

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E TRIBOLÓGICO DE  
PARÁFUSOS DA CLASSE 10.9 PARA EMPREGO ESTRUTURAL**

**CARLAN RIBEIRO RODRIGUES**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
ABRIL – 2015**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E TRIBOLÓGICO DE  
PARAFUSOS DA CLASSE 10.9 PARA EMPREGO ESTRUTURAL**

**CARLAN RIBEIRO RODRIGUES**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof.Ph.D. Eduardo Atem de Carvalho

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
ABRIL – 2015**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

**16/2015**

Rodrigues, Carlan Ribeiro

Avaliação do comportamento mecânico e tribológico de parafusos da classe 10.9 para emprego estrutural / Carlan Ribeiro Rodrigues. – Campos dos Goytacazes, 2015.

x, 120 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2015.

Orientador: Eduardo Atem de Carvalho.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

Bibliografia: f. 111-113.

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

CDD 621.882

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E TRIBOLÓGICO DE  
PARAFUSOS DE CLASSE 10.9 PARA EMPREGO ESTRUTURAL**

**CARLAN RIBEIRO RODRIGUES**

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.”

Aprovada em 14 de abril de 2015.

Comissão Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. D.Sc. MARCIA GIARDINIERI DE AZEVEDO - LAMAV/UENF

---

Prof<sup>a</sup>. D.Sc. POLYANA BORGES DIAS – IFF Campos

---

Prof. D.Sc. LÚCIO JOSÉ TERRA PETRUCCI – IFF Campos

---

Prof. Ph.D. EDUARDO ATEM DE CARVALHO – LAMAV/UENF  
(Orientador)

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
ABRIL – 2015**

Dedico este trabalho a minha família que soube compreender as minhas ausências em muitos momentos, mas sempre me incentivou a atingir os meus objetivos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente os meus pais Carlos Peixoto e Ana Isabel, por tudo que me ensinaram e ainda ensinam.

A minha irmã Isabela, que sempre me incentivou nos momentos em que as dificuldades se apresentavam.

A todos os amigos que contribuíram de alguma forma para elaboração desse trabalho.

A todos os funcionários e aos docentes do LAMAV-UENF, em especial ao Professor Eduardo Atem de Carvalho pela paciência, dedicação, prontidão e competência na orientação deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório Silvio Gonçalves Mendes e Michel Picanço Oliveira, por suas colaborações na realização dos ensaios.

## RESUMO

Parafusos da classe 10.9 são utilizados em montagens estruturais de grande responsabilidade. Embora esses componentes sejam um dos mais antigos empregados na indústria, tanto na montagem de equipamentos, quanto na sua futura manutenção ainda existem muitas dúvidas a serem esclarecidas quanto o seu uso continuado. Prova disso seria que grande parte dos recalls que ocorrem em veículos se deve a falhas relacionadas a parafusos, ou até mesmo em uma linha de montagem, parafusos que se rompem durante o processo de torque. Nesse sentido o trabalho em questão teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e tribológicas desses elementos, nas condições de uso, sem e com utilização de lubrificantes. Para avaliação dessas características, primeiramente os parafusos foram submetidos à ensaio de tração e os resultados obtidos comparados aos recomendados por normas aplicadas a fixadores. Já para as verificações tribológicas o fator de torque (K) e os coeficientes de atrito das roscas e do contato entre porca e arruela, foram coletados através de um equipamento eletromecânico, desenvolvido no próprio laboratório (LAMAV), que tem como princípio de funcionamento um atuador para aplicar o torque, uma célula de carga para determinar a força trativa resultante, um torquímetro instrumentado e um programa para aquisição dos dados. Os resultados obtidos nos ensaios apresentaram uma superioridade nas montagens realizadas com lubrificação, com melhores resultados para a lubrificação feita com a pasta de montagem, que apresentou tanto nas condições de aplicação de torques na faixa de carga de 75% da tensão de serviço como na de 90%, maior estabilidade dos fatores de torque e dos coeficientes de atrito pesquisados.

**Palavras-chaves:** Parafusos estruturais, tribologia, fator de torque, coeficiente de atrito.

## ABSTRACT

Class 10.9 bolts are used in structural assemblies of great responsibility. Although these components are among the oldest used in industry, for assembly purposes or future maintenance, there are still many information gaps to be filled pertaining their continued usage. Evidence would be that large portion of vehicles factory recalls are related to bolts and screws, or in the assembly line where screws may rupture during torque process. This work has as objective to evaluate mechanical and tribological properties of the specified bolts, under use conditions, with and without lubrication use. To evaluate these characteristics, the bolts were submitted to tensile testing at first and results compared to the limits fixed by standards applied to fixers. For the tribological inspections the Torque Factor (K), friction coefficients for the screw threads and the surface between washer and the nut, an electromechanical device was manufactured, developed in house (LAMAV), having as working principle an actuator to apply torque, a load cell to measure the generated tensile force, a torquemeter and software for data acquisition. Testing results show a clear superiority at lubed assemblies, with even better results for those made with assembly paste. The later presented greater stability in Torque Factors and friction coefficients for both 75 % and 90 % load range.

Key-words: Structural bolts, tribology, torque factor, friction coefficient



## SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABELAS.....	IX
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - Aspectos Gerais .....	1
1.2 - Objetivos.....	2
1.3 - Justificativas .....	2
1.3.1 - Importância Científica .....	2
1.3.2 - Importância Econômica e Tecnológica .....	2
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 - Parafusos .....	3
2.2 - Área sob tração. ....	6
2.3 - Especificação de parafusos e porcas. ....	6
2.4 - Fabricação de roscas .....	8
2.5 - Tensões em roscas .....	9
2.5.1 - Tensão de cisalhamento .....	10
2.5.2 - Tensões cisalhantes torcionais. ....	10
2.6 - Juntas aparafusadas .....	10
2.6.1 - Gráficos de uniões aparafusadas.....	12
2.7 - Método de aplicação de pré-carga em uniões aparafusadas .....	15
2.7.1 - Controle de torque de aperto .....	15
2.7.2 - Controle de ângulo de aperto.....	18
2.7.3 - Método de estiramento do parafuso.....	19
2.7.4 - Tensionamento com torquímetro manual.....	20
2.8 - Aços utilizados para fabricação de parafusos de alta resistência.....	21
2.9 - Determinação de propriedades mecânicas .....	27
2.10 - Tribologia.....	29
2.10.1 - Atrito.....	30
2.10.2 - Atritos e forças que atuam em parafusos.....	32

2.11 - Atrito no Nível Molecular.....	37
2.11.1 - Área de Contato Real.....	38
2.11.2 - Atrito em Metais .....	40
2.12 - Lubrificação .....	42
2.12.1 - Lubrificantes empregados para montagem de juntas aparafusadas.....	43
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 - Materiais a serem ensaiados.....	44
3.2 - Equipamento para teste de torque.....	44
3.2.1 - Desenvolvimento do transdutor de torque.....	46
3.2.2 - Calibração do transdutor de torque.....	48
3.2.3 - Calibração da célula de carga de tração.....	50
3.2.4 - Projeto e fabricação de garras para ensaio de tração.....	52
3.2.5 - Determinação de propriedades mecânicas .....	53
3.2.6 - Determinação de propriedades metalúrgicas.....	54
3.2.7 - Análise de superfícies .....	55
3.2.8 - Ensaio para determinação do fator de torque e do coeficiente de atrito médio do conjunto parafuso, porca e arruela.....	56
3.2.9 - Coeficiente de atrito da rosca e do contato da porca.....	57
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1 - Ensaio Mecânicos.....	59
4.1.1 - Ensaio de tração. ....	59
4.2 - Propriedades metalúrgicas .....	61
4.2.1 - Avaliação Metalográfica .....	61
4.2.2 - Análise Química do conjunto parafuso, porca e arruela.....	63
4.3 - Análise das superfícies.....	65
4.3.1 - Medição de rugosidade.....	65
4.4 - Ensaio para determinação do fator de torque e dos coeficientes de atrito. .	81
4.5 - Efeito da velocidade de parafusamento sobre os parâmetros tribológicos. .	106

