

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E  
TRIBOLÓGICO DE DOIS PARAFUSOS DA CLASSE 10.9 ASTM

**LARYCE SOUZA DA SILVA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY  
RIBEIRO – UENF

Campos dos Goytacazes – RJ

Abril– 2017

# AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E TRIBOLÓGICO DE DOIS PARAFUSOS DA CLASSE 10.9 ASTM

**LARYCE SOUZA DA SILVA**

“Dissertação 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 Ciências dos Materiais.”

Orientador: Prof. PhD. Eduardo Atem de Carvalho

Campos dos Goytacazes – RJ

Abril – 2017

# AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E TRIBOLÓGICO DE DOIS PARAFUSOS DA CLASSE 10.9 ASTM

**LARYCE SOUZA DA SILVA**

“Dissertação 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 Ciências dos Materiais.”

Aprovada em 10 de Abril de 2017.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Djalma Souza (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) – LAMAV-UENF

---

Prof<sup>a</sup>. Márcia Giardinieri de Azevedo (D.Sc., Engenharia Química) – LAMAV-UENF

---

Prof. Said Sérgio Martins Auatt (D.Sc., Ciências de Engenharia) – ISECENSA

---

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (PhD, Engenharia Mecânica) - LAMAV-UENF

Orientador

## SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
ÍNDICE DE QUADROS .....	VIII
ÍNDICE DE TABELAS .....	IX
RESUMO.....	X
ABSTRACT .....	XI
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	13
1.1 - ASPECTOS GERAIS .....	13
1.2 - OBJETIVOS .....	14
1.3- JUSTIFICATIVAS.....	14
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1 – PARAFUSOS .....	15
2.2 - PORCAS E ARRUELAS .....	20
2.2.1 - PORCAS .....	20
2.2.2 - ARRUELAS.....	21
2.2 - JUNTAS APARAFUSADAS .....	23
2.3 - AÇOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE PARAFUSOS.....	24
2.3.1 - AÇOS PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA .....	24
2.3.2 - AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL).....	25
2.3.3 - AÇO AISI/SAE 4140.....	27
2.3.4 - AÇO AISI/SAE 5140.....	29
2.4 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PARAFUSOS.....	29
2.4.1 - ENSAIOS MECÂNICOS EM PARAFUSOS .....	30
2.4.1.1 - ENSAIO DE TRAÇÃO.....	29
2.4.1.2 - ENSAIO DE DUREZA .....	33
2.5– MEDIÇÃO DE TORQUE .....	37
2.5.1 - CONTROLE DE ÂNGULO DE APERTO.....	39
2.5.2 - CONTROLE DE APERTO AO ESCOAMENTO .....	40
2.5.3- TENSIONAMENTO .....	40
2.6 - TRIBOLOGIA .....	41
2.7 - RUGOSIDADE .....	43
2.8- ATRITO NOS PARAFUSOS .....	47
2.9 - LUBRIFICAÇÃO.....	48
2.10 - ANÁLISE DIMENSIONAL E SEMELHANÇA .....	49

2.11 – MATERIAIS E MÉTODOS (ROLIN, 2014 / RODRIGUES, 2015).....	50
2.11.1– ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....	50
2.11.2 - ENSAIO DE DUREZA .....	51
2.11.3 - MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE .....	51
2.11.4 - MEDIÇÃO DE TORQUE .....	51
2.11.5 - ENSAIO DE TRAÇÃO.....	54
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	57
3.1 – ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....	58
3.2 – MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.....	58
3.3 - ENSAIO DE TRAÇÃO.....	58
3.4 - ENSAIO DE DUREZA.....	59
3.4 – MEDIÇÃO DO TORQUE .....	59
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
4.1 - ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....	62
4.2 - ENSAIO DE DUREZA.....	63
4.3 - MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE .....	63
4.4 - MEDIÇÃO DE TORQUE .....	64
4.4.1 - MÉDIA ENSAIOS DE TORQUE DE 111NM (M12 X 1,75) E 2034NM (1.1/4” X 7UNC) LUBRIFICADO À 75%DO LIMITE DE ESCOAMENTO DO MATERIAL DO PARAFUSO.....	64
4.4.2 - MÉDIA ENSAIOS DE TORQUE DE 133NM (M12 X 1,75) E 2441NM (1.1/4” X 7 UNC) LUBRIFICADO À 90%DO LIMITE DE ESCOAMENTO DO MATERIAL DO PARAFUSO.....	68
4.4.3 - MÉDIA ENSAIOS DE TORQUE DE 133 NM (M12 X 1,75) E 2441 NM (1.14” X 7 UNC) SECO À 90%DO LIMITE DE ESCOAMENTO DO MATERIAL DO PARAFUSO.....	71
4.5 - ENSAIO DE TRAÇÃO.....	74
CAPÍTULO 5–CONCLUSÕES .....	75
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES .....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77
ANEXOS .....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – PARAFUSO .....	14
FIGURA 2.2 - PADRONIZAÇÃO DA NOMENCLATURA DAS DIMENSÕES DE PARAFUSOS .....	17
FIGURA 2.3 - COMPOSIÇÃO DE UM PARAFUSO .....	16
FIGURA 2.4 - IDENTIFICAÇÃO DO PASSO DE ROSCA ATRAVÉS DE PENTE DE ROSCA E PAQUÍMETRO .....	17
FIGURA 2.5 – TIPOS DE PORCAS .....	20
FIGURA 2.6 – TIPOS DE ARRUELAS .....	21
FIGURA 2.7 - REPRESENTAÇÃO DAS FORÇAS QUE ATUAM SOBRE UMA JUNTA APARAFUSADA .....	22
FIGURA 2.8 - DIAGRAMA TTT PARA O AÇO AISI 4140 .....	27
FIGURA 2.9 - CURVATENSÃO X DEFORMAÇÃO .....	29
FIGURA 2.10 – TENSÃO DE ESCOAMENTO .....	31
FIGURA 2.11 - EXEMPLO DE CORPOS DE PROVA DE SEÇÃO REDUZIDA.....	33
FIGURA 2.12 - TIPOS DE ENSAIOS DE DUREZA, DESTACANDO AS CARACTERÍSTICAS DE PENETRAÇÃO .....	35
FIGURA 2.13 - APLICAÇÃO DE TORQUE MANUAL .....	37
FIGURA 2.14 - APLICAÇÃO HIDRÁULICA DE TORQUEAMENTO .....	38
FIGURA 2.15 - MICROGRAFIA ELETRÔNICA DE AMOSTRA DE COBRE POLIDA MECANICAMENTE.....	42
FIGURA 2.16 - MICROGRAFIA ELETRÔNICA DE OURO ELETRO DEPOSITADO EM LATÃO .....	43
FIGURA 2.17 - PERSPECTIVA DE RUGOSIDADES EM FUNÇÃO DA SUPERFÍCIE .....	43
FIGURA 2.18 - DEFINIÇÃO DA RUGOSIDADE RA .....	44
FIGURA 2.19 - DEFINIÇÃO DA RUGOSIDADE $R_p$ E $R_t$ .....	46
FIGURA 2.20 - MICROSCÓPIO OLYMPUS CONFOCAL.....	50
FIGURA 2.21 - TORQUEADEIRA ELÉTRICA.....	51
FIGURA 2.22 - SOQUETE DIGITAL .....	51
FIGURA 2.23 - ARRUELA SENSORA .....	52
FIGURA 2.24 - EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DE TORQUE .....	53
FIGURA 2.25 - INSTRON, MODELO 8852 – LAMAV .....	54

FIGURA 2.26 - POSIÇÃO DE EXTRAÇÃO DE CORPO DE PROVA DE TRAÇÃO. 2014) .....	54
FIGURA 2.27 – DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA DO PARAFUSO 1 ¼ IN X 7 UNC .....	55
FIGURA 2.28 - DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA DO PARAFUSO M12 X 1,75 ..	55
FIGURA 3.1 – VISTA ISOMÉTRICA DOS PARAFUSOS 1.1/4” X 7 UNC E M 12 X 1,75 .....	56
FIGURA 3.2 – PARAFUSOS 1.1/4” X 7 UNC E M12 X 1,75 EM UMA MESMA VISTA	56
FIGURA 3.3 - MEDIÇÕES E ANÁLISES COMPARADAS NESSE ESTUDO .....	57
FIGURA 4. 1 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO VERSUS CICLO DE APERTO NOS PARAFUSOS M12 X 1,75 E 1.1/4” X 7 UNC .....	63
FIGURA 4. 2 - VARIAÇÃO DO FATOR K VERSUS CICLO DE APERTO NOS PARAFUSOS M12 X 1,75 E 1.1/4” X 7 UNC .....	64
FIGURA 4. 3 - VARIAÇÃO DA FORÇA VERSUS CICLO DE APERTO NOS PARAFUSOS M12 X 1,75 E 1.1/4” X 7 UNC .....	66
FIGURA 4. 4 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO VERSUS CICLO DE APERTO NOS PARAFUSOS M12 X 1,75 E 1.1/4” X 7 UNC .....	67
FIGURA 4. 5 - VARIAÇÃO DO FATOR K VERSUS CICLO DE APERTO NOS PARAFUSOS M12 X 1,75 E 1.1/4” X 7 UNC .....	68
FIGURA 4. 6 - VARIAÇÃO DA FORÇA VERSUS CICLO DE APERTO NOS PARAFUSOS M12 X 1,75 E 1.1/4” X 7 UNC .....	69
FIGURA 4. 7 -VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO VERSUS CICLO DE APERTO NOS PARAFUSOS M12 X 1,75 E 1.1/4” X 7 UNC .....	70
FIGURA 4. 8 - VARIAÇÃO DO FATOR K VERSUS CICLO DE APERTO NOS PARAFUSOS M12 X 1,75 E 1.1/4” X 7 UNC .....	71
FIGURA 4. 9 -VARIAÇÃO DA FORÇA VERSUS CICLO DE APERTO NOS PARAFUSOS M12 X 1,75 E 1.1/4” X 7 UNC .....	72
FIGURA 4. 10 – CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO E RESPECTIVOS PARÂMETROS .....	73

## ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 2. 1 – ESPECIFICAÇÃO DE ROSCA.....	18
QUADRO 2. 2 - ELEMENTOS DE LIGA EM UM AÇO ARBL .....	25
QUADRO 2. 3 - RUGOSIDADE RA INDICADA DE ACORDO COM NÚMEROS DA CLASSE DE RUGOSIDADE CORRESPONDENTE .....	44
QUADRO 2. 4 - COMPRIMENTO DA AMOSTRAGEM (CUT OFF).....	45
QUADRO 4.1 - MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE EM AMBOS PARAFUSOS.....	62



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1 – EXEMPLO DO PROCESSO DOS CÁLCULOS.....	60
TABELA 4.1 – RELAÇÕES MATEMÁTICAS PARA OBTENÇÃO DO DIFERENCIAL MÉDIO DO COEFICIENTE DE ATRITO DOS PARAFUSOS .....	64
TABELA 4.2 - RELAÇÕES MATEMÁTICAS PARA OBTENÇÃO DO DIFERENCIAL MÉDIO DO FATOR DE TORQUE DOS PARAFUSOS .....	65
TABELA 4.3 - RELAÇÕES MATEMÁTICAS PARA OBTENÇÃO DO DIFERENCIAL MÉDIO DO COEFICIENTE DE ATRITO DOS PARAFUSOS .....	68
TABELA 4.4 - RELAÇÕES MATEMÁTICAS PARA OBTENÇÃO DO DIFERENCIAL MÉDIO DO FATOR DE TORQUE DOS PARAFUSOS .....	69
TABELA 4.5 - RELAÇÕES MATEMÁTICAS PARA OBTENÇÃO DO DIFERENCIAL MÉDIO DO COEFICIENTE DE ATRITO DOS PARAFUSOS .....	70
TABELA 4.6 - RELAÇÕES MATEMÁTICAS PARA OBTENÇÃO DO DIFERENCIAL MÉDIO DO FATOR DE TORQUE DOS PARAFUSOS .....	71

## RESUMO

Resumo do projeto apresentado no LAMAV / CCT / UENF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais.

Os parafusos são elementos de fixação que devem ser projetados adequadamente para simplesmente unir e/ou vedar partes de um equipamento, e até mesmo suportar tensões, evitando a falha do mesmo. Os parafusos de classe de resistência 10.9 são muito utilizados em montagem estruturais. Segundo a especificação ISO 898 Parte I, parafusos dessa classe possuem valores mínimos de limite de resistência à tração (LRT) e limite de escoamento (LE) de 1040 MPa e 936 MPa, respectivamente. Parafusos de classe 10.9 normalmente são confeccionados em aço médio carbono ou liga. Além disso, estes requerem tratamento térmico (têmpera e revenimento). Em processo de aperto tem-se um esforço combinado, onde simultaneamente ocorrem esforços axiais e torsionais. Para análise das propriedades mecânicas e metalúrgicas de um parafuso, são realizados ensaios para análise de cada propriedade mecânica. Porém, em alguns casos, como em parafusos de diâmetro superior à  $\frac{3}{4}$ ", não é possível realizar essas análises

justamente pelo tamanho do parafuso, que exige espaço e ferramental adequado, o que não está sempre disponível, principalmente em ambiente acadêmico. Esse estudo tem por objetivo comparar as propriedades mecânicas e metalúrgicas e análise tribológica de dois tipos de parafusos de mesma classe, porém confeccionados em aços e dimensões distintas, nas condições de uso, com e sem lubrificação, e trazer os resultados encontrados para uma mesma escala. Dessa forma, será possível trabalhar com parafusos de diâmetro inferior à  $\frac{3}{4}$ " em ambiente acadêmico, e assim, atendendo e relacionados estes aos parafusos de diâmetros superiores.

**Palavras Chaves:** Parafusos, classe 10.9, propriedades mecânicas e metalúrgicas, análise tribológica, escala.

#### **ABSTRACT**

Resumo do projeto apresentado no LAMAV / CCT / UENF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais.

The bolts are fixing elements that must be appropriately designed to simply attach and / or seal parts of equipment, and even support stresses, avoiding its failure. The bolts from strength class 10.9 are widely used in structural assembly. According to the ISO specification 898 Part I, bolts from this class have minimum values of tensile strength limit (LRT) and yield strength (LE) of 1040 MPa and 936 MPa respectively. Class 10.9 bolts are usually made of medium carbon or alloy steel. Besides, these ones require heat treatment (quenching and tempering). On the tightening process, there is a combined strain, which occurs simultaneously axial and torsional strains. For the mechanical and metallurgical properties analysis of a bolt, tests are performed to analyze each mechanical property. However, in some cases, such as on bolts with diameter greater than  $\frac{3}{4}$  ", it's not possible to perform these analyzes rightly because of the bolt size that requires space and proper tools, which is not always available, especially in the academic environment. This study aims to compare the mechanical and metallurgical properties and tribological analysis of two

types of bolts from the same class, but made of different steels and dimensions, on the conditions of use, with and without lubrication, and bringing the results found to the same scale. This way, it will be possible work with bolts which diameters are less than  $\frac{3}{4}$ " in the academic environment, and thus attending and relating these to the bolts of larger diameters.

**Keywords:** Bolts, class 10.9, mechanical and metallurgical properties, tribological analysis, scale

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 - Aspectos Gerais

Equipamentos em geral possuem juntas aparafusadas que são basicamente constituídas por um parafuso, uma contra peça que sofrerá todas as forças resultantes do processo de aperto, uma arruela que protege a contra peça e uma porca, que possui rosca interna. O parafuso é um componente de grande importância, já que este promove união de partes para simples vedação ou sustentação de forças.

Testar parafusos de grande porte com diâmetro maior que 3/4" apresenta grandes dificuldades tecnológicas, requerendo espaço e ferramental adequado, o que geralmente não está disponível no ambiente acadêmico.

A possibilidade de se realizar experimentos em escala é sempre desejada. No presente estudo, aborda-se o caso de parafusos aplicados em guindastes de emprego offshore e parafusos de mesma classe. Um estudo comparativo desses parafusos e trazendo as propriedades mecânicas de ambos para uma mesma escala, é importante para que, com os aparatos disponíveis em laboratório, seja verificado a existência de fatores em comum.

A variação nos parâmetros de fabricação e montagem das partes da junta aparafusada é muito grande, pois são inúmeras as variáveis envolvidas: Rugosidade, proteção superficial, lubrificante, método de aplicação do torque, projeto mal dimensionado, operação indevida, calibração de ferramentas, etc. Qualquer uma dessas variáveis afeta o desempenho da junta.

A montagem de parafusos através do torqueamento é muito utilizada. Dessa forma, é importante um estudo detalhado a respeito das variações das propriedades mecânicas neste processo. Esses fatores são fundamentais, pois influenciam diretamente na tensão gerada sobre uma união parafusada. Uma tensão superior ou inferior a ideal poderá acarretar em uma falha.

## 1.2 - Objetivos

O principal objetivo do presente estudo é analisar as propriedades mecânicas e tribológicas dos parafusos 1 ¼ in x 7 UNC e M 12 x 1,75, que são de mesma classe de resistência, 10.9, porém de aços diferentes, e a partir dos resultados obtidos em duas dissertações deste grupo de pesquisa em Análise Experimental e Numérica de Tensões e Metrologia, e comparar os ensaios realizados, e analisar as características tribológicas, para verificar se existe semelhança entre os resultados. Dessa forma, permitindo o teste em escala de parafusos de mesma classe.

## 1.3- Justificativas

Desenvolver teoricamente uma metodologia para dimensionar variáveis para teste em laboratório de um parafuso e refletir os resultados em escala real. Tornando-se assim possível trabalhar em ambiente acadêmico, com parafusos de diâmetros inferiores a ¾" que possuam as mesmas características daqueles de diâmetros superiores quando colocados em uma mesma escala, empregando ferramental disponível no laboratório. No ponto de vista industrial, esse estudo poderá minimizar custos, fazendo previsões em menor escala.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – Parafusos

No mercado mundial existem infindos métodos de união e fixação de peças como: parafusos de cabeça, parafusos de retenção, rebites, retorno por mola, dispositivos de travagem, pinos, chavetas, soldadura e adesivos (Shigley, 2005).

O parafuso é um componente metálico ou constituído por outro material como, plástico, vidro ou madeira, de geometria cilíndrica ou cônica. Em aplicações onde a resistência ao tempo e à corrosão são necessárias, o aço inoxidável, o titânio e o bronze são os materiais mais utilizados. Normalmente apresenta um formato cilíndrico ou cônico, sulcado em espiral ao longo da sua face externa e com a sua base superior, designada por cabeça do parafuso, podendo se adaptar a diversas ferramentas de fixação, como por exemplo uma chave de fendas. A cabeça também pode ser quadrada ou sextavada e deste modo é utilizada uma chave de bocas para proceder à sua fixação (Coelho, 2014).

O parafuso, conforme representado na Figura 2.1, diferencia-se por seu tipo de cabeça, corpo, rosca, diâmetro e comprimento da área roscada. Com relação a cabeça os parafusos podem ter cabeça sextavada, quadrada, abaulada, cilíndrica, cônica, com fenda, fenda cruzada, etc (CTISM, 2014).

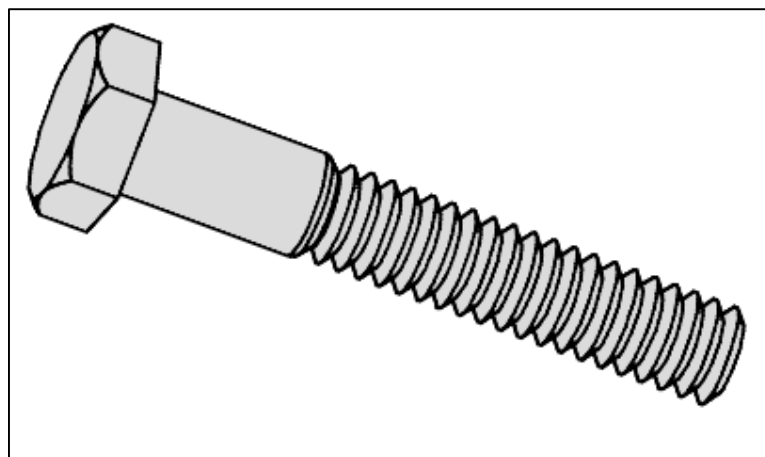


Figura 2.1- Parafuso (Fonte: Autor)

Dentre os elementos de fixação, pode-se dizer que os parafusos são os mais utilizados. São elementos de corpo cilíndrico e comprimento de corpo variável, onde, sobre este corpo, há filetes de roscas. Estas roscas podem ser de diferentes especificações e trabalham em conjunto com porcas, com as mesmas características de roscas (CTISM, 2014).

O corpo do parafuso pode ser com rosca inteira ou rosca parcial, sendo que as roscas podem ser do tipo *whitworth*, métrica e americana. Os parafusos podem ser utilizados pra diversas aplicações, como unir ou fixar aços, madeira, borracha, alvenaria e polímeros. O grau ou classe do parafuso indica o quanto este suporta de carga antes de seu rompimento, por isso quanto maior o grau, maior a tensão suportada.(CTISM, 2014)

Especificamente em uma junta parafusada à tração, os parafusos devem apertar um membro contra o outro com força para prevenir a separação ou vazamento. Coincidentemente, a tração no parafuso deve ser grande o suficiente para prevenir auto afrouxamento quando exposto a vibração, choque, ou ciclos térmicos. A alta tensão no parafuso pode torná-lo menos susceptível a fadiga (mas algumas vezes mais susceptível a trincamento por tensão) (Bickford,1995).

Há dois fatos importantes que se deve ter em mente quando se lida com juntas aparafusadas. Primeiro, o parafusos é um mecanismo para criar e manter a força entre os membros da junta. Segundo, o comportamento e a vida da junta aparafusada dependem muitíssimo da magnitude e estabilidade da força de aperto, ou pretensão (Bickford, 1995).

O parafuso é um operador que deriva diretamente do plano inclinado e sempre trabalha associado a um orifício roscado. Basicamente pode-se definir um plano inclinado envolto em um cilindro. Ou que é mais realista um sulco helicoidal fabricado na superfície de um cilindro (Ciser, 2006).



Quanto à geometria e terminologias, as Figuras 2.2 e 2.3 apresentam os aspectos mais importantes.

