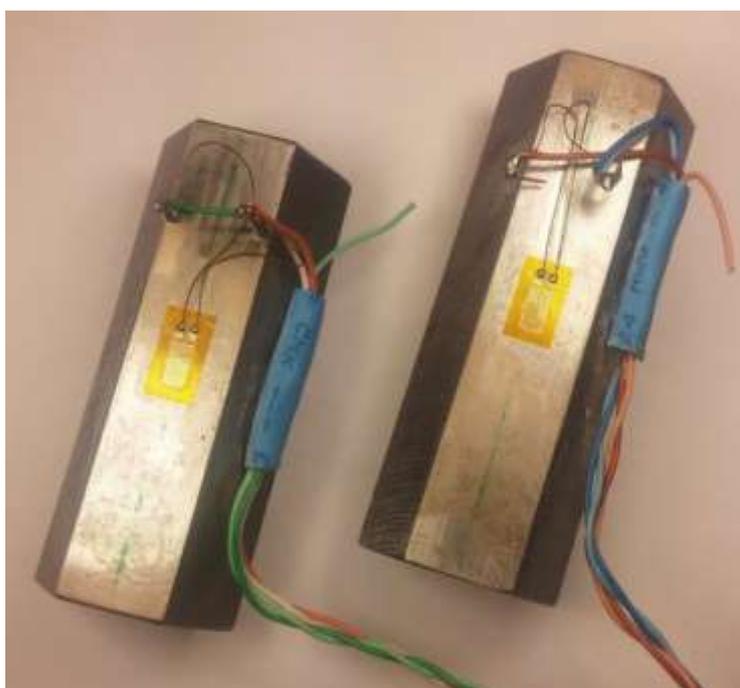


Figura 3.13 - Acoplamento dos strain gages nas matrizes de 68 mm e 75 mm.

3.9 Calibração das células de carga

Antes do uso das células de carga, foi necessária a calibração das mesmas, pois os dados obtidos utilizando o strain gage eram coletados na forma de deformação

compressiva e para o ensaio de torque, sendo certo que o que importa ser mensurado é a força de aperto.

A calibração foi realizada na máquina universal de ensaios INSTRON, modelo 5582 (Figura 3.14), da seguinte maneira: cada matriz de aperto foi submetida a cargas compressivas iniciando com 5 kN e terminando com 40 kN.

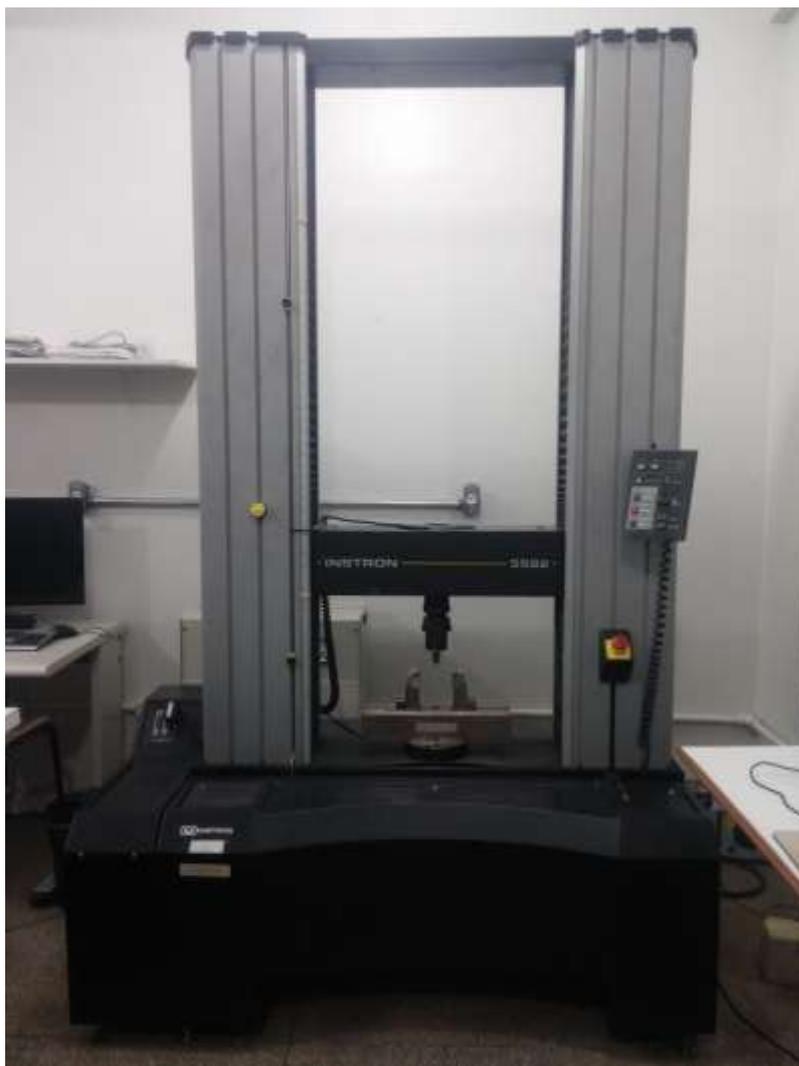


Figura 3.14 - Máquina universal de ensaios INSTRON, modelo 5582.

Ao mesmo tempo em que as matrizes eram apertadas, os dados de deformação eram mensurados com a utilização de um dispositivo condicionador e transdutor de sinal Vishay P3. Esse dispositivo possui quatro canais, tornando possível monitorar a deformação em até quatro corpos de prova simultaneamente. Os

valores da deformação são apresentados no visor no canto superior esquerdo da caixa e armazenados em um cartão de memória para futuramente serem extraídos.

A partir dos 5 kN iniciais, a cada 5 kN era anotado o valor da carga aplicada e a deformação disponibilizada no visor da caixa Vishay P3. A calibração foi repetida cinco vezes para cada matriz a fim de reduzir erros de medições. Com os dados obtidos foram construídas curvas de calibração onde é possível obter a correlação entre a deformação compressiva da matriz e a força de aperto.

Segue na Figura 3.15 a montagem da matriz na máquina de ensaios universal e na caixa Vishay P3.



Figura 3.15 - Calibração das células de carga.

3.10 Ensaio de torque

A primeira etapa do ensaio de torque foi definir qual o torque a ser utilizado. Essa definição foi baseada no limite de escoamento dos parafusos. Seguem na Tabela 3.4 os dados fornecidos pelo fabricante para o lote de parafusos adquiridos.

Tabela 3.4 - Dados dos parafusos classe 10.9 fornecidos pelo fabricante.

Composição química					
%C	%Mn	%P	%S	%B	%Si
0,32	0,9	0,022	0,005	0,0026	0,29
Propriedades mecânicas					
Propriedade	Especificado pela norma ISO 898-1			Encontrado	
Dureza HRC	Mín.	32		34	
	Máx.	39		35	
Limite de escoamento	Mín.	940		944,5	
	Máx.	1034		1029,5	
Limite de resistência à tração	Mín.	1040		1044,5	
	Máx.	1144		1139,5	

Para calcular o torque, foram necessários alguns dados: coeficiente de torque teórico e área sob tração do parafuso. O coeficiente de torque escolhido foi o de 0,2; recomendado por Budynas, e Nisbett (2011) quando não são definidas as condições do parafuso. A área sobre tração foi calculada a partir da Equação 2.1a. Para o cálculo da área foram calculados os diâmetros primitivo e menor a partir das Equações 2.1c. Seguem abaixo os valores encontrados:

- $d_r = 9,85 \text{ mm}$
- $d_p = 10,86 \text{ mm}$
- $A_t = 84,22 \text{ mm}^2$

Com a área sob tração calculada, o próximo passo foi calcular a força de aperto desejada. Como dito antes, foi escolhido o limite de escoamento para definir a força de aperto. De modo a ser conservativo, foi utilizado o valor mínimo de 940 MPa requerido pela norma ISO 898-1 (2009) e a força calculada foi de 79167 N.

A norma ISO 16047 (2005) que trata dos ensaios de torque em parafusos recomenda utilizar 70% da carga de prova para os ensaios. Como esta propriedade não foi fornecida pelo fabricante do parafuso e como ela é sempre menor que o limite

de escoamento, foi decidido utilizar 50% da força de aperto definida a partir do escoamento. Portanto, a força utilizada foi de 39584 N.

Com todos os dados necessários para calcular o torque a partir da equação na forma reduzida, foi encontrado o valor de 95,65 Nm e, portanto, utilizado um valor de 95 Nm. Esse valor está dentro da faixa utilizada na indústria, por exemplo, em fechamento de acessórios bipartidos de dutos flexíveis usados na indústria de petróleo e gás. Sendo assim, é um valor representativo.

Definido o torque e com as células de carga fabricadas e devidamente calibradas, foram iniciados os ensaios. Todo o ensaio foi realizado na máquina de ensaios de torção TNS-DW5 (Figura 3.16), que foi a responsável pela aplicação do torque.



Figura 3.16 - Máquina de torção, modelo TNS-DW5.

A fim de testar a metodologia, foi decidido verificar a influência do atrito entre as roscas engajadas e entre a superfície de contato da porca ou cabeça do parafuso com o material a ser apertado na força de aperto obtida. Para isso, foram realizados ensaios em quatro condições conforme apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Condições dos ensaios de torque.

Condição de ensaio	Materiais utilizados				
	Parafuso	Porca	Arruela	Rolamento Axial	Lubrificante
Torque a seco	10 un.	20 un.	20 un.		
Torque lubrificado	10 un.	20 un.	20 un.		x
Torque a seco com rolamento	10 un.	20 un.	20 un.	1 un.	
Torque lubrificado com rolamento	10 un.	20 un.	20 un.	1 un.	x

Seguem na Figura 3.17 as dimensões dos parafusos, das porcas e das arruelas que foram ensaiados.

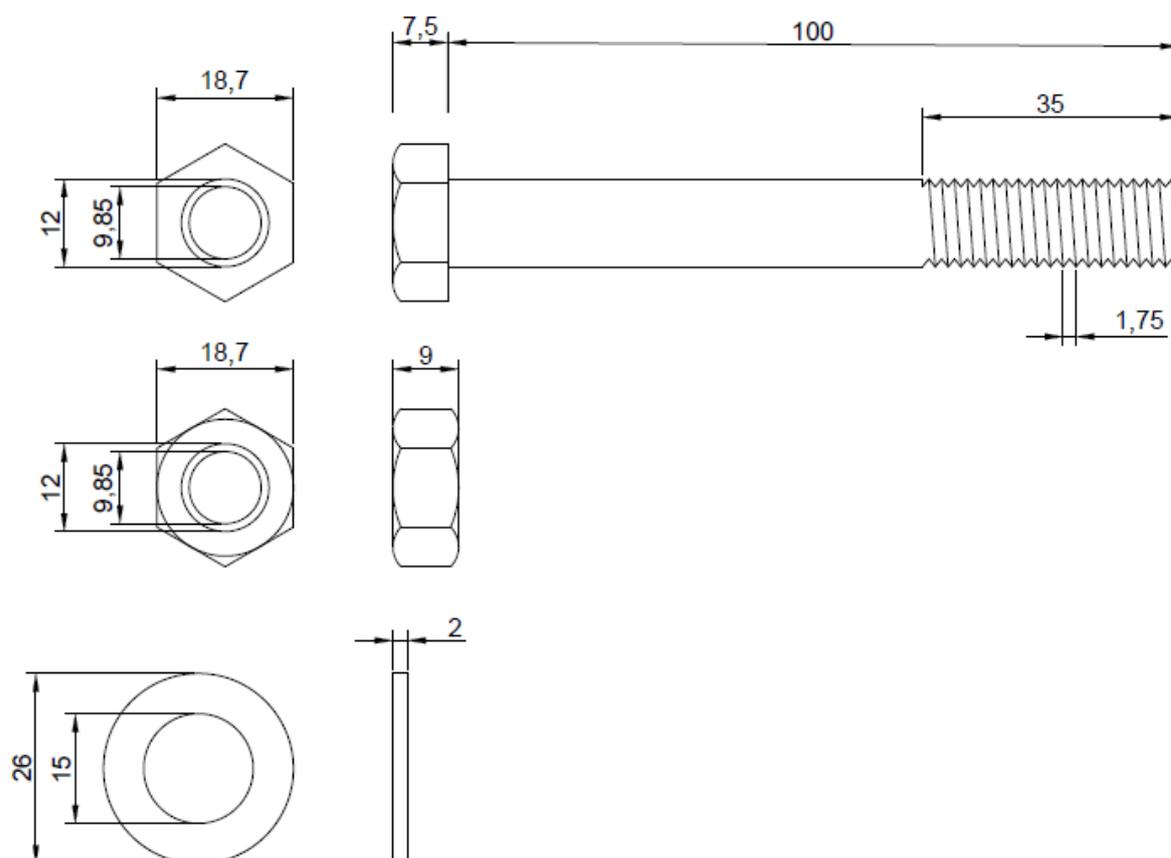


Figura 3.17 - Dimensional dos parafusos, das porcas e das arruelas.

O lubrificante utilizado foi a graxa Lubrax Autolith 2, à base de sabão de lítio. Ele era aplicado manualmente ao trecho rosqueado do parafuso. Este lubrificante foi escolhido porque além de ser uma graxa de uso comum na lubrificação de rolamentos ele também foi utilizado em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa da OEMM. A Figura 3.18 representa a lubrificação do trecho rosqueado do parafuso.