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES. ....	108
5.1 - Conclusões.....	108
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES.....	110
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	111
CAPÍTULO 8 - ANEXOS. ....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Filetes gerados em uma superfície cilíndrica. ....	3
Figura 2.2 - Porca e parafusos .....	4
Figura 2.3 - Padronização da nomenclatura das dimensões de parafusos. ....	4
Figura 2.4 - Identificação do passo de rosca.....	5
Figura 2.5 - (a) Filetes usinados e (b) Filetes conformados.. ....	9
Figura 2.6 - Junta aparafusada .....	11
Figura 2.7 - Diagrama de junta.....	12
Figura 2.8 - Gráfico de pré-carga extensão.....	13
Figura 2.9 - Gráfico de carga e extensão com aplicação de força externa.....	14
Figura 2.10 - Diagrama que correlaciona a força e a extensão de uma junta rígida e de uma junta com menor rigidez. ....	15
Figura 2.11 - Aplicação manual de torqueamento.....	17
Figura 2.12 - Aplicação hidráulica de torqueamento com bomba e chave. ....	18
Figura 2.13 - Determinação de torque ângulo.....	19
Figura 2.14 - Equipamento tensionado.....	20
Figura 2.15 - Torquímetros manual.. ....	20
Figura 2.16 - Foto de parafusos com vários tratamentos superficiais. ....	26
Figura 2.17 - Exemplo de corpos de prova de seção reduzida.. ....	28
Figura 2.18 - Experimento para determinação da força de atrito.. ....	31
Figura 2.19 - Forças atuando no plano inclinado da rosca.....	32
Figura 2.20 - Forças atuando no filete de rosca.....	34
Figura 2.21 - Força entre dois átomos em função de suas distâncias de separação. ....	37
Figura 2.22- Representação de área aparente e área real de contato.....	38
Figura 2.23 - Escorregamento em superfície rugosa.. ....	39
Figura 2.24 - Ilustração esquemática de filmes em uma superfície metálica.. ....	40
Figura 3.1 - Equipamento fabricado para ensaios de torque.....	46
Figura 3.2 - Extensões adquiridas para fabricação de transdutor de torque. ....	47
Figura 3.3 - Teste para determinação de características mecânica do material. ....	47
Figura 3.4 - Transdutor de torque.....	48
Figura 3.5 - Aparato para calibração do torquímetro. ....	49

Figura 3.6 - Gráfico da curva de calibração do transdutor de torque. ....	50
Figura 3.7 - Gráfico da curva de calibração da célula de carga de tração.....	51
Figura 3.8 - Desenho de conjunto, corpo de prova e garras. ....	52
Figura 3.9 - Foto de garra em processo de fabricação.....	52
Figura 3.10 - Máquina de ensaio (a), Garras durante ensaio de tração (b) e Corpo de prova (c).....	53
Figura 3.11 - Corpo de prova de tração.....	53
Figura 3.12 - Durômetro de bancada (a) e região de medição da dureza recomendada (b).....	54
Figura 3.13 - Amostras embutidas. ....	55
Figura 3.14 - Microscópio Olympus Confocal.....	55
Figura 3.15 - Equipamento configurado para determinação de fator de torque e atrito total. ....	57
Figura 3.16 - Equipamento de torque com rolamento axial.....	58
Figura 4.1 - Gráfico com as curvas de tensão deformação. ....	59
Figura 4.2 - Gráfico para determinação dos módulos de elasticidade.....	60
Figura 4.3 - Micrografia da seção transversal do parafuso com aumento de 2136 vezes realizada no microscópio confocal. ....	62
Figura 4.4 - Micrografia da porca com aumento de 2136 vezes.....	62
Figura 4.5 - Micrografia da arruela com aumento de 2136 vezes. ....	63
Figura 4.7 - Composição química do material da porca. ....	64
Figura 4.6 - Composição química do parafuso.....	64
Figura 4.8 - Composição química do material de fabricação da arruela.....	64
Figura 4.9 - Superfície do filete do parafuso sem uso. ....	66
Figura 4.10 - Superfície de contato da porca sem uso.....	67
Figura 4.11 - Superfície de contato da arruela não torqueada. ....	68
Figura 4.12 - Superfícies deformadas do filete.....	78
Figura 4.13 - Superfície de contato da porca. ....	79
Figura 4.14 - Superfície de contato da arruela. ....	80
Figura 4.15 - Fatores de torque a seco torqueados com 111Nm. ....	81
Figura 4.16 - Força tensora para cada torque na condição sem lubrificante.....	82
Figura 4.17 - Coeficientes de atrito médios.....	82
Figura 4.18 - Coeficientes de atrito entre os contatos da porca e arruela. ....	82
Figura 4.19 - Coeficientes de atrito das roscas. ....	83

Figura 4.20 - Fatores de torque calculados na condição sem lubrificação com torque de 133 Nm.....	83
Figura 4.21 - Forças atingidas a cada ciclo com torque de 133 Nm.....	84
Figura 4.22 - Coeficientes de atrito médios calculados com torque de 133 Nm.....	84
Figura 4.23 - Coeficientes de atrito nas regiões de contato da porca e arruela. ....	84
Figura 4.24 - Coeficientes de atrito das roscas sem lubrificação e torquedadas com 133 Nm.....	85
Figura 4.25 - Fator de torque em parafuso montado com graxa e torque de 111 Nm. ....	85
Figura 4.26 - Forças alcançadas em parafusos lubrificados com graxa.....	86
Figura 4.27 - Coeficientes de atrito médios em parafusos lubrificados com graxa e torque de 111 Nm.....	86
Figura 4.28 - Coeficientes de atrito das roscas lubrificadas com graxa e torque de 111 Nm.....	87
Figura 4.29 - Coeficiente de atrito do contato da porca lubrificada com graxa e torque de 111 Nm.....	87
Figura 4.30 - Fator de torque em parafusos lubrificados com graxa e torquedados com 133 Nm.....	88
Figura 4.31 - Forças tensoras atingidas nos parafusos lubrificados com graxa e torque de 133 Nm.....	88
Figura 4.32 - Coeficiente de atrito médio na condição lubrificado com graxa e torquedado com 133 Nm.....	89
Figura 4.33 - Coeficiente de atrito das roscas lubrificadas com graxa e torque de 133 Nm.....	89
Figura 4.34 - Coeficientes de atrito no contato das porcas lubrificadas com graxa e torque de 133 Nm.....	90
Figura 4.35 - Fator de torque de parafusos torquedados com 111 Nm e lubrificados com pasta de montagem.....	90
Figura 4.36 - Forças coletadas em parafusos lubrificados com pasta e torque de 111 Nm.....	91
Figura 4.37 - Coeficiente de atrito médio em parafusos lubrificados com pasta de montagem e torque de 111 Nm.....	91
Figura 4.38 - Coeficiente de atrito da rosca nos dez ciclos de aperto lubrificado com pasta. ....	92

Figura 4.39 - Coeficiente de atrito na superfície sob a porca lubrificada com pasta e torque de 111 Nm.....	92
Figura 4.40 - Fatores de torque obtidos nos torques dos parafusos lubrificadas com pasta de montagem e torque de 133 Nm. ....	93
Figura 4.41 - Força em cada ciclo do parafuso torquado com 133 Nm e lubrificado com pasta de montagem. ....	93
Figura 4.42 - Coeficientes de atrito médio obtidos com aplicação de torque de 133 Nm e lubrificadas com pasta de montagem. ....	94
Figura 4.43 - Coeficientes de atrito das roscas na condição lubrificada com pasta e torque de 133 Nm.....	94
Figura 4.44 - Coeficiente de atrito na superfície de contato da porca com a arruela lubrificada com pasta e torque de 133 Nm. ....	95
Figura 4.45 - Médias entre os fatores de torque de 111 Nm e 133 Nm ensaiados sem lubrificação. ....	95
Figura 4.46 - Médias das forças em parafusos apertados a seco com torques de 111 Nm e 133 Nm. ....	96
Figura 4.47 - Valores dos coeficientes de atrito médio torquados a seco com 111Nm e 133Nm. ....	96
Figura 4.48 - médias dos coeficientes de atrito dos contatos da porca com torques de 111 Nm e 133 Nm a seco.....	97
Figura 4.49 - médias entre os coeficientes de atrito das roscas ensaiadas a seco com torque de 111 Nm e 133 Nm. ....	97
Figura 4.50 - fatores de torque entre parafusos montados com torques de 111Nm e 133 Nm lubrificadas com graxa. ....	98
Figura 4.51 - Médias das forças na condição lubrificado com graxa e torques de 111 Nm e 133 Nm. ....	98
Figura 4.52 - Coeficientes de atrito dos contatos das porcas lubrificadas com graxa e torques de 111Nm e 133 Nm. ....	99
Figura 4.53 - Coeficientes de atrito das roscas lubrificadas com graxa e torques de 111Nm 133 Nm. ....	99
Figura 4.54 - Coeficientes de atrito médio na condição lubrificado com graxa e torque de 111 Nm e 133 Nm. ....	99
Figura 4.55 - Fatores de torque montados com pasta e apertados com torques de 111 Nm e 133 Nm. ....	100