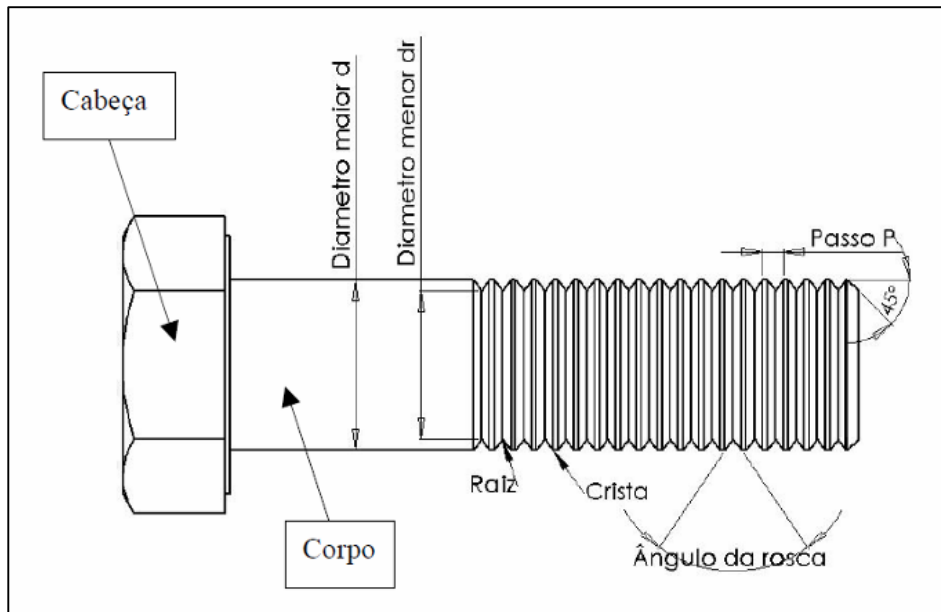


Figura 2 2-Padronização da nomenclatura das dimensões de parafusos. (Fonte: Pizzio, 2005)

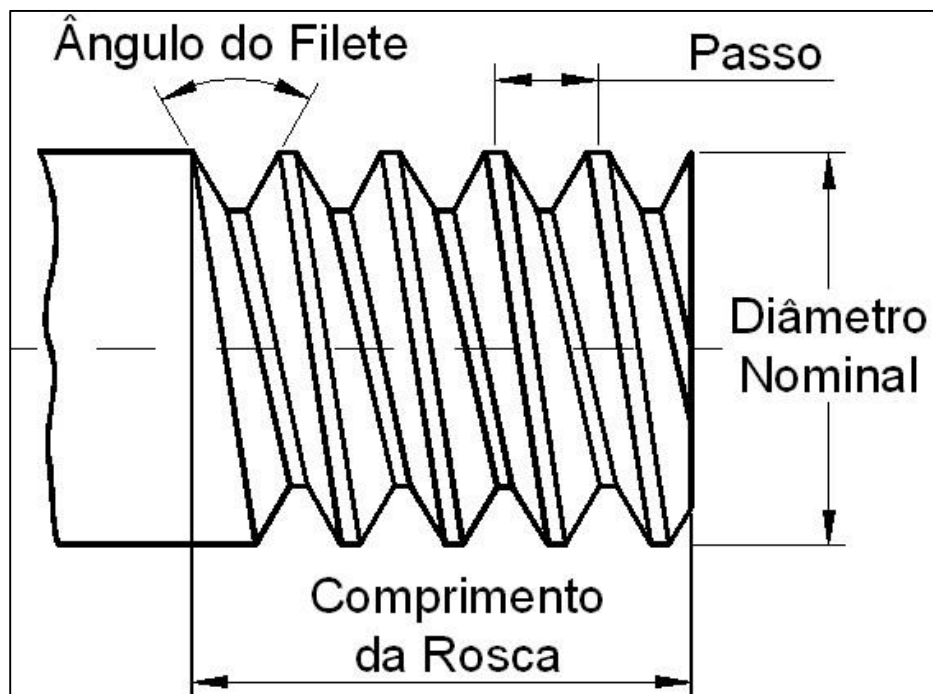


Figura 2 3 - Figura 2 3 - Composição de um parafuso.  
(Fonte: [www.metallica.com.br/artigos-tecnicos/parafusos](http://www.metallica.com.br/artigos-tecnicos/parafusos))

As roscas originalmente eram diferentes para cada um dos países fabricantes, porém após a Segunda Guerra Mundial, foram padronizadas na Inglaterra, Canadá e nos Estados Unidos dando origem a norma UNS (Unified National Standard). O sistema Europeu é definido pela norma ISO (International Organization for Standardization) e tem a mesma forma de seção transversal de rosca, usando porém dimensões métricas e, portanto não é intercambiável com o sistema UNS. Ambos os sistemas, UNS e ISO, são utilizados corriqueiramente nos países de língua Inglesa e países que tem ligação comercial com os mesmos. Ambas normas possuem ângulo de inclinação dos filetes de  $60^\circ$  e definem o tamanho de rosca pelo diâmetro externo “d”. O diâmetro primitivo “dp” e o diâmetro de raiz “dr” são definidos em termos do passo de rosca “p” com razões ligeiramente diferentes encontradas nas roscas UNS e ISO (Norton, 2004).

O passo é a distância entre formas adjacentes de roscas medidas paralelamente ao eixo do parafuso. O passo em unidades inglesas é o recíproco do número de fios de rosca por polegada “n” (Shigley, 2005).

A Figura 2.4 apresenta formas de identificação do passo de rosca através de calibre normalizado.

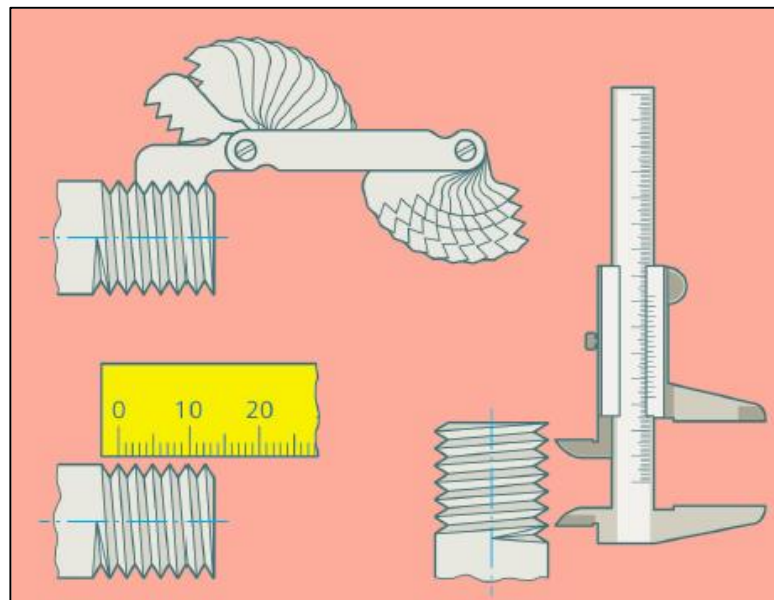


Figura 2.4 - Identificação do passo de rosca através de pente de rosca e paquímetro. (Fonte: CTISM)

Três séries padrão de famílias de diâmetros primitivos são definidas para roscas de padrão UNS: passo normal ou grosso (UNC), passo fino (UNF) e passo

extrafino (UNEF). A UNC é a mais comum e recomendada para aplicações corriqueiras, especialmente onde a necessidade de montagem e desmontagem é frequente (apud Rodrigues, 2015).

As roscas unificadas são especificadas declarando-se o diâmetro maior nominal, o número de fios por polegada e a série de rosca, por exemplo: 5/8in-18UNC (Shigley, 2005).

O perfil M (métrico) substitui a classe em polegadas e é o perfil básico da ISO 68, com rosca de 60 graus. O perfil MJ, por sua vez, tem um filete arredondado na raiz da rosca externa e o diâmetro menor acrescido de ambas as roscas interna e externa (Shigley, 2005).

As roscas métricas são especificadas escrevendo-se o diâmetro e o passo em milímetros, nessa ordem. Assim, M12 x 1,75 é uma rosca com diâmetro maior nominal de 12 mm e um passo de 1,75 mm. A letra M significa rosca métrica (Shigley, 2005).

O Quadro 2.1 diferencia os diferentes tipos de especificação da rosca.

Quadro 2. 1 – Especificação de Rosca.

<b>WHITWORTH</b>	NORMAL	BSW 1/2"
	FINA	BSF 1/2 x 8
<b>AMERICANA</b>	NORMAL	NC 1/2"
	FINA	NF 1/2 x 6
<b>MÉTRICA</b>	NORMAL	M 10
	FINA	M 10 x 0,75

## 2.2 - Porcas e Arruelas

### 2.2.1 - Porcas

A porca é uma peça de forma prismática ou cilíndrica geralmente metálica, com um furo roscado no qual se encaixa um parafuso, ou uma barra roscada. Em conjunto com um parafuso, é um acessório amplamente utilizado na união de peças. Esta pode ser fabricada em diversos materiais como: aço, bronze, latão, alumínio, plástico. Há casos especiais em que as porcas recebem banhos de galvanização, zincagem e bicromatização para protegê-las contra oxidação.

A porca de aperto é uma versão estreita da porca hexagonal padrão e é utilizada em combinação com a porca-padrão para travar esta ao parafuso. A porca de castelo tem sulcos para inserção de um pino através de um furo passante ao parafuso e que evita que a porca trabalhe frouxa. Uma porca cega é utilizada com propósitos decorativos e a porca de borboleta permite remoção sem a necessidade de utilização de ferramentas (Norton, 2013).

Na porca de travamento há uma preocupação universal que é a prevenção do afrouxamento espontâneo de porcas devido a vibração. Duas porcas apertadas conjuntamente no parafuso ou uma porca de castelo com um pino, em ambos os casos, conseguem alcançar esse objetivo. Muitos outros projetos de porcas de aperto com direitos especiais de propriedade são oferecidos por fabricantes. Alguns deles são mostrados na Figura 2.5. A porca de travamento elíptica possui seus últimos fios de rosca dispostos em uma forma elíptica depois que a porca é feita. Essas roscas produzem interferência com as correspondentes no parafuso e, quando forçadas, agarram as roscas e resistem o afrouxamento. Porcas também são fabricadas com insertos de náilon nas roscas, os quais se deformam quando forçados contra o parafuso. O náilon flui nas folgas de rosca e agarra o parafuso (Norton, 2013).

Uma porca de pino de travamento possui um pino de aço que permite o aperto, mas que adentra as roscas do parafuso evitando o afrouxamento. Porcas também são feitas com dentamentos em uma das faces que atuam de forma a cavar aparte sujeitada e resistem ao afrouxamento (Norton, 2013).



Figura 2.5 – Tipos de Porcas (Fonte: Norton, 2013)

### 2.2.2 - Arruelas

Arruelas são peças cilíndricas, de pouca espessura, com um furo no centro, pelo qual passa o corpo do parafuso. Estas podem ser utilizadas para proteger a superfície das peças, evitar deformações nas superfícies de contato, evitar que a porca afrouxe, suprimir folgas axiais (isto é, no sentido do eixo) na montagem das peças e evitar o desgaste da cabeça do parafuso ou da porca. A maioria das arruelas é fabricada em aço, mas o latão também é empregado; neste caso, são utilizadas com porcas e parafusos de latão. As arruelas de cobre, alumínio, fibra e couro são extensivamente usadas na vedação de fluidos.

Arruelas de aço endurecido são utilizadas quando a força de compressão da cabeça de parafuso sobre a parte sujeitada necessita ser distribuída sobre uma área maior que a área da cabeça do parafuso ou da porca. Uma arruela mais mole irá escoar em flexão em vez de efetivamente distribuir a carga. Qualquer arruela simples também evita afundamento da superfície da parte quando a porca é apertada. Arruelas não metálicas são usadas quando é necessário isolamento elétrico do parafuso com relação à parte. As arruelas planas têm seus tamanhos idênticos aos padronizados de parafuso. Se forem necessárias arruelas maiores que o tamanho-padrão, arruelas para-choques (que possuem um diâmetro externo maior) podem ser utilizadas. Arruelas Belleville são utilizadas em alguns casos

sob porcas ou cabeças de parafusos para fornecer um controle das mudanças de força axial ao longo do comprimento do parafuso (Norton, 2013).

Para evitar o afrouxamento espontâneo de porcas padronizadas (em oposição a porcas de travamento), arruelas de travamento podem ser utilizadas sob a porca de um parafuso ou sob a cabeça de um parafuso de máquina. A Figura 2.6 mostra vários dos muitos estilos de arruelas de travamento disponíveis. A arruela partida, ou de pressão, é de aço endurecido e atua como uma mola sob a porca. Seus cantos vivos também tendem a cavar as superfícies sujeitadas. Vários estilos de arruelas dentadas são também oferecidos. Seus dentes dispostos para cima são comprimidos quando sujeitados e cavam, adentrando a porca e as superfícies das partes. As arruelas de travamento são consideradas menos efetivas em evitar o afrouxamento que as porcas de travamento, que são, portanto, preferidas (Norton, 2013).

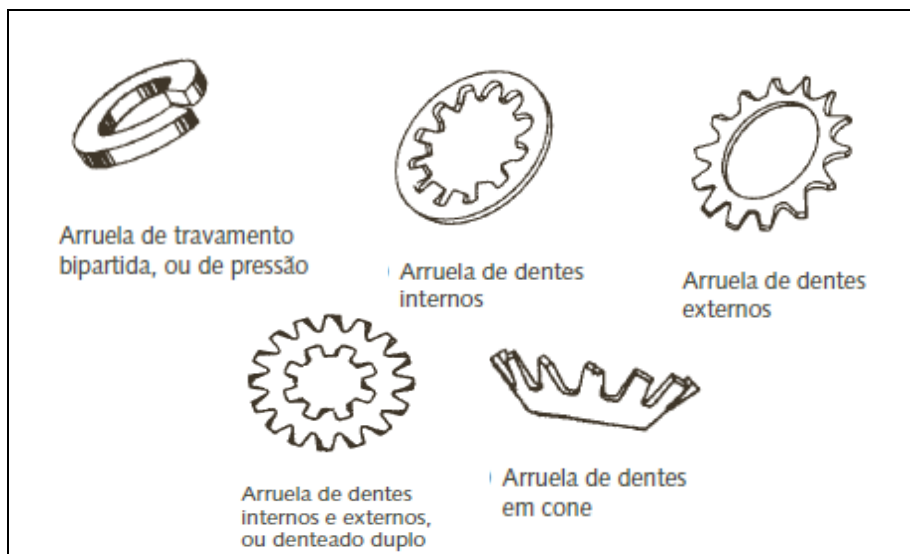


Figura 2.6 – Tipos de Arruelas  
(Fonte: Norton, 2013)

## 2.2 - Juntas Aparafusadas

Juntas aparafusadas são muito aplicadas em junções mecânicas com o objetivo de unir e/ou fixar peças, e é uma solução de projeto responsável por quase todos os sistemas que requerem uma posterior desmontagem. Uma junta é constituída de três elementos: o parafuso com rosca externa; a contra peça que é quem sofrerá toda resultante da força aplicada no momento do aperto e que não pode sofrer nenhuma deformação plástica; e por fim a porca com rosca interna. A Figura 2.7 exemplifica os tipos de solicitações a que estão sujeitas as juntas aparafusadas (Barbosa et al., 2014).

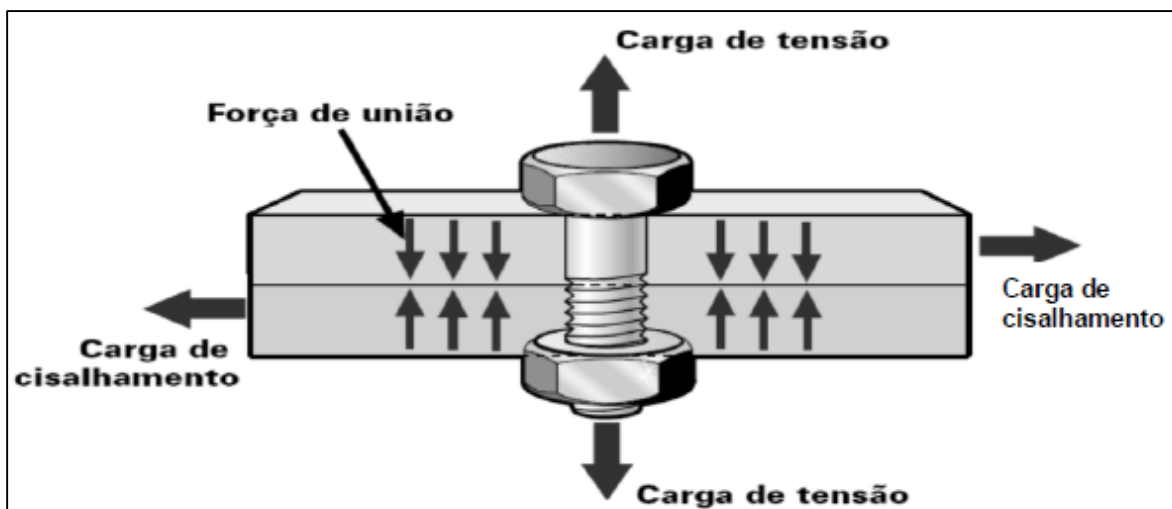


Figura 2. 7 - Representação das forças que atuam sobre uma junta aparafusada.  
(Fonte: Barbosa et al., 2014)

Em uma junta aparafusada à tração, os parafusos devem apertar um peça contra o outro com força para prevenir a separação ou vazamento. Coincidentemente, a tração no parafuso deve ser grande o suficiente para prevenir auto afrouxamento quando exposto a vibração, choque, ou ciclos térmicos. Alta tensão no parafuso pode torná-lo menos susceptível a fadiga, mas algumas vezes mais susceptível a trincamento por tensão (Bickford, 1995).

As juntas aparafusadas sujeitas a carregamentos dinâmicos possuem uma tendência ao afrouxamento. Geralmente o problema está mais ligado a pré cargas insuficientes que cargas excessivas. A questão de pré cargas inadequadas é associada ao método de aperto usado, somado as condições de atrito (Norton,2006).

## **2.3 - Aços utilizados na fabricação de parafusos**

### **2.3.1 - Aços para construção mecânica**

Os aços para construção mecânica foram desenvolvidos para as mais diversas aplicações, como na indústria automobilística, naval, de eletrodomésticos, etc. Dentro desta classificação enquadram-se os aços carbono e aços liga, que continuam evoluindo para atender o mercado que necessita de aços de menor custo e com melhores propriedades mecânicas. A utilização dos diversos aços para construção mecânica está diretamente relacionada aos processos de tratamento térmico, que por sua vez depende, em parte, da presença de determinados elementos de liga para obtenção das propriedades mecânicas necessárias ao produto final (Krauss, 1995).

Enquanto os aços estruturais são normalmente fornecidos para atender a requisitos mecânicos (com alguns limites de composição química especificados com vistas à soldabilidade, por exemplo), aços para construção mecânica são usualmente fornecidos para atender faixas de composição química, uma vez que, normalmente, são tratados termicamente para obter propriedades finais após o processamento pelo comprador. A principal característica visada, ao se definir a composição química, é a temperabilidade (Silva, 2006).

A presença de pequenos teores de boro em solução (3 a 5 ppm) em aços com 0,20 a 0,40 % C permite obter uma temperabilidade média que fornece os valores necessários de dureza e resistência após têmpera, principalmente em parafusos de pequenas seções. O boro está presente nos aços como elemento intersticial e possui baixa solubilidade na ferrita (<0,003%). Apesar dos teores de boro presentes nos aços variar de 5 a 30 ppm, teores em solução na faixa de 3 a 5 ppm, para aços carbono, aumenta substancialmente a sua temperabilidade quando submetidos à têmpera convencional. (Suski, 2007).

A temperabilidade dos aços aumenta devido à presença de boro em solução, porém o excesso de boro forma borocarbonetos, eliminando o efeito do boro na temperabilidade. No entanto, percebe-se que há uma divergência entre os teores ótimos de boro bastante grande entre os autores, pois as variações e comentários são inúmeros, principalmente devido às possíveis formações de



nitretos e borocarbonetos, as quais reduzem a quantidade de boro em solução sólida (apud Rodrigues, 2015).

Os aços compostos de boro são largamente utilizados na fabricação de parafusos de alta resistência, principalmente na indústria automotiva. Quando comparado com aços sem boro de igual temperabilidade, estes aços C-Mn-B tem conformabilidade superior; igual, ou melhor, usinabilidade e menor tendência à formação de trincas de têmpera (Suski, 2007).

A norma ASTM A-490 (2011) aborda parafuso de aço liga, temperado e revenido para uso estrutural com resistência a tração de 150 a 173Ksi, com padrão de rosca em polegadas com dimensão de 0,5 a 1,5 polegadas.

A norma ASTM A-490M (2011) aborda parafuso de aço de alta resistência, classes 10.9 para juntas estruturais com padrão métrico, com limite de resistência de 1040 a 1210 MPa e com dimensão de M-12 a M-36. Esta norma cobre dois tipos de ligas de aço temperados e revenidos, de parafusos sextavados estruturais pesados com resistência a tração de 1040 a 1210 MPa.

### **2.3.2 - Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)**

Aços de alta resistência e baixa liga, como diz o nome, são aços com baixos teores de liga com altos limites de resistência. Eles tem as chamadas microadições de elementos de liga como o Nb, Ti e/ou V e associados com os tratamentos termomecânicos tem microestrutura com grãos finos.

De um modo geral, são classificados como aços ARBL os aços resultantes de um processo de manufatura que incorpora na rota de produção destes aços a aplicação de conceitos como endurecimento por precipitação, refino de grão, adição de elementos microligantes associados a diferentes escalas de passes de temperaturas de laminação. Os aços ARBL foram desenvolvidos pela indústria do aço e atualmente atendem diversos setores industriais como o automobilístico e o de estruturas, devido ao seu elevado limite de resistência, boa tenacidade a baixas temperaturas, boa conformabilidade e boa soldabilidade, devido ao baixo carbono equivalente (Ordóñez, 2004).

Historicamente, pontos notáveis da evolução destes aços, segundo Pickering (1978), são: inicialmente o projeto de estrutura era baseado no limite de ruptura e o carbono era o principal elemento de liga. Apesar do baixo custo, tenacidade e soldabilidade eram baixas. O advento da soldagem exigiu redução do teor de carbono. Para manter a resistência, o teor de manganês foi aumentado. Falhas catastróficas de estruturas soldadas levaram ao reconhecimento da importância do controle de Tenacidade. Ao mesmo tempo, os critérios de projeto passaram a dar mais importância ao limite de escoamento. O teor de carbono foi reduzido ainda mais, mantendo-se o teor de manganês elevado. A importância do tamanho de grão na resistência e na tenacidade foi reconhecida (Silva, 2006).

A composição química de um aço BLAR pode variar de um produto para outro. Um aço típico possui normalmente menos que 0,15% de Carbono, 1,65% de Manganês e níveis baixos (abaixo de 0,035%) de Fósforo, enxofre e outros elementos. O baixo carbono garante boa conformabilidade e soldabilidade. A resistência destes aços é aumentada pela adição de pequenas quantidades de elementos de liga, conforme mostra o Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Elementos de Liga em um aço ARBL.