Figura 3.18 - Parafuso classe M12 x 1,75 com o trecho rosqueado lubrificado com graxa Lubrax Autolith 2.

Os rolamentos também eram lubrificados a cada ensaio com graxa branca, à base de dióxido de titânio. Essa graxa além de ser lubrificante também é antioxidante e, portanto, ajuda na conservação dos rolamentos. Antes de cada ensaio realizado com rolamento, este era limpo com querosene, com o intuito de proporcionar a mesma condição de lubrificação. A Figura 3.19 apresenta as principais dimensões do rolamento utilizado.

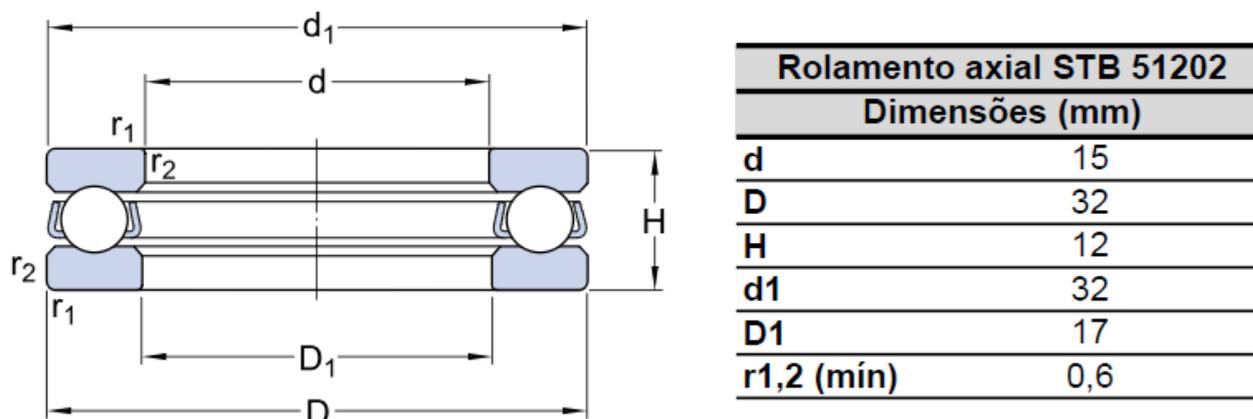


Figura 3.19 - Dimensões do rolamento axial modelo STB 51202 (Fonte: Adaptado de SKF, 2018).

A máquina tem a função de programar uma condição de término de ensaio e a condição escolhida foi o torque de 95 Nm e a velocidade de torqueamento foi de 50 °/min. Ao atingir este torque, a máquina automaticamente parava e os dados do ensaio eram armazenados no computador para futuramente serem tratados juntamente com os dados extraídos da caixa Vishay P3. O próximo passo era destorquear o parafuso para liberar a célula de carga. A velocidade escolhida para o destorqueamento foi de 120 °/min. Deve ser mencionado que o condicionador de ar estava desligado para reduzir interferências na rede elétrica, fato já confirmado em estudos anteriores.

3.11 Rugosidade

Após os ensaios de torque nas quatro condições, foi mensurada a rugosidade dos filetes dos parafusos e da superfície da arruela no microscópio confocal Olympus LEXT. Juntamente com a rugosidade foram obtidas micrografias para uma análise qualitativa dos filetes e das arruelas.

As medições foram realizadas da seguinte maneira:

- Parafuso como recebido: 3 filetes avaliados e 5 medições ao longo de cada filete;

- Parafuso torqueado a seco: 3 filetes avaliados e 5 medições ao longo de cada filete;
- Parafuso torqueado com lubrificante: 3 filetes avaliados e 5 medições ao longo de cada filete;
- Arruela como recebida: 4 medições ao longo da superfície em contato com a cabeça do parafuso;
- Arruela como torquada sem rolamento: 4 medições ao longo da superfície em contato com a cabeça do parafuso;
- Arruela como torquada com rolamento: 4 medições ao longo da superfície em contato com a cabeça do parafuso.

A combinação de ensaios apresentada acima foi escolhida a fim de avaliar em qual superfície (filete ou arruela) a rugosidade sofreu um maior impacto após o aperto e também avaliar, através da variação da rugosidade, qual elemento (lubrificante ou rolamento) exerce maior influência na redução do coeficiente de atrito.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dureza

A preparação dos corpos de prova para os ensaios de dureza ocorreu com êxito. Como mostra a Figura 4.1, o lixamento até 600 mesh foi suficiente para remover a camada superficial de óxido formada durante os tratamentos térmicos, pois a mesma poderia causar influência na dureza.



Figura 4.1 - Corpo de prova temperado com a camada superficial de óxido (a) e com a camada superficial de óxido removida com lixa de 600 mesh.

Na Tabela 4.1 são apresentadas as medições de dureza na escala HR do equipamento. Com os resultados apresentados, comprova-se que a tabela do fabricante realmente é limitada e poderia ser utilizada para apenas 47% dos resultados.

Tabela 4.1 - Resultados do ensaio de dureza na escala HR do equipamento.

Endentação	Sem tratamento térmico	Temperada	Temperada e revenida
1 ^a	69 HR	81 HR	72 HR
2 ^a	69 HR	82 HR	80 HR
3 ^a	68 HR	83 HR	83 HR
4 ^a	68 HR	85 HR	81 HR
5 ^a	68 HR	84 HR	84 HR

Segue nas Tabelas 4.2 a 4.4 a dureza calculada a partir das medidas dos diâmetros das endentações, onde foi utilizada a Equação 3.2.

Tabela 4.2 - Dureza HB a partir do diâmetro médio do corpo de prova sem tratamento.

Endentação	Diâmetro 1 (µm)	Diâmetro 2 (µm)	Diâmetro médio (µm)	Dureza (HB)
1 ^a	854	867	861	312
2 ^a	857	864	860	312
3 ^a	845	850	848	322
4 ^a	866	865	865	309
5 ^a	840	859	849	321

Tabela 4.3 - Dureza HB a partir do diâmetro médio do corpo de prova temperado.

Endentação	Diâmetro 1 (µm)	Diâmetro 2 (µm)	Diâmetro médio (µm)	Dureza (HB)
1 ^a	658	661	659	539
2 ^a	658	665	662	535
3 ^a	645	624	634	584
4 ^a	657	629	643	568
5 ^a	630	639	634	584

Tabela 4.4 - Dureza HB a partir do diâmetro médio do corpo de prova temperado e revenido.

Endentação	Diâmetro 1 (μm)	Diâmetro 2 (μm)	Diâmetro médio (μm)	Dureza (HB)
1 ^a	685	704	694	485
2 ^a	705	710	708	467
3 ^a	684	692	688	495
4 ^a	645	655	650	555
5 ^a	670	685	678	510

Comparando os resultados obtidos pela tabela do equipamento e pela medição dos diâmetros (Tabela 4.5), nota-se uma pequena diferença. De acordo com o fornecedor da barra sextavada de aço SAE 4140, a dureza HB máxima no estado laminado é de 350 HB (América Aços Especiais, 2018). A dureza obtida pela medição dos diâmetros tem um valor médio mais próximo ao do fornecido pelo fabricante e isso se deve à precisão das medições realizadas no microscópio Confocal.

Tabela 4.5 - Comparação entre os resultados de dureza obtidos pela tabela de conversão do equipamento e pela medição dos diâmetros para o corpo de prova sem tratamento.

Endentação	Tabela do equipamento	Média	Medição dos diâmetros	Média
1 ^a	301 HB	296 HB	312 HB	315 HB
2 ^a	301 HB		312 HB	
3 ^a	293 HB		322 HB	
4 ^a	293 HB		309 HB	
5 ^a	293 HB		321 HB	

A Figura 4.2 apresenta a dureza HB média para os corpos de prova nas três condições de ensaio.

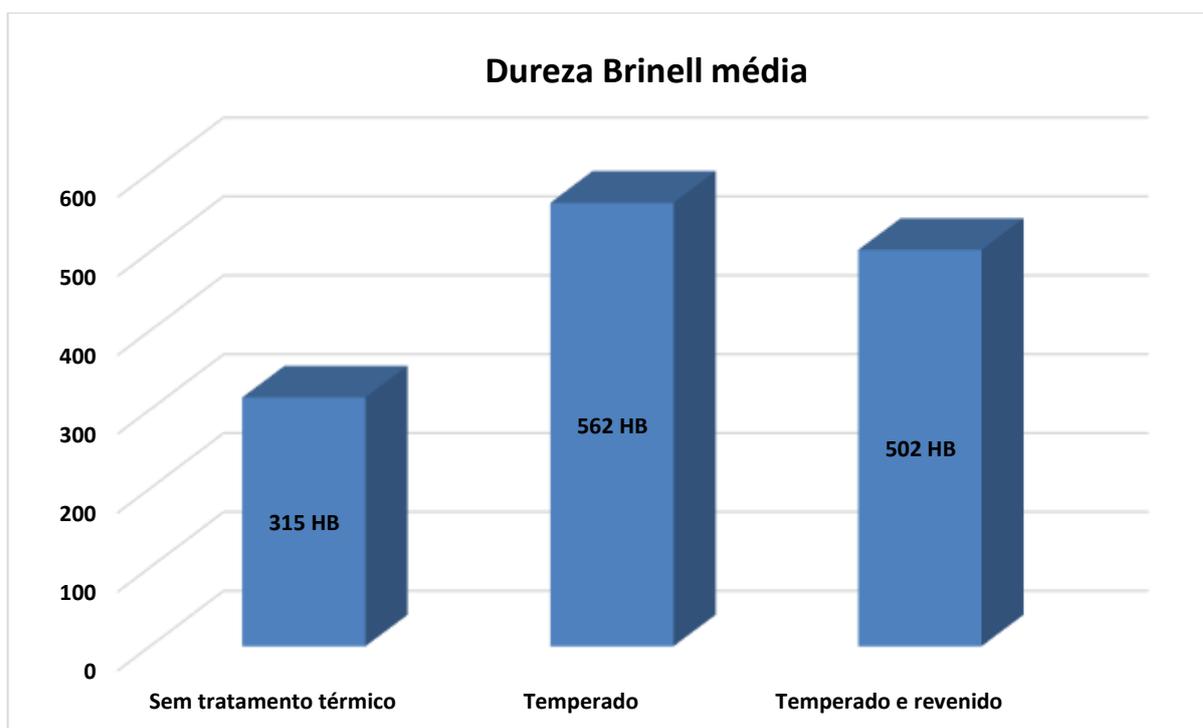


Figura 4.2 - Dureza Brinell média para as três condições de ensaio do corpo de prova.

Como esperado, o maior valor de dureza foi o do corpo de prova temperado devido à formação da martensita. Essa microestrutura consiste em uma estrutura Tetragonal de Corpo Centrado (TCC) onde todos os átomos de carbono permanecem como impurezas intersticiais formando uma solução sólida supersaturada. Os átomos de carbono nos sítios intersticiais são eficientes em restringir o movimento das discordâncias e, portanto, dificultam a deformação plástica e aumentam a dureza do material (Callister, 2008).

A diminuição da dureza após o revenimento se deve ao fato de que a martensita, formada na têmpera, se decompõe em ferrita e cementita. Apesar da redução da dureza em relação ao aço temperado, ela permanece elevada em relação ao aço sem tratamento térmico.

A Figura 4.3 torna clara a evolução da dureza nos tratamentos térmicos. A endentação no corpo de prova sem tratamento térmico possui um diâmetro maior e uma maior profundidade, que pode ser observado pela coloração escura. A endentação do meio representa o corpo de prova temperado, pois tem um diâmetro

bem menor que a anterior e a coloração é mais clara, ou seja, é menos profunda. Além disso, nota-se também que os riscos da lixa de 600 mesh passam pela endentação, comprovando que ela é rasa. A última figura é a endentação do corpo de prova temperado e revenido. Como mostrado nas tabelas acima, o diâmetro é levemente maior que a endentação do aço temperado, porém a coloração é mais escura, portanto menos profunda, comprovando uma redução na dureza.

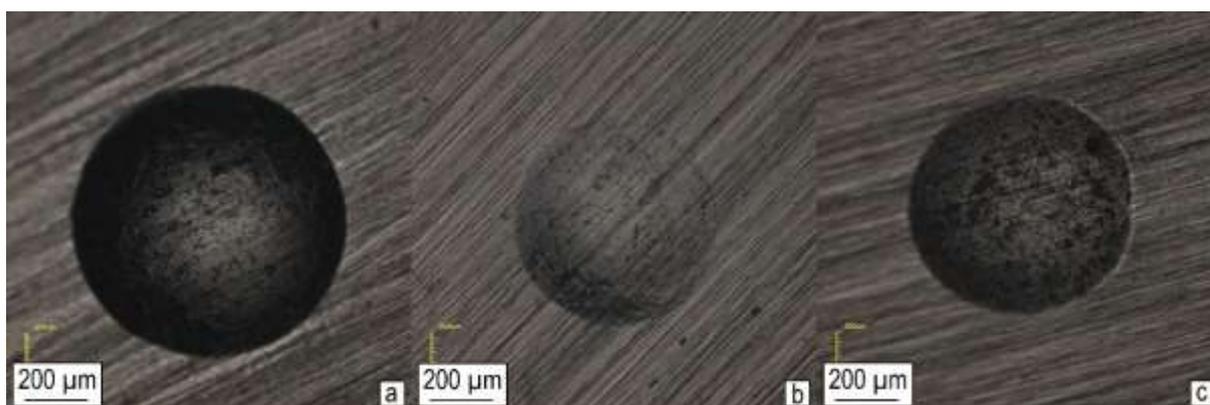


Figura 4.3 - Endentação no corpo de prova sem tratamento térmico (a), temperado (b) e temperado e revenido (c).