Figura 4.56 - Forças atingidas na condição lubrificada com pasta e torques de 111 Nm e 133 Nm. ....	100
Figura 4.57 - Coeficientes de atrito médios em parafusos torqueados com pasta e torques de 111 Nm e 133 Nm. ....	101
Figura 4.58 - Coeficiente de atrito nas superfícies de contato das porcas montadas com pasta e torques de 111 Nm e 133 Nm.....	101
Figura 4.59 - Coeficientes de atrito das roscas montadas na condição lubrificadas com pasta e torques de 111 Nm e 133 Nm.....	102
Figura 4.60 - Fatores de torque médio para as condições de montagem seco e lubrificadas com torque de 111 Nm.....	102
Figura 4.61 - Médias entre forças na condição de montagem a seco e com lubrificantes. ....	103
Figura 4.62 - Coeficientes de atrito médio.....	103
Figura 4.63 - Coeficiente de atrito no contato entre porca e arruela a seco e com lubrificantes. ....	103
Figura 4.64 - Coeficiente de atrito das roscas montadas na configuração a seco e lubrificadas com graxa e pasta de montagem. ....	104
Figura 4.65 - Fatores de torque extraídos dos ensaios com torque de 133 Nm sem lubrificação e com lubrificantes. ....	105
Figura 4.66 - Médias das forças dos ensaios realizados com 133 Nm a seco e lubrificadas. ....	105
Figura 4.67 - Atritos médios torqueados a seco e lubrificadas. ....	105
Figura 4.68 - atrito nas superfícies das porcas apertadas com torque de 133 Nm a seco e lubrificadas.....	106
Figura 4.69 - Atrito das roscas montadas a seco e lubrificadas com torque de 133 Nm.....	106
Figura 4.70 - Fatores de torque em parafusos apertados com 111 Nm com graxa e rotações de 0,6 e 4,7 rpm. ....	107
Figura 4.71 - Forças obtidas em parafusos torqueados com 111 Nm com graxa e rotações de 0,6 e 4,7 rpm. ....	107



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Similaridade entre classe e grau de resistência.....	7
Tabela 2. 2 - Propriedades físico-mecânicas segundo Norma ISO.....	8
Tabela 2. 3 - Requisitos químicos para parafusos Tipo 1.....	24
Tabela 2. 4 - Composição química segundo ISO.....	25
Tabela 3. 1 - Número de parafuso empregado em cada ensaios.....	44
Tabela 3. 2 - Dados de calibração do transdutor de torque.....	50
Tabela 3. 3 - Dados de calibração da célula de carga de tração.....	51
Tabela 4. 1 - Propriedades mecânicas determinadas pelo ensaio de tração. ....	60
Tabela 4. 2 - Resultados dos ensaios de dureza obtidos.....	61
Tabela 4. 3 – Rugosidade da rosca parafuso sem uso. ....	65
Tabela 4. 4 - Rugosidade do superfície da porca nova. ....	66
Tabela 4. 5 - Rugosidade da superfície da arruela sem uso. ....	67
Tabela 4. 6 - Rugosidade do parafuso na região do filete lubrificado com graxa a 75% da tensão de serviço após 10 ensaios. ....	68
Tabela 4. 7 - Rugosidade da superfície da porca lubrificada com graxa a 75% da tensão de serviço após dez ensaios. ....	69
Tabela 4. 8 - Rugosidade da superfície da arruela lubrificada com graxa a 75% da tensão de serviço. ....	69
Tabela 4. 9 - Rugosidade do filete do parafuso lubrificado com graxa e torque de 133Nm.....	70
Tabela 4. 10 - Rugosidade da face da porca lubrificada com graxa a 90% da tensão de serviço.....	70
Tabela 4. 11 - Rugosidade da arruela lubrificado com graxa e torque de 133Nm.....	71
Tabela 4. 12 - Rugosidade do parafuso na região do filete lubrificado com pasta de montagem a 75% da tensão de serviço. ....	71
Tabela 4. 13 - Rugosidade da superfície da porca lubrificada com pasta e torque de 111Nm após dez ensaios.....	72

Tabela 4. 14 - Rugosidade da superfície da arruela lubrificada com pasta a 75% da tensão de serviço.....	72
Tabela 4.15 - Rugosidade do filete do parafuso lubrificado com pasta e torque de 133Nm.....	73
Tabela 4. 16 - Rugosidade da face da porca lubrificada com pasta e torquada com 133Nm.....	73
Tabela 4. 17 - Rugosidade da arruela lubrificado com pasta e montada com torque de 133Nm.....	74
Tabela 4. 18 - Rugosidade do parafuso na região do filete montado a seco com torque de 111Nm.....	74
Tabela 4. 19 - Rugosidade da superfície da porca montada a seco com torque de 111Nm.....	75
Tabela 4. 20 - Rugosidade da superfície da arruela torquada a seco com torque de 111Nm.....	75
Tabela 4. 21 - Rugosidade do filete do parafuso montado a seco com torque de 133Nm.....	76
Tabela 4. 22 - Rugosidade da face da porca sem lubrificação com torque de 133Nm. ....	76
Tabela 4. 23 - Rugosidade da superfície da arruela montada a seco e torque de 133Nm.....	77
Tabela 4. 24 - Rugosidades médias do filete do parafuso após dez apertos. ....	77
Tabela 4. 25 - Rugosidades médias da superfície de contato da porca.....	78
Tabela 4. 26 - Rugosidades médias da superfície de contato da arruela.....	79

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 – Aspectos Gerais**

Na indústria de um modo geral as uniões aparafusadas são empregadas em larga escala, por serem de fácil montagem e permitir fácil reposição dos componentes durante a manutenção. O parafuso é um componente importante, já que ele promove a união das partes para sustentar forças ou promover vedação. Um exemplo seria um flange de vaso de pressão onde os parafusos fixação o flange suportam a tensão no seu corpo para que não haja o vazamento do fluido, outro exemplo são os parafusos que sustentam a roda de um veículo. Uma falha de um dos parafusos leva a sobrecarga dos outros que fazem parte da junta aparafusada.

O processo de montagem de parafusos através do torqueamento é o mais utilizado, tanto em linhas de montagem quanto em processos de manutenção, um melhor conhecimento do fator de torque e dos coeficientes de atrito leva a uma maior confiabilidade do componente montado; estes fatores são muito importantes, e influenciam diretamente na tensão aplicada à junta aparafusada; uma tensão inferior à recomendada pode levar o elemento de fixação a falhar por fadiga ou a um vazamento por falta de tensão. Já numa tensão superior, o parafuso pode falhar por ter sofrido uma deformação plástica durante o torqueamento e estar próximo do seu limite de ruptura.

Os lubrificantes influenciam de forma decisiva no coeficiente de atrito e por consequência no fator de torque. Embora essa afirmação seja do conhecimento de uma boa parte das pessoas que atuam nesta área; não existem trabalhos que relatem com propriedades técnicas as diferenças de coeficiente de atrito de juntas aparafusadas, em relação aos variados lubrificantes encontrados no mercado, principalmente os que são projetados para essa aplicação como, por exemplo, as pastas de torqueamento.

## **1.2 - Objetivos**

O Trabalho em questão tem por objetivo desenvolver um equipamento de baixo custo utilizando ferramental existente no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF, para identificação do fator de torque (K) e os coeficientes de atrito: das roscas e de contato entre porca e arruela em parafusos estruturais M12 x 1,75 classe 10.9, torqueados a seco ou com lubrificante específico para montagens aparafusadas e um de uso geral.