(Fonte: [www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6340-acos-de-alta-resistencia-e-baixa-liga](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6340-acos-de-alta-resistencia-e-baixa-liga))

<b>Elementos de liga num aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL, BLAR ou HSLA)</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Porcentagem (%)</b>	<b>Efeito nas propriedades</b>
Cobre	0,2 – 1,5	Melhora a resistência à corrosão atmosférica
Níquel	Ao menos a metade do percentual do cobre	Beneficia a qualidade superficial
Nióbio	0,02	Aumenta o limite de resistência e o limite de escoamento
Nitrogênio	0,003 – 0,012	Contribui para a resistência e pode melhorar a soldabilidade
Vanádio	até 0,12	Melhora a resistência sem reduzir a soldabilidade
OBS: Pequenas quantidades de cálcio, terras raras e zircônio podem estar presentes para controle da forma de inclusões de sulfetos (globulização)		

Os aços de ARBL apresentam resistência entre 300 e 700 MPa, tendo sido desenvolvidos para elevar a relação entre resistência e peso, visando aplicação em estruturas móveis. Grande parte desses apresentam maior limite de escoamento e limite de resistência do que os aços carbonos. Apresentam também maior relação resistência-peso que os aços ao carbono em sua maioria. Possuem melhor tenacidade a baixas temperaturas, especialmente os de grãos finos e aqueles contendo níquel, do que os aços ao carbono de mesmo teor de carbono. Aços ARBL contendo Cr e Mo apresentam melhores propriedades a altas temperaturas do que os aços ao carbono.

### **2.3.3 - Aço AISI/SAE 4140**

Os aços da família AISI/SAE 41XX são usados em aplicações de engenharia na condição “temperado e revenido” ou “normalizado”, este último quando é necessário assegurar elevados níveis de tenacidade. Os aços baixa liga dessa família, especialmente o 4130 e o 4140, estão entre os aços mais usados na indústria do petróleo em aplicações de alta resistência. Esses aços se apresentam em destaque do ponto de vista de utilização porque são facilmente tratados termicamente para os níveis de resistência requeridos pelos códigos API (American Petroleum Institute), são relativamente baratos e bastante disponíveis no mercado (Dufor, 2002).

Este aço muito utilizado em peças que exigem elevada dureza, resistência e tenacidade. Usado em automóveis, aviões, virabrequins, bielas, eixos, engrenagens, armas, parafusos, equipamentos para a indústria do petróleo. Apresenta diversas condições de fornecimento, tais como: barras laminadas trefiladas, barras laminadas retificadas ou sem acabamento, barras forjadas dentre outras (apud Rolin, 2014).

Em relação aos aços carbono, os baixa liga da família 41XX são modificados ao cromo e ao molibdênio, e em relação ao AISI/SAE 4130 e os aços AISI/SAE 4140 e 4150, esses apresentam teores mais elevados de carbono e manganês, o que aumenta bastante sua temperabilidade (Dufor, 2002).

A partir dos principais aços dessa classe (AISI/SAE 4130, 4140 e 4150), são feitas modificações na composição química para se alcançar otimização de

alguma propriedade específica. Os estudos voltados para essa classe de aços têm objetivado o aumento da ductilidade e tenacidade, a minimização da variação das propriedades e conseqüentemente uma maior confiabilidade em serviço, através da melhoria e inovações de técnicas de refino e processamento e também através de um maior controle do processamento e inspeção (Phillip, 1990).

O aço SAE-4140(UNS-41400) apresenta como principais constituintes após tratamento térmico a martensita e a bainita, muito embora poderão ser formadas algumas estruturas com considerável difusão como a ferrita pró-eutetóide, presentes nos diagramas tempo-temperatura-transformação (TTT), mostrado na Figura 2.8, para os aços dessa classe (Ericsson, 1991).

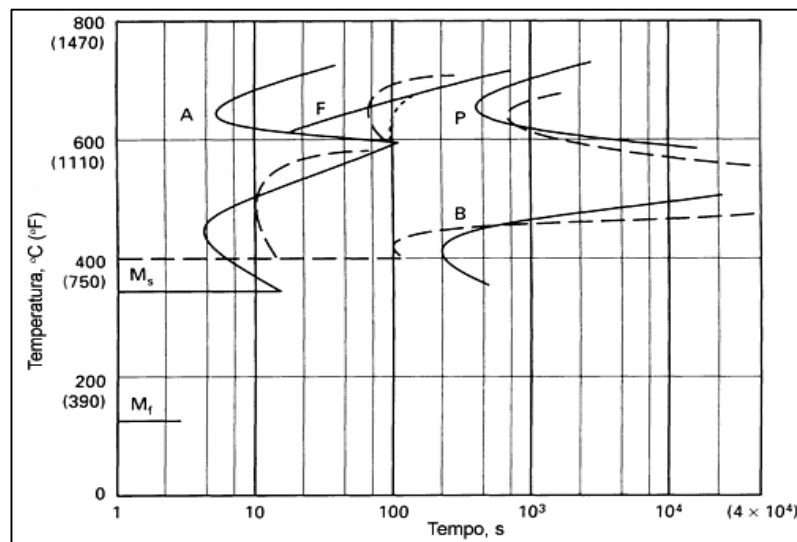


Figura 2.8 - Diagrama TTT para o aço AISI 4140 (Fonte: Ericsson, 1991).

O diagrama TTT para os aços é baseado na decomposição da austenita a temperaturas constantes, sendo usado para descrever as condições nas quais os vários tipos de microestruturas se formam. Uma vez iniciada, esta transformação só depende da temperatura, o que significa que, uma vez iniciada a formação da martensita, ela só continua na medida em que houver uma queda de temperatura, independentemente do tempo de permanência em uma determinada temperatura (Chiaverini, 1986).

### **2.3.4 - Aço AISI/SAE 5140**

Os aços da família AISI/SAE 51XX são usados em aplicações de engenharia na condição “temperado” e “revenido” ou “normalizado”. Este último quando é necessário assegurar elevados níveis de tenacidade. Os aços de baixa liga dessa família, especialmente o 5140, são aplicados também na fabricação de parafusos apesar de não ser tão comum (apud Rolin, 2014).

## **2.4 – Propriedades Mecânicas dos Parafusos**

Muitos materiais, quando em serviço, são submetidos a forças ou cargas; exemplos incluem a liga de alumínio a partir da qual uma asa de avião é construída e o aço do eixo da roda de um automóvel. Em tais situações é necessário conhecer as características do material e projetar o elemento estrutural a partir do qual ele é feito de tal maneira que qualquer deformação resultante não será excessiva e a fratura do material não ocorrerá. O comportamento mecânico do material reflete a correlação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada (Callister, 2002).

As propriedades mecânicas de materiais são apuradas (determinadas) pela execução de experimentos de laboratório cuidadosamente projetados que replicam tanto quanto possível as condições de trabalho. Fatores a serem considerados incluem a natureza da carga aplicada e a sua duração, bem como as condições ambientais (Callister, 2002).

A determinação das propriedades mecânicas de um material metálico é realizada por meio de vários ensaios. Geralmente esses ensaios são destrutivos, pois promovem a ruptura ou inutilização do material. Nessa categoria, estão classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão entre outros. Os ensaios de dureza que, embora possam, em certos casos, não inutilizar a peça ensaiada, também está incluído nessa categoria (Souza, 1982).

A escolha do ensaio mecânico mais interessante ou mais adequado para cada produto metálico depende da finalidade do material, dos esforços que esse material vai sofrer e das propriedades mecânicas que se deseja medir. Os

ensaios mecânicos podem também servir para comparação de materiais distintos e, juntamente com a análise química do material, avaliar a grosso modo a história prévia de um material desconhecido, sem a necessidade de um exame metalográfico mais demorado, isto é, avaliar o tipo de material, o processo de fabricação e sua aplicação possível (Souza, 1982).

## 2.4.1 - Ensaios Mecânicos em Parafusos

### 2.4.1.1 - Ensaio de Tração

Entre os diversos tipos de ensaios disponíveis para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, o mais amplamente utilizado é o ensaio de tração, por ser um tipo de ensaio relativamente simples e de realização rápida além de fornecer informações importantes e primordiais para o projeto e fabricação de peças e componentes. Esse tipo de ensaio utiliza corpos de prova preparados segundo as normas técnicas convencionais (no Brasil, a norma utilizada para materiais metálicos é a NBR-6152, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT) e consiste na aplicação gradativa de carga de tração uniaxial às extremidades do corpo. O levantamento da curva de tensão de tração pela deformação sofrida, Figura 2.9, pelo corpo constitui o resultado do teste de tração (Garcia et al., 2000).

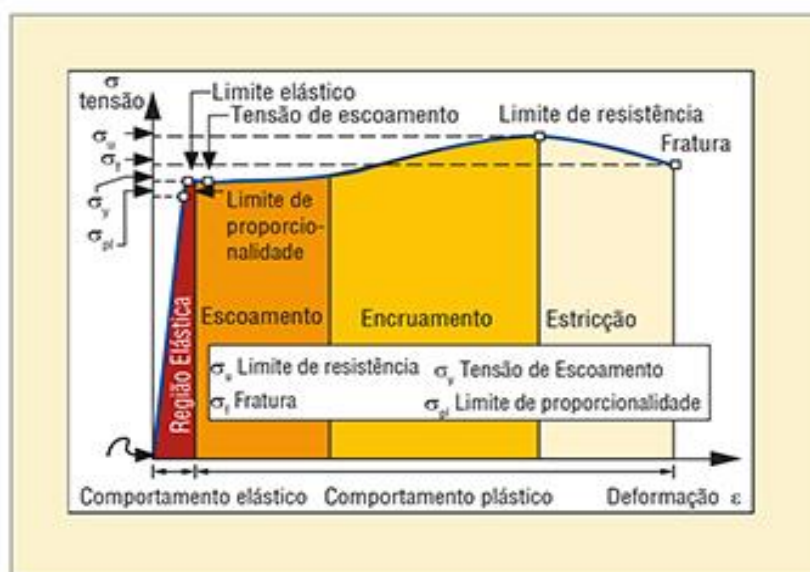


Figura 2.9 - Curva Tensão x Deformação  
(Fonte: [www.revistaih.com.br/coluna-htd/ensaio-de-tracao/1784](http://www.revistaih.com.br/coluna-htd/ensaio-de-tracao/1784))

Durante o carregamento do material, observa-se, inicialmente um período em que a deformação é diretamente proporcional à tensão aplicada. Nesta fase, a deformação é permanente, isto é, removido o carregamento, a deformação desaparece. Esta fase é chamada de fase elástica do material e a constante de proporcionalidade que relaciona a tensão com a deformação é denominada módulo de elasticidade ( $E$ ). Assim,  $\sigma_\epsilon = E \cdot \epsilon$ . A deformação elástica, reversível, acontece pelo aumento das distâncias interatômicas no material. Durante a deformação elástica, o volume do material se conserva (Silva e Mei, 2006).

O limite superior para essa relação linear é denominado limite de proporcionalidade,  $\sigma_p$ . Se a tensão ultrapassar ligeiramente o limite de proporcionalidade, o material ainda pode responder de maneira elástica; todavia a reta tende a encurvar-se e achatar-se. Isso continua até a tensão atingir o limite de elasticidade (Hibbeler, 2010).

Um pequeno aumento na tensão acima do limite de elasticidade resultará no colapso do material e fará com que ele se deforme permanentemente. Esse comportamento é denominado escoamento e é indicado pela segunda região da curva. A tensão que causa escoamento é denominada tensão de escoamento ou ponto de escoamento,  $\sigma_e$ , é a deformação que ocorre é denominada deformação plástica (Hibbeler, 2010).

O escoamento pode ser nítido ou imperceptível. Para casos de escoamento imperceptível, figura 2.9, convencionou-se adotar uma deformação padrão que corresponda ao limite de escoamento, conhecida como limite  $n$  de escoamento ( $\sigma_{en}$ ). Por exemplo, o procedimento para se determinar o limite de escoamento para o caso de  $n = 0,2\%$  (ASTM A-490, 2011) é como segue:

1. Obter a curva tensão-deformação de engenharia por meio de ensaio de tração.
2. Construir uma linha paralela à região elástica da curva, partindo de uma deformação de 0,002 ou 0,2%.
3. Definir  $\sigma_e$  na interseção da reta paralela com a curva tensão-deformação.

O valor de  $n$  pode assumir valores em função do campo elástico do material, como por exemplo:

- Metais e ligas em geral

$$n = 0,2\% (\epsilon = 0,002)$$

- Cobre e suas ligas

$$n = 0,5\% (\epsilon = 0,005)$$

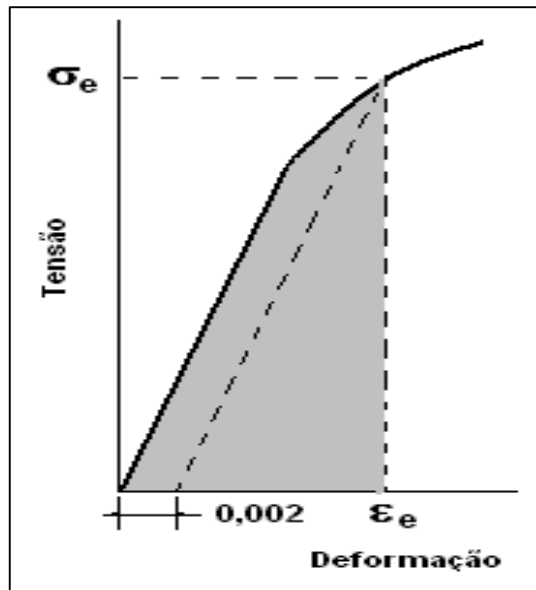


Figura 2.10 – Tensão de Escoamento.

Nesse caso, traça-se uma perpendicular ao eixo das deformações a partir da definição especificada, até atingir a curva tensão-deformação.

- Ligas metálicas muito duras

$$n = 0,1\% (\epsilon = 0,001)$$

Quando o escoamento tiver terminado, pode-se aplicar uma carga adicional ao corpo de prova, o que resulta em uma curva que cresce continuamente, mas torna-se mais achatada até atingir uma tensão máxima denominada, limite de resistência,  $\sigma_r$ . O crescimento da curva dessa maneira é denominado endurecimento por deformação e é identificado na terceira região da curva. Durante todo o ensaio, enquanto o corpo se alonga, sua seção transversal diminui. Essa redução na área é razoavelmente uniforme por todo comprimento de referência do corpo de prova, até mesmo a deformação que corresponde o limite de resistência (Hibbeler, 2010).

A diminuição da força a partir deste ponto está associada ao fenômeno da estricção. Até se atingir força máxima, o aumento da força durante o ensaio é



balanceado pelo encruamento do material e, naturalmente, pela redução de área associada à conservação de volume do material durante a deformação plástica.

A ocorrência da carga máxima está associada ao fim deste equilíbrio. Neste ponto, uma determinada região do corpo de prova passa a se deformar mais do que as demais. Assim, se alonga mais e, conseqüentemente, tem sua área mais reduzida que o restante do corpo de prova.

A tensão real nesta região, submetida à estrição, é elevada; entretanto, como sua área é reduzida, a tensão de engenharia decresce em relação à tensão de ruptura. Naturalmente, a fratura ocorrerá na região de estrição. O alongamento permanente (plástico) após a fratura e a redução de área na região da fratura são medidas convencionais da ductilidade do material (Silva e Mei, 2006)

Em relação aos parafusos, segundo a norma ASTM F606 (2011), os principais procedimentos de ensaios de tração de corpo de prova usinado são:

Quando parafusos ou estojos não podem ser testados de corpo inteiro, testes conduzidos usando corpos de prova usinados de parafusos podem ser usados. Parafusos ou estojos de diâmetro 9/16 e menor podem ser usinados concêntricos com o eixo do parafuso. O corpo de prova deve ser torneado com seção tão grande quanto possível e ter um comprimento de garra de quatro vezes o diâmetro do corpo de prova (ASTM F606, 2011).

Parafusos de seção transversal pequena que não permita ter diâmetro de 0,500" polegadas, e 2" polegadas de comprimento de medição no corpo de prova deve ter uma usinagem de seção tão grande quanto possível e concêntrica com eixo do parafuso. O comprimento medido deve ser quatro vezes o diâmetro do corpo de prova, conforme Figura 2.11. (ASTM F606, 2011).

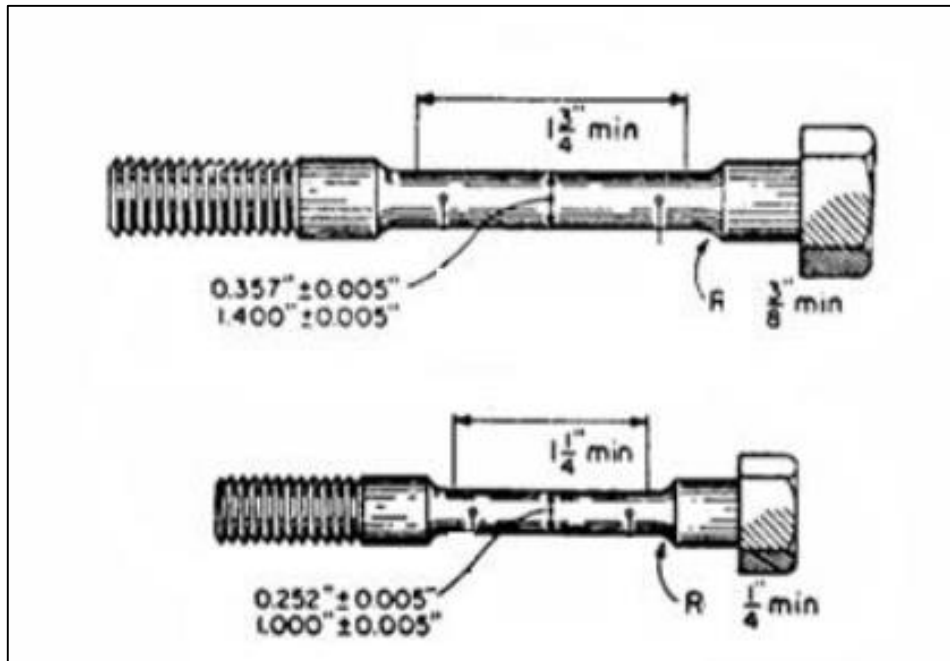


Figura 2.11 - Exemplo de corpos de prova de seção reduzida.  
(Fonte: ASTM F606, 2011)

#### 2.4.1.2 - Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça, pela aplicação de pressão, com uma ponta de penetração. A medida da dureza do material é dada em função das características da marca de impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio de dureza realizado. Esse ensaio é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, tratamentos superficiais, vidros e laminados devido à vantagem de fornecer dados quantitativos das características de resistência à deformação permanente das peças produzidas. É utilizado como um ensaio para o controle das especificações da entrada de matéria prima e durante as etapas de fabricação de componentes (Garcia et al., 2000).

A dureza de um material depende diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, assim como da resistência mecânica. Nos sólidos moleculares, como os plásticos, as forças atuantes entre as moléculas (forças de Van der Waals) são baixas, e eles são relativamente macios. Os sólidos metálicos e iônicos, devido à natureza mais intensa das forças de ligação, são mais duros, enquanto os sólidos de ligação covalente são os materiais conhecidos de maior

dureza. A dureza dos metais pode também ser aumentada por tratamentos especiais, como adição de soluto, trabalho a frio, endurecimento por precipitação ou tratamentos térmicos específicos. Há uma ligação bastante próxima entre o limite de escoamento dos metais e a sua dureza (Garcia et al., 2000).

Os diversos ensaios de dureza existentes possibilitam uma excelente cobertura de todas as gamas usuais de durezas e dimensões encontradas nos aços. Além disso, o ensaio de dureza corretamente escolhido e interpretado é uma excelente ferramenta para o controle indireto das propriedades mecânicas, a baixíssimo custo, comparado com as demais opções existentes (Silva e Mei, 2006).

Existem ensaios de dureza estáticos e dinâmicos. Dentre os ensaios estáticos, estão os ensaios de Rockwell e Brinell, que são testes empregados para aços na maioria dos casos. Mais especificamente, os ensaios de Rockwell é bastante emprego, pois é um ensaio de maior simplicidade, rapidez, ampla faixa de medidas e obtêm-se uma medida direta.

Os Principais ensaios de dureza, Figura 2.12, são:

- Dureza Brinell (HB)
- Dureza Rockwell (HR)
- Dureza Vickers (HV)
- Microdureza KNOOP (HK)

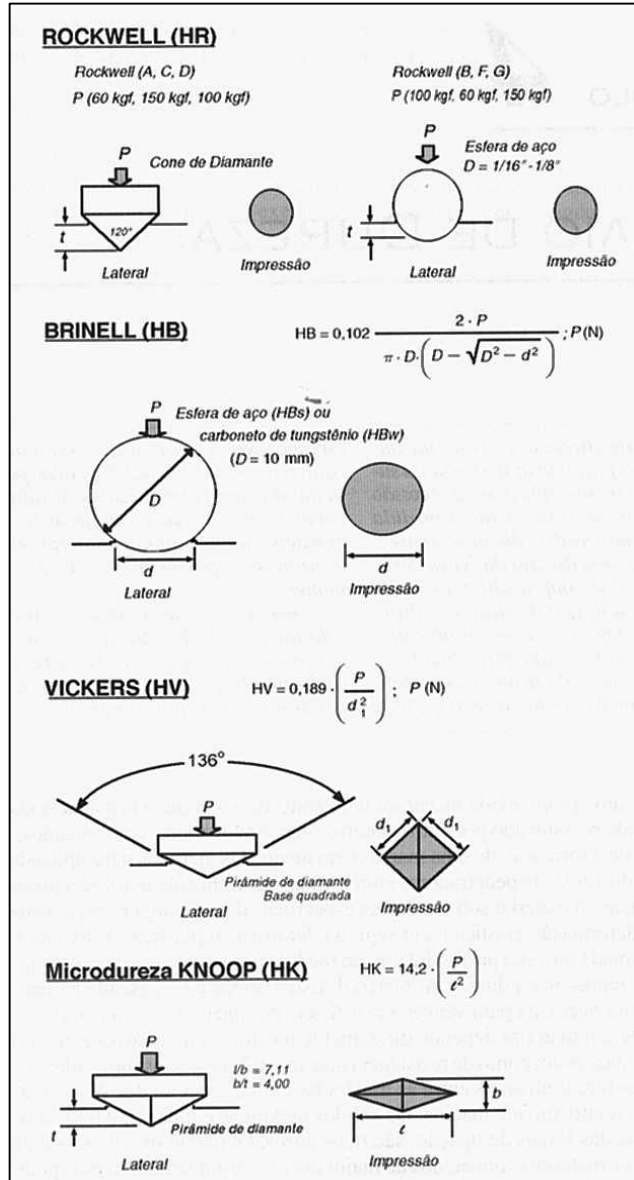


Figura 2.12 - Tipos de ensaios de dureza, destacando as características de penetração. (Fonte: Souza, 1982)

Segundo a norma ASTM F606 (2011), os testes devem ser conduzidos após a remoção de qualquer óxido superficial, descarbonetação, tinta ou outra cobertura. A média de todas as leituras na mesma parte deve ser considerada como dureza do produto. Para teste de dureza de produto acabado, as seguintes localizações podem ser usadas:

Para parafusos de cabeça quadrada ou hexagonal, testes devem ser conduzidos na parte plana, topo da cabeça, terminação do parafuso, ou local arbitrário (ASTM F606, 2011).