O valor da dureza HB para aço SAE 4140 de 1", temperado no óleo e revenido à 205 °C é de 520 HB (MatWeb, 2018). Isso comprova a eficácia do tratamento térmico em endurecer as matrizes.

4.2 Microscopia óptica

A Figura 4.4 representa uma micrografia do aço SAE 4140 como recebido com aumento de 500X e revelada após ataque com Nital 2% por 3 segundos. As regiões claras são os grãos de ferrita α e as regiões escuras correspondem aos grãos de perlita. Segundo Colpaert (2008), o reagente Nital não ataca uniformemente a perlita e, quando o espaçamento é muito fino, as áreas perlíticas aparecem escuras, como observado na micrografia. Pode-se observar também que os grãos têm formato

diferente com alguns mais alongados e outros menos. Isso se deve ao fato que alguns grãos crescem mais que outros e também crescem com orientações diferentes. Pode-se observar também alguns pontos escuros que são pontos de corrosão por pites que ocorreu durante o ataque.

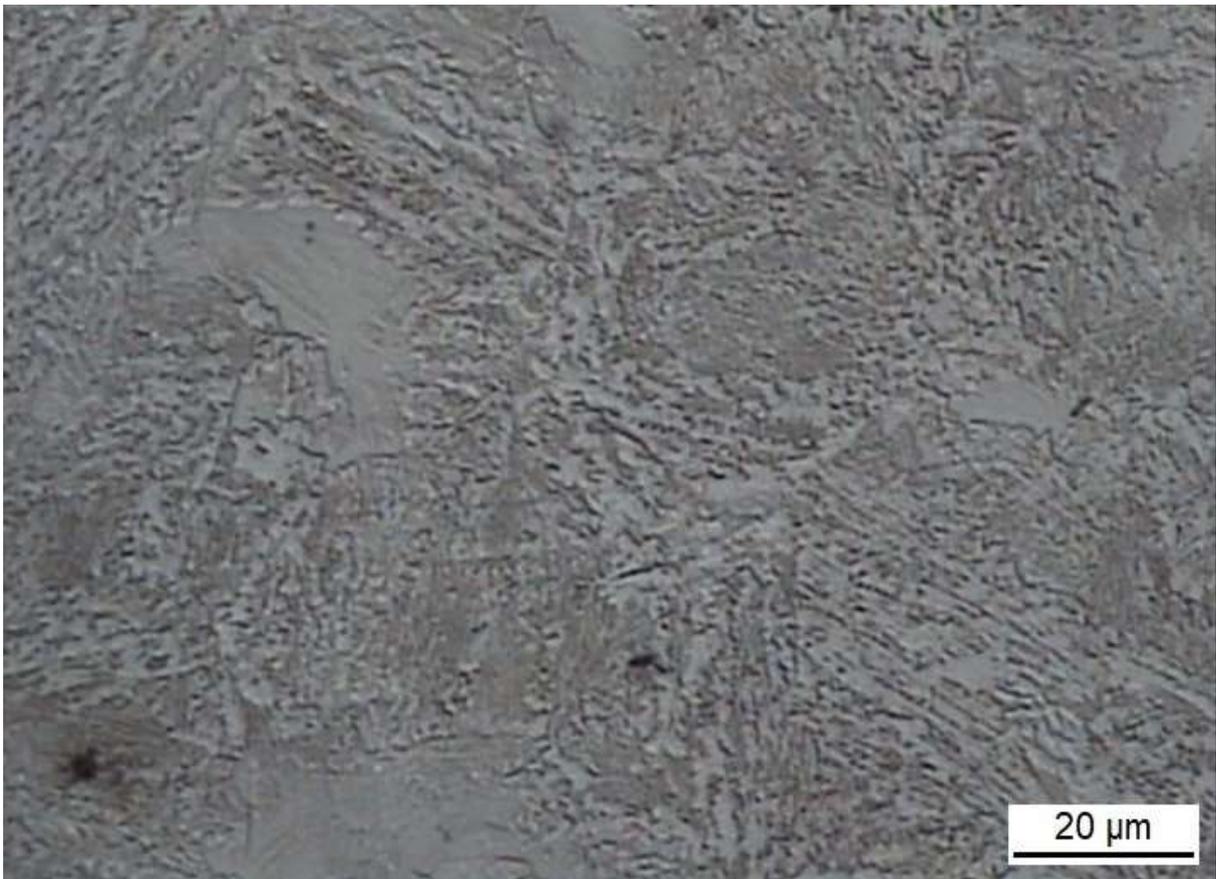


Figura 4.4 - Microestrutura de um aço SAE 4140 como recebido no aumento de 500x. Ataque: Nital 2%.

A Figura 4.5 representa a microestrutura do aço SAE 4140 temperado com aumento de 500X e revelada após ataque com Nital 2% por 6 segundos. Pode-se observar nesta micrografia que a microestrutura é composta de ripas e isto é característico da transformação martensítica, ou seja, a austenita se transformou em uma estrutura supersaturada de carbono. Segundo Chiaverini (2012), os elementos que tendem a estabilizar a austenita aumentam a quantidade de austenita retida no aço. Mesmo com a presença de manganês, que é um elemento austenitizante, não

foi possível identificar essa estrutura na micrografia, sendo isto um indício da efetividade do tratamento de têmpera.

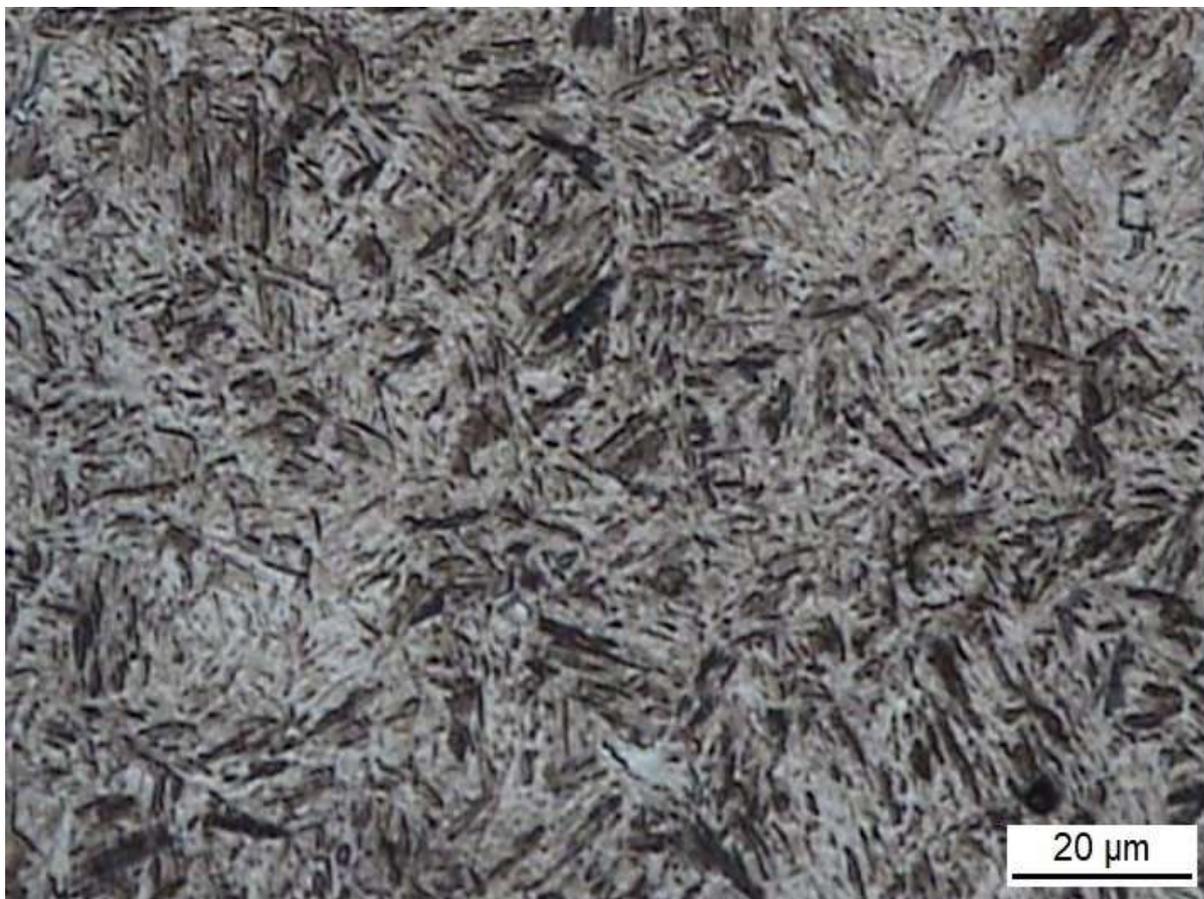


Figura 4.5 - Microestrutura de um aço SAE 4140 temperado no aumento de 500x.
Ataque: Nital 2%.

A Figura 4.6 representa a microestrutura do aço SAE 4140 temperado e revenido com aumento de 500X e revelada após ataque com Nital 2% por 5 segundos. É possível observar a estrutura em ripas da amostra temperada perdendo a definição. Isto se deve às transformações que ocorrem no revenimento onde a martensita começa a se decompor em ferrita e cementita. A alteração da microestrutura é acompanhada da alteração nas propriedades mecânicas do aço. Uma delas é a dureza que é reduzida, como visto na seção anterior.

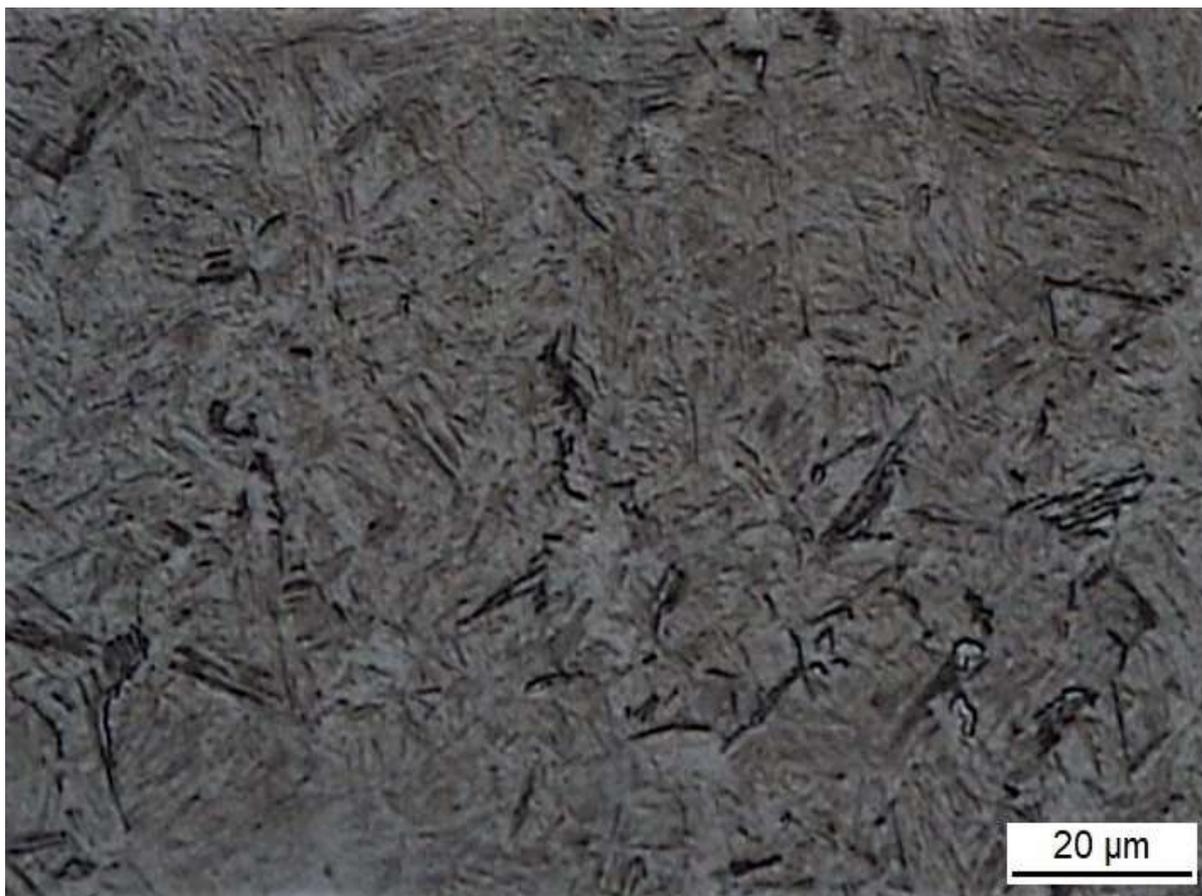


Figura 4.6 - Microestrutura de um aço SAE 4140 temperado e revenido no aumento de 500x. Ataque: Nital 2%.