Realizar a investigação das propriedades mecânicas e metalúrgicas dos parafusos com acabamento superficial enegrecido por tempera. Posteriormente aos ensaios de torqueamento verificar alterações tribológicas, tais como: rugosidade, aderência do acabamento superficial e plastificação da superfície do material durante o torque.

## **1.3 – Justificativas**

### **1.3.1 – Importância Científica**

O trabalho tem na sua vertente científica o propósito de desenvolver todo o aparato experimental para a realização dos testes de torque, dessa forma esclarecendo dúvidas existentes sobre o processo de tensionamento de fixadores de alta resistência, nas condições: lubrificados e a seco.

### **1.3.2 – Importância Econômica e Tecnológica**

No aspecto econômico e tecnológico, uma determinação correta do torque a ser empregado, proporciona uma tensão aplicada às juntas aparafusadas dentro dos limites de projeto, desta forma permitindo uma maior confiabilidade para a sua utilização, reduzindo grandes perdas financeiras por falhas em juntas aparafusadas. Um bom exemplo dessas perdas são os recalls realizados em veículos que, em sua maioria são devido a falhas em parafusos. A obtenção de dados experimentais leva ao esclarecimento das dúvidas, desta forma convergindo no desenvolvimento de novos processos tecnológicos.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - Parafusos

Os parafusos são componentes mecânicos que tem por finalidade realizar fixação entre peças, geralmente formando conjuntos com porcas e arruelas, ou transmitindo potência através do movimento.

Fabricados em sua maioria de aço, também podem ser de uma grande variedade de materiais metálicos e não metálicos. Os parafusos se diferenciam pela forma da rosca, cabeça, haste e tipo de acionamento.

O parafuso é um elemento de máquina que deriva diretamente do plano inclinado e sempre trabalha associado a um orifício roscado. Basicamente a rosca pode ser definida como um plano inclinado circulando um cilindro. Ou que é mais realista um sulco helicoidal fabricado na superfície de um cilindro. (Ciser, 2006).

A rosca é um conjunto contínuo de filetes em torno de uma superfície cilíndrica, como indicado na Figura 2.1.

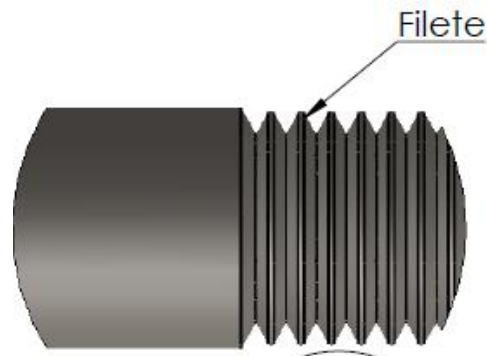


Figura 2.1 - Filetes gerados em uma superfície cilíndrica.

As roscas podem ser internas ou externas. As roscas internas encontram-se no interior das porcas. As roscas externas se localizam no corpo dos parafusos. (Figura 2.2).

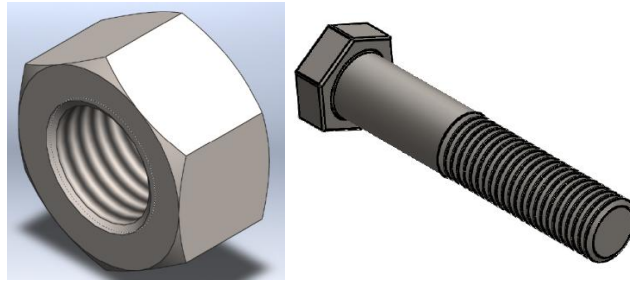


Figura 2.2 - Porca e parafusos

Quanto à geometria e terminologia, a figura 2.3 apresenta os aspectos mais importantes quanto a padronização da nomenclatura de parafusos.

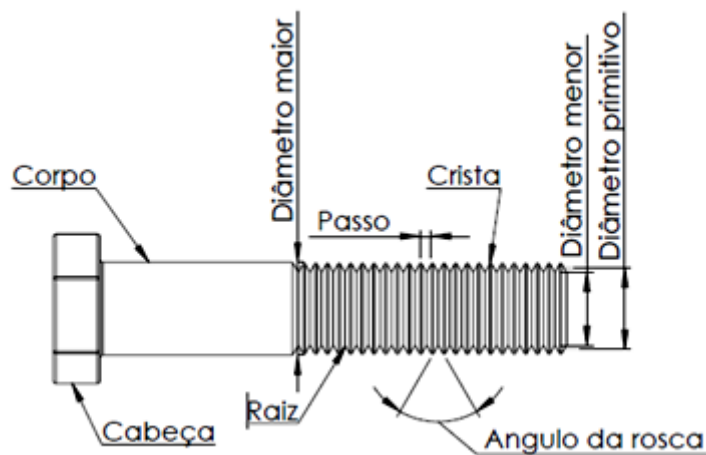


Figura 2.3 - Padronização da nomenclatura das dimensões de parafusos.

As roscas originalmente eram diferentes para cada um dos países fabricantes, porém, após a Segunda Guerra Mundial, foram padronizadas na Inglaterra, no 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 as 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, 2006).

O passo é a distância entre filetes adjacentes de roscas medidas paralelamente ao eixo do parafuso. O passo em unidades inglesas é o número de filetes por polegada.

A Figura 2.4 apresenta algumas das formas de identificação do passo de rosca através de calibre normalizado “Pente de rosca” (a), paquímetro e escala (b). Para parafusos de pequenas dimensões ou situações que se exige maior precisão também se utiliza o projetor de perfil (c), ou micrômetro.

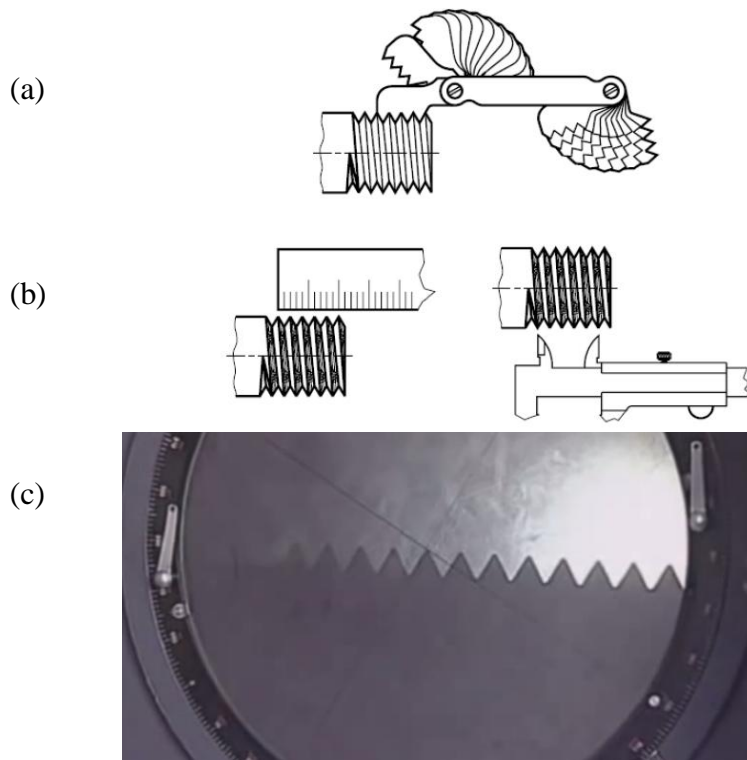


Figura 2.4 - Identificação do passo de rosca. (Apostila metrologia IFF).

O passo da rosca também pode ser definido como a distância que uma rosca avançará axialmente a cada revolução completa da porca, sendo esta uma rosca simples. Parafusos também podem ser feitos com roscas de múltiplas entradas.

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 é recomendada para aplicações corriqueiras, especialmente onde a necessidade de montagem e desmontagem é frequente.

As roscas finas são mais resistentes ao afrouxamento decorrentes de vibrações que as normais por causa do seu menor ângulo de hélice, são utilizadas em automóveis, aviões e outras aplicações submetidas a vibrações. (Norton, 2006).

Uma rosca é especificada a partir de um código que define a sua série, diâmetro, passo e classe de ajuste.