A escala de dureza Rockwell pode ser usada para todos os diâmetros dos produtos, contudo, a dureza Brinell é limitada a produtos acima de 1 ½ in de diâmetro (ASTM F606, 2011).

Um mínimo de três leituras deve ser realizado em cada amostra de parafuso acabado. Para testes de dureza arbitrários, a norma define que a medição deve ser conduzida no raio médio da seção transversal da rosca tomada a uma distância de aproximadamente um diâmetro da extremidade. Quatro leituras devem ser efetuadas a aproximadamente 90° uma da outra, no mesmo plano, se o produto permitir (apud Rodrigues, 2015).

## **2.5– Medição de Torque**

O método mais comum de controle de tensão no parafuso é indireto porque isso é usualmente difícil ou não é prático medir a tensão produzida em cada parafuso durante a montagem. Para muitas aplicações, a tensão em parafusos pode ser satisfatoriamente controlada com certos limites pela aplicação de um torque conhecido no parafuso. Teste de laboratório tem mostrado, 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 severamente alterar a relação. Isto ocorre porque 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 (Pizzio, 2005).

Indiferente ao método ou precisão de aplicação de pré carga, a tensão diminuirá com o tempo se o parafuso, porca, ou assentamento da face da arruela deformar sob carga, ou se o parafuso se estender por fluência sob carga de tração, ou se carga cíclica causa relativa movimentação entre os membros da junta (Machinery Handbook, 2012).

Um método controlado de apertar conexões roscadas é apertando de modo que um torque especificado seja conseguido. Este método é geralmente conhecido como controle de torque. O problema principal relacionado a este método é que a força de tração do fixador (referida a pré carga) gerada do resultado de um torque aplicado é dependente do projeto do fixador e das condições de fricção que prevalecem. Apesar destes problemas, é ainda a maneira mais comum de assegurar-se que um parafuso montado cumpra com as especificações da engenharia (Pizzio, 2005).

Na Figura 2.13 percebe-se a aplicação do controle de torque através de ferramenta manual chamada de torquímetro. O valor de torque, já conhecido, é ajustado na ferramenta, que por sua vez, é utilizada na aplicação do torque ao parafuso.



Figura 2.13 - Aplicação de torque manual.  
(Fonte: Hiretorque, 2016)

Na Figura 2.14 percebe-se a aplicação do controle de torque através de ferramenta hidráulica chamada de chave de torque. O valor de torque, já conhecido também, é relacionado à pressão à ser ajustada na bomba. Esta relação é possibilitada através de uma tabela torque versus pressão para cada tipo de chave. Com a bomba, então, regulada na pressão, aplica-se o torque no parafuso utilizando uma chave especificada.



Figura 2.14 - Aplicação hidráulica de torqueamento.  
(Fonte: [mlb-s2-p.mlstatic.com/chave-de-torque-hidraulica-de-baixo-perfil-5400nm](http://mlb-s2-p.mlstatic.com/chave-de-torque-hidraulica-de-baixo-perfil-5400nm))

### 2.5.1 - Controle de Ângulo de Aperto

Este método, também conhecido como método de giro da porca, foi introduzido para o conjunto manual logo após a segunda guerra mundial quando um determinado ângulo de aperto foi especificado. O método foi aplicado para o uso com chaves mecânicas. O aperto a um ângulo pré-determinado além da extensão elástica, resulta em uma pequena variação na pré carga devido, em parte, à tolerância da tensão de escoamento. As principais desvantagens deste método encontram-se na necessidade para a determinação precisa, e, se possível, experimental do ângulo (Bickford, 1995).

Tem-se tentado usar torque como o principal controle de pré carga de parafusos, no entanto, mesmo um torque perfeito pode resultar numa variação de

$\pm 25\%$  da pré carga. Quando se aplica torque a porca gira. Pode-se usar o giro ao invés do torque para controlar a pré carga (Bickford, 1995).

### **2.5.2 - Controle de Aperto ao Escoamento**

Este método é conhecido também pelo nome de “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. Como equivalente eletrônico deste método, um sistema de controle é usado que seja sensível ao gradiente de torque do parafuso que está sendo apertado. 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. Isto é conseguido incorporando sensores para ler o torque e o ângulo durante 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 (Bickford, 1995).

### **2.5.3- Tensionamento**

O monitoramento da pressão hidráulica controla eficazmente a pré carga no parafuso. Uma pequena redução da pré carga, entretanto, ocorre quando a pressão é removida enquanto a porca se deforma elasticamente sob a carga (Pizzio, 2005).

Com torque e/ou giro tenta-se controlar o processo de aperto através da aplicação de força, ou movimentação da porca. O que realmente interessa no parafuso é o quanto ele alonga para produzir a força de aperto da junta (Bickford, 1995).

Um problema relacionado ao aperto de grandes parafusos é que torques muito elevados são requeridos. Embora isto possa em parte ser superado pelo uso de chaves de torque hidráulicas (a reação do torque, entretanto pode ser um problema), o uso de dispositivos tensionadores hidráulicos é comum para os



parafusos acima de 20 mm de diâmetro. O método usa um pequeno pistão hidráulico o qual é ajustado sobre a porca, a parcela roscada do parafuso projeta-se bem após a porca e um extrator roscado é acoplado. O óleo hidráulico de uma bomba pequena age em cima do pistão hidráulico, que age, por sua vez, em cima do extrator. 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).

O tensionamento também pode ser realizado manualmente com a utilização de torquímetros. Este é realizado manualmente pelo usuário aplicando a força necessária diretamente em sua haste. Existem torquímetros de estalo, de relógio, de escape, de giro livre, etc.

## **2.6 - Tribologia**

Hutchings (1992) define Tribologia como: “A ciência e a tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo”. E abrange o estudo do Atrito, do Desgaste abrasivo e da Lubrificação. A palavra Tribologia vem do Grego: τριβοζ = Esfregar ou atritar.

A natureza e consequência das interações resultantes na interface de contato entre dois sólidos são geralmente, o atrito e o desgaste. Durante a interação entre duas superfícies ocorre a transmissão de forças, conversão de energia e a alteração das propriedades mecânicas e químicas incluindo a natureza superficial dos materiais em contato (Cangundo, 2009).

Apesar de que em muitas aplicações de engenharia, o fenômeno de atrito e desgaste seja uma fonte de perda de eficiência e aumento de custo, o mesmo não acontece com outras aplicações (sistemas de frenagem de veículos, discos de embreagens, processo de laminagem, etc.) onde a presença do fenômeno de atrito faz parte dos requisitos básicos para o seu funcionamento normal, do mesmo modo que o homem não seria capaz de andar sem o efeito do fenômeno de atrito. Por fim, foi através da fricção que o homem descobriu o fogo (Cangundo, 2009).

Não existe um desgaste abrasivo constante das superfícies, visto que o movimento não é constante e na maior parte do tempo, as superfícies ficarão em repouso relativo (Muniz, 2007).

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 ocorre na maioria dos casos estudados pelos diversos autores que escrevem sobre Tribologia (Muniz, 2007).

A abrasão somente ocorrerá se as superfícies em contato não estiverem separadas por algum elemento lubrificante ou não houver alguma proteção superficial nos componentes em contato. Na maioria das vezes estas juntas terão que ser desmontadas e montadas diversas vezes. A repetibilidade tem que ser garantida. Sendo assim, parâmetros como rugosidade, proteção superficial, lubrificante e método de aperto devem ser controlados, pois são eles que têm influência direta sobre o coeficiente de atrito (Muniz, 2007).

Muitos fabricantes de equipamentos especificam que parafusos novos devem ser usados se houver desmontagem. Contudo, por causa da falta de disponibilidade, ou razões econômicas, parafusos são reutilizados na desmontagem de uma junta. Um bom número de pesquisadores tem reportado uma mudança nas características de fricção de parafusos em torques repetidos (Eccles, 2010).

Morgan e Henshall (1996) relataram que estojos podem experimentar uma redução significativa (50%) na sua tensão axial após algumas reutilizações. Contudo, eles descobriram que uma recuperação a condição original pode ser alcançada pelo uso de óleo como lubrificante.

Estudos prévios tem estabelecido que o coeficiente de fricção é largamente independente da velocidade de aperto do parafuso e substancialmente independente da pré carga (Eccles, 2010).

Jiang, Zhang e Park (2002) relataram que o dobro do coeficiente de fricção pode ocorrer na cabeça distorcida prevalecendo o torque na porca também. Eles concluíram que o coeficiente de atrito na rosca é substancialmente independente da pré-carga do parafuso e que o coeficiente de fricção na superfície de rolamento sob a cabeça do parafuso diminui com o incremento da carga. Eles também notaram que apertos e afrouxamentos repetidos geralmente

aumentam o atrito presente na junta aparafusada especialmente quando as superfícies em contato estão cobertas. Seus testes foram conduzidos em porcas flangeadas e eles especularam que isto foi atribuível à mudança na distribuição de pressão na área de contato com incremento da força de aperto.

## 2.7 - Rugosidade

Todas as superfícies sólidas são rugosas. O mundo do engenheiro é feito de sólidos com superfícies os quais adquirem sua textura como resultado da grande variedade de processos. Em alguns casos, ele é meramente um sub-produto do processo de conformação como fundição, forjamento, ou usinagem (CRC Handbook of Lubrication, 1983).

Texturas superficiais encontradas na engenharia moderna variam muito. A Figura 2.15, por exemplo, mostra uma superfície polida mecanicamente, enquanto a Figura 2.16 mostra uma na qual foi eletro-depositada. A Figura 2.17 coloca a rugosidade em perspectiva contra outras superfícies relacionadas de interesse da engenharia (CRC Handbook of Lubrication, 1983).

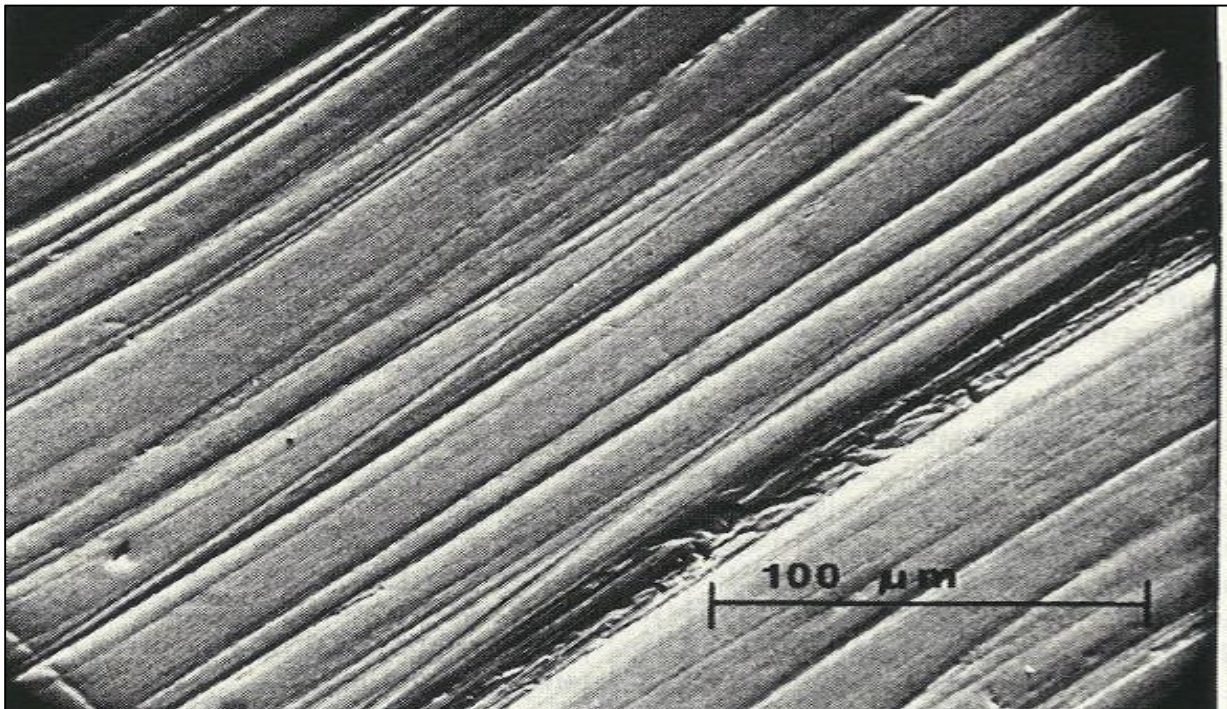


Figura 2. 15 - Micrografia eletrônica de amostra de cobre polida mecanicamente.  
(Fonte: CRC Hand book of Lubrification, 1983)

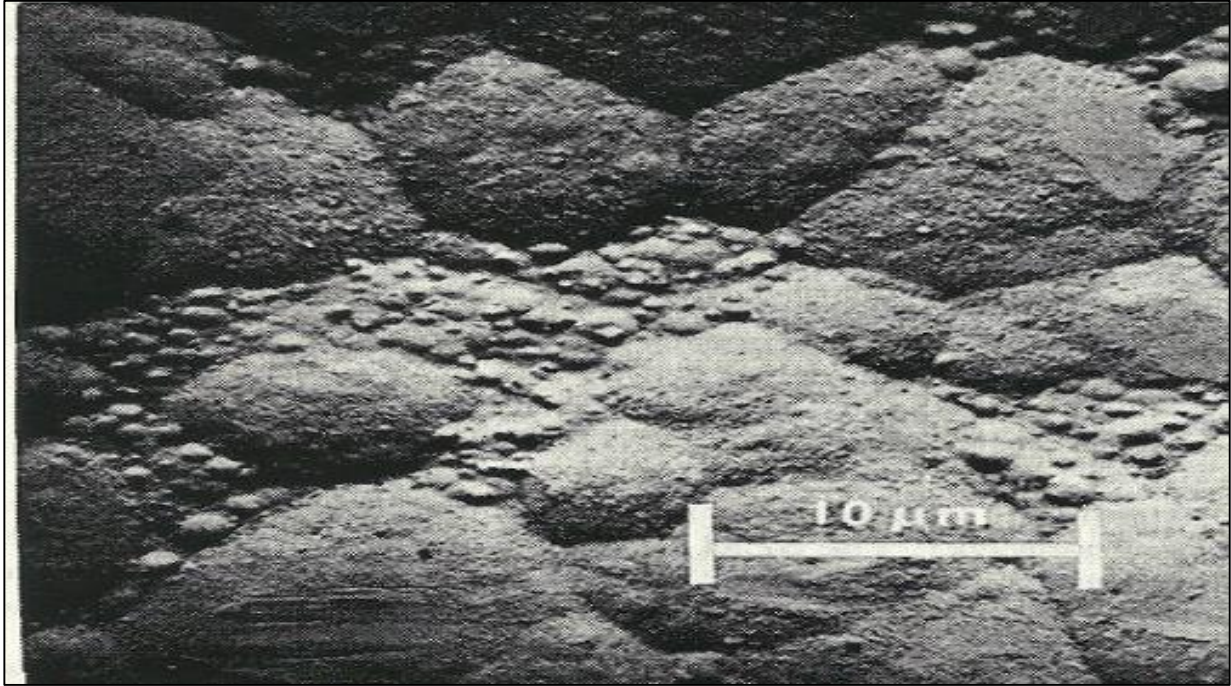


Figura 2. 16 - Micrografia eletrônica de ouro eletro depositado em latão.  
(Fonte: CRC Hand book of Lubrification, 1983)

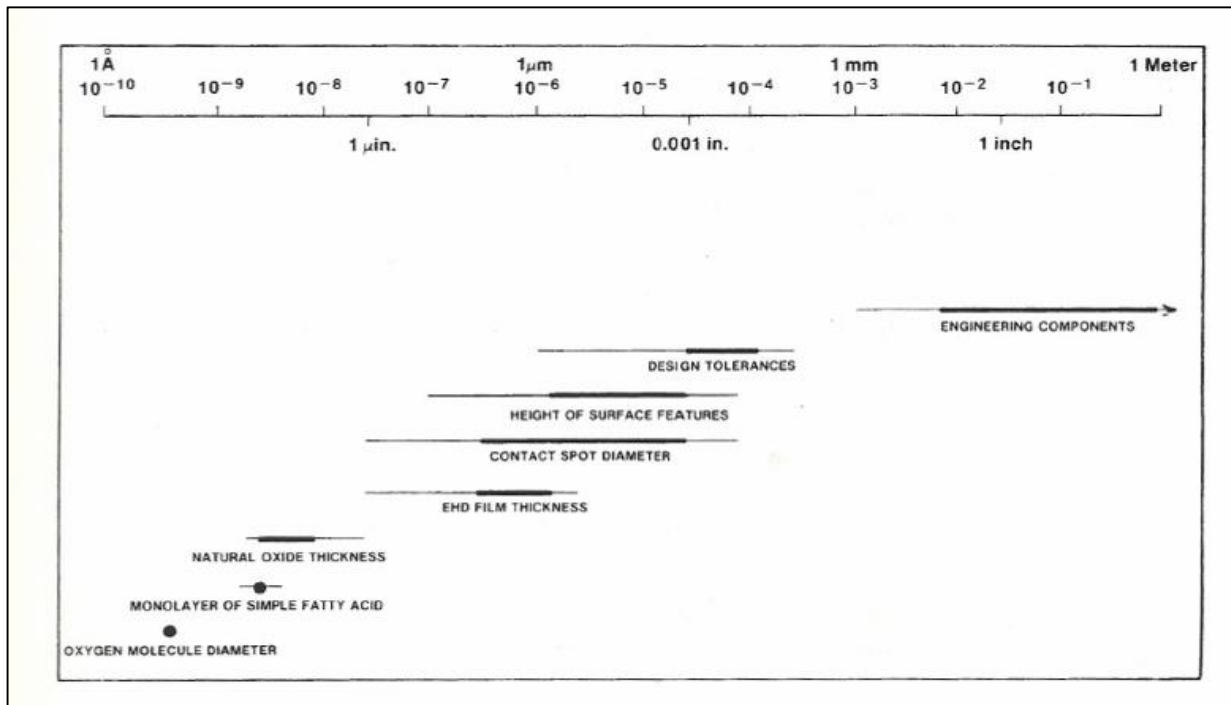


Figura 2. 17 - Perspectiva de rugosidades em função da superfície.  
(Fonte: Stoeterau, 2004)

A Rugosidade Média (Ra), Figura 2.18, é definida como sendo a média aritmética dos valores absolutos dos afastamentos  $Y_i$  do perfil médio.

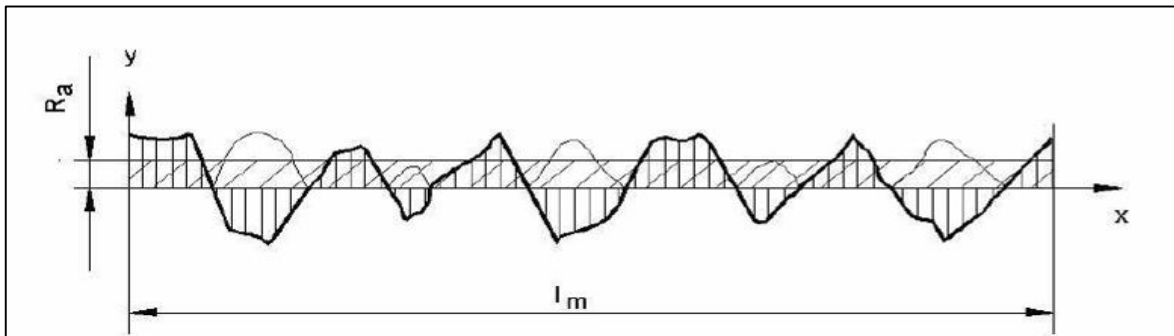


Figura 2. 18 - Definição da rugosidade Ra. (Stoeterau, 2004)

A rugosidade Ra pode ser definida através da equação 2.1:

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (2.1)$$

A norma NBR 8404/1984 de indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos esclarece que a característica principal (o valor) da rugosidade Ra também pode ser indicada pelos números da classe de rugosidade correspondente, conforme o Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Rugosidade Ra indicada de acordo com números da classe de rugosidade correspondente.

(Fonte: [destec.no.sapo.pt/pdf/parametros\\_rugosidade.pdf](http://destec.no.sapo.pt/pdf/parametros_rugosidade.pdf))

CLASSE DE RUGOSIDADE	RUGOSIDADE RA (valor em mm)
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

Na medição da rugosidade, são recomendados os valores mostrados no Quadro 2.4 para o comprimento da amostragem.

Quadro 2.4 - Comprimento da Amostragem (CUT OFF).  
(Fonte: [destec.no.sapo.pt/pdf/parametros\\_rugosidade.pdf](http://destec.no.sapo.pt/pdf/parametros_rugosidade.pdf))

TABELA DE COMPRIMENTO DA AMOSTRAGEM (CUT OFF)	
RUGOSIDADE RA (mm)	MÍNIMO COMPRIMENTO DE AMOSTRAGEM L (CUT OFF) (mm)
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,80
Maior que 2,0 até 10,0	2,50
Maior que 10,0	8,00

A rugosidade  $R_t$  é definida como sendo a distância e perfil de referência, ou seja, a maior distância medida normalmente ao perfil geométrico ideal (Stoeterau, 2004).

A norma VDI/VDE 2601 não recomenda o uso de  $R_t$  devido a seu uso errôneo no passado, onde foi utilizado como sinônimo de  $R_z$ ,  $R_{max}$ , entre outros. Alguns autores definem  $R_t$ , Figura 2.19, como sendo a distância vertical entre o ponto mais elevado e o mais profundo do perfil pico/vale (Stoeterau, 2004).

A Profundidade de alisamento  $R_p$  é definida como o afastamento médio de perfil real, sendo igual ao afastamento do perfil médio do perfil de referência (Stoeterau, 2004).

A rugosidade  $R_Z$ , ou média das rugosidades  $R_{Zi}$ , é definida como sendo a média aritmética das rugosidades singulares em cinco trechos de medição sucessivos.

A rugosidade  $R_{max}$  é definida como sendo a maior das profundidades isoladas das rugosidades singulares  $Z_i$ , ao longo do trecho de medição (Stoeterau, 2004).