4.3 Calibração das células de carga

Seguem nas Tabelas 4.6 a 4.10 os resultados das cinco calibrações para as células de carga de 68 mm e de 75 mm e, nas Figuras 4.7 a 4.11, as curvas de calibração correspondentes às tabelas.

Estas curvas são acompanhadas de suas respectivas equações e dos coeficientes de regressão linear (R^2), ferramenta de grande importância para analisar a tendência dos dados obtidos durante as calibrações.

Tabela 4.6 - Resultado da 1ª calibração das matrizes de aperto.

1ª Calibração				
Alvo	68 mm		75 mm	
	Carga (kN)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Carga (kN)	Deformação ($\mu\epsilon$)
5	5,01	190	5,03	92
10	10,07	343	10,05	169
15	15,07	472	15,08	241
20	20,08	582	20,09	311
25	25,09	677	25,09	378
30	30,08	762	30,09	445
35	35,08	843	35,08	510
40	40,1	922	40,1	577

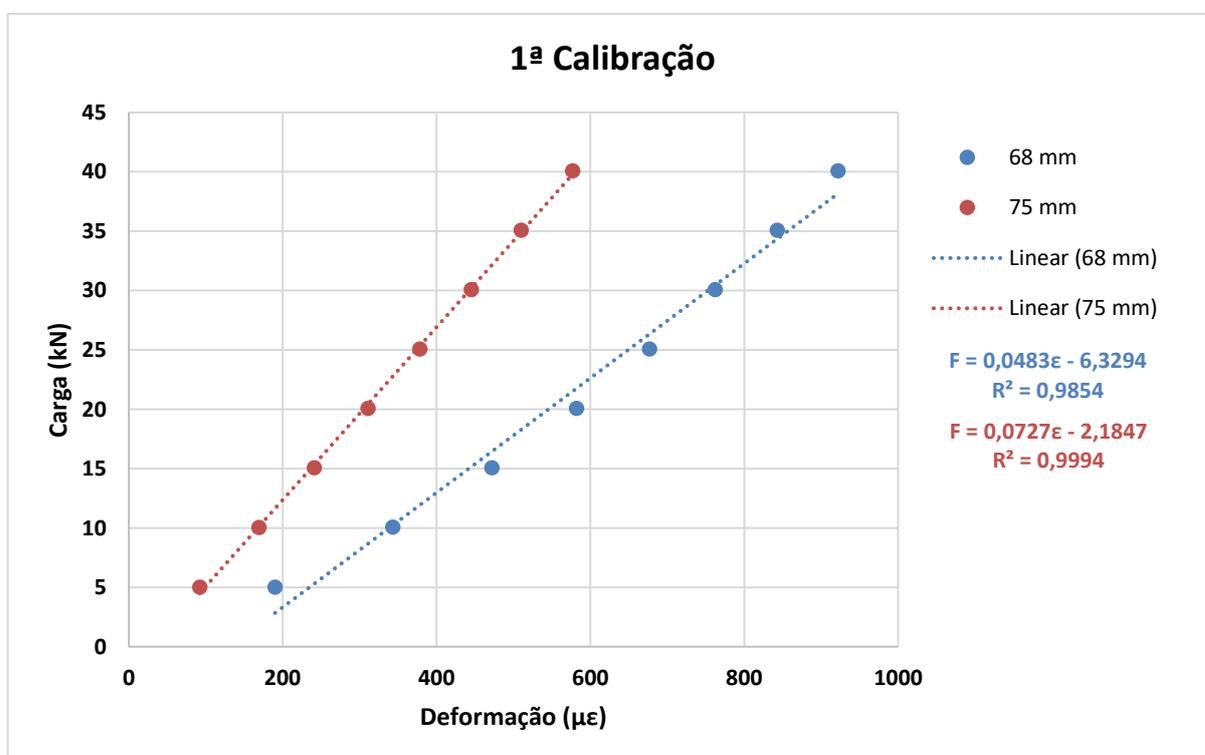


Figura 4.7 - Curvas da 1ª calibração das matrizes de aperto.

Tabela 4.7 - Resultado da 2ª calibração das matrizes de aperto.

2ª Calibração				
Alvo	68 mm		75 mm	
	Carga (kN)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Carga (kN)	Deformação ($\mu\epsilon$)
5	5	183	5,03	95
10	10,06	340	10,05	171
15	15,08	470	15,08	244
20	20,08	581	20,08	313
25	25,08	677	25,08	380
30	30,09	763	30,08	446
35	35,08	844	35,08	512
40	40,09	923	40,08	578

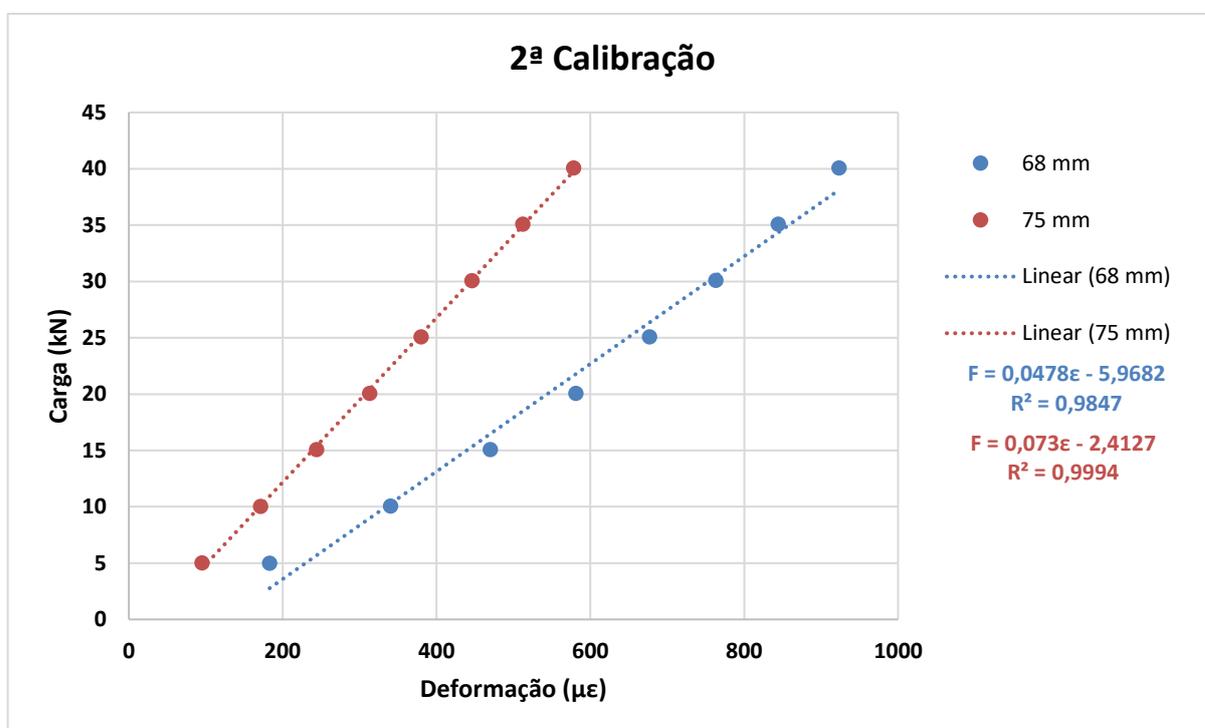


Figura 4.8 - Curvas da 2ª calibração das matrizes de aperto.

Tabela 4.8 - Resultado da 3ª calibração das matrizes de aperto.

3ª Calibração				
Alvo	68 mm		75 mm	
	Carga (kN)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Carga (kN)	Deformação ($\mu\epsilon$)
5	5,025	189	5,03	94
10	10,06	340	10,05	171
15	15,08	470	15,08	242
20	20,08	580	20,08	311
25	25,08	674	25,08	379
30	30,09	760	30,08	446
35	35,08	840	35,08	511
40	40,09	919	40,08	577

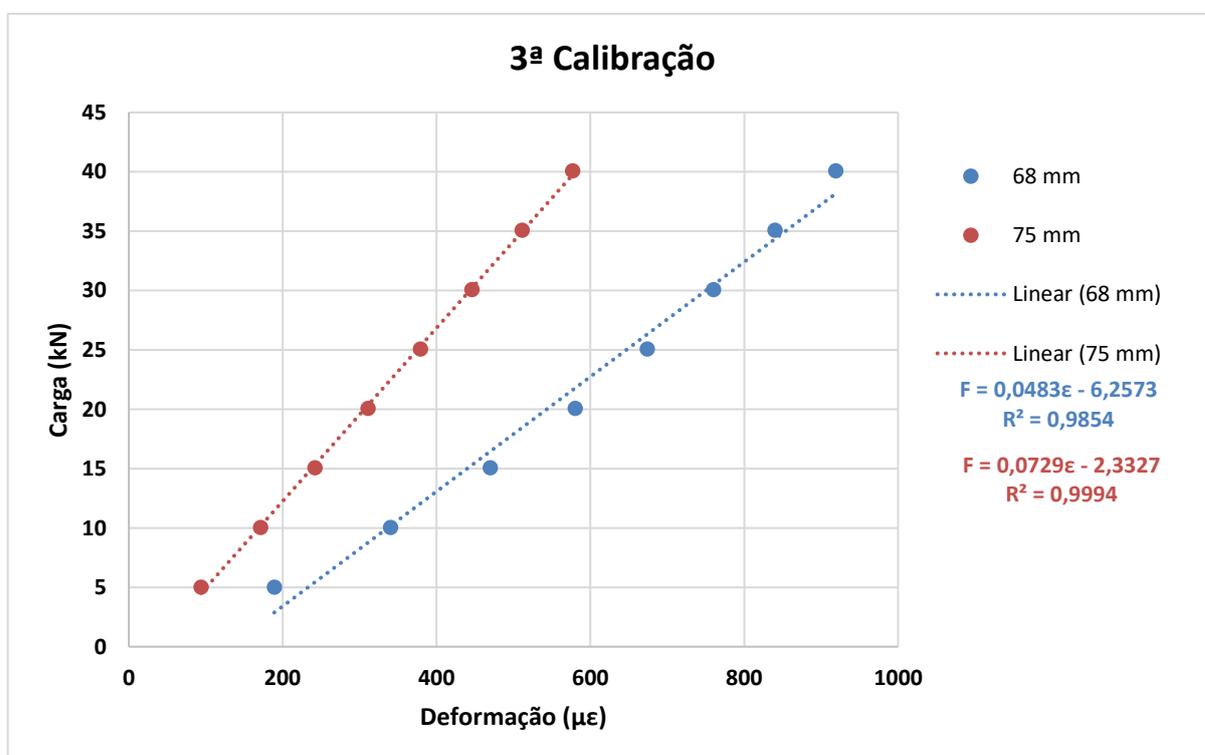


Figura 4.9 - Curvas da 3ª calibração das matrizes de aperto.

Tabela 4.9 - Resultado da 4ª calibração das matrizes de aperto.

4ª Calibração				
Alvo	68 mm		75 mm	
	Carga (kN)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Carga (kN)	Deformação ($\mu\epsilon$)
5	5,03	185	5,03	93
10	10,07	338	10,06	170
15	15,08	467	15,07	241
20	20,08	578	20,08	310
25	25,08	673	25,08	377
30	30,09	758	30,08	444
35	35,08	839	35,08	510
40	40,09	918	40,08	575

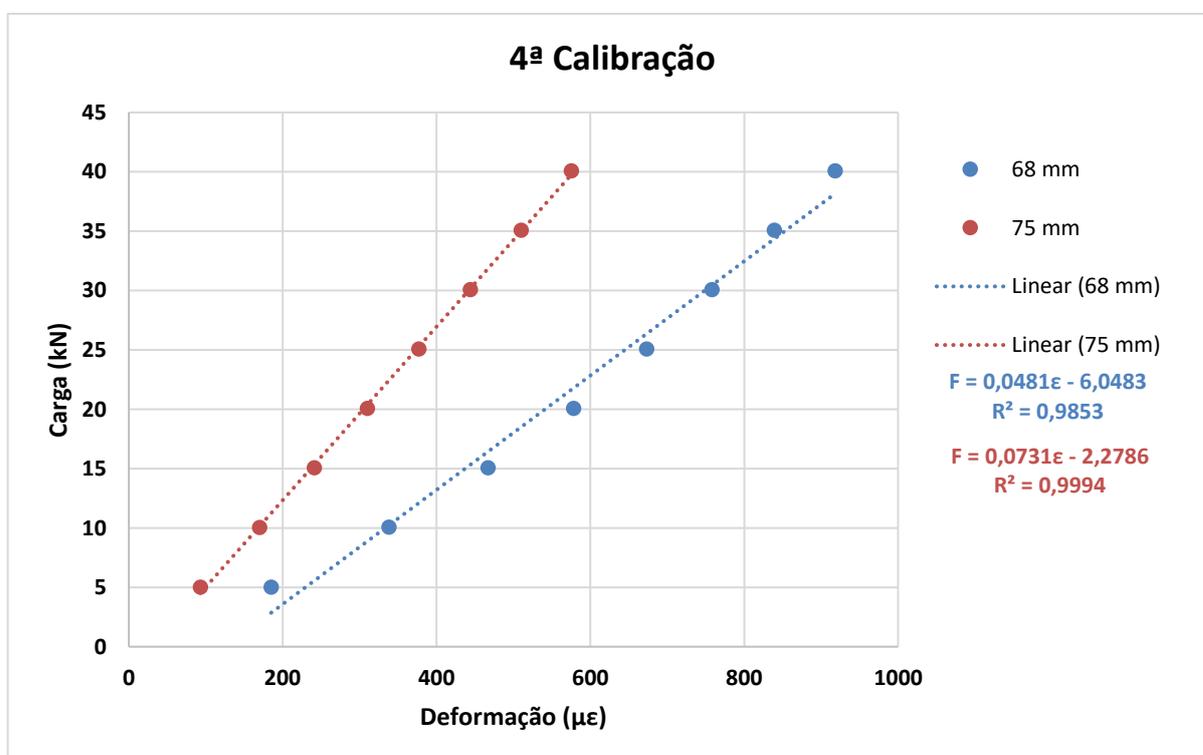


Figura 4.10 - Curvas da 4ª calibração das matrizes de aperto.