Os padrões UNS e ISO definem intervalos de tolerância para roscas internas e externas de maneira a controlar o seu ajuste.

Exemplos de especificação de rosca UNC e ISO seriam:

- UNC 3/8"x 16 fios

- M10 x 1,5 mm.

## 2.2 - Área sob tração.

Para a área de um parafuso submetido a uma carga de tração pura, seria de se esperar que fosse limitada pela área do seu diâmetro interno da raiz. Contudo, teste de parafusos sob tração mostram que a sua resistência à tração é melhor definida pela média dos diâmetros menor e primitivo. A área sob tração "At" é definida pela equação (1.0). (Norton, 2006).

$$At = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{dp + dr}{2} \right)^2 \quad (1.0 \text{ a}).$$

$$\text{Para rosca UNC: } dr = \left( \frac{d - 1,299038}{N} \right) \text{ e } dp = \left( \frac{d - 0,649519}{N} \right) \quad (1.0 \text{ b}).$$

$$\text{Para rosca ISO: } dr = (d - 1,226869) \cdot p \text{ e } dp = (d - 0,649519) \cdot p \quad (1.0 \text{ c}).$$

## 2.3 - Especificação de parafusos e porcas.

Parafusos e porcas para aplicação em estruturais ou cargas pesadas devem ser escolhidos com base na sua resistência de prova como definido pelas normas SAE (*Society of Automotive Engineers*), ASTM (*American Society for Testing and Materials*), ISO e etc. Estas organizações definem graus ou classes para parafusos que especificam material, tratamento térmico e uma resistência mínima de prova para o mesmo. A resistência de prova é a tensão sob a qual o parafuso começa a



apresentar deformação permanente, e é próxima, porém inferior a tensão de escoamento do material. O grau ou classe de cada parafuso são indicados por marcas ou ausência das mesmas na sua cabeça. (Norton 2006).

Segundo a norma ISO, os parafusos 4.8, 5.8 e 6.8 não sofrem tratamento térmico. Já os parafusos 8.8, 10.9 e 12.9 precisam de tratamento térmico (têmpera e revenimento). Esta classificação pode ser explicada da seguinte forma, se um parafuso for da classe 10.9, significa que a sua resistência a tração máxima é de 1000 MPa, já que os primeiros dígitos devem ser multiplicados por 100 para indicar sua resistência a tração. E o limite de escoamento é de 900 MPa, sendo o último dígito indicador de 90% do valor de resistência a tração. A Tabela 2.1 faz uma comparação entre diferentes normas e a tabela 2.2 mostra as propriedades mecânicas segundo norma ISO. (Garcia, 2008).

Para as porcas, a força de teste é função do diâmetro nominal e sua altura. Considerando porcas de passo normal grau 8, isto é, porcas que não sofrem tratamento térmico, temos os seguintes valores: Até M4 = 800 MPa, de M4 a M7 = 855 MPa, de M7 a M10 = 870 MPa, de M10 a M16 = 880 MPa e de M16 a M39 = 920 MPa.

Para porcas que são tratadas termicamente (grau 10), com passo normal, as forças de testes são: Até M10 de 1040 MPa, de M10 a M16 1050MPa, de M16 a M139 1060MPa. (Garcia, 2008).

Tabela 2. 1 - Similaridade entre classe e grau de resistência. (www.rex.com.br).

TABELA DE SIMILARIDADE DE CLASSE E GRAU DE RESISTÊNCIA		
SAE J 429	DIN - ISO 898-1	ASTM
G 1	CL 4.6	A 307 Grau A
G 2	CL 5.8	A 394 TO
		A 307 Grau B
G 5	CL 8.8	A 449 - A 394 TI
		A 325 - Tipo 1 e 2
G 8	CL 10.9	A 354 Grau B D
		A 490 - Tipo 1 e 2
-	CL 12.9	A 574

Tabela 2. 2 - Propriedades físico-mecânicas segundo Norma ISO.(Muniz, 2007).

SEÇÃO	Propriedades Mecânicas e Físicas		Classe de Resistência										
			3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8 <sup>1)</sup>		9.8 <sup>2)</sup>	10.9	12.9
									d ≤ M16 <sup>3)</sup>	d > M16 <sup>3)</sup>			
4.2.1	Resistência à Tração	nom.	300	400	500	600	800	800	900	1000	1200		
4.2.2	Rm <sup>4)</sup> N/mm <sup>2</sup>	min.	330	420	520	600	800	830	900	1040	1220		
		min.	95	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385
4.2.3	Dureza Vickers HV10	máx.	220 <sup>5)</sup>				250	320	335	360	390	435	
		min.	90	114	124	147	152	181	238	242	276	304	366
4.2.4	Dureza Brinell, HB, F=300 <sup>2</sup>	máx.	209 <sup>6)</sup>				238	304	318	342	361	414	
		min.	52	67	71	79	82	89	---	---	---	---	
4.2.5	Dureza Rockwell, HR	HRC (min.)	---	---	---	---	---	---	22	23	28	32	39
		HRB (máx.)	95,0 <sup>6)</sup>				99,5	---	---	---	---	---	
		HRC (máx.)	---				---	32	34	37	39	44	
4.2.6	Dureza Superficial, HV 0,3	máx.	---				7)						
4.2.7	Límite de Escoamento Rel <sup>8)</sup> , N/mm <sup>2</sup>	nom.	180	240	320	300	400	480	---	---	---	---	
		min.	190	240	340	300	420	480	---	---	---	---	
4.2.8	Límite de Escoamento Permanente Rp 0,2 <sup>9)</sup> , N/mm <sup>2</sup>	nom.	---						640	640	720	900	1080
		min.	---						640	660	720	940	1100
4.2.9	Tensão sob Ensaio de Carga, Sp	N/mm <sup>2</sup>	0,94	0,94	0,91	0,93	0,90	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,88
		Sp/Rel ou Rp 0,2	0,94	0,94	0,91	0,93	0,90	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,88
4.2.10	Torque de Ruptura, MB	Nm min.	---				Ver ISO 898-7						
4.2.11	Alongamento após Ruptura A5, %	min.	25	22	---	20	---	---	12	12	10	9	8
4.2.12	Redução de Área após Ruptura Z, % min		---				52		48	48	44		
4.2.13	Resistência à Tração com Cunha <sup>5)</sup>		Os valores para parafuso inteiros ( exceto prisioneiros ) devem ser iguais aos valores mínimos de resistência à tração especificados nesta Tabela. (4.2.2)										
4.2.14	Resistência ao Impacto, J min.		---		25	---		30	30	25	20	15	
4.2.15	Resistência à Martelagem na cabeça		Sem ruptura										
4.2.16	Altura mínima da zona não descarbonetada da rosca, E		---				1/2H 1		2/3H 1	3/4H 1			
	Profundidade máxima de descarbonetação total - G mm		---				0,015						
4.2.17	Dureza após Re - revenimento		---				Redução de dureza de 20 HV máximo						

## 2.4 - Fabricação de roscas

Existem várias maneiras de fabricar roscas. As roscas internas são geralmente cortadas com uma ferramenta especial chamada "Macho", que possui o formato dos filetes desejados e se parece com um parafuso, sendo que esta operação pode ser realizada manualmente ou em máquina. As roscas externas também podem ser cortadas por uma ferramenta chamada "Cossinete", que tem formato parecido com uma porca inteira ou partida. Estas ferramentas são feitas de aço ferramenta tratado termicamente. Em porcas e parafusos de grande dimensão a rosca pode ser usinada em um torno mecânico utilizando uma ferramenta

monocortante com o perfil da rosca ou em máquinas específicas chamadas rosqueadeiras. (Norton, 2006).

Outro método, de fabricar roscas externas é o de laminação de rosca, também conhecido como conformação de roscas. Uma matriz de aço endurecido na forma de rosca é forçada contra a superfície da barra que se pretende fabricar a rosca. As matrizes fazem escoar o material da barra para adquirir a forma de rosca. O diâmetro da barra é menor que o final da rosca porque é forçado para fora formando a crista e para dentro originando a raiz.