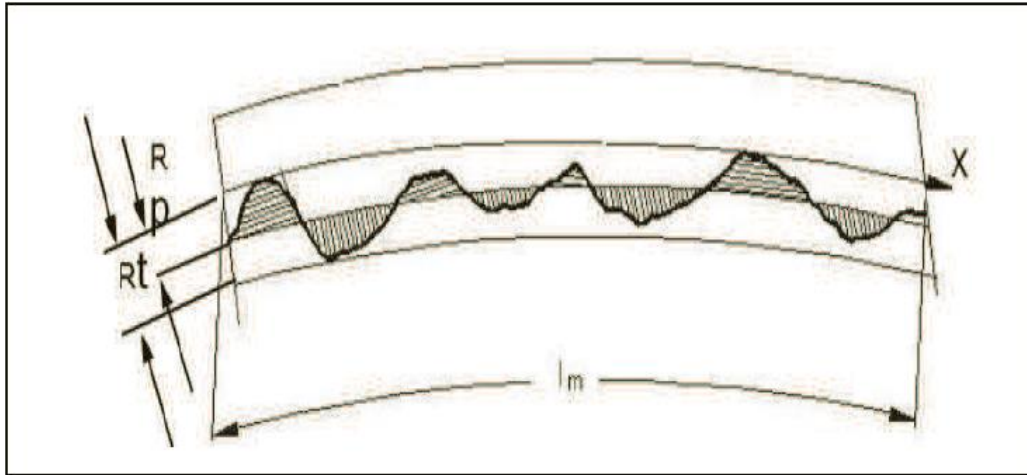


Figura 2. 19 - Definição da rugosidade  $R_p$  e  $R_t$  (Stoeterau, 2004)

## 2.8- Atrito nos Parafusos

A usual definição de engenharia para atrito é a resistência a relativa movimentação de corpos em contato. Tipos de atrito comumente encontrados são: seco, lubrificado, deslizante, rolante, dinâmico ou cinético, estático ou iniciando ou limite, interno ou histerético, externo e viscoso (CRC Handbook, 1983).

A magnitude da fricção é usualmente expressada como um coeficiente de atrito, o qual é a razão da força requerida para iniciar ou sustentar a movimentação relativa tangencial para a força normal  $N$  (ou peso) o qual pressiona as duas superfícies juntas. Então  $\mu = F/N$ . Nos primeiros anos destes estudos, o valor de  $F/N$  foi sendo razoavelmente constante para cada classe de materiais. Nos estudos modernos,  $\mu$  é amplamente considerado, dependendo de variáveis operacionais, lubrificantes, propriedades do substrato, e filmes superficiais (CRC Handbook, 1983).

O coeficiente de atrito é interpretado de duas maneiras: Coeficiente de atrito estático e dinâmico. Dinâmico, quando a força tangencial for medida durante o movimento das partes em contato e Estático quando esta força for àquela necessária para tirar do repouso, um dos corpos em contato (Muniz, 2007).

No caso de parafusos os coeficientes relacionados ao atrito que são mais importantes são os dinâmicos, pois são eles que aparecem nos cálculos de confiabilidade de parafusos. Porém o travamento final da junta é feito pelo coeficiente de atrito estático. Este é o responsável pelo torque final de desaperto da junta (Muniz, 2007).

## **2.9 - Lubrificação**

A lubrificação é usada para reduzir o atrito e o desgaste entre duas superfícies sólidas em movimento relativo. Em alguns casos para controlar, sob razoáveis limites, a temperatura gerada pelo atrito (Muniz, 2007).

No caso da aplicação da lubrificação no rosqueamento, o uso vai se restringir em diminuir o atrito dinâmico durante a aplicação do torque, até o ponto onde a força axial gerada seja a força de montagem desejada. Se esta redução for excessiva poderá haver ruptura de algum elemento da junta. Se for insuficiente a força de montagem não será conseguida (Muniz, 2007).

A lubrificação pode ser líquida ou sólida. Apesar da importância do óleo lubrificante no controle do coeficiente de atrito nas superfícies de contato dos parafusos, não abordaremos a análise dos óleos lubrificantes neste estudo. A análise dos lubrificantes sólidos ficará restrita ao fosfato ou ao enegrecido de têmpera, depende dos parafusos amostrados, encontrado nas peças testadas em laboratório (Muniz, 2007).

A aplicação de lubrificantes especiais impede a corrosão e a grimpagem da união roscada. O tempo necessário para desfazer estas uniões, por exemplo, durante a inspeção de condutas de abastecimento, guarnições e máquinas é substancialmente reduzido o que se reflete em redução direta dos custos (OSK-Germany, 2014).

Assim, a escolha do lubrificante para parafusos de forma acertada não garante apenas a confiabilidade de uma união roscada, como também facilita mais tarde a sua desmontagem e oferece as vantagens em termos de custos que daí advém (OSK-Germany, 2014).

Para os parafusos de alta resistência, os fabricantes dos mesmos recomendam utilizar nas montagens, lubrificantes específicos que suportem



elevadas pressões e temperaturas elevadas com baixa velocidade de deslizamento.

As graxas possuem em suas formulações altas concentrações de óleos de base que são formadores de películas lubrificantes entre as superfícies, indispensáveis para redução do atrito e para evitar o desgaste. Essas são projetadas para liberar o óleo e assim prover a lubrificação, mas em conexões roscadas devido a altas cargas durante o torqueamento, o óleo base pode não resistir e evaporar, reduzindo as propriedades da graxa (apud Rodrigues, 2015).

As formulações de pastas para montagem são diferentes das graxas, já que os óleos de base são responsáveis apenas pela transmissão de altas concentrações de lubrificantes sólidos para os locais de lubrificação. Estes lubrificantes sólidos não estão sujeitos a evaporação, mantendo assim a camada de lubrificação e estabilizando o atrito durante o torque (Molycote Dow Corning Corporation, 2012).

Os vernizes anti-atrito formam uma película lubrificante seca como uma tinta, otimizando as operações de torqueamento mesmo em condições extremas de pressão, temperatura, ambientes com muita poeira e corrosivos. Porém a eficiência e a vida útil da superfície anti-atrito é grandemente afetada pelo pré-tratamento da superfície de deposição do mesmo (Molycote Dow Corning Corporation, 2012).

## **2.10 - Análise Dimensional e Semelhança**

A análise dimensional é um valioso meio para elaboração de métodos experimentais. Uma das principais aplicações da análise dimensional é o estabelecimento das condições de semelhanças físicas, que devem relacionar protótipos com modelos reduzidos. Para que um modelo possa representar um protótipo é preciso que haja semelhança cinemática e dinâmica, a começar pela semelhança geométrica. Em muitos casos introduzem-se distorções, ou seja, adotam-se escalas diferentes no modelo para grandezas de um mesmo tipo, e as consequências devem ser cuidadosamente analisadas para evitar erros de

interpretação de resultados. A análise dimensional além de orientar o modo como devem ser executados os modelos, passa a ter como papel principal o de advertir contra conclusões simplistas (Neves, 2005).

Discrepâncias que podem existir entre o comportamento do modelo e do protótipo, não significam a condenação na utilização de modelos reduzidos. A rigorosa crítica dessas discrepâncias permite a melhoria dos modelos e a avaliação do grau de importância dos erros delas resultantes (Neves, 2005).

## **2.11 – Materiais e Métodos (Rolin, 2014 / Rodrigues, 2015)**

Em estudo anterior foram analisados e ensaiados 19 parafusos de diâmetro 1 ¼ in x 7 UNC da classe 10.9, fabricados conforme a norma ASTM A-490, enegrecido por tratamento térmico, com e sem aplicação de lubrificante, utilizados em guindastes de emprego offshore.

Posteriormente foram analisados e ensaiados 42 parafusos M12 x 1,75 de mesma classe, com acabamento superficial enegrecido por têmpera, com e sem lubrificação, que desempenham papel estrutural nas montagens de componentes mecânicos, bem como algumas de suas propriedades mecânicas.

### **2.11.1– Análise Microestrutural**

Foi realizada uma análise microestrutural em ambos parafusos para determinação das propriedades metalúrgicas. Os parafusos foram cortados, limpos e posteriormente lixados e polidos. O reativo químico utilizado para revelar a microestrutura dos aços foi o Nital 2%. Foram analisadas as seções transversais e longitudinais dos corpos de prova. A observação microestrutural foi realizada através do Microscópio Olympus Confocal, modelo OLS 4100 mostrado na Figura 2.20.



Figura 2.20 - Microscópio Olympus Confocal  
(Fonte: Rodrigues, 2015)

### 2.11.2 - Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza nos parafusos 1.1/4 in x 7 UNC foram realizados no microdurômetro Shimadzu HVM na escala Vickers. Já os parafusos M12 x 1,75 foram analisados em um durômetro de bancada na escala Rockwell C.

### 2.11.3 - Medição da rugosidade

A medição da rugosidade foi realizada em amostra de ambos parafusos nas condições: sem uso (como recebido), seco após o décimo torqueamento e lubrificado após o décimo torqueamento. Foi utilizado o microscópio Olympus confocal em escala Ra.

### 2.11.4 - Medição de torque

Na medição de torque, foram comparados graficamente, os resultados das médias do coeficiente de atrito e fator K em ambos parafusos com o intuito de comprovar que estes apesar de se tratarem de diferentes tipos de aços, possuem as mesmas características mecânicas.

Nos parafusos 1 ¼ in x 7 UNC, a medição de torque foi realizada em uma bancada construída para esta finalidade com a utilização de equipamentos

especiais como uma torqueadeira eletrônica, um visor da arruela sensora, uma arruela sensora e um soquete digital.

Acessórios:

- Torqueadeira Eletrônica, Figura 2.21- utilizada devido a facilidade de ajustar o torque pretendido, e também por se tratar de torqueamento contínuo;



Figura 2. 21 - Torqueadeira Elétrica.

(Fonte: [www.pnx.com.br/produtos/index.php?prod=33](http://www.pnx.com.br/produtos/index.php?prod=33))

- Soquete Digital, Figura 2.22 – denominado como célula de carga de torção, este foi utilizado para obter o conhecimento mais perfeito possível do torque efetivamente aplicado ao parafuso. Este foi calibrado em laboratório credenciado pela Rede Brasileira de Calibração (RBC);



Figura 2.22 - Soquete Digital. (Fonte: [www.sportsmansguide.com/product/index/powerbuilt-3-8-digital-t?](http://www.sportsmansguide.com/product/index/powerbuilt-3-8-digital-t?))

- Arruela Sensora, Figura 2.23 - foi utilizado o sistema de arruela sensora composto por célula de carga de compressão, tipo arruela, e visor de cristal líquido para apresentação de valores. A mesma foi calibrada em laboratório credenciado pela Rede Brasileira de Calibração (RBC);



Figura 2. 23 - Arruela Sensora.  
(Fonte: [www.strainsense.co.uk/products/measurement-specialties](http://www.strainsense.co.uk/products/measurement-specialties))

Foram utilizados três valores médios de torque, 1450, 2034 e 2441Nm. Estas faixas de torque foram selecionadas com objetivo de gerar força de pré-tensão axial de 55, 75 e 85% do limite de escoamento do material do parafuso. Foram selecionadas três condições de montagem, consideradas típicas na indústria: seco, lubrificado e relubrificado. Na condição “lubrificado”, com uso de graxa Lubrax Autolith 2, o parafuso foi lubrificado apenas antes da primeira montagem. Já na condição “Relubrificado”, a graxa foi reaplicada a cada torqueamento, aguardando-se um tempo de cinco minutos entre cada reaplicação. Algumas combinações de carga e lubrificação não foram testadas devido à falta de corpos de prova.

Nos parafusos M 12 x 1,75, os ensaios de torque foram realizados nos parafusos com e sem lubrificação com torque de 111 e 133Nm. Nos parafusos sem lubrificação, apenas a camada superficial enegrecida pelo processo de tempera e revenimento foi deixada nas superfícies. Nos parafusos que receberam lubrificação, um grupo foi lubrificado com graxa de uso comum na lubrificação de rolamentos, Lubrax Autolith 2, e o outro uma pasta específica para montagem, com alta concentração de lubrificantes sólidos a base de cobre e grafite LOCTITE LB 8008. As cargas pretendidas de pré-tensão tanto para os lubrificados como para os sem lubrificação foram de 75% e 90% da tensão de serviço.

A medição foi realizada através de equipamento mostrado na Figura 2.24, configurado para este fim em cada situação de montagem, segundo norma ISO 16047.

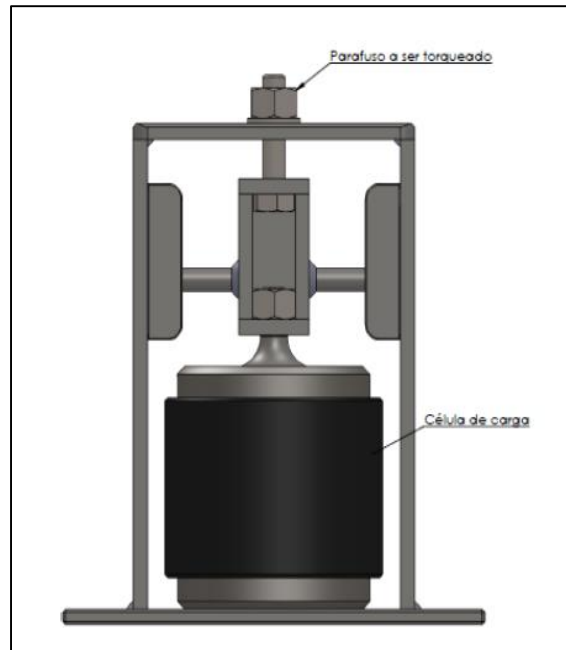


Figura 2.24 - Equipamento utilizado para medição de torque. (Fonte: Rodrigues, 2015)

### 2.11.5 - Ensaio de tração

Os ensaios de tração em ambos parafusos foram realizados na máquina universal de ensaios INSTRON, modelo 8852, mostrado na Figura 2.25, para construção do gráfico de tensão versus deformação e verificação das propriedades mecânicas.

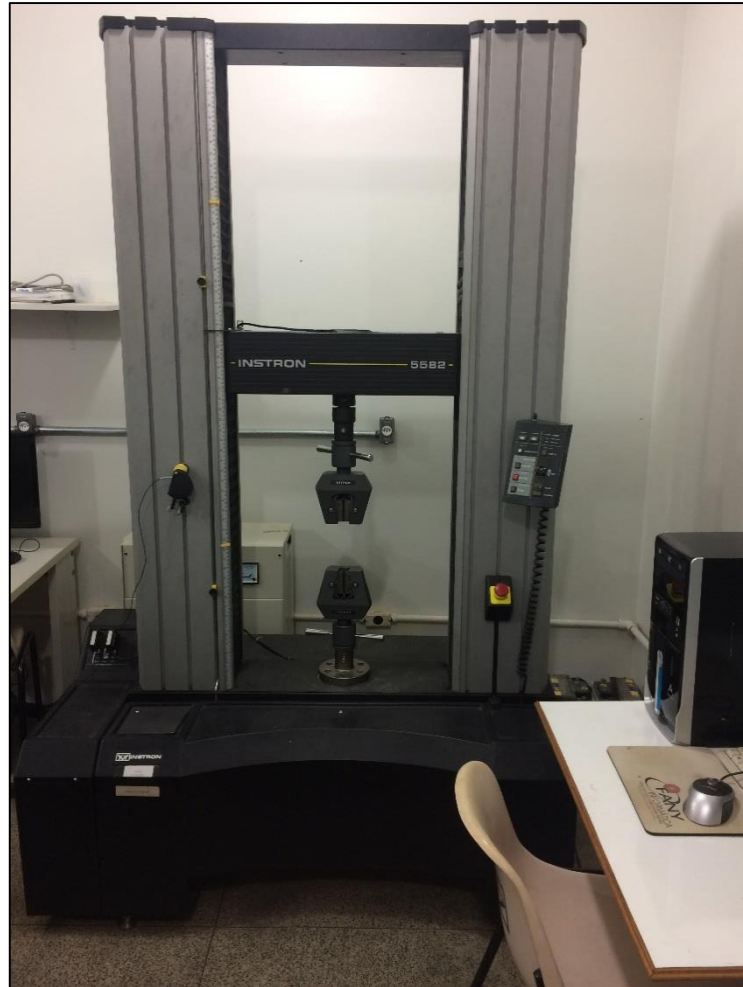


Figura 2.25 - INSTRON, modelo 8852 – LAMAV  
(Fonte: Autor)

Os corpos de prova dos parafusos 1.1/4 in x 7 UNC tiveram suas dimensões de seção reduzida extraídos no próprio parafuso. As figuras 2.26 e 2.27 apresentam o esquema de retirada de amostras e as dimensões do corpo de prova, respectivamente.

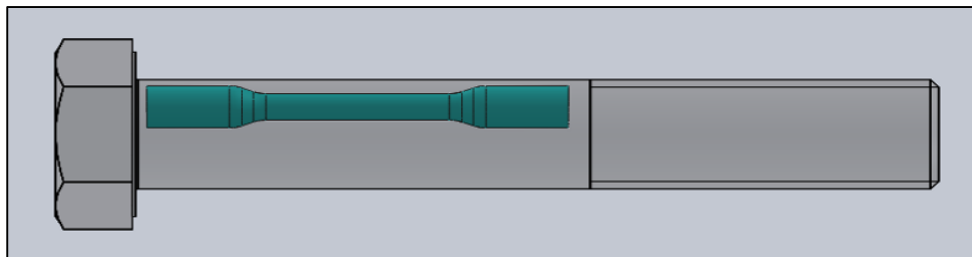


Figura 2. 26 - Posição de extração de corpo de prova de tração.  
(Fonte: Rolin, 2014)

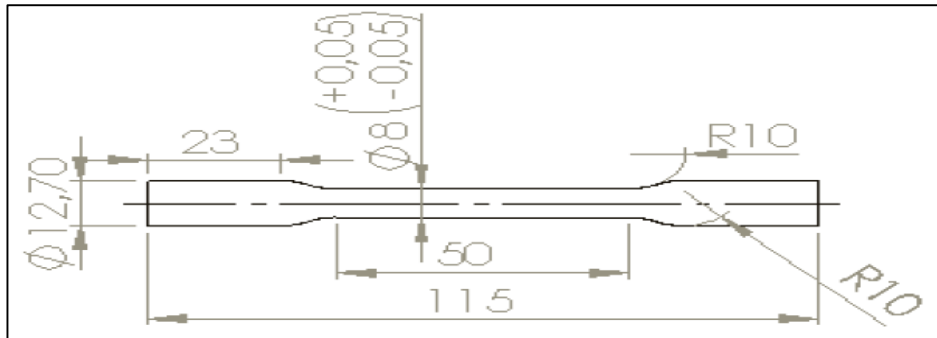


Figura 2. 27 – Dimensões do corpo de prova do parafuso 1 ¼ in x 7 UNC. (Rolin, 2014)

No caso dos parafusos M12 x 1,75, conforme mostrado na figura 2.28, os corpos de prova foram usinados com as dimensões padronizadas pela norma ASTM F 606M em um torno horizontal MAZAK, modelo QSM 200 M do LAMAV.

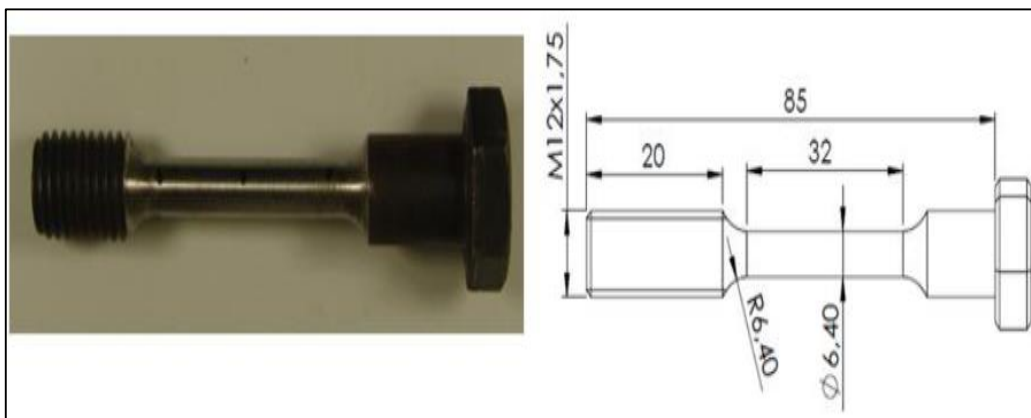


Figura 2.28 - Dimensões do corpo de prova do parafuso M12 x 1,75. (Fonte: Rodrigues, 2015)

Devido ao tamanho e geometria dos parafusos, foram projetadas e fabricadas, duas garras em aço ANSI 4140 temperadas e revenidas, para realização dos ensaios de tração nos corpos de prova usinados.

A partir de então serão analisadas as curvas tensão versus deformação de cada um dos parafusos e comparar graficamente, as respectivas propriedades mecânicas.



### CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

O objetivo desse estudo foi comparar os parafusos M 12 x 1,75 e 1.1/4" x 7 UNC de classe 10.9, analisando suas propriedades mecânicas e verificar se existe similaridade entre essas propriedades, além de equacionar e trazer os valores dos resultados encontrados em duas dissertações deste mesmo grupo de pesquisa para a mesma escala. A Figura 3.1 apresenta o esboço em 3D dos parafusos em questão. Na Figura 3.2 é possível observar estes parafusos.

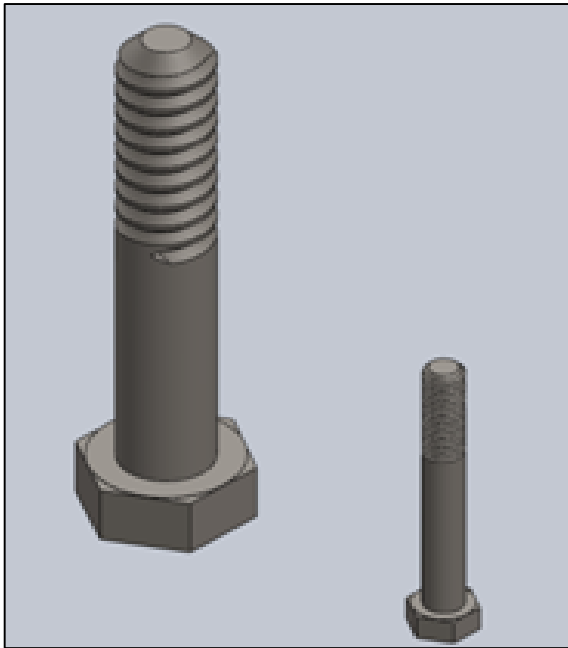


Figura 3. 1 – Vista isométrica dos parafusos 1.1/4" x 7 UNC e M 12 x 1,75



Figura 3. 2 – Parafusos 1.1/4" x 7 UNC e M12 x 1,75

A metodologia utilizada no presente estudo foi a comparação direta e adimensionalização confiável para parafusos de mesma classe, porém com acabamentos e materiais diferentes. Por se tratar de um estudo introdutório, essas comparações também são consideradas meramente qualitativas. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma especificando os ensaios e medições que foram comparados.