Tabela 4.10 - Resultado da 5ª calibração das matrizes de aperto.

5ª Calibração				
Alvo	68 mm		75 mm	
	Carga (kN)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Carga (kN)	Deformação ($\mu\epsilon$)
5	5,03	189	5,03	93
10	10,07	338	10,05	169
15	15,08	467	15,07	240
20	20,08	576	20,07	310
25	25,08	670	25,08	377
30	30,09	755	30,08	443
35	35,09	836	35,08	509
40	40,09	914	40,08	574

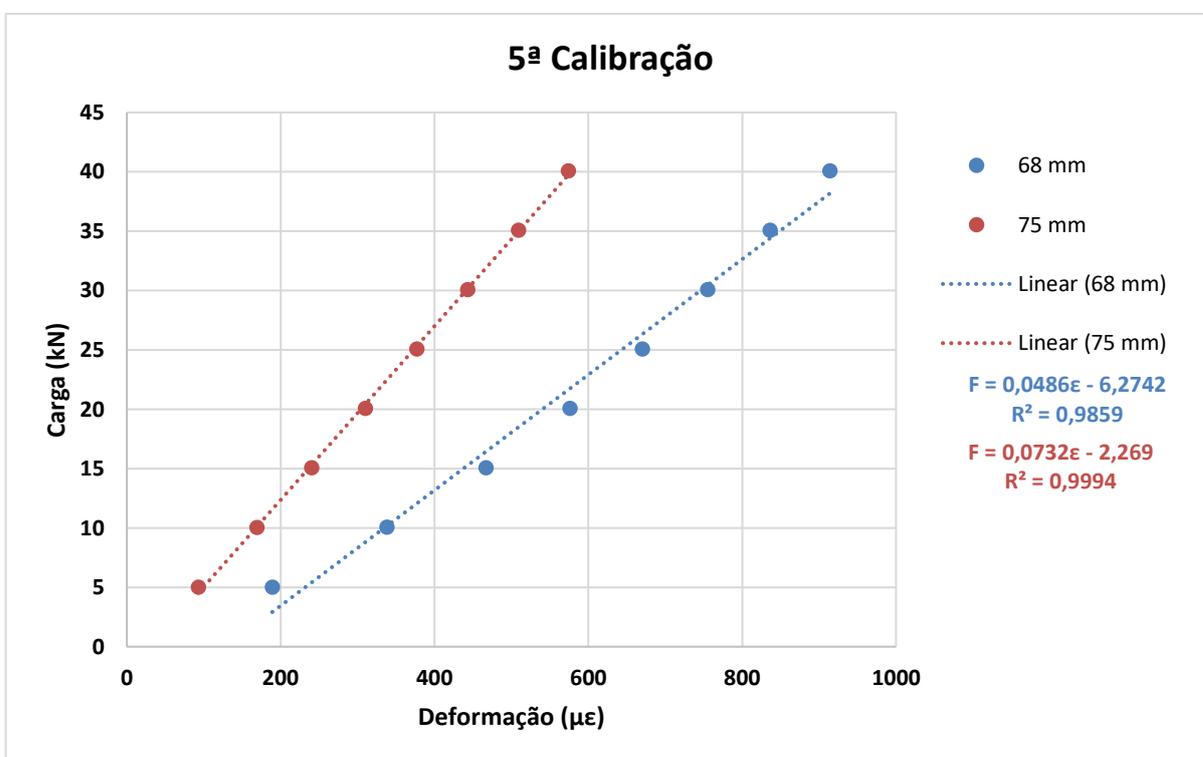


Figura 4.11 - Curvas da 5ª calibração das matrizes de aperto.

Ao observar as curvas de calibrações, nota-se que as curvas da matriz de 68 mm apresentam maiores valores de deformação, em relação à matriz de 75 mm, para uma mesma carga aplicada. Isto não era esperado, pois a rigidez de um corpo é inversamente proporcional ao comprimento, diretamente proporcional à área da seção transversal e ao módulo de elasticidade (Hibbeler, 2010). Como as matrizes foram fabricadas a partir da mesma barra, elas têm a mesma seção transversal e são do mesmo material. Então, esperava-se que a matriz menor apresentasse menores deformações por ser mais rígida.

Uma hipótese seria uma diferença na microestrutura das matrizes que acarretaria em uma diferença de propriedades mecânicas. No entanto, elas são fabricadas do mesmo material e foram tratadas termicamente simultaneamente, ou seja, sob mesmas condições de temperatura e tempo. Portanto, esta hipótese não estaria válida.

Outra hipótese é uma diferença na colagem do strain gage e/ou preparação da superfície onde ele foi colado. Segundo Dally e Riley (1991), o adesivo tem a função de transmitir a deformação da peça para o strain gage, sem causar distorções. Portanto, uma alteração nas condições de colagem e da superfície interfere nas medições da deformação.

Através das curvas obtidas para cada matriz, foram calculadas as médias dos coeficientes angular e linear para, então, determinar a equação da força de aperto. Seguem nas Tabelas 4.11 e 4.12 as equações finais.

Tabela 4.11 - Desenvolvimento da equação da força de aperto para a matriz de 68 mm.

Matriz de 68 mm						
Forma da equação: $y = ax + b$						
Coefficientes	1ª Cal.	2ª Cal.	3ª Cal.	4ª Cal.	5ª Cal.	Média
Angular (a)	0,048	0,048	0,0483	0,0481	0,0486	0,0482
Linear (b)	-6,329	-5,968	-6,257	-6,048	-6,274	-6,1755
Equação para determinação da força de aperto: $F = 0,0482\varepsilon - 6,1755$						

Tabela 4.12 - Desenvolvimento da equação da força de aperto para a matriz de 75 mm.

Matriz de 75 mm						
Forma da equação						
$y = ax + b$						
Coeficientes	1ª Cal.	2ª Cal.	3ª Cal.	4ª Cal.	5ª Cal.	Média
Angular (a)	0,0730	0,0730	0,0729	0,0731	0,0732	0,0730
Linear (b)	-2,1850	-2,4130	-2,3330	-2,2790	-2,2690	-2,2955
Equação para determinação da força de aperto						
$F = 0,0730\varepsilon - 2,2955$						

Também deve ser destacado que a curva de tendência linear para a matriz de 68 mm apresenta um coeficiente de regressão linear (R^2) médio de 0,9854 e, para a matriz de 75 mm, o coeficiente de regressão linear (R^2) foi de 0,9994 para todas as cinco calibrações. Quanto mais próximo de 1 for R^2 , melhor o ajuste linear da linha de tendência, ou seja, os resultados estão mais próximos de um comportamento linear. O fato de os resultados da matriz de 68 mm apresentarem um comportamento mais afastado do linear também pode ser justificado pela hipótese das condições de colagem e da superfície onde o strain gage foi colado.

4.4 Ensaio de torque

As equações determinadas na seção anterior juntamente com a equação do coeficiente de atrito total (Equação 2.25) apresentada na Revisão Bibliográfica foram utilizadas para tratar os dados de deformação e obter as propriedades desejadas. Seguem nas Tabelas 4.13 a 4.16 os resultados obtidos para cada condição de ensaio.

Tabela 4.13 - Resultados obtidos para parafusos ensaiados na condição de torque a seco.

Torque a seco						
Parafuso	D (mm)	T (Nm)	ϵ ($\mu\epsilon$)	F (kN)	K	μ_{tot}
1	11,742	94,956	288	18,729	0,432	0,326
2	11,756	94,967	344	22,817	0,354	0,264
3	11,746	94,987	284	18,437	0,439	0,332
4	11,768	94,900	272	17,561	0,459	0,349
5	11,684	94,775	337	22,306	0,364	0,270
6	11,758	94,798	210	13,035	0,619	0,476
7	11,704	94,793	320	21,065	0,384	0,287
8	11,752	95,043	264	16,977	0,476	0,362
9	11,688	94,786	259	16,612	0,488	0,369
10	11,726	94,996	266	17,123	0,473	0,358

Tabela 4.14 - Resultados obtidos para parafusos ensaiados na condição de torque lubrificado.

Torque lubrificado						
Parafuso	D (mm)	T (Nm)	ϵ ($\mu\epsilon$)	F (kN)	K	μ_{tot}
11	11,770	94,925	460	31,285	0,258	0,187
12	11,732	94,924	286	18,583	0,435	0,329
13	11,718	94,959	380	25,445	0,318	0,235
14	11,742	94,969	329	21,722	0,372	0,278
15	11,760	94,906	362	24,131	0,334	0,249
16	11,722	94,937	394	26,467	0,306	0,225
17	11,748	94,952	384	25,737	0,314	0,232
18	11,754	94,838	531	36,468	0,221	0,158
19	11,732	94,823	457	31,066	0,260	0,189
20	11,722	94,942	504	34,497	0,235	0,168

Tabela 4.15 - Resultados obtidos para parafusos ensaiados na condição de torque a seco com rolamento.

Torque a seco com rolamento						
Parafuso	D (mm)	T (Nm)	ϵ ($\mu\epsilon$)	F (kN)	K	μ_{tot}
21	11,724	94,956	600	22,745	0,356	0,265
22	11,734	94,898	764	30,649	0,264	0,192
23	11,660	94,898	544	20,045	0,406	0,303
24	11,736	94,833	645	24,914	0,324	0,240
25	11,690	94,862	538	19,756	0,411	0,308
26	11,688	94,925	737	29,348	0,277	0,201
27	11,722	94,995	605	22,986	0,353	0,262
28	11,726	94,878	421	14,117	0,573	0,438
29	11,698	95,000	578	21,684	0,375	0,279
30	11,720	94,962	511	18,455	0,439	0,331

Tabela 4.16 - Resultados obtidos para parafusos ensaiados na condição de torque lubrificado com rolamento.

Torque lubrificado com rolamento						
Parafuso	D (mm)	T (Nm)	ϵ ($\mu\epsilon$)	F (kN)	K	μ_{tot}
31	11,720	94,704	665	25,878	0,312	0,230
32	11,724	94,942	709	27,998	0,289	0,212
33	11,734	94,945	887	36,578	0,221	0,158
34	11,738	94,976	766	30,746	0,263	0,191
35	11,740	94,939	536	19,660	0,411	0,310
36	11,750	94,967	923	38,313	0,211	0,150
37	11,642	94,985	719	28,480	0,286	0,208
38	11,706	94,942	947	39,470	0,205	0,145
39	11,676	94,978	733	29,155	0,279	0,203
40	11,732	94,877	547	20,190	0,401	0,301

A partir desses dados apresentados foram calculados os valores médios e o desvio padrão, conforme mostra a Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Média e desvio padrão das propriedades obtidas no ensaio.

Condição	Propriedade								
	F (kN)			K			μ_{tot}		
	Méd.	Desv. Pad.	C.V. (%)	Méd.	Desv. Pad.	C.V. (%)	Méd.	Desv. Pad.	C.V. (%)
Torque a seco	17,999	2,949	16	0,449	0,076	17	0,340	0,061	18
Torque lubrificado	26,102	5,667	22	0,310	0,066	21	0,229	0,052	23
Torque a seco com rolamento	22,214	4,947	22	0,365	0,089	24	0,272	0,071	26
Torque lubrificado com rolamento	28,818	6,900	24	0,283	0,072	25	0,205	0,057	28

O primeiro fato a ser notado é que a variação da força de aperto na condição de torque a seco é de $\pm 16\%$, ou seja, a precisão de aplicação da pré-carga nos ensaios de torque utilizando a máquina de torção, modelo TNS-DW5, é de $\pm 16\%$. Este resultado é coerente com o valor informado na Tabela 2.7 para a precisão da aplicação da pré-carga com o método do giro de porca que é de $\pm 15\%$, já que, ao invés de ser girado a porca, foi girado a cabeça do parafuso.

Ao observar o coeficiente de torque, percebe-se que ele tem o maior valor para a condição de torque a seco, o que era esperado, pois o coeficiente de torque é função dos coeficientes de atrito entre os filetes de rosca e entre a cabeça do parafuso e a arruela e, nessa condição, o atrito é maior. Considerando o torque lubrificado como a condição inicial de aperto, nota-se que o coeficiente de torque diminuiu 31% para a condição de torque lubrificado, 19% para a condição de torque a seco com rolamento e 37% para a condição de torque lubrificado com rolamento.