O processo de laminação tem vantagens. A conformação encrua e aumenta a resistência do material da rosca, com tensões residuais de compressão na raiz. A alteração do material na forma de roscas causa uma reorientação dos grãos do material para a forma de rosca. Em contraste, o corte de roscas interrompe os grãos como mostrado na Figura 2.5. (Norton 2006).

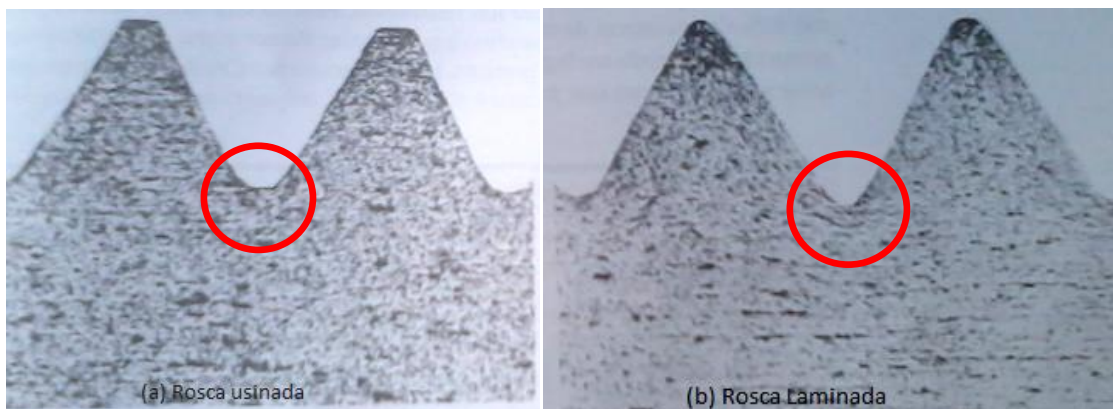


Figura 2.5 - (a) Filetes usinados e (b) filetes conformados. ( Norton, 2006).

## 2.5 - Tensões em roscas

Quando uma porca é acoplada a um parafuso, teoricamente todos os filetes de rosca devem compartilhar a carga. Na realidade, imprecisões no espaçamento dos filetes fazem com que praticamente toda a carga seja carregada pelo primeiro par de filetes. (Norton 2006).

A tensão principal é a soma das tensões, axial e torsional. Um parafuso de fixação normalmente está submetido à carga axial de tração. Mas em função do atrito dos filetes a torção pode existir em maior ou menor valor.

Essa é a principal razão para o uso de lubrificação nas roscas antes da montagem de parafusos. (Norton 2006).

### **2.5.1 - Tensão de cisalhamento**

Um possível modo de falha por cisalhamento envolve o rasgamento de filetes da rosca tanto da porca quanto do parafuso. Dependerá das resistências relativas dos materiais da porca e parafuso para que um desses cenários venha a ocorrer. Se o material da porca for de menor resistência, os seus filetes podem ser cortados ao longo do seu diâmetro maior. Se for o parafuso, pode ter os seus filetes de roscas cisalhados ao longo do seu diâmetro menor.

Se ambos os materiais possuem resistência idêntica, o conjunto pode ser cisalhado ao longo do diâmetro primitivo. Em todo caso devemos supor algum grau de compartilhamento da carga entre os filetes das roscas a fim de calcular as tensões. (ÁVILA, 2014).

### **2.5.2 - Tensões cisalhantes torcionais.**

Quando uma porca é apertada em um parafuso, ou quando o torque é transmitido através de uma porca de um parafuso de potência, uma tensão de torção pode ser desenvolvida no parafuso. O torque que torce o parafuso depende do atrito na interface parafuso-porca. Se o parafuso e a porca estão bem lubrificados, uma porção menor do torque aplicado é transmitida ao parafuso e uma maior é absorvida entre a porca e a superfície engastada. Se a porca “grimpar” (fixar sem movimento relativo), todo o torque aplicado será transmitido ao parafuso. (ÁVILA, 2014).

## **2.6 - Juntas aparafusadas**

De uma forma sucinta, uma Junta aparafusada (Figura 2.6) é constituída de quatro elementos básicos: o Parafuso, aquele que possui rosca externa; a Contra-Peça, que sofrerá todas as forças resultantes do processo de aperto; a Arruela que protege a contra-peça e por último a Porca, aquela que possui rosca interna (Bickford, 1995).

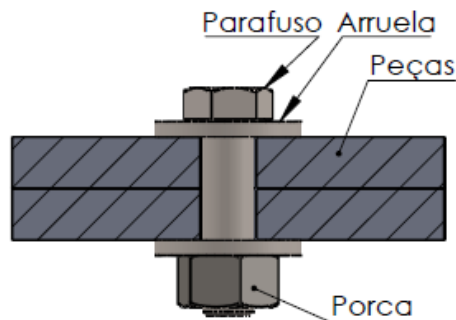


Figura 2.6 - Junta aparafusada

A Porca é muito importante, pois em 99 % dos apertos é o elemento que possui maior resistência mecânica e muitas vezes são ignoradas.

Em uma junta aparafusada 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. 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 diretamente da magnitude e estabilidade da força de aperto, ou pré-tensão (Bickford, 1995).

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

É prática comum pré-carregar a junta apertando os parafusos com suficiente torque que se aproximam as respectivas resistências de prova. A resistência à prova é o quociente da carga de prova e a área de tensão de tração. Assim, ela corresponde grosseiramente ao limite de proporcionalidade. É comum usar para montagens carregadas de forma estática, uma pré-carga que gera uma tensão no parafuso de até 90% da resistência à prova. E para juntas carregadas

dinamicamente, de 75% ou mais. Assumindo que os parafusos sejam adequadamente dimensionados para resistir às cargas aplicadas.

Peterson relata que cerca de 15% das falhas de parafusos ocorrem sob a cabeça, 20% no final das roscas no corpo do mesmo e cerca de 65% na rosca de face da porca. (Norton 2006).

### 2.6.1 - Gráficos de uniões parafusadas

Para auxiliar na visualização dos carregamentos envolvidos em uniões parafusadas foram desenvolvidos os diagramas de uniões (Figura 2.7). Diagramas de uniões podem ser utilizados para ajudar a visualizar a forma como uma junta parafusada resiste a carregamentos externos e, desta forma, esclarecer porque o parafuso não resiste à totalidade desta força. (Grisa, 2000).

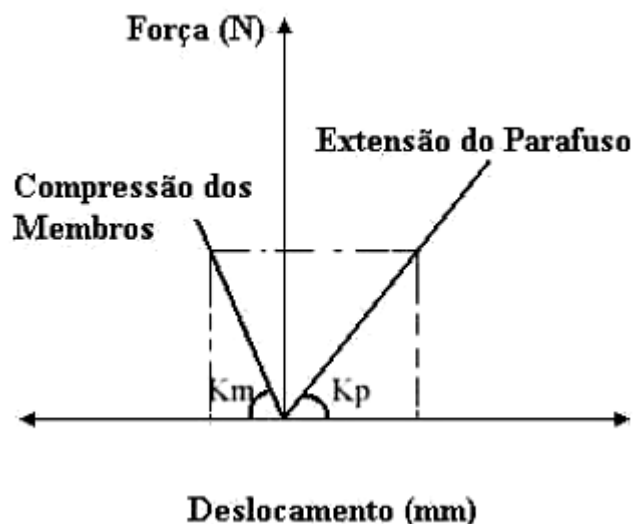


Figura 2.7 - Diagrama de junta (Grisa, 2000).

O gráfico da Figura 2.7 apresenta a forma como um diagrama básico de uniões parafusadas é construído. Conforme a porca é girada na rosca do parafuso, o mesmo se estende. Por causa das forças internas do parafuso que resistem à força de extensão, são geradas tensões normais, ou pró-tensão. A realização desta força que gera o aperto da conexão. O diagrama que correlaciona à força e a extensão apresenta a extensão do parafuso e compressão do membro. As inclinações das retas representam a rigidez de cada componente. Sendo que os membros são geralmente mais rígidos do que o parafuso.

O diagrama básico é formado transpondo-se a linha de compressão da Figura 2.7 para a direita. Um triângulo é formado, pois o aperto que tende a comprimir a junta é igual à pré-carga no parafuso. Uma extensão positiva é representada com uma linha de inclinação negativa. O diagrama então fica como mostra a Figura 2.8. As duas retas da rigidez do parafuso e membros encontram-se no ponto definido pela pré-carga que é igual para ambos. (Grisa, 2000).