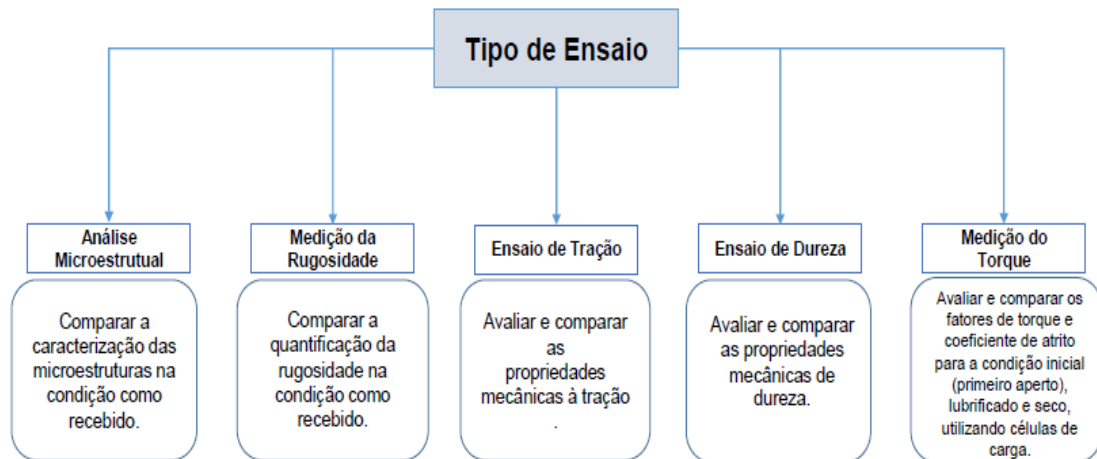


Figura 3. 3 - Medições e Análises comparadas nesse estudo. (Fonte: Autor)

### 3.1 – Análise Microestrutural

Em duas dissertações anteriores citadas neste, uma análise microestrutural em ambos parafusos foi realizada para determinação das propriedades metalúrgicas. Através da revisão bibliográfica dessa dissertação e dos resultados obtidos nas dissertações foi possível comparar os resultados e obter-se conclusões.

### 3.2 – Medição da Rugosidade

Na medição da rugosidade foram avaliados os resultados obtidos através da rosca do parafuso 1.1/4" x 7 UNC e do filete da rosca do parafuso M12 x 1,75 nas condições, como recebido, lubrificado após o 10<sup>o</sup> torqueamento e seco após o 10<sup>o</sup> torqueamento.

### 3.3 - Ensaio de Tração

Foram comparados os resultados obtidos no ensaio de tração realizados na máquina de ensaios universal (Instron) dos parafusos para caracterização das suas respectivas propriedades mecânicas dos materiais estudados.

### 3.4 - Ensaio de Dureza

No ensaio de dureza foram comparados os resultados obtidos anteriormente da dureza HRc média dos parafusos.

### 3.4 – Medição do Torque

Na medição de torque, foram comparadas as médias das seguintes grandezas obtidas nas dissertações anteriores: fator de torque (K), coeficiente de atrito ( $\mu_t$ ) e força de aperto.

Através das médias obtidas em cada estudo do fator de torque e do coeficiente de atrito foi realizada uma análise gráfica das médias por ciclo de aperto com o objetivo de visualizar o comportamento mecânico dessas grandezas em diferentes valores torques condições seco e lubrificado.

A determinação dos torques que puderam ser comparados entre os parafusos foi dada de acordo com a ordem crescente desses valores e o percentual da pré tensão axial do limite de escoamento do material (tensão de serviço) de cada parafuso (55%, 75% e 90%). Três valores médios foram obtidos na medição de torque dos parafusos 1.1/4" x 7 UNC (1450, 2034 e 2441 Nm). Já nos parafusos M 12 x 1,75 foram obtidos dois valores médios de torque (111 e 133 Nm).

O parafuso M12 x 1,75 será considerado nesta dissertação como modelo experimental do parafuso 1.1/4" x 7 UNC, dito real. Como o objetivo é encontrar a grandeza do parafuso real testando o experimental, podemos fazer a seguinte associação em relação ao fator de torque e coeficiente de atrito descrita nas equações 3.1 e 3.2:

$$\mu_{t_{real}} = \frac{1}{RM} \mu_{t_{experimental}} \quad (3.1)$$

$$k_{real} = \frac{1}{RM} k_{experimental} \quad (3.2)$$

Onde:

$\mu_{\text{real}}$  = coeficiente de atrito do parafuso considerado real (1.1/4" x 7 UNC);

$\mu_{\text{experimental}}$  = coeficiente de atrito do parafuso considerado real (M 12 x 1,75);

$k_{\text{real}}$  = fator de torque do parafuso considerado real (1.1/4" x 7 UNC);

$K_{\text{experimental}}$  = fator de torque do parafuso considerado experimental (M12 x 1,75);

RM = razão das médias;

Se usarmos a média dos apertos em um parafuso experimental (M12 x 1,75) e souber o fator de escala do mesmo (média da razão média), é possível corrigir todos os valores que foram obtidos em laboratório utilizando um fator de escala.

Assim foi possível determinar, através de cálculos matemáticos, um fator nomeado por este autor de fator de correção (FC) do fator de torque e do coeficiente de atrito através dessas médias obtidas através das equações 3.3 e 3.4.

$$FC = \frac{k_{\text{experimental}}}{RM} \quad (3.3)$$

$$FC = \frac{\mu_{\text{experimental}}}{RM} \quad (3.4)$$

Onde:

FC = fator de correção;

$K_{\text{experimental}}$  = fator de torque do parafuso considerado experimental (M12 x 1,75);

$\mu_{\text{experimental}}$  = coeficiente de atrito do parafuso considerado experimental (M12 x 1,75);

RM = razão das médias;

A partir do fator de correção, foi calculado a variação média ( $\Delta\%$ ) do fator de torque e do coeficiente de atrito através das equações 3.5 e 3.6:

$$\Delta\% = \left( \frac{FC - k_{real}}{k_{real}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

$$\Delta\% = \left( \frac{FC - \mu t_{real}}{\mu t_{real}} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

Onde:

$\Delta\%$  = variação média;

FC = fator de correção;

$K_{real}$  = fator de torque do parafuso considerado real (1.1/4" x 7 UNC);

$\mu t_{real}$  = coeficiente de atrito do parafuso considerado real (1.1/4" x 7 UNC);

O processo foi realizado para cada aperto. A variação média foi considerada uma descrição do quanto os valores se dispersam em torno da média. Se eles variam pouco, esta variação terá valor baixo (aceitável), porém se ele tiver alto, significa que ele tem uma variação elevada em torno da média. Esse processo é uma medida da qualidade da dispersão.

A tabela 3.1 exemplifica o processo e cálculo das médias, razão das médias, fator de correção e a variação média entre o parafuso considerado nesta pesquisa como experimental e o parafuso dito como real.

Tabela 3. 1 – Exemplo do Processo dos Cálculos

APERTOS	PARAFUSO M12 x 1,75	PARAFUSO 1.1/4 in x 7UNC	RAZÃO DAS MÉDIAS	FATOR DE CORREÇÃO	$\Delta\%$ EXPERIMENTAL x REAL	MÓDULO
1				FC = $K_{experimental}/1,34$	$\Delta\% = ((FC - K_{real})/K_{real}) \times 100$	ABS
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
			MÉDIA			MÉDIA

Para força de aperto foi estabelecido, graficamente, um coeficiente utilizando as razões das médias das cargas ( $F/F_0$ ) e verificando assim um fator de correção mínimo.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 - Análise Microestrutural

Tanto no parafuso 1 ¼” x 7UNC e no M12 x 1,75, a avaliação metalográfica revelou uma estrutura martensítica revenida, típica de aços de baixa liga, temperados e revenidos (ARBL – aço carbono de alta resistência e baixa liga).

Através da análise química dos parafusos M12 x 1,75 e respectivas porcas foi revelado um aço de baixo carbono microligado, e das arruelas um aço de alto carbono microligado.

Já nos parafusos 1 ¼” x 7UNC, a análise da composição química não evidenciou a presença do elemento molibdênio que caracteriza o aço como SAE 4140 (UNS-41400). Em análise qualitativa realizada no MEV, a composição encontrada é característica do aço de baixa liga conforme a norma SAE 5140 (UNS-51400).

O elemento químico Molibdênio (Mo) tem por finalidade o aumento da resistência em altas temperaturas (fluência), desloca a curva TTT para a direita aumentando sua temperabilidade e influencia na estabilização de carbonetos. Entretanto, a norma de fabricação do parafuso (ASTM-A490) não impõe o aço a ser utilizado, apenas indica a necessidade de que seja um aço liga e que atenda os limites de escoamento e ruptura ( $\sigma_e = 900$  MPa e  $\sigma_{max} = 1000$  MPa). Dessa forma, a divergência encontrada não se configura uma irregularidade, à princípio, porém esta pode acarretar uma irregularidade dependendo da aplicação (temperaturas mais elevadas).

Tratando termicamente o aço 5140, pode-se chegar a mesma qualidade do aço 4140, porém existirá a possibilidade de perda de vida em fadiga.

O parafuso, segundo norma NBR 8855, deve atingir ou superar as propriedades mecânicas especificadas para ser aprovado. Assim a norma não restringe o aço a ser empregado na sua fabricação, apenas delimita os aços recomendados para cada classe.

## 4.2 - Ensaio de Dureza

No parafuso 1.1/4" x 7 UNC, as medições de dureza revelaram um valor médio de 35,2 HRc. Já no parafuso M 12 x 1,75, as medições de dureza atingiram um valor médio de 38 HRc, estando de acordo com a dureza recomendada pela norma NBR 8855.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração e de dureza são decisivos para a aceitação ou não dos parafusos, segundo a norma NBR 8855. Todas as amostras atenderam ao intervalo de dureza definido na norma ASTM A-490 (33 a 38 HRc).

## 4.3- Medição da Rugosidade

No Quadro 4.1 temos os resultados da medição da rugosidade realizada no microscópio confocal para ambos parafusos que puderam ser comparáveis. A rugosidade no parafuso M 12 x 1,75 foi medida no filete da rosca do parafuso. Já o parafuso 1.1/4" x 7 UNC, a rugosidade foi medida na rosca do parafuso. Logo aquele pôde ser comparado a rosca do parafuso.

Quadro 4.1 - Medição da Rugosidade em ambos parafusos.

Medição da Rugosidade em Ra		
Condição	Parafuso	
	1 1/4" x 7UNC (Aço 5140)	M 12 x 1,75 (Aço 4140)
	Rosca	Filete do Parafuso
Sem uso (Como recebido)	1,482	0,664
Lubrificado após o 10 <sup>o</sup> torqueamento	2,354	1,861
Seco após o 10 <sup>o</sup> torqueamento	9,589	3,527

Podemos observar que a rugosidade inicial do parafuso M 12 x 1,75 é equivalente à 45% da rugosidade do parafuso 1.1/4" x 7 UNC. Além disso, a rugosidade do parafuso M 12 x 1,75 torqueado com lubrificação aumentou cerca

de 3 vezes em relação ao valor inicial. Já o parafuso 1.1/4" x 7 UNC aumentou apenas 1,5 vezes.

O aumento da rugosidade de ambos parafusos torqueados a seco ficaram próximos. O parafuso 1.1/4" x 7 UNC aumentou 6,5 vezes e o M 12 x 1,75 aumentou 5,3 vezes. Logo, a lubrificação se mostra benéfica, porém em proporção menor no parafuso M 12 x 1,75, visto que a rugosidade triplicou.

#### 4.4- Medição de Torque

##### 4.4.1 - Média Ensaio de Torque de 111Nm (M12 x 1,75) e 2034Nm (1.1/4" x 7UNC) lubrificado à 75%do limite de escoamento do material do parafuso.

#### Coeficiente de Atrito ( $\mu$ )

Observa-se na Figura 4.1 que a variação do coeficiente de atrito de acordo com cada ciclo de aperto de ambos os parafusos se comportam de maneira similar, porém a variação no parafuso 1.1/4" x 7 UNC, dito como real, é menor.

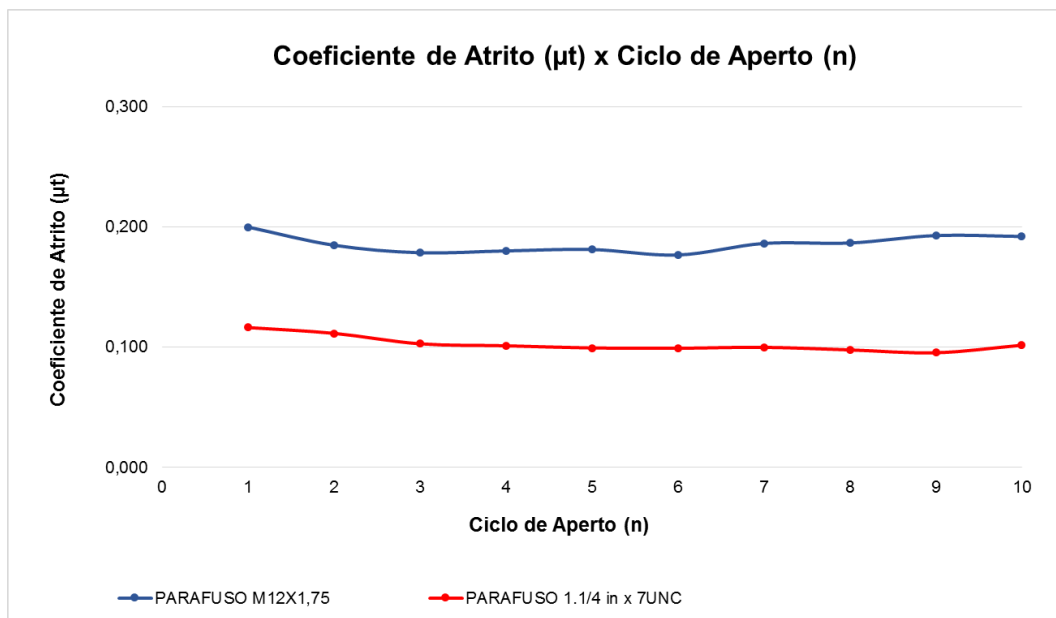


Figura 4. 1 – Variação do Coeficiente de Atrito versus Ciclo de Aperto nos Parafusos M12 x 1,75 e 1.1/4" x 7 UNC.



A partir das informações discriminadas na Tabela 4.1, é possível estabelecer que:

Tabela 4. 1 – Relações matemáticas para obtenção do diferencial médio do coeficiente de atrito dos parafusos.

APERTOS	PARAFUSO M12 x 1,75	PARAFUSO 1.1/4 in x 7UNC	RAZÃO DAS MÉDIAS	FATOR DE CORREÇÃO FC = $\mu_{\text{experimental}}/1,82$	$\Delta\%$ EXPERIMENTAL x REAL $\Delta\% = ((FC - \mu_{\text{real}})/\mu_{\text{real}}) \times 100$	MÓDULO ABS
1	0,200	0,116	1,718	0,110	-5,496	5,496
2	0,185	0,111	1,657	0,102	-8,889	8,889
3	0,178	0,103	1,737	0,098	-4,495	4,495
4	0,180	0,101	1,779	0,099	-2,154	2,154
5	0,181	0,099	1,824	0,100	0,332	0,332
6	0,177	0,099	1,782	0,097	-1,996	1,996
7	0,186	0,100	1,866	0,102	2,592	2,592
8	0,187	0,098	1,909	0,103	4,994	4,994
9	0,193	0,095	2,022	0,106	11,189	11,189
10	0,192	0,102	1,890	0,106	3,925	3,925
			MÉDIA			MÉDIA
			1,82			4,61

$$\mu_{t_{1.1/4" \times 7 \text{ UNC}}} = \frac{1}{1,82} \mu_{t_{M12 \times 1,75}} \quad (4.1)$$

E que através do cálculo do fator de correção e o empregando no cálculo do diferencial médio, obtivemos um diferencial equivalente à **4,61** e considerado nesta pesquisa como uma pequena variação.

### Fator de Torque (K)

Em relação ao fator de torque, observa-se na Figura 4.2 que a variação do fator de torque de acordo com cada ciclo de aperto no parafuso M12 x 1,75 apresentar maior discrepância em relação a variação do parafuso 1.1/4" x 7 UNC.

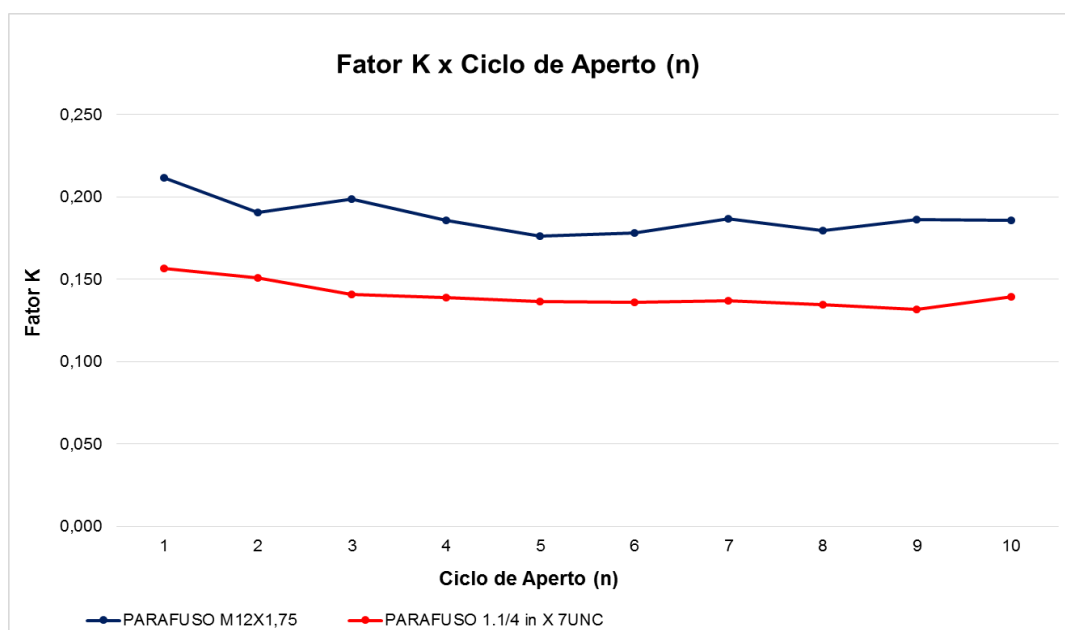


Figura 4. 2 - Variação do Fator K versus Ciclo de Aperto nos Parafusos M12 x 1,75 e 1.1/4" x 7 UNC.

A partir das informações discriminadas na Tabela 4.2, é possível estabelecer que:

Tabela 4. 2 - Relações matemáticas para obtenção do diferencial médio do fator de torque dos parafusos.

APERTOS	PARAFUSO M12 x 1,75	PARAFUSO 1.1/4 in x 7UNC	RAZÃO DAS MÉDIAS	FATOR DE CORREÇÃO	Δ% EXPERIMENTAL x REAL	MÓDULO
				FC = $K_{\text{experimental}}/1,34$	$\Delta\% = ((FC - K_{\text{real}})/K_{\text{real}}) \times 100$	ABS
1	0,212	0,157	1,352	0,158	1,080	1,08
2	0,191	0,151	1,263	0,143	-5,539	5,54
3	0,199	0,141	1,413	0,148	5,639	5,64
4	0,186	0,139	1,339	0,139	0,123	0,12
5	0,176	0,136	1,290	0,132	-3,503	3,50
6	0,178	0,136	1,307	0,133	-2,259	2,26
7	0,187	0,137	1,364	0,140	2,020	2,02
8	0,180	0,135	1,335	0,134	-0,123	0,12
9	0,186	0,132	1,414	0,139	5,776	5,78
10	0,186	0,139	1,335	0,139	-0,151	0,15
			MÉDIA			MÉDIA
			1,34			2,62

$$k_{1.1/4" \times 7 UNC} = \frac{1}{1,34} k_{M12 \times 1,75} \quad (4.2)$$

Através do cálculo do fator de correção e o empregando no cálculo do diferencial médio, obtivemos um diferencial equivalente à **2,62** e considerado nesta pesquisa como uma pequena variação. Este valor pode ser considerado mesmo com a discrepância mostrada no gráfico na figura 4.2.

### Exemplo de Aplicação

Calcular força de aperto necessária para ser aplicada no parafuso experimental para que se tenha os mesmos parâmetros do parafuso real.

$$K_{1.1/4" \times 7 UNC} = \frac{1}{1,34} K_{M12 \times 1,75}$$

Sendo,  $T = F \cdot D \cdot K$ , logo:  $F = \frac{T}{DK}$

$$F_{exp} = \frac{T_{exp}}{D_{exp}(1,34K_{real})}$$

$$F_{exp} = \frac{T_{exp}}{D_{exp}(1,34K_{real})} = \frac{111}{0,012 (1,34 \times 0,140)} = 49,3 \text{ kN}$$

## Força

Em relação à força é possível observar no gráfico da Figura 4.3 que foram comparadas as médias das razões das cargas final e inicial em cada ciclo de aperto em ambos parafusos. Neste primeiro caso é possível observar que a variação entre ambos não é tão significativa.

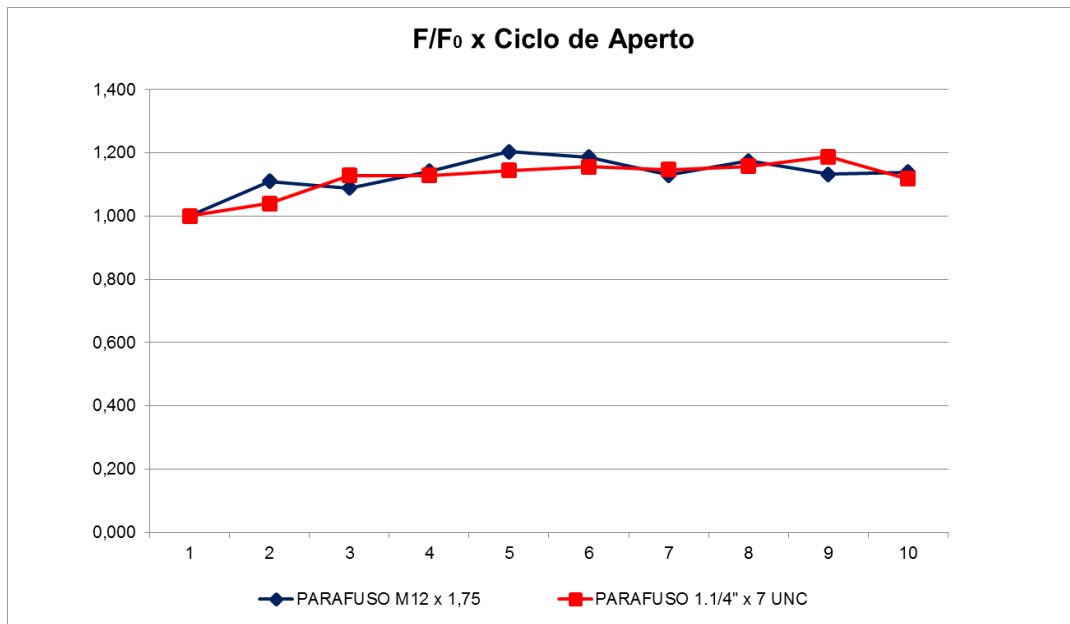
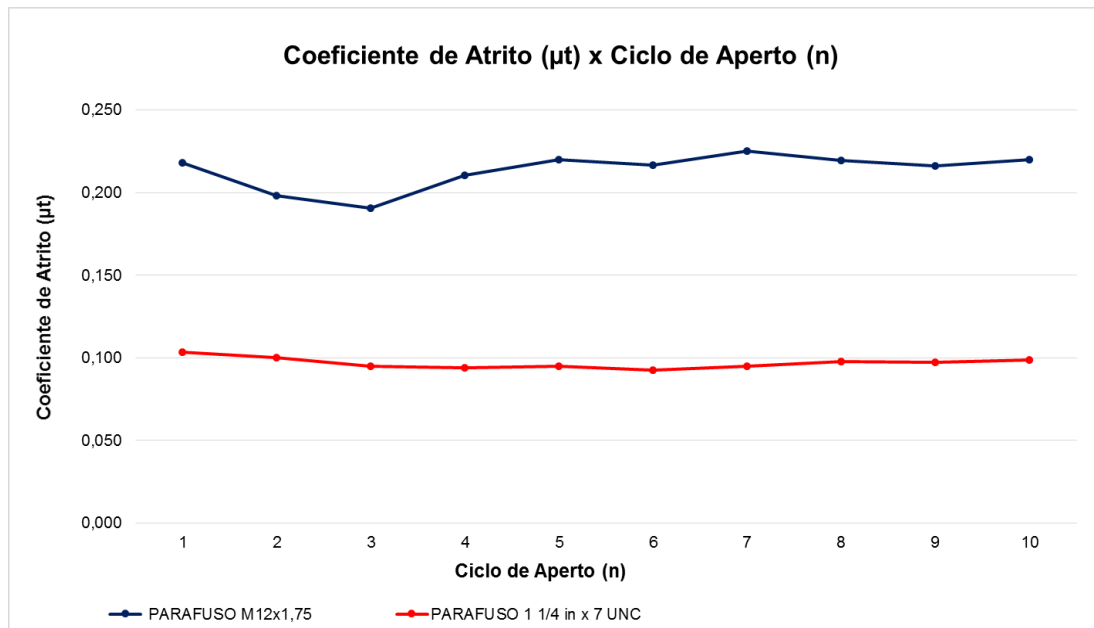


Figura 4. 3 - Variação da Força versus Ciclo de Aperto nos Parafusos M12 x 1,75 e 1.1/4" x 7 UNC.