De acordo com Bickford (2008), 50% do torque aplicado é utilizado para vencer o atrito entre a cabeça do parafuso e a superfície apertada e 40% é utilizado para

vencer o atrito entre os filetes de rosca. Sendo assim a redução do atrito sob a cabeça do parafuso deveria causar uma maior redução no coeficiente de torque. No entanto, ocorreu o contrário e a lubrificação das roscas foi de maior impacto. Fato semelhante também ocorreu no trabalho de Rodrigues (2015), onde também foi utilizada lubrificação das roscas do parafuso e rolamento sob a porca; pois, em seu trabalho, o torque foi aplicado através do giro da porca. Este autor encontrou, para a maior parte dos parafusos testados, um coeficiente de atrito entre os filetes de rosca maior que o coeficiente de atrito sob a porca.

Um comportamento semelhante foi observado para o coeficiente de atrito total. Em relação ao torque a seco, ele reduziu 33% para a condição de torque lubrificado, 20% para a condição de torque a seco com rolamento e 40% para a condição de torque lubrificado com rolamento. O autor deste trabalho optou pelo coeficiente de atrito total pela dificuldade de mensurar os coeficientes de atrito da rosca e sob a cabeça do parafuso. De acordo com a norma ISO 16047 (2005), a fórmula do coeficiente de atrito total é baseada na suposição de que os coeficientes de atrito nas roscas e sob a cabeça do parafuso são equivalentes. Ela também afirma que este coeficiente de atrito é apenas útil para a comparação de diferentes condições de atrito de juntas aparafusadas. Portanto, ele é adequado para este estudo.

Jiang *et al.* (2002) construíram um aparato em que o parafuso não estava apertando uma matriz; sendo apenas alongado, enquanto a porca era rotacionada. Tanto a porca quanto a cabeça do parafuso eram fixados através de garras em forma de U de modo que não havia o giro deles em relação às garras. Neste caso, pode-se assumir como zero o coeficiente de atrito sob a cabeça da porca e anular da equação da forma longa o termo que é representado por este atrito. Assim, torna-se possível calcular o coeficiente de atrito das roscas. Para adaptar este tipo de técnica na máquina de ensaios de torção TNS-DW5, o strain gage deveria ser colado diretamente no parafuso tornando o experimento bastante oneroso ou limitado a ensaiar poucos parafusos. Além disso, deveria ser pensada uma maneira de fixar a castanha móvel para que o alongamento do parafuso ocorresse efetivamente.

A força de aperto se comportou de maneira semelhante ao coeficiente de torque e coeficiente de atrito total, porém de forma inversa. Em relação ao torque a seco, a força de aperto aumentou 31% para a condição de torque lubrificado, 19%

para a condição de torque a seco com o rolamento e 38% para a condição de torque lubrificado com rolamento.

Ao observar na Tabela 4.17 os desvios padrões das propriedades mensuradas, percebe-se que eles são elevados, porém este fato não é incomum. Jiang *et al.* (2005) também observaram um grande espalhamento nos dados mensurados das propriedades friccionais. Eles disseram que isto é um grande problema quando é realizada o controle da pré-carga pelo torque. Bickford (2008) apresenta resultados de fatores de torque para diferentes lubrificantes onde os desvios padrões variam de aproximadamente 12 a 31%.

A Tabela 4.18 resume a variação das três propriedades mensuradas.

Tabela 4.18 - Variação das propriedades em relação à condição de torque a seco.

Condição	Propriedade		
	F	K	μ_{tot}
Torque lubrificado	↑ 31%	↓ 31%	↓ 33%
Torque a seco com rolamento	↑ 19%	↓ 19%	↓ 20%
Torque lubrificado com rolamento	↑ 38%	↓ 37%	↓ 40%

A semelhança entre as variações era esperada, pois o coeficiente de torque é diretamente proporcional ao coeficiente de atrito total e, para parafusos de mesmo diâmetro nominal e sob a aplicação de um mesmo torque, é inversamente proporcional à força de aperto.

4.5 Rugosidade

As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 mostram respectivamente três filetes de rosca de um parafuso como recebido, de um parafuso torquado a seco e de um parafuso torquado com lubrificante observados no microscópio Confocal com um aumento de

430x. Nota-se que, no parafuso torquado a seco, o desgaste dos filetes foi maior que no parafuso torquado com lubrificante, pois, no primeiro, há a presença de rasgos e crateras. Nota-se também que os filetes do parafuso como recebido apresentam irregularidades que provavelmente são oriundas da fabricação e/ou manuseio.

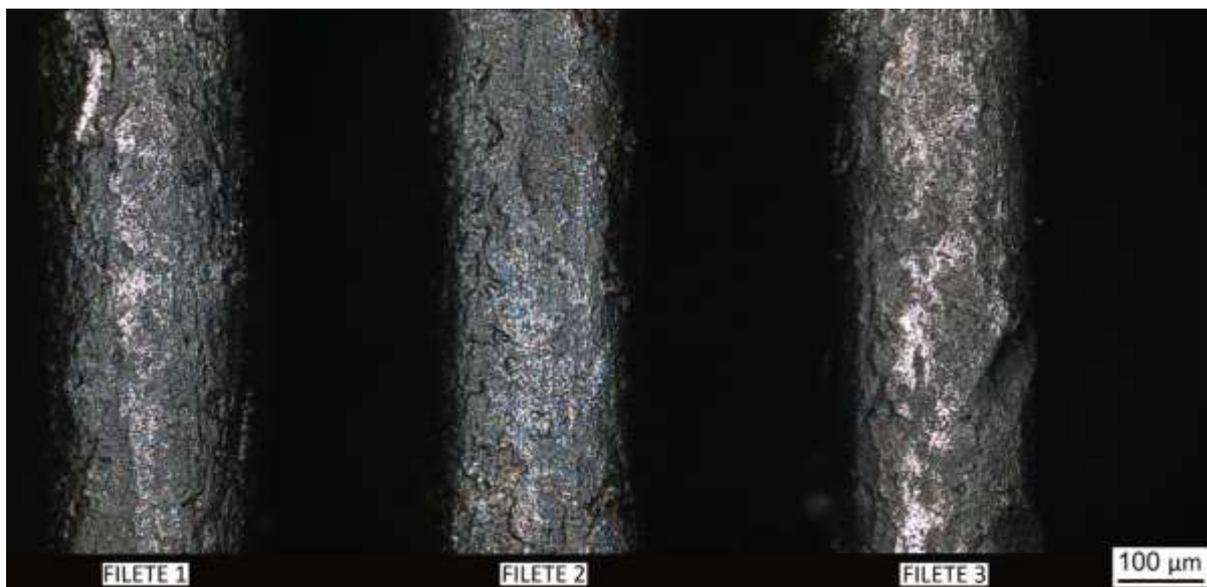


Figura 4.12 - Filetes de rosca de um parafuso como recebido.

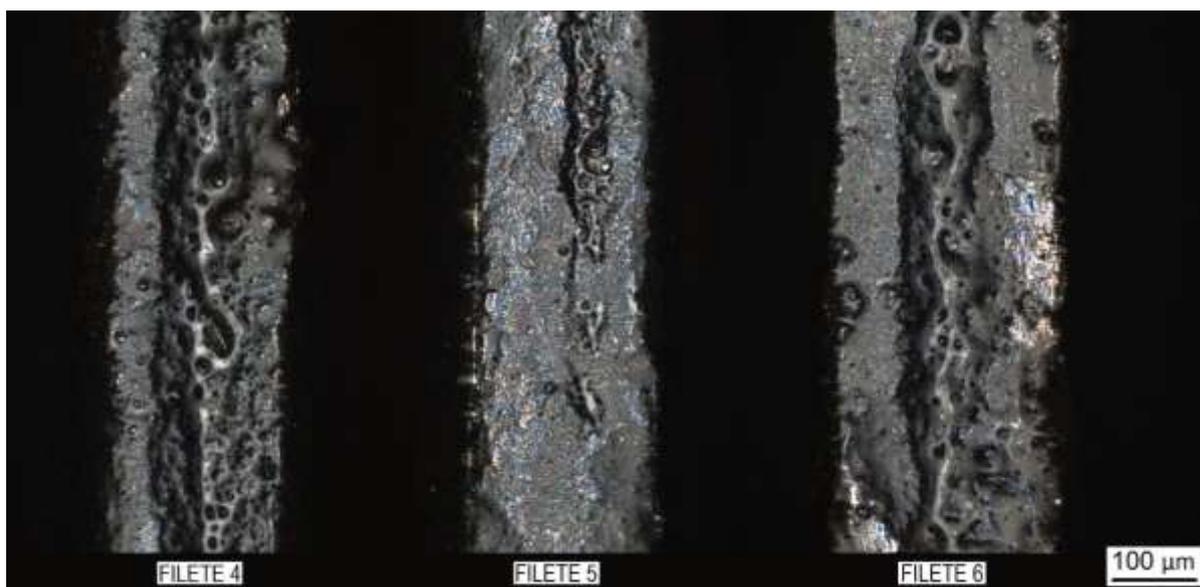


Figura 4.13 - Filetes de rosca de um parafuso torquado a seco.

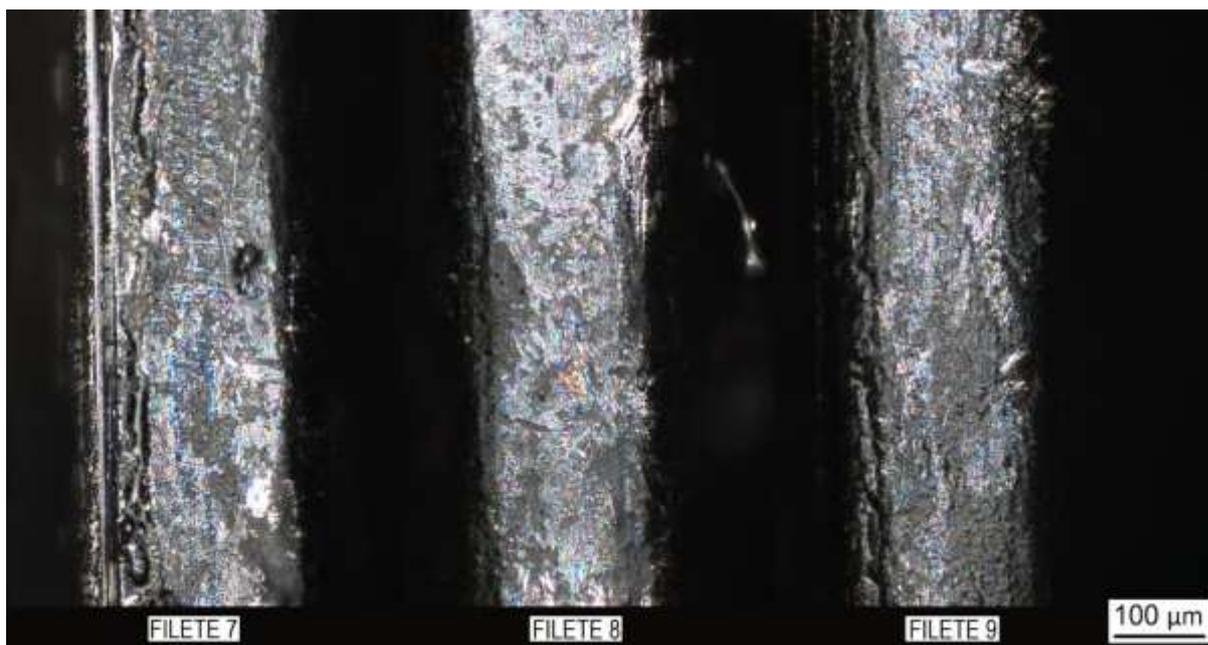


Figura 4.14 - Filetes de rosca de um parafuso torqueado com lubrificante.

A Figura 4.15 representa a arruela como recebida, a arruela utilizada no parafuso que foi torqueado a seco sem rolamento e a arruela utilizada no parafuso que foi torqueado a seco com o rolamento. A face de onde foi realizada a micrografia é a que estava em contato com a cabeça do parafuso durante o ensaio. O desgaste das três arruelas foi semelhante e, no segundo caso, observa-se oxidação do metal.

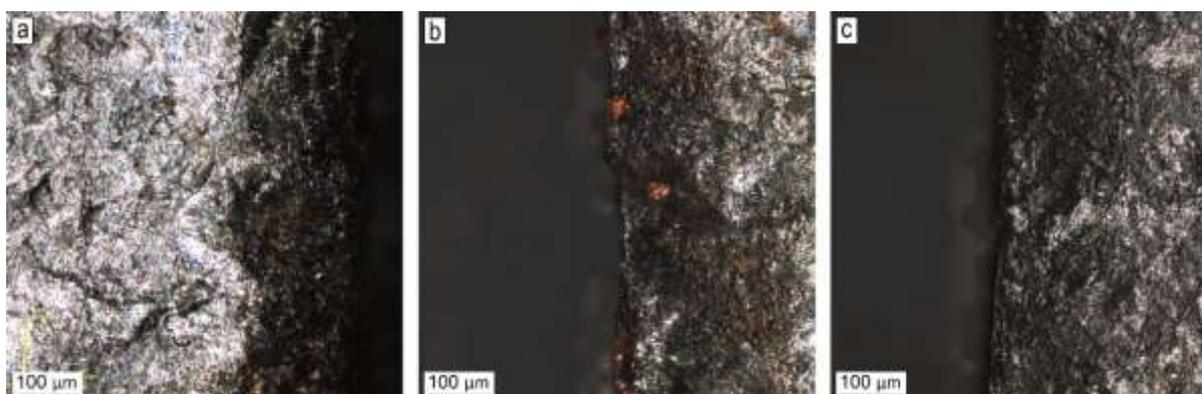


Figura 4.15 - Arruela como recebida (a), arruela utilizada no parafuso que foi torqueado a seco sem rolamento (b) e a arruela utilizada no parafuso que foi torqueado a seco com o rolamento (c).