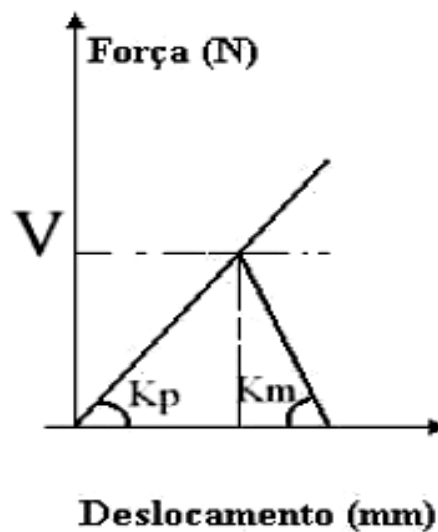


Figura 2.8 - Gráfico de pré-carga extensão (Grisa, 2000).

Quando uma força externa de tração é aplicada ao conjunto, esta tem o efeito de diminuir o aperto causado pela pré-carga e dessa forma adicionando força ao parafuso. A força externa atua primeiramente sobre o material da junta e, por consequência, no parafuso. A princípio pode parecer errado colocar os vetores de força como mostrado na Figura 2.9, porém não dá para considerar um aumento da força trativa no parafuso sem haver diminuição da força de aperto. (Grisa, 2000).

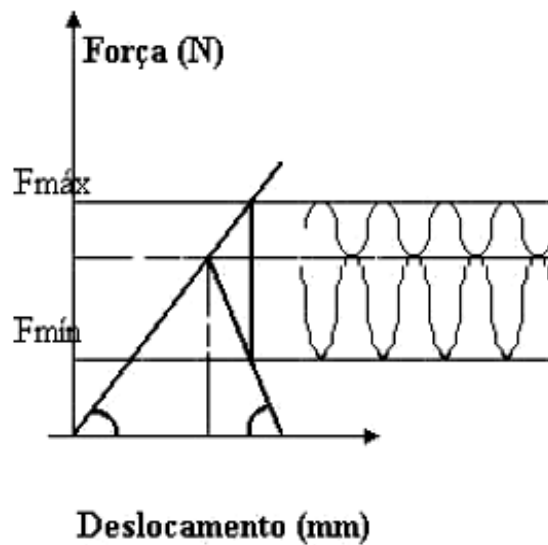


Figura 2.9 - Gráfico de carga e extensão com aplicação de força externa. (Grisa, 2000).

Como pode ser observada no diagrama de uniões, a carga externa aplicada provoca o aumento da carga no parafuso, com conseqüente aumento na deformação, e provoca também a diminuição da pré-tensão nos membros até a pré-carga crítica. A deformação diminuirá na mesma escala. Mas para que esta relação seja válida não deve ocorrer qualquer deformação plástica no sistema, para que a lei de Hooke continue aplicável. Deformações plásticas nas arruelas, muito comuns na montagem de juntas, devem ser evitadas nos testes.

Agora, graficamente, podemos observar na Figura 2.10(a) a variação que ocorre ao se aumentar a deformação dos membros, para uma mesma carga externa e mesmo parafuso. Observa-se que, partindo de uma configuração inicial, ao substituir os membros por outro menos rígido e conservando o mesmo valor da carga externa e o mesmo valor da pré-tensão, aumentará, mesmo assim a carga que atua no parafuso. (Grisa, 2000).

Como pode ser analisado da observação do diagrama, o aumento da força aplicada ao parafuso depende da rigidez do parafuso em relação ao material dos membros. Para ilustrar melhor a influência da rigidez dos componentes no aumento da carga no parafuso, a figura 2.10 (b) mostra o caso de uma junta mais rígida. Neste caso o parafuso suportará apenas uma pequena porção da força aplicada.

Altas pré-cargas em conexões rígidas, com Módulo de Elasticidade dos membros elevados, transferem menos de carga externamente aplicada para o parafuso, reduzindo a carga cíclica. (Grisa, 2000).



Para comparação está apresentada também uma junta menos rígida, composta por um parafuso rígido em uma junta de pouca rigidez. Neste caso, devido à grande inclinação da curva de rigidez do parafuso em comparação com a da junta, o parafuso seria solicitado pela maior parte da carga aplicada. (Grisa, 2000).

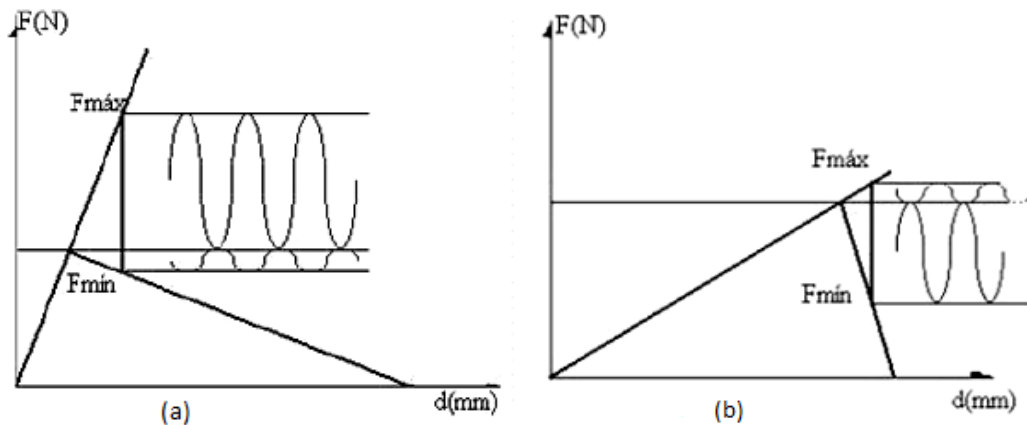


Figura 2.10 - Diagrama que correlaciona a força e a extensão de uma junta rígida e de uma junta com menor rigidez (Grisa, 2000).

## 2.7 - Método de aplicação de pré-carga em uniões aparafusadas

Um dos principais problemas com o uso de uniões parafusadas é a precisão, no que diz respeito a conseguir uma pré-carga com menor variação do valor nominal com o método de aperto escolhido. Uma pré-carga insuficiente ou superior, causada por um método de aperto inadequado, é uma causa freqüente de falha dos fixadores. É importante para o projetista verificar as características dos principais métodos empregados para apertar os parafusos. Porém, qualquer que seja o escolhido, um grau de dispersão deve ser esperado. (Pizzio 2005).

As literaturas sobre o tema apontam um desvio de mais ou menos 20% para o método de controle de torque, mas os fabricantes de torquímetros afirmam que se todos os parâmetros forem controlados esse desvio não passaria de 5%.

### 2.7.1 - Controle de torque de aperto

O método mais comum de controle de tensão no parafuso é indireto, 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 acurácia 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 alonga por fluência sob carga de tração, ou se carga cíclica causa movimentação relativa entre os membros da junta (Machinery Handbook, 2012).

Um método controlado de atuar em 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 procedimento é que a força de tração do fixador (parafuso), gerada do resultado de um torque aplicado, é dependente do projeto do fixador e das condições de atrito 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).

A figura 2.11 e 2.12 ilustra a aplicação manual e hidráulica deste método.



Figura 2.11 – Aplicação manual de torqueamento. ([www.fattocom.com.br](http://www.fattocom.com.br)).

Nesta figura 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 2.12 – Aplicação hidráulica de torqueamento com bomba e chave (www.alimaqmix.com.br).

Nesta figura 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 ajustada na bomba.

### 2.7.2 - Controle de ângulo de aperto

Este método, também conhecido como método de giro da porca, Figura 2.13 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).



Figura 2.13 -Determinação de torque ângulo. (www.fattocom.com.br).

### 2.7.3 - Método de estiramento do parafuso

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), é comum o uso de dispositivos tensionadores hidráulicos para os parafusos acima de 20 mm de diâmetro. O método usa um pequeno pistão hidráulico fixado, à parcela roscada do parafuso projetada após a porca. O óleo hidráulico de uma bomba pequena que age no pistão hidráulico desloca o mesmo; dessa forma a força é transmitida ao parafuso tendo por resultado a extensão. A porca pode então ser girada manualmente com a ajuda de um soquete integral auxiliado por uma barra. (Pizzio, 2005).