**4.4.2 - Média Ensaio de Torque de 133Nm (M12 x 1,75) e 2441Nm (1.1/4" x 7 UNC) lubrificado à 90%do limite de escoamento do material do parafuso.**

### **Coeficiente de Atrito ( $\mu$ )**

Observa-se no gráfico da Figura 4.4 que entre o primeiro e quarto aperto do parafuso M 12 x 1.75 houve maior discrepância na variação do coeficiente de atrito em relação ao parafuso 1.1/4" x 7 UNC.



**Figura 4. 4 - Variação do Coeficiente de Atrito versus Ciclo de Aperto nos Parafusos M12 x 1,75 e 1.1/4" x 7 UNC.**

A partir das informações discriminadas na Tabela 4.3, é possível estabelecer que:

Tabela 4.3 - Relações matemáticas para obtenção do diferencial médio do coeficiente de atrito dos parafusos.

APERTOS	PARAFUSO M12 x 1,75	PARAFUSO 1.1/4 in x 7UNC	RAZÃO DAS MÉDIAS	FATOR DE CORREÇÃO	Δ% EXPERIMENTAL x REAL	MÓDULO
				$FC = \mu_{\text{experimental}}/2,20$	$\Delta\% = ((FC - \mu_{\text{real}}) / \mu_{\text{real}}) \times 100$	ABS
1	0,218	0,104	2,105	0,099	-4,492	4,492
2	0,198	0,100	1,979	0,090	-10,186	10,186
3	0,190	0,095	2,003	0,086	-9,104	9,104
4	0,210	0,094	2,235	0,095	1,395	1,395
5	0,220	0,095	2,313	0,100	4,970	4,970
6	0,217	0,093	2,337	0,098	6,066	6,066
7	0,225	0,095	2,372	0,102	7,640	7,640
8	0,220	0,098	2,247	0,100	1,944	1,944
9	0,216	0,097	2,218	0,098	0,663	0,663
10	0,220	0,099	2,228	0,100	1,103	1,103
			MÉDIA			MÉDIA
			2,20			4,76

$$\mu_{1.1/4" \times 7 \text{ UNC}} = \frac{1}{2,20} \mu_{M12 \times 1,75} \quad (4.3)$$

Através do cálculo do fator de correção e o empregando no cálculo do diferencial médio, obtivemos um diferencial equivalente à **4,76** e considerado nesta pesquisa como uma pequena variação. Este valor pode ser considerado mesmo com a discrepância mostrada no gráfico na figura 4.4.

### Fator K

Observa-se no gráfico da Figura 4.5 que houve maior no parafuso M12 x 1,75 até o sétimo aperto e que a partir de então houve uma queda na variação do parafuso 1.1/4 x 7 UNC que até então sofreu pequena variação no fator de torque.

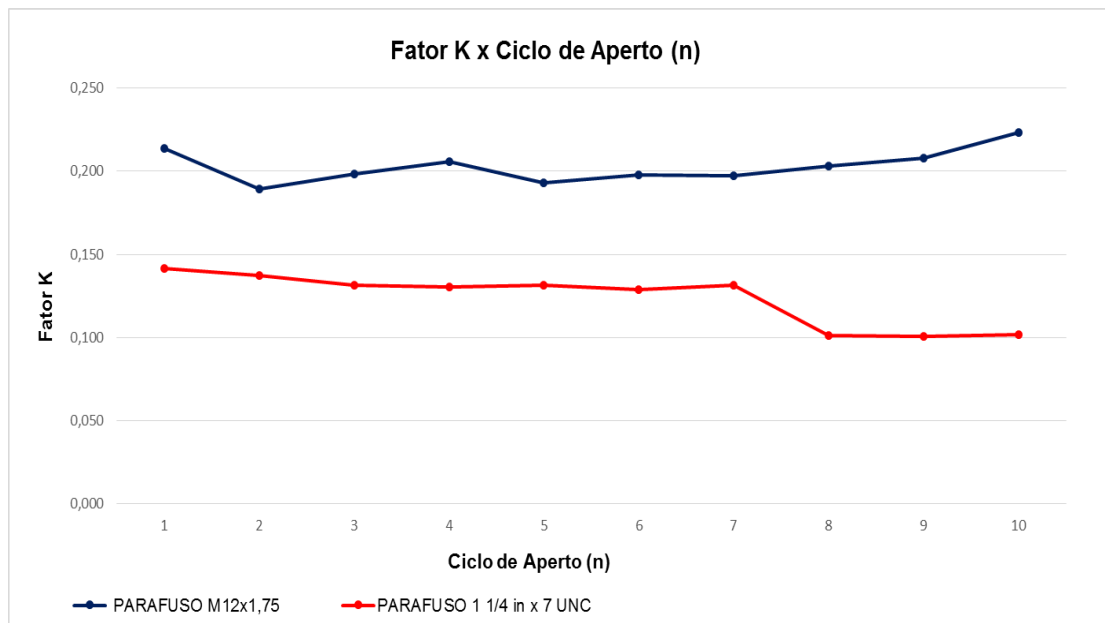


Figura 4. 5 - Variação do Fator K versus Ciclo de Aperto nos Parafusos M12 x 1,75 e 1.1/4" x 7 UNC.

A partir das informações discriminadas na Tabela 4.4, é possível estabelecer que:

Tabela 4.4 - Relações matemáticas para obtenção do diferencial médio do fator de torque dos parafusos.

APERTOS	PARAFUSO M12 X 1,75	PARAFUSO 1.1/4 in X 7UNC	RAZÃO DAS MÉDIAS	FATOR DE CORREÇÃO	Δ% EXPERIMENTAL x REAL	MÓDULO
				FC = Kexperimental/1,68	Δ% = ((FC - Kreal)/Kreal) x 100	ABS
1	0,214	0,142	1,510	0,128	-9,904	9,90
2	0,189	0,137	1,377	0,113	-17,836	17,84
3	0,198	0,131	1,509	0,118	-9,939	9,94
4	0,206	0,130	1,578	0,123	-5,828	5,83
5	0,193	0,131	1,469	0,115	-12,307	12,31
6	0,198	0,129	1,539	0,118	-8,160	8,16
7	0,197	0,131	1,505	0,118	-10,175	10,17
8	0,203	0,101	2,012	0,121	20,055	20,05
9	0,208	0,101	2,064	0,124	23,150	23,15
10	0,223	0,102	2,194	0,133	30,943	30,94
			MÉDIA			MÉDIA
			1,68			14,83

$$k_{1.1/4" \times 7 \text{ UNC}} = \frac{1}{1,68} k_{M12 \times 1,75} \quad (4.4)$$

Através do cálculo do fator de correção e o empregando no cálculo do diferencial médio, obtivemos um diferencial equivalente à **14,83**. Apesar de se tratar da mesma condição de uso, o diferencial neste caso é mais elevado devido a variação sofrida por ambos parafusos em ciclos de apertos distintos.

### Força

Pode-se observar na Figura 4.6 uma maior variação de carga no parafuso M12 x 1,75 em relação ao parafuso 1.1/4" x 7 UNC.

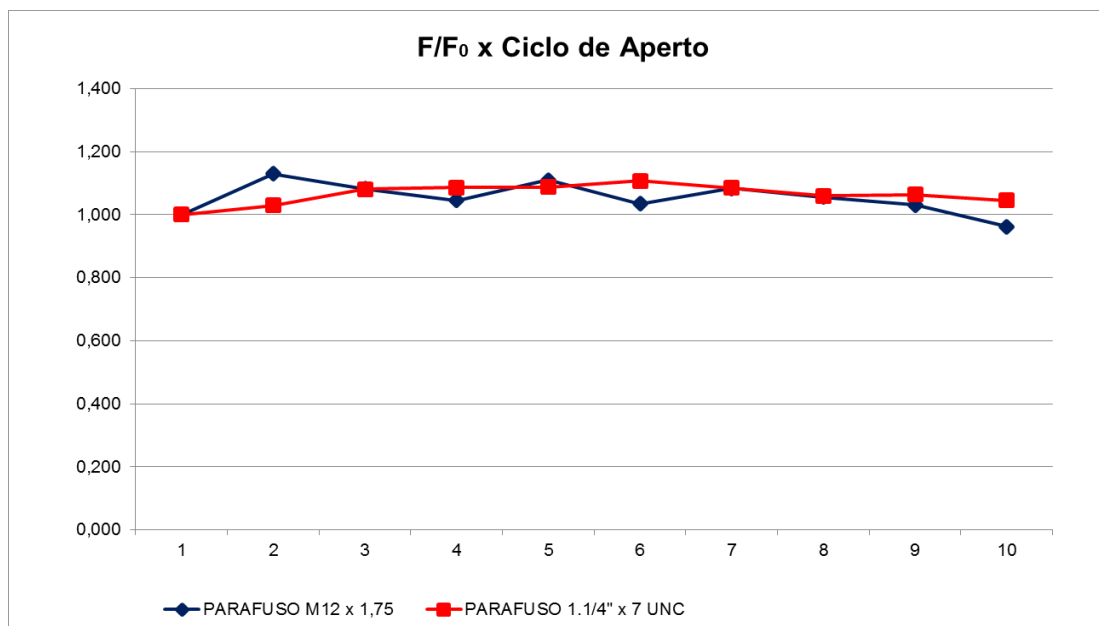


Figura 4. 6 - Variação da Força versus Ciclo de Aperto nos Parafusos M12 x 1,75 e 1.1/4" x 7 UNC.

#### 4.4.3 - Média Ensaio de Torque de 133 Nm (M12 x 1,75) e 2441 Nm (1.14" x 7 UNC) Seco à 90% do limite de escoamento do material do parafuso.

##### Coeficiente de Atrito ( $\mu$ )

Observa-se no gráfico da Figura 4.7 uma diferença significativa entre a variação do coeficiente de atrito dos parafusos M12 x 1,75 e 1.1/4" x 7 UNC. Entre o quinto e sexto aperto, o parafuso M 12 x 1,75 sofre uma queda considerável.

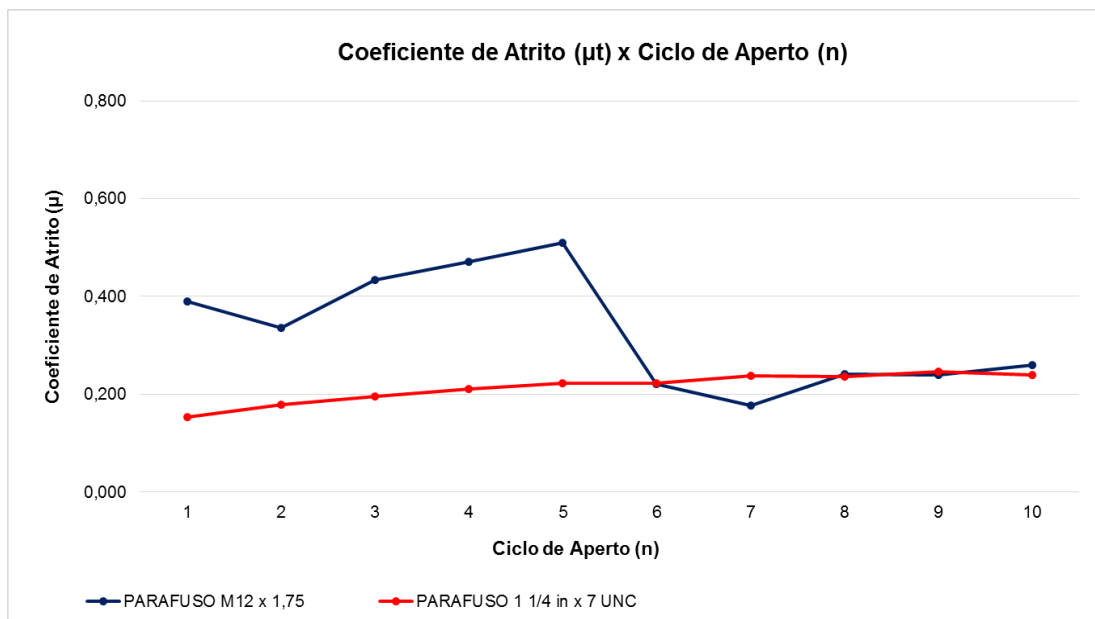


Figura 4. 7 -Variação do Coeficiente de Atrito versus Ciclo de Aperto nos Parafusos M12 x 1,75 e 1.1/4" x 7 UNC.

A partir das informações discriminadas na Tabela 4.5, não é possível estabelecer uma relação entre a variação dos parafusos.

Através do cálculo do fator de correção e o empregando no cálculo do diferencial médio, obtivemos um diferencial equivalente à **39,78** e considerado nesta pesquisa como uma alta variação.

Tabela 4. 5 - Relações matemáticas para obtenção do diferencial médio do coeficiente de atrito dos parafusos.

APERTOS	PARAFUSO M12 x 1,75	PARAFUSO 1.1/4 in x 7UNC	RAZÃO DAS MÉDIAS	FATOR DE CORREÇÃO $FC = \mu_{\text{experimental}}/1,60$	$\Delta\%$ EXPERIMENTAL x REAL $\Delta\% = ((FC - \mu_{\text{real}}) / \mu_{\text{real}}) \times 100$	MÓDULO ABS
1	0,389	0,153	2,538	0,244	58,789	58,789
2	0,335	0,179	1,877	0,210	17,462	17,462
3	0,434	0,195	2,230	0,272	39,524	39,524
4	0,471	0,211	2,233	0,295	39,739	39,739
5	0,510	0,222	2,291	0,319	43,364	43,364
6	0,220	0,223	0,988	0,138	-38,176	38,176
7	0,177	0,237	0,748	0,111	-53,173	53,173
8	0,242	0,237	1,020	0,151	-36,157	36,157
9	0,240	0,247	0,973	0,150	-39,142	39,142
10	0,260	0,240	1,083	0,162	-32,230	32,230
			MÉDIA			MÉDIA
			1,60			39,78

## Fator K

Através do gráfico na Figura 4.8 é possível observar que a variação do fator de torque no parafuso M12 x 1,75 é bem maior que no parafuso 1.1/4" x 7 UNC.

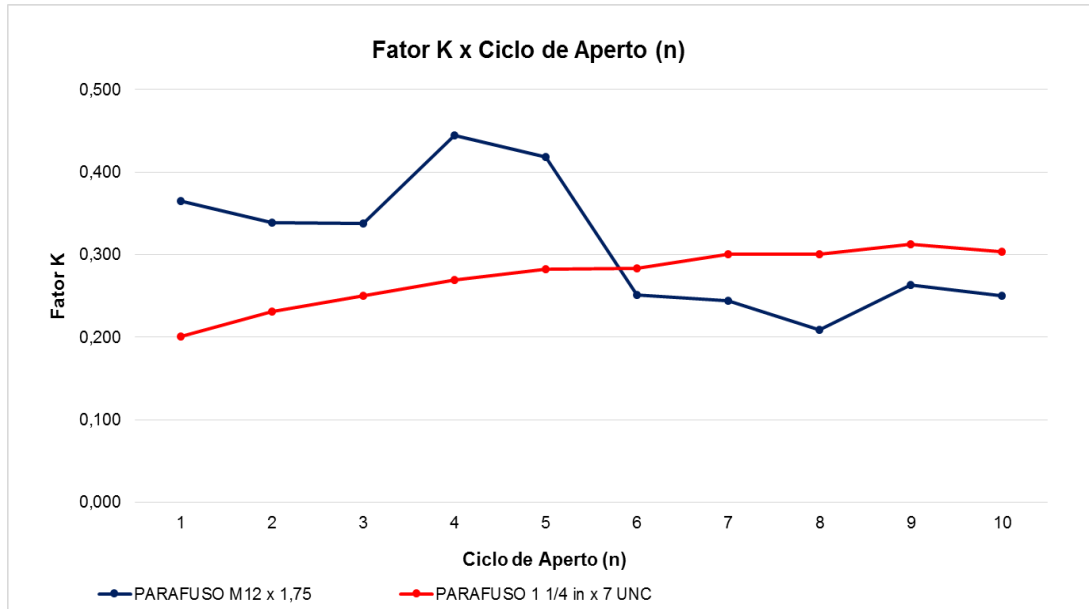


Figura 4. 8 - Variação do Fator K versus Ciclo de Aperto nos Parafusos M12 x 1,75 e 1.1/4" x 7 UNC.

A partir das informações discriminadas na tabela 4.6, não é possível estabelecer uma relação entre a variação dos parafusos.

Através do cálculo do fator de correção e o empregando no cálculo do diferencial médio, obtivemos um diferencial equivalente à **31,33** e considerado nesta pesquisa como uma alta variação.

Tabela 4. 6 - Relações matemáticas para obtenção do diferencial médio do fator de torque dos parafusos.

APERTOS	PARAFUSO M12X1,75	PARAFUSO 1.1/4 in X 7UNC	RAZÃO DAS MÉDIAS	FATOR DE CORREÇÃO	$\Delta\%$ EXPERIMENTAL x REAL	MÓDULO
				$FC = K_{\text{experimental}}/1,18$	$\Delta\% = ((FC - K_{\text{real}})/K_{\text{real}}) \times 100$	ABS
1	0,365	0,201	1,815	0,308	53,494	53,49
2	0,339	0,231	1,469	0,287	24,197	24,20
3	0,338	0,250	1,350	0,286	14,201	14,20
4	0,445	0,269	1,653	0,376	39,741	39,74
5	0,418	0,283	1,479	0,354	25,029	25,03
6	0,252	0,283	0,888	0,213	-24,922	24,92
7	0,244	0,300	0,812	0,206	-31,336	31,34
8	0,209	0,300	0,695	0,176	-41,245	41,24
9	0,263	0,312	0,842	0,222	-28,804	28,80
10	0,250	0,304	0,824	0,211	-30,354	30,35
			MÉDIA			MÉDIA
			1,18			31,33



## Força

Através do gráfico na Figura 4.9 observamos uma variação da força de maior no parafuso M12 x 1,75 em relação ao parafuso 1.1/4" x 7 UNC.

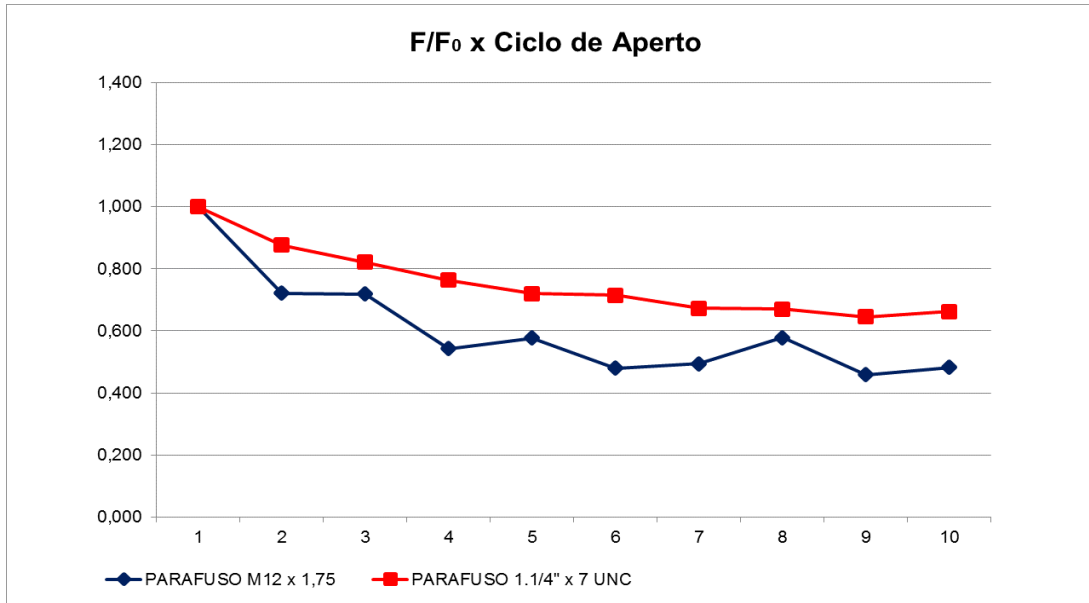


Figura 4. 9 -Variação da Força versus Ciclo de Aperto nos Parafusos M12 x 1,75 e 1.1/4" x 7 UNC.

#### 4.5 - Ensaio de Tração

As propriedades mecânicas dos parafusos foram avaliadas através de ensaio de tração, sendo as de interesse deste trabalho as listadas na norma ASTM A-490, ou seja, tensão máxima e tensão de escoamento. Através dos parâmetros obtidos no diagrama tensão x deformação, Figura 4.10, foi possível realizar uma análise comparativa dos parafusos.