Os resultados da medição da rugosidade de cada filete para ambos os parafusos são apresentados na Tabela 4.19 e Figuras 4.16 a 4.18. Como já esperado, após observar os filetes, a rugosidade encontrada para os filetes do parafuso torqueado a seco é a maior e isto está ligado à grande quantidade de crateras formadas na superfície do filete. Por exemplo, ao observar as medições de rugosidade para o Filete 6, constata-se que os maiores valores são os das medições 1, 2 e 4. Justamente as que estão na região mais danificada do filete.

Deve ser destacado que a rugosidade dos filetes do parafuso como recebido apresentou maiores valores que a rugosidade dos filetes do parafuso lubrificado. Existem duas hipóteses para explicar o ocorrido. Este fato pode estar relacionado com a variação da condição superficial de parafusos dentro de um mesmo lote. Como mencionado anteriormente, os filetes do parafuso como recebido apresentam defeitos e é provável que os filetes do parafuso lubrificado apresentassem uma condição, antes do torque, melhor que os do parafuso como recebido. A outra hipótese é que a utilização do lubrificante possa prover um melhor acabamento superficial, pois durante o torque, as partículas sólidas que compõem o lubrificante agiriam como uma lixa.

Tabela 4.19 - Rugosidade dos filetes nas três condições de ensaio.

Medição	Condição								
	Como recebido			Torqueado a seco			Torqueado com lubrificante		
	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4	Filete 5	Filete 6	Filete 7	Filete 8	Filete 9
1	0,603	0,572	0,511	0,372	0,607	0,775	0,494	0,514	0,471
2	0,570	0,547	0,522	0,601	0,525	0,734	0,564	0,443	0,575
3	0,563	0,570	0,576	0,571	0,349	0,418	0,425	0,485	0,461
4	0,575	0,542	0,560	0,879	0,459	0,886	0,398	0,441	0,470
5	0,502	0,536	0,520	1,015	0,614	0,361	0,441	0,469	0,420

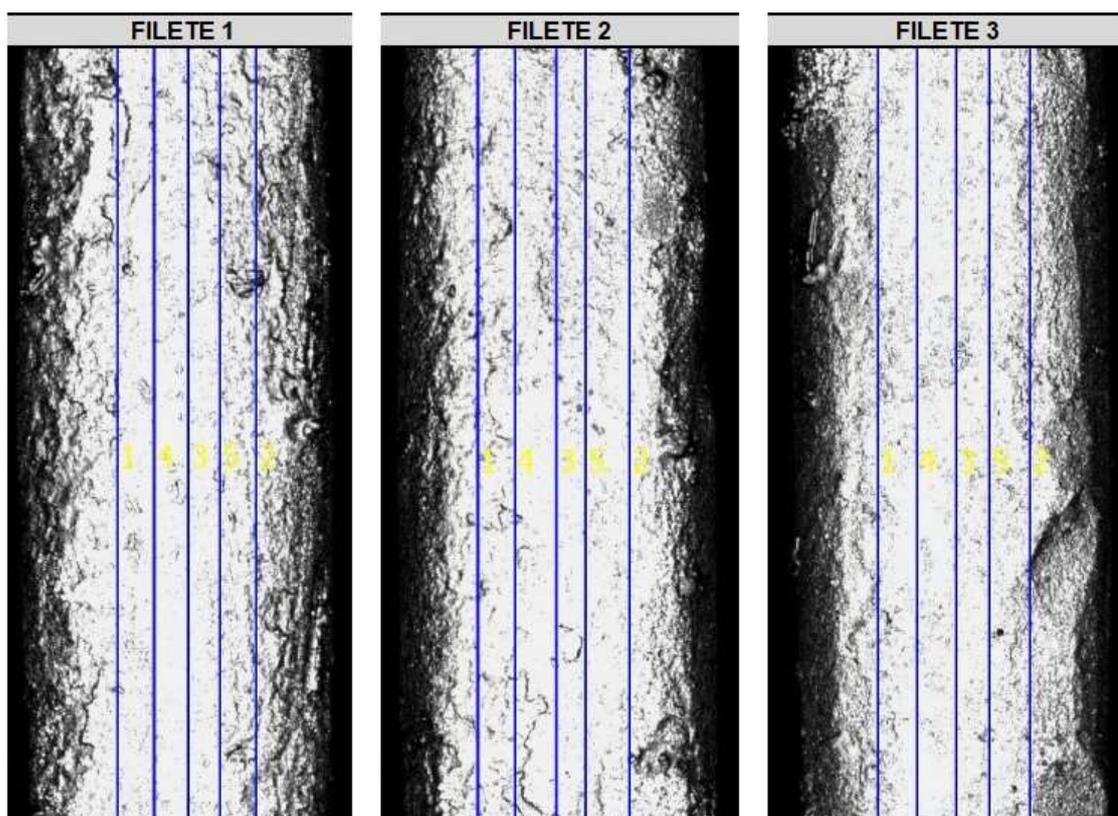


Figura 4.16 - Região das medições de rugosidade em três filetes do parafuso como recebido.

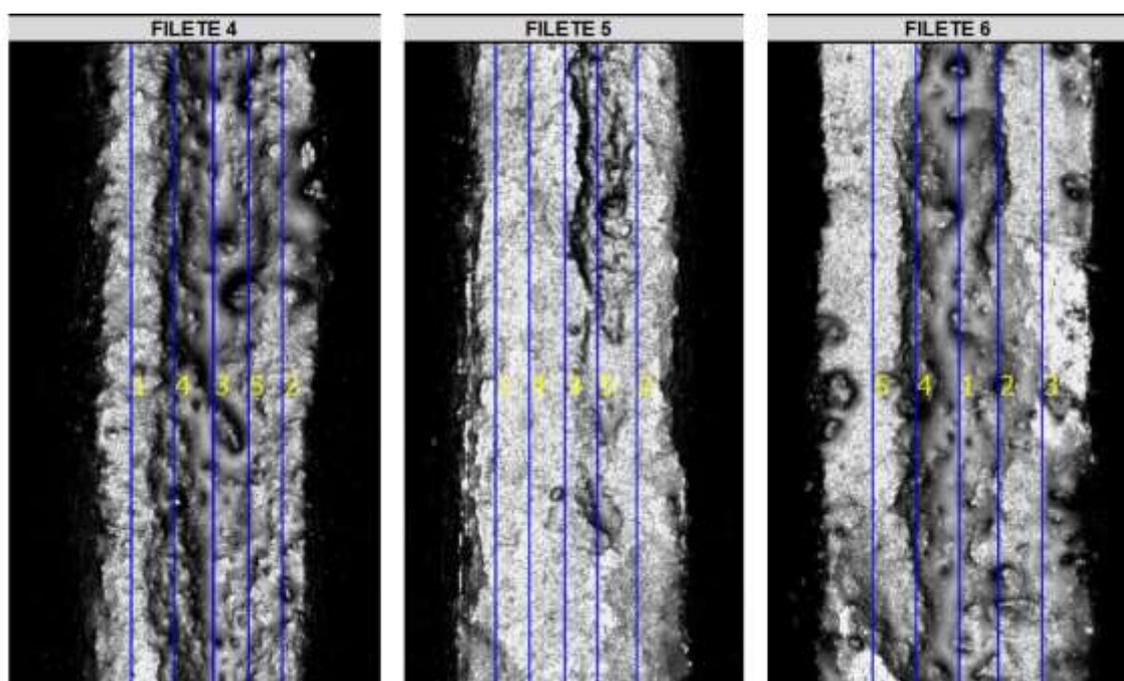


Figura 4.17 - Região das medições de rugosidade em três filetes do parafuso torqueado a seco.

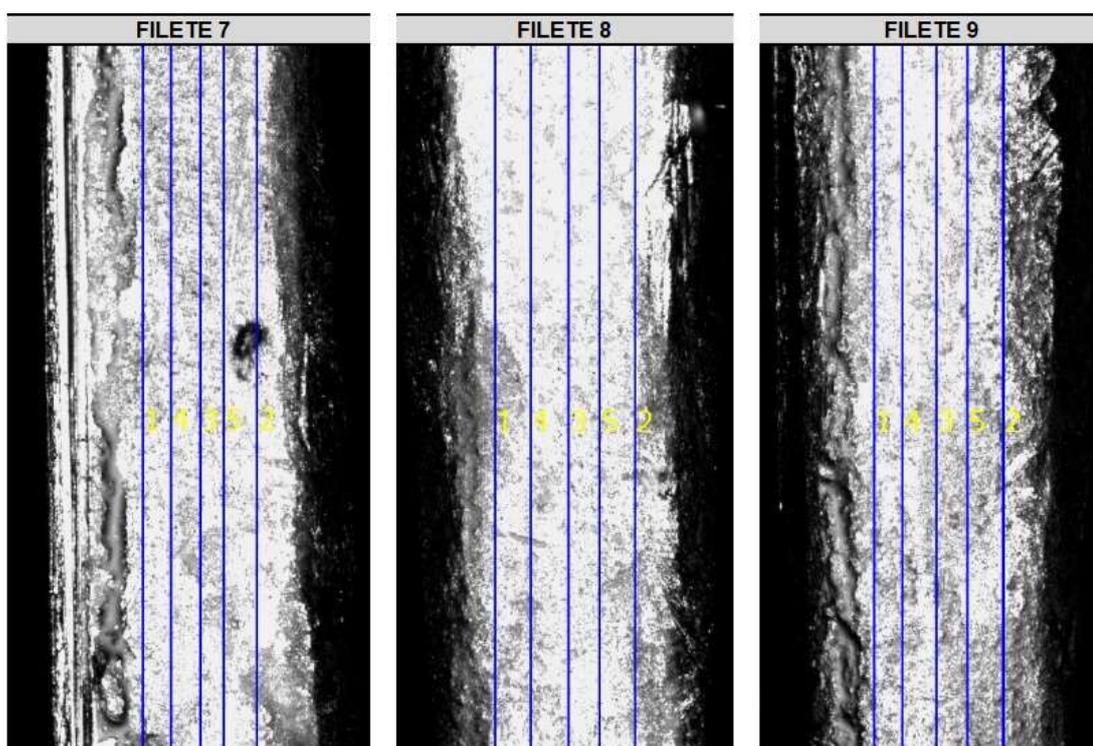


Figura 4.18 - Região das medições de rugosidade em três filetes do parafuso torqueado com lubrificante.

Os resultados da medição da rugosidade das arruelas se encontram na Tabela 4.20 e Figura 4.19. A rugosidade da arruela utilizada do parafuso que foi torqueado a seco sem rolamento é apenas um pouco maior que a rugosidade da arruela do parafuso que foi torqueado a seco com rolamento. Resultado coerente com o fato anteriormente apresentado de que o uso do rolamento causou pouco impacto nas propriedades mensuradas no ensaio de torque.

Tabela 4.20 - Rugosidade das arruelas nas três condições de ensaio.

Medição	Condição		
	Como recebida	Sem rolamento	Com rolamento
1	0,809	1,452	1,277
2	0,864	1,256	1,163
3	0,836	1,122	1,106
4	0,869	1,058	0,883