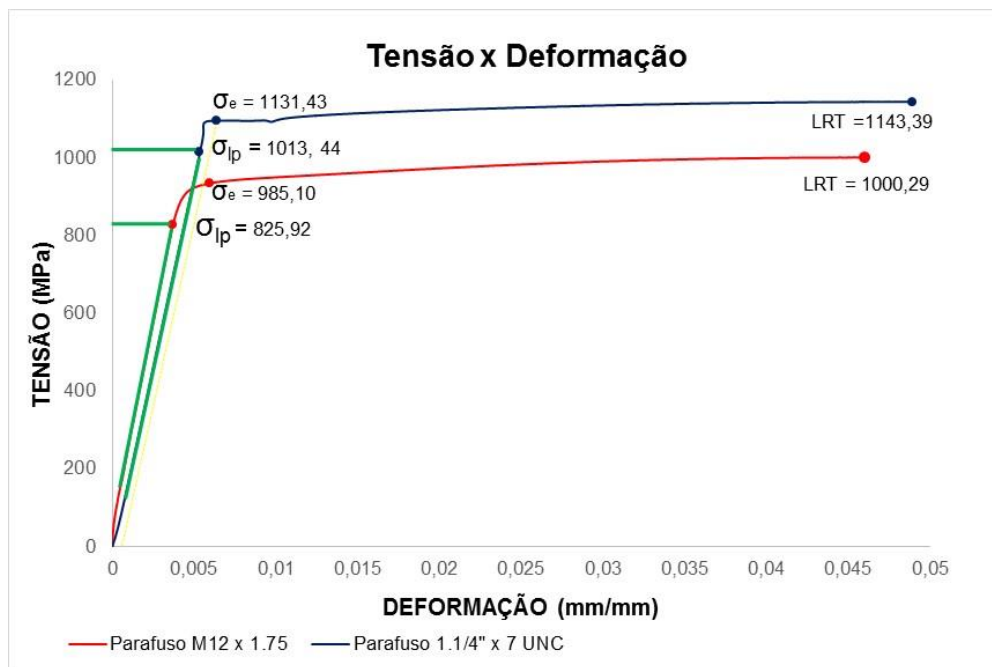


Figura 4. 10 – Curvas Tensão x Deformação e respectivos parâmetros.

As propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração foram comparadas a norma NBR 8855, os resultados superaram os valores mínimos recomendados pela mesma. No caso da tensão de escoamento a norma recomenda no mínimo 900 MPa, e os parafusos ensaiados atingiram 985 MPa e 1131 MPa.

## CAPÍTULO 5–CONCLUSÕES

- ✓ Embora os parafusos possuam geometrias semelhantes, os comportamentos não são idênticos, pois todo fenômeno associado à tribologia sofre também um efeito da natureza do material.
- ✓ Trata-se de dois materiais distintos e estes sofreram tratamentos superficiais também distintos. Dessa forma foram encontrados coeficientes diferentes, embora proporcionais e bem comportados um em relação ao outro.
- ✓ Em relação a dureza na escala HRc, ambos atendem a norma, e apresentaram valores próximos entre si .
- ✓ A medição da rugosidade mostrou que nos parafusos sem lubrificação houve um aumento progressivo desta propriedade, muito superior aos parafusos lubrificados.
- ✓ Através dos resultados obtidos na avaliação comparativa da medição de torque, comprova-se que a lubrificação neutraliza o efeito de acabamento superficial, tornando-se uma variável dominante no processo de aperto do parafuso.
- ✓ No ensaio de tração observamos graficamente que ambos possuem comportamento similar e seus parâmetros estão de acordo com norma.
- ✓ Comprova-se a partir dos dados citados que mesmo com algumas limitações, existe a possibilidade de utilização do parafuso M12 x 1,75 como modelo experimental em laboratório do modelo real 1.1/4" x 7 UNC.

## CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES

- ✓ Repetir análises, ensaios e cálculos adimensionais utilizando parafusos de mesma composição química, porém de escala menor.
- ✓ Repetir análises, ensaios e cálculos adimensionais utilizando o parafuso M12 x 1,75 e um parafuso com mesma dimensão, porém na composição do aço 5140.
- ✓ Verificar o número mínimo de amostras necessárias para correta determinação das grandezas estudadas.
- ✓ Avaliar a incerteza associada ao método empregado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM A-490. Standard Specification for Structural Bolts, Alloy Steel, Heat Treated, 150 ksi Minimum Tensile Strength.: ASTM; 2011.

ASTM A-490M. Standard Specification for High-Strength Steel Bolts, Classes 10.9 and 10.9.3, for Structural Steel Joints (Metric). ASTM; 2011.

ASTM F-606. Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, Direct Tension Indicators, and Rivets.: ASTM; 2011.

Bickford, J.H. (1995) An introduction to the design and behavior of bolted joints. 3. ed. New York: CRC.

Cândido, G.M., Rezende, M.C., Donadon, M.V., Amelida, S.F.M.(2012) Fractografia de compósito estrutural aeronáutico submetido à caracterização de tenacidade à fratura interlaminar em modo I.

Canevaloro JR., S. V.(2002) Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber.

Cangundo, E.M (2009). Avaliação Experimental da Condição Tribológica no Processamento de Corte por Arranque e Apara, Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa.

Callister JR., William D.(2002) Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC.

Ciser. (2006). Elementos de Máquinas. CET.

Chiaverini, V. (1986) Tecnologia Mecânica. Vol. III. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill.

CRC Handbook of Lubrication (Theory and Practice of Tribology). (1983) vol.1p.; v.2, p., 1ª edição. Ohio, USA.

Silva, A., Mei, P.R. (2006) Aços e Ligas Especiais. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher.

Dufour, J.D., (2002) An Introduction to Metallurgy. 4 ed. Houston-TX: Cooper Cameron Corporation.

Eccles, W. (2010) Tribological Aspects of the Self-Loosening of Threaded Fasteners, Tese de Doutorado, University of Central Lancashire (UCLAN).

Ericsson, T. (1991) "Principles of Heat Treating of Steels". In: ASM Handbook, v. 4, Heat Treating, ASM International, pp. 3-19.

Garcia, A., Spim, J. A., Santos, C. A. dos. (2000) Ensaios dos Materiais. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC.

Hibbeler, R.C. (2010) Resistência dos Materiais. 7. ed. São Paulo: Pearson.

Jiang et al. (2002) An Experimental Investigation on Frictional Properties of Bolted Joints.

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

Machinery Handbook. 29 ed. New York: Industrial Press, 2012.

Muniz, J.M. (2007) Fenômenos tribológicos intrínsecos ao travamento de juntas de engenharia aparafusadas, Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

NBR 8855:1991. Propriedades mecânicas de elementos de fixação - parafusos e prisioneiros.

Norton, R. (2004) Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. 2 ed. Porto Alegre: Bookman.

Norton, R. (2013) Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. 4 ed. Porto Alegre: Bookman.

OKS-Germany. (2014). Catálogo de Lubrificantes OKS-Germany

Ordóñez, R. (2004) Soldagem e caracterização das propriedades mecânicas de dutos de aço API 5L-X80 com diferentes arames tubulares. Tese Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

PICKERING, F. B., Physical Metallurgy and the Design of Steels, Applied Science Publisher Ltda., London, 1978.

Pizzio, E. (2005) Avaliação da Vida em Fadiga de Uniões Parafusadas, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Philip T., McCaffrey, T. (1990) "Ultrahigh-Strength Steels". In: Metals Handbook, v. 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International, pp. 430-448.

Rodrigues, C. (2015) Avaliação do Comportamento Mecânico e Tribológico de Parafusos de Classe 10.9 para Emprego Estrutural.

Rolin, A., (2014). Avaliação do Comportamento Mecânico e Tribológico de Parafusos de Classe 10.9 para Emprego em Guindaste Offshore.

Shigley, J.E. (2005) Projeto de Engenharia Mecânica. 7 ed. Porto Alegre: Bookman.

Silva, A., Mei, P.R. (2006) Aços e Ligas Especiais. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher.

Souza, A. (1982) Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. São Paulo: Edgard Blucher.

Stoeterau, R. (2004) Tribologia. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina Centro Tecnológico.

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

<<https://www.dowcorning.com/content/publishedlit/80-3256.pdf>>Acesso em: 29 de Março de 2016.

<<http://www.revistaih.com.br/coluna-htd/ensaio-de-tracao/1784>>Acesso em: 29 de Março de 2016.

<[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6340-acos-de-alta-resistencia-e-baixa-liga#.Vw9-oEfGXWk](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6340-acos-de-alta-resistencia-e-baixa-liga#.Vw9-oEfGXWk)>Acesso em: 06 de Abril de 2016.

<<http://www.dowcorning.com/content/iam/iamproducts/molykote.aspx>>Acesso em: 21 de Fevereiro de 2016.



## ANEXOS

### Média dos Ensaios de Torque

#### 1 - Média Ensaios de Torque a 111 e 2034 Nm lubrificado 75%

<b>µt - PARAFUSOS M12x1,75x85mm (Lubrificado - 75%)</b>					
Apertos	P1	P2	P3	Méd.(µt)	Desvio(µt)
1	0,202	0,174	0,224	0,200	0,025
2	0,203	0,160	0,192	0,185	0,022
3	0,195	0,168	0,172	0,178	0,015
4	0,190	0,186	0,164	0,180	0,014
5	0,182	0,178	0,183	0,181	0,003
6	0,171	0,167	0,192	0,177	0,013
7	0,192	0,187	0,180	0,186	0,006
8	0,182	0,194	0,184	0,187	0,006
9	0,203	0,193	0,182	0,193	0,011
10	0,199	0,198	0,179	0,192	0,011

<b>µt - PARAFUSOS 1 1/4 in x 7 UNC (Lubrificado - 75%)</b>					
Apertos	PH	PI	PT	Méd. (µt)	Desvio (µt)
1	0,133	0,106	0,109	0,116	0,015
2	0,129	0,102	0,103	0,111	0,016
3	0,124	0,101	0,083	0,103	0,020
4	0,115	0,095	0,093	0,101	0,012
5	0,110	0,094	0,094	0,099	0,009
6	0,114	0,101	0,083	0,099	0,016
7	0,114	0,101	0,085	0,100	0,015
8	0,000	0,103	0,093	0,098	0,057
9	0,000	0,104	0,086	0,095	0,056
10	0,000	0,104	0,100	0,102	0,059

<b>K - PARAFUSOS M12x1,75x85mm (Lubrificado - 75%)</b>					
Apertos	P1	P2	P3	Méd.(K)	Desvio(K)
1	0,230	0,201	0,204	0,212	0,016
2	0,203	0,180	0,189	0,191	0,011
3	0,244	0,174	0,178	0,199	0,039
4	0,197	0,169	0,190	0,186	0,015
5	0,190	0,163	0,175	0,176	0,013
6	0,183	0,170	0,181	0,178	0,007
7	0,196	0,186	0,179	0,187	0,008
8	0,185	0,179	0,175	0,180	0,005
9	0,189	0,187	0,183	0,186	0,003
10	0,199	0,181	0,177	0,186	0,012

<b>K - PARAFUSOS 1 1/4 in x 7 UNC (Lubrificado - 75%)</b>					
Apertos	Kh	Ki	Kt	Méd.(K)	Desvio (K)
1	0,177	0,145	0,148	0,157	0,018
2	0,172	0,140	0,141	0,151	0,018
3	0,166	0,138	0,118	0,141	0,024
4	0,155	0,132	0,129	0,139	0,014
5	0,149	0,130	0,130	0,136	0,011
6	0,154	0,138	0,117	0,136	0,019
7	0,154	0,138	0,119	0,137	0,018
8	0,000	0,140	0,129	0,135	0,078
9	0,000	0,142	0,121	0,132	0,077
10	0,000	0,142	0,137	0,139	0,080

<b>F - PARAFUSOS M12x1,75x85mm (Lubrificado - 75%)</b>						
Apertos	P1	P2	P3	Méd.(F)	Desvio(F)	F/F0
1	40232,016	45916,736	45380,823	43843,192	3138,828	1,000
2	45676,160	51293,542	48920,545	48630,083	2819,933	1,109
3	37940,610	53313,124	51858,237	47703,990	8486,570	1,088
4	46921,377	54650,989	48563,090	50045,152	4072,359	1,141
5	48761,115	56778,341	52716,124	52751,860	4008,732	1,203
6	50551,230	54265,010	51243,986	52020,075	1974,785	1,187
7	47237,567	49748,789	51634,852	49540,403	2206,037	1,130
8	50010,288	51748,140	52765,820	51508,083	1393,363	1,175
9	49013,596	49448,596	50511,648	49657,947	770,656	1,133
10	46414,006	51064,957	52251,348	49910,104	3085,272	1,138

---

<b>F - PARAFUSOS 1 1/4 in x 7 UNC (Lubrificado - 75%)</b>						
Apertos	Fh	Fi	Ft	Méd.(F)	Desvio (F)	F/F0
1	362243,797	441948,021	432365,235	412185,684	43515,532	1,000
2	371825,899	457978,191	455518,314	428440,802	49045,368	1,039
3	385775,826	464005,812	544829,919	464870,519	79530,572	1,128
4	412520,019	486958,647	496214,503	465231,056	45883,088	1,129
5	429252,625	491111,225	494344,459	471569,437	36683,073	1,144
6	416706,790	463286,536	549689,312	476560,879	67477,729	1,156
7	415320,642	463911,449	539107,549	472779,880	62368,152	1,147
8	0,000	456310,794	497835,249	477073,022	276219,646	1,157
9	0,000	450296,816	528654,134	489475,475	285301,678	1,188
10	0,000	452193,861	468662,906	460428,384	265955,960	1,117

1 - Média Ensaios de Torque a 133 e 2441 Nm lubrificado 90%

<b>µt - PARAFUSOS M12x1,75x85mm (Lubrificado - 90%)</b>					
Apertos	P1	P2	P3	Média (µt)	Desvio(µt)
1	0,226	0,227	0,202	0,218	0,014
2	0,188	0,207	0,2	0,198	0,010
3	0,169	0,202	0,2	0,190	0,019
4	0,211	0,215	0,205	0,210	0,005
5	0,205	0,230	0,224	0,220	0,013
6	0,210	0,230	0,211	0,217	0,011
7	0,216	0,228	0,231	0,225	0,008
8	0,219	0,227	0,212	0,220	0,008
9	0,193	0,239	0,216	0,216	0,023
10	0,199	0,235	0,226	0,220	0,019

<b>µt - PARAFUSOS 1 1/4 in x 7 UNC (Lubrificado - 90%)</b>						
Apertos	PG	PP	PR	PS	Média (µt)	Desvio (µt)
1	0,121	0,096	0,097	0,101	0,104	0,012
2	0,114	0,097	0,090	0,099	0,100	0,010
3	0,114	0,092	0,086	0,088	0,095	0,013
4	0,108	0,094	0,088	0,088	0,094	0,009
5	0,114	0,101	0,085	0,080	0,095	0,015
6	0,108	0,099	0,086	0,078	0,093	0,013
7	0,110	0,099	0,090	0,080	0,095	0,013
8	0,114	0,097	0,083		0,099	0,016
9	0,116	0,094	0,082		0,098	0,017
10	0,112	0,097	0,087		0,098	0,013

<b>K - PARAFUSOS M12x1,75x85mm (Lubrificado - 90%)</b>					
	P1	P2	P3	Média(K)	Desvio(K)
1	0,215	0,216	0,212	0,214	0,002
2	0,194	0,186	0,188	0,189	0,004
3	0,186	0,211	0,198	0,198	0,013
4	0,195	0,225	0,197	0,206	0,017
5	0,198	0,198	0,183	0,193	0,009
6	0,198	0,191	0,205	0,198	0,007
7	0,200	0,192	0,200	0,197	0,004
8	0,211	0,189	0,209	0,203	0,012
9	0,208	0,201	0,214	0,208	0,007
10	0,234	0,204	0,232	0,223	0,017

<b>K - PARAFUSOS 1 1/4 in x 7 UNC (Lubrificado - 90%)</b>						
Apertos	PG	PK	PR	OS	Média(K)	Desvio (K)
1	0,162	0,133	0,133	0,139	0,142	0,014
2	0,154	0,134	0,126	0,136	0,137	0,012
3	0,153	0,128	0,121	0,123	0,131	0,015
4	0,146	0,130	0,123	0,123	0,130	0,011
5	0,154	0,139	0,120	0,113	0,131	0,018
6	0,147	0,136	0,121	0,111	0,129	0,016
7	0,150	0,136	0,126	0,113	0,131	0,016
8	0,154	0,134	0,117	0,000	0,101	0,069
9	0,156	0,130	0,116	0,000	0,101	0,069
10	0,151	0,134	0,122	0,000	0,102	0,069

<b>F - PARAFUSOS M12x1,75x85mm (Lubrificado - 90%)</b>						
	Força	Força	Força	Méd.(F)	Desvio(F)	F/F0
1	51662,425	51378,132	52394,161	51811,573	524,178	1
2	57110,894	59551,949	59051,315	58571,386	1289,355	1,130
3	59746,304	52559,301	55845,698	56050,434	3597,873	1,082
4	56931,480	49307,786	56142,216	54127,161	4192,316	1,045
5	55917,937	56094,46	60510,043	57507,480	2601,793	1,110
6	55927,351	58174,176	53981,486	56027,671	2098,145	1,035
7	55503,049	57596,452	55349,107	56149,536	1255,428	1,084
8	52537,028	58637,533	52985,342	54719,968	3400,108	1,056
9	53314,865	55183,467	51671,767	53390,033	1757,057	1,030
10	47427,639	54394,875	47691,865	49838,126	3948,471	0,962

<b>F - PARAFUSOS 1 1/4 in x 7 UNC (Lubrificado - 90%)</b>						
Apertos	Fg	Fp	Fr	Fs	Méd.(F)	Desvio (F)
1	474689,877	580111,606	576400,408	553348,571	546137,616	49081,041
2	499000,203	573631,797	612272,609	564150,786	562263,849	47031,747
3	501078,517	599370,884	637278,169	624004,735	590433,076	61605,305
4	525452,100	592879,726	627594,982	626423,860	593087,667	47877,168
5	500300,889	554496,739	642635,777	678160,233	593898,410	81216,528
6	522808,792	566061,798	637281,823	691779,400	604482,953	74929,499
7	513972,647	564021,374	611440,958	679749,096	592296,018	70589,365
8	500627,083	575739,948	659193,421		578520,151	79319,720
9	492421,155	590066,947	661307,182		581265,094	84786,361
10	507882,407	573069,799	632737,656		571229,954	62447,955

2 - Média Ensaios de Torque a 133 e 2441 Nm Seco 90%

<b>μt - PARAFUSOS M12x1,75x85mm (Seco - 90%)</b>					
Apertos	P1	P2	P3	Média(μt)	Desvio(μt)
1	0,427	0,521	0,219	0,389	0,154
2	0,624	0,000	0,382	0,335	0,315
3	0,837	0,000	0,466	0,434	0,420
4	0,950	0,000	0,463	0,471	0,475
5	1,071	0,000	0,458	0,510	0,537
6	0,000	0,000	0,660	0,220	0,381
7	0,000	0,000	0,532	0,177	0,307
8	0,000	0,000	0,725	0,242	0,419
9	0,000	0,000	0,721	0,240	0,416
10	0,000	0,000	0,779	0,260	0,450

<b>μt - PARAFUSOS 1 1/4 in x 7 UNC (Seco - 85%)</b>					
Apertos	PJ	PL	PM	Média (μt )	Desvio (μt )
1	0,142	0,150	0,169	0,153	0,014
2	0,167	0,159	0,210	0,179	0,027
3	0,165	0,175	0,245	0,195	0,044
4	0,173	0,197	0,263	0,211	0,047
5	0,190	0,208	0,268	0,222	0,041
6	0,199	0,207	0,262	0,223	0,034
7	0,218	0,217	0,276	0,237	0,034
8	0,242	0,212	0,257	0,237	0,023
9	0,259	0,216	0,266	0,247	0,027
10	0,231	0,222	0,266	0,240	0,023

<b>K - PARAFUSOS M12x1,75x85mm (Seco - 90%)</b>					
Apertos	P1	P2	P3	Média (K)	Desvio(K)
1	0,323	0,390	0,381	0,365	0,036
2	0,568	0,000	0,449	0,339	0,300
3	0,545	0,000	0,469	0,338	0,295
4	0,659	0,000	0,676	0,445	0,386
5	0,618	0,000	0,637	0,418	0,363
6	0,000	0,000	0,755	0,252	0,436
7	0,000	0,000	0,732	0,244	0,423
8	0,000	0,000	0,626	0,209	0,361
9	0,000	0,000	0,789	0,263	0,456
10	0,000	0,000	0,750	0,250	0,433

<b>K - PARAFUSOS 1 1/4 in x 7 UNC (Seco - 85%)</b>					
Apertos	PJ	PL	PM	Média (K)	Desvio (K)
1	0,187	0,196	0,220	0,201	0,017
2	0,217	0,208	0,268	0,231	0,033
3	0,214	0,226	0,310	0,250	0,052
4	0,224	0,253	0,332	0,269	0,056
5	0,245	0,266	0,338	0,283	0,049
6	0,256	0,265	0,330	0,283	0,041
7	0,278	0,277	0,347	0,300	0,040
8	0,306	0,271	0,324	0,300	0,027
9	0,327	0,276	0,334	0,312	0,032
10	0,293	0,282	0,335	0,304	0,028

<b>F - PARAFUSOS M12x1,75x85mm (Seco- 90%)</b>						
Apertos	P1-F(N)	P2-F(N)	P3-F(N)	Méd.(F)	Desvio(F)	F/Fo
1	34336,117	28453,660	29100,636	30630,138	3225,733	1,000
2	19497,781		24675,204	22086,492	3660,991	0,721
3	20353,280		23630,199	21991,740	2317,132	0,718
4	16811,531		16401,856	16606,693	289,684	0,542
5	17922,733		17407,552	17665,142	364,288	0,577
6			14684,972	14684,972	#DIV/0!	0,479
7			15133,431	15133,431	#DIV/0!	0,494
8			17703,089	17703,089	#DIV/0!	0,578
9			14051,283	14051,283	#DIV/0!	0,459
10			14779,089	14779,089	#DIV/0!	0,483

<b>F - PARAFUSOS 1 1/4 in x 7 UNC (Seco 85%)</b>						
Apertos	Fj	Fl	Fm	Méd.(F)	Desvio (F)	F/Fo
1	411789,490	391507	350238,196	384511,486	31366,239	1,000
2	354395,742	370108	286779,634	337094,463	44276,465	0,877
3	358767,061	340177	247841,069	315594,948	59408,260	0,821
4	343644,343	304146	231907,054	293232,354	56662,427	0,763
5	313963,816	288611	227583,359	276719,493	44401,095	0,720
6	300724,660	290618	232847,125	274729,897	36621,873	0,714
7	276353,401	277859	221824,358	258678,978	31925,916	0,673
8	251320,968	283782	237191,805	257431,633	23888,693	0,670
9	235212,551	278780	229848,658	247947,066	26836,443	0,645
10	262232,043	272402	229347,080	254660,269	22503,856	0,662