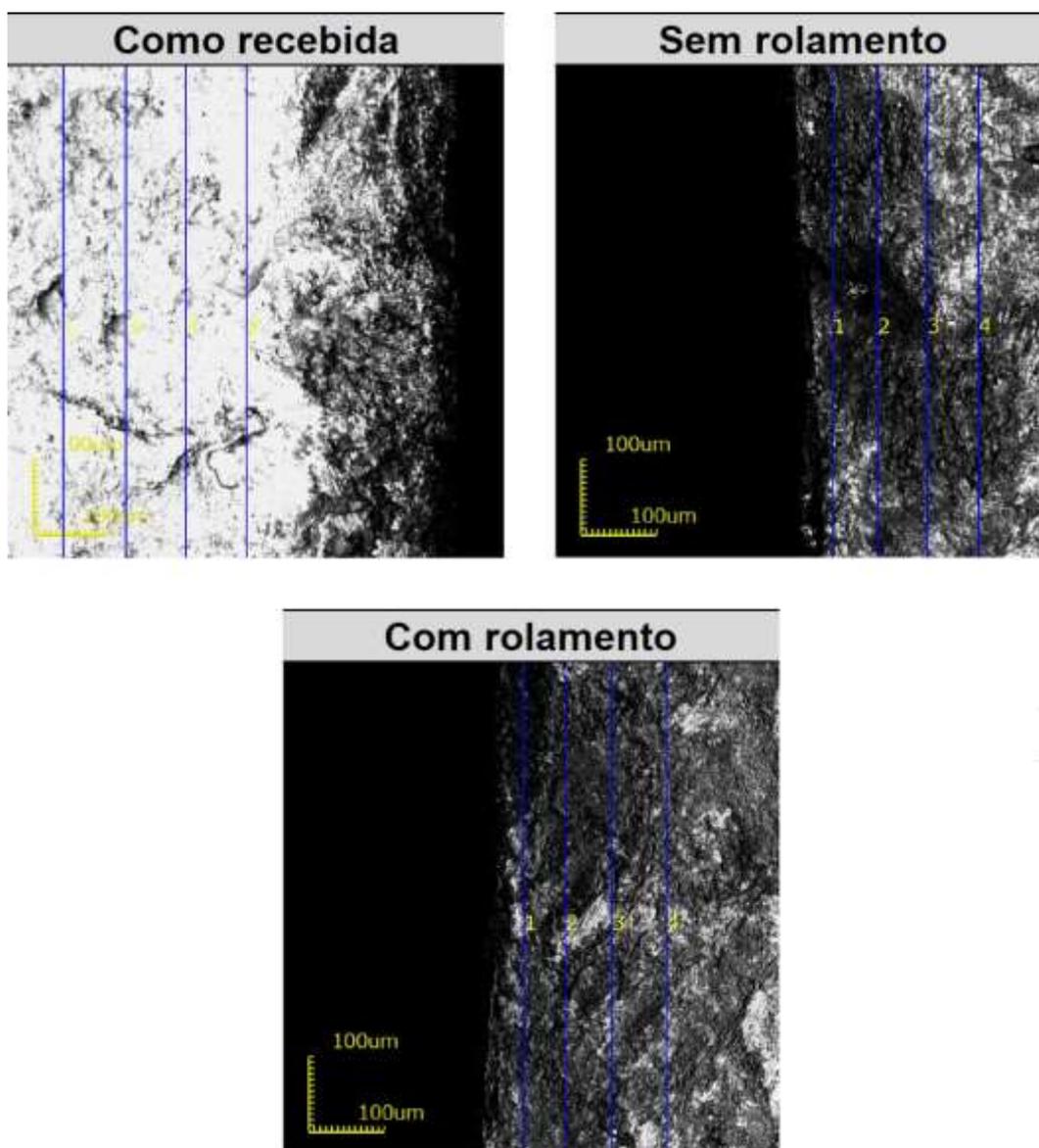


Figura 4.19 - Região das medições de rugosidade das arruelas nas três condições de ensaio.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a máquina de ensaios de torção, modelo TNS-DW5, é adequada para a realização de ensaios de torque em parafusos, pois a precisão da pré-carga obtida foi de $\pm 16\%$, coerente com a precisão de $\pm 15\%$ que métodos de obtenção da pré-carga através do giro da porca apresentam. Além disso, ela não é restrita à parafusos M12, pois a abertura das castanhas permite ensaios de fixadores mais robustos e a máquina é capaz de aplicar torques de até 500 Nm. A máquina também é capaz de fornecer uma velocidade de torqueamento de até 720 °/min e alterar a velocidade durante o ensaio através de uma programação. Com isso, a gama de estudos a serem realizados com essa metodologia torna-se ainda maior.

O ensaio de torque foi realizado com êxito para as quatro condições pré-determinadas. Os resultados obtidos foram coerentes com a literatura consultada. A literatura informa que o maior responsável pela fricção é a superfície de contato da cabeça do parafuso ou da porca, dependendo de qual dos dois é girado para promover o aperto. O fato de a utilização do rolamento ter causado um menor impacto que a utilização do lubrificante parece estar contrário ao que foi encontrado na literatura. Pode-se concluir que o lubrificante foi mais eficiente em reduzir o atrito.

A eficiência do lubrificante foi confirmada através das medições de rugosidade e da micrografia dos filetes e das arruelas. A condição de superfície do parafuso torqueado a seco em relação ao parafuso torqueado com lubrificante apresenta uma diferença muito mais marcante que a condição de superfície da arruela sem rolamento em relação à arruela com rolamento. Complementando, a redução da rugosidade para o parafuso lubrificado é maior que a redução de rugosidade para a arruela com rolamento.

Foi constatado também que o desvio padrão das propriedades mensuradas no ensaio de torque é menor para a condição de torque a seco aumentando para a condição de torque com lubrificante, seguida da condição de torque a seco com rolamento e obtendo o maior valor para a condição de torque lubrificado com rolamento. Isso se deve ao fato de que tanto o uso do lubrificante quanto o uso do rolamento trazem incertezas para o ensaio, pois há um aumento nas variáveis de ensaio, como: uniformidade na aplicação do lubrificante nas roscas, bem como o fato

de que o rolamento é mais um elemento acrescentado à junta aparafusada e, portanto, torna mais difícil o alinhamento de todos os elementos, uniformidade da graxa branca utilizada no rolamento etc.

A calibração das matrizes de aperto ocorreu com êxito e as equações para obtenção da força de aperto através da deformação axial da matriz foram determinadas.

O tratamento térmico nas matrizes também foi realizado com êxito aumentando sua resistência mecânica. Isso foi comprovado por dois caminhos que se complementam: medição da dureza Brinell e avaliação microestrutural. O maior valor de dureza foi para o corpo de prova temperado e isto ocorreu devido à formação da microestrutura martensítica. Após o revenimento, houve uma queda na dureza, no entanto ela ainda permaneceu elevada. Esta queda se deve à decomposição da martensita em ferrita e cementita que foi constatada pela perda de definição das ripas de martensita.

CAPÍTULO 6: SUGESTÕES

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Ensaio de torque com parafusos de classes e dimensões diferentes para consolidar a metodologia pelo aumento de sua abrangência;
- Ensaio de torque com diferentes lubrificantes a fim de estudar a influência deles nas propriedades friccionais;
- Ensaio de torque com velocidades diferentes a fim de estudar a influência da velocidade nas propriedades friccionais;
- Ensaio de torque em condições de aperto e reaperto de parafusos de classes diferentes a fim de estudar a influência dessas condições nas propriedades friccionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

América Aços Especiais - Aço SAE 4140: dureza de fornecimento. Disponível em <http://americaacos.com.br/produtos2.php?id=MTU5>. Acessado em 06/06/2018.

Anônimo (2006) Como surgiu o parafuso. *Revista do Parafuso*, 1. ed.

Anônimo - 40 Year Anniversary - A message from the ITC President. Disponível em <http://www.itctribology.net/itcnews.php?issue=185>. Acessado em 13/06/2018.

Aragão, M. - Estruturas metálicas: ligações parafusadas. Disponível em http://transportes.ime.eb.br/~moniz/metallica/lig_paraf_15.pdf. Acessado em 19/01/2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2002) Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade: ABNT NBR ISO 4287. Rio de Janeiro.

Bhusan, B. (1999) *Principles and Applications of Tribology*. New York: John Wiley & Sons, Inc. XVIIp.

Bickford, J. H. (2008) *Introduction to the design and behavior of bolted joints*. 4. ed. CRC Press. Boca Raton.

Bickford, J. H., Nassar, S. (1998) *Handbook of bolts and bolted joints*. New York. MARCEL DEKKER, INC.

Blau, P. J. (2001) The significance and use of friction coefficient. *Tribology International*, V. 34 (9): pp. 585-591.

Böllhoff (2009) *The manual of fastening technology*. 5. ed. Bielefeld.

Booser, E. R. (1983) *Handbook of lubrication: theory and practice of tribology*. Boca Raton: CRC Press LLC. V. 2. 31p.

Budynas, R.G., Nisbett, J.K. (2011) *Elementos de máquinas de Shigley: projetos de engenharia mecânica*. 8. ed. Porto Alegre. AMGH Editora Ltda.

Callister, W. D. Jr (2008) *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 7. ed. Rio de Janeiro. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. 99p.

Chiaverini, V. (2012) Aços e ferros fundidos. 7. ed. São Paulo. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 59p.

Croccolo, D., Massimiliano, D. A., Fini, S., Olmi, G. (2017) Tribological properties of bolts depending on different screw coatings and lubrications: an experimental study. *Tribology International*. V. 107: pp. 199-205.

Croccolo, D., Massimiliano, D. A., Vincenzi, N. (2010) Failure analysis of bolted joints: effect of friction coefficients in torque–preloading relationship. *Engineering Failure Analysis*. V. 18 (1): pp. 364-373.

Dally, J. W., Riley, W. F. (1991) *Experimental stress analysis*. 3. ed. New York. McGraw-Hill. pp. 250-253.

Deutsches Institut für Normung (1982) Form deviations, Concepts, Classification system: DIN 4760. Em: Stoeterau, R. L. (2004) Tribologia (Apostila). Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC: Departamento de engenharia mecânica.

Eccles, W. (2010) *Tribological aspects of the self-loosening of threaded fasteners*. Ph.D. Thesis. University of Central Lancashire. Preston.

Ettl, P., Schmidt, B. E., Schenk, M., Laszlo, I., Haeusler, G. (1998) Roughness parameters and surface deformation measured by coherence radar. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. V. 3407: pp. 133-140.

Fastener material. Disponível em <http://machinedesign.com/basics-design/fastener-materials>. Acessado em 24/01/2017.

Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M., Soliman, H. H. (2002) Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*. V.123: pp. 133-145.

Garcia, R. (2007) Conceitos gerais sobre torque e processos de torque/ parte 1. *Revista do parafuso*. São Bernardo do Campo. Editora Milatias Ltda. v. 07.

Garcia, A., Spim, J. A., Santos, C. A. (2012) *Ensaio dos materiais*. 2. ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 4p.

Gentil, V. (2011) *Corrosão*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Ltda., 62p.

Herring, D. H. (2016) The use of coatings on fasteners. Disponível em <http://www.industrialheating.com/blogs/14-industrial-heating-experts-speak-blog/post/92752-the-use-of-coatings-on-fasteners>. Acessado em 26/01/2017.

Hibbeler, R. C. (2005) *Estática: mecânica para engenharia*. 10. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil. pp. 322-371.

Hibbeler, R. C. (2010) *Resistência dos materiais*. São Paulo: Pearson Education do Brasil. 7. ed. pp. 85-125.

Hutchings, I. M. (1992) *Tribology: friction and wear of engineering materials*. London: Edward Arnold.

International Organization for Standardization (2005) Fasteners - Torque/clamp force testing: ISO 16047. Switzerland.

International Organization for Standardization (2009) 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: ISO 898-1. Switzerland.

Jiang Y., Zhang, M., Park, T.-W., Lee, L.-H. (2002) An experimental investigation of frictional properties of bolted joints. *ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conference*. n. PVP2002-1083, Vancouver, pp. 59-66.

Krauss, G. (1995) Heat Treated Martensitic Steel: Microstructural System for Advanced Manufacture, *ISIJ International*. V. 35 (4): pp. 349-359.

Kulak, G. L., Fisher, J. W., Struik, J.H.A (2001) *Guide to design criteria for bolts and riveted joints*. 2. ed. Chicago. Research Council on Structural Connections.

Levinson, I. J. (1968) *Introduction to mechanics*. Em: Stoeterau, R. L. (2004) *Tribologia (Apostila)*. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC: Departamento de engenharia mecânica.

MatWeb - AISI 4140 Steel, oil quenched, 205°C (400°F) temper, 25 mm (1 in.) round. Disponível em <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=757684bcff76455eaf94b20102617988&ckck=1>. Acessado em 06/06/2018.

Morgan, R. C., Henshall, J. L. (1996) The torque-tension behaviour of 22 x 1.5 mm bolts for fixing spigot-located wheels on heavy commercial vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. V. 210 (34): pp. 209-214.

Muniz, J. M. (2007) *Fenômenos Tribológicos intrínsecos ao travamento de juntas de engenharia aparafusadas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) - São Paulo - SP, Universidade de São Paulo - USP, pp. 26-27.

Norton, R. L. (2013) *Projetos de máquinas: uma abordagem integrada*. 4. ed. Porto Alegre. Bookman Editora Ltda.

Oberg, E., Jones, F. D., Horton, H. L., Ryffel, H. H. (2008) *Machinery's handbook*. 28. ed. New York: Industrial Press Inc.

Pauli, E. A., Uliana, F. S., Carvalho, J. G., Pontes, J. R. M., Rocha, T. D., Oliveira, W. (1996) *Noções básicas de elementos de máquinas*. Vitória: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI / Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST. pp. 6-28.

Pizzio, E. (2005) *Avaliação da vida em fadiga de uniões parafusadas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, pp. 6-8.

Rolin, A. S. (2014) *Avaliação do comportamento mecânico e tribológico de parafusos de classe 10.9 para emprego em guindaste off-shore*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, pp. 57-59.

Rodrigues, C. R. (2015) *Avaliação do comportamento mecânico e tribológico de parafusos da classe 10.9 para emprego estrutural*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, pp. 46-48.

Roy, R. K. (2014) Design and behavior of bolted joints. Bloomfield Hills. Nutek, Inc.

Sakai, T. (1978) The friction coefficient of fasteners. *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*. V. 21 (152): pp. 333-340.

SKF - Thrust ball bearings: 51202 dimensions. Disponível em <http://www.skf.com/ph/products/bearings-units-housings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/single-direction/index.html?designation=51202>. Acessado em 16/07/2018.

Souza, S. A. (2014) *Ensaaios mecânicos de materiais metálicos*. São Paulo. Editora Blucher. 2p. 1p.

Suski, C.A. (2007). Estudo da Influência na Adição de Boro nos Aços de Baixo Carbono. O parafuso.

Van Vlack, L. H. (2014) *Princípio de ciência dos materiais*. São Paulo. Editora Blucher. 2p.