O controle de 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).

A figura 2.14 ilustra o funcionamento do tensionador.

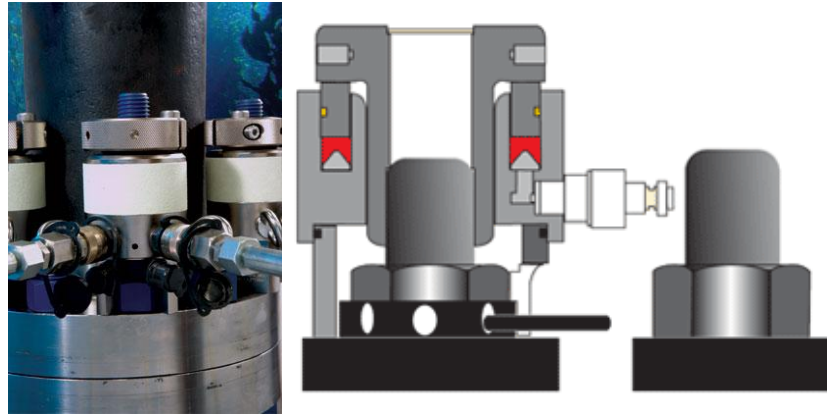


Figura 2.14 – Equipamento tensionador. (www.hydratight.com).

#### 2.7.4 - Tensionamento com torquímetro manual

Os torquímetros são ferramentas utilizadas para aplicar momento torço em porcas e parafusos a partir de uma especificação de projeto.

O acionamento é feito pelo usuário aplicando a força diretamente em sua haste/alavanca.

Existe uma grande variedade de torquímetros manuais, tais como: de estalo, com ou sem escala, de relógio, de relógio com ponteiro de arreste, de escape ou giro livre, etc. Cada ferramenta opera em uma determinada faixa de aperto, por isso é importante o conhecimento amplo dos equipamentos. A Figura 2.15, mostra modelos de torquímetro manual.



Figura 2.15 – Torquímetros manual. (WWW.lojadomecânico.com.br).

## 2.8 - Aços utilizados para fabricação de parafusos de alta resistência

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).

Dentre os principais tratamentos térmicos destaca-se a têmpera e o revenimento, os quais, aliados, podem apresentar excelentes combinações de propriedades mecânicas, tais como resistência mecânica e tenacidade. Uma das características importantes de aços e ligas, que define marcadamente sua aplicação é a sua temperabilidade. (Krauss, 1995).

Nos aços, a austenita é a fase em equilíbrio em temperaturas elevadas que se transforma em martensita sob resfriamento rápido o suficiente para alterar as condições de equilíbrio da fase ferrita. A transformação martensítica é adifusional, e por essa razão a martensita tem exatamente a mesma composição que a austenita, até 2% de carbono. Como a difusão é suprimida, normalmente pelo resfriamento rápido, os átomos de carbono não se dividem entre cementita e ferrita, e sim são aprisionados nas posições octaédricas de uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), produzindo então uma nova fase, a martensita. A solubilidade de carbono em uma estrutura CCC é enormemente excedida quando a martensita se forma; esta assume então uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC). (Krauss, 1995).

A martensita é uma fase particular que se forma nos aços. Ela tem sua própria estrutura cristalina e composição, e é separada de outras eventuais fases por interfaces bem definidas, entretanto ela é uma fase metaestável que está presente apenas porque a difusão foi suprimida. Se a martensita for aquecida a uma temperatura onde os átomos de carbono tenham mobilidade, estes difundem dos sítios octaédricos para formar carbonetos. Como resultado, a tetragonalidade é aliviada, e a martensita é substituída por uma mistura de ferrita e cementita como

previsto pelo diagrama de fase Fe-C, e desde que se trate de um aço ao carbono. (Krauss, 1995).

A martensita é formada por um mecanismo de cisalhamento, no qual vários átomos se movimentam cooperativamente e quase simultaneamente para efetuar a transformação, mecanismo este bem diferente do movimento de átomo por átomo através de interfaces durante as transformações difusionais. A cinética da transformação martensítica é a térmica, uma vez que a conversão da microestrutura austenítica em martensítica acontece continuamente com o decréscimo da temperatura durante resfriamento suficientemente rápido e contínuo. A martensita nos aços apresenta duas morfologias, ripas e placas. As ripas, formadas em aços de baixo e médio carbono, são placas longas e finas que se formam lado a lado, e estão alinhadas paralelamente entre si. As ripas são agrupadas em entidades estruturais maiores, os blocos. Os detalhes microestruturais desse tipo de martensita são muito finos para serem revelados por microscopia ótica. As placas descrevem propriamente a forma das unidades de martensita que se formam em aços de alto teor de carbono (Krauss, 1995).

Os aços ao 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 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.

A temperabilidade do boro é fortemente reduzida pela formação de borocarbonetos. Para evitar a formação de nitretos de boro é comum adicionar elementos fortes formadores de nitretos, como o Ti e Zr, a fim de se ter boro em solução. (Suski, 2007).

A norma ASTM A-490 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 (2010) 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.

A norma ASTM A 490-M cobre dois tipos de ligas de aço temperados e revenidos, de parafusos sextavados estruturais pesados com resistência a tração de 1040 a 1210 MPa.

Estes parafusos são fabricados para uso em conexões estruturais comparáveis aqueles cobertos pelos requisitos das normas ASTM A-325 e A-490 de parafusos. Eles são fornecidos nos diâmetros nominais de M12 a M36, inclusive. Eles são designados pela composição química como se segue:

Tipo 1 – Aço liga de médio carbono;

Tipo 2 – Removido em 2002;

Tipo 3 – Aço de instrumentos.

Os parafusos, segundo esta norma devem ser tratados termicamente por têmpera em óleo na temperatura austenítica e então revenidos pelo re-aquecimento a temperatura não menor que 425° C. As roscas devem ser usinadas ou roladas.

Os parafusos tipo 1, usuais, tem sua liga de aço conforme os requisitos de composição química da tabela 2.3.

Tabela 2. 3 - Requisitos químicos para parafusos Tipo 1.

Aço Liga		
Elemento	Análise química, %	Análise de Produto, %
Carbono	0,30 a 0,48	0,28 a 0,50
Para tamanhos até M30, inclusive.		
Para tamanho M-36.	0,35 a 0,53	0,33 a 0,55
Manganês, min.	0,60	0,57
Fósforo, max.	0,04	0,045
Enxofre, max.	0,04	0,045
Elementos de Liga	A	A
Aço Liga com Adição de Boro		
Carbono		
Para tamanhos até M30, inclusive.	0,30 a 0,48	0,28 a 0,50
Para tamanho M-36.	0,35 a 0,53	0,33 a 0,55
Manganês, min.	0,60	0,57
Fósforo, max.	0,04	0,045
Enxofre, max.	0,04	0,045
Boro	0,0005 a 0,003	0,0005 a 0,003
Elementos de Liga	A	A

A – Aço, como definido pela AISI (American Iron and Steel Institute), deve ser considerado “liga” quando a faixa máxima para os elementos de ligas contidos excedem um ou mais dos seguintes limites: Manganês, 1,65%; Silício, 0,60%; Cobre, 0,60% ou no qual um faixa definida, ou uma quantidade mínima definida de qualquer dos seguintes elementos são especificados, ou requeridos com os limites de campo reconhecido de aço liga de construção: Alumínio, Cromo até 3,99, Cobalto, Molibdênio, Níquel, Titânio, Tungstênio, Vanádio, Zircônio, ou qualquer outro elemento de liga adicionado para obter os efeitos da liga desejados. (ASTM; 2011).

A tabela 2.4 apresenta a composição química para aços de parafusos.

Tabela 2. 4 - Composição química segundo ISO. (Muniz, 2007).

Classe de Resistência	Material e Tratamento Térmico	Limites de Composição Química (análise confirmatória) %					Temperatura de Revenimento *Celsius - min.
		C		P	S	B	
		mín.	máx.	máx.	máx.	máx.	
3.6	Aço carbono	--	0,20	0,05	0,06	0,003	--
4.6 e 4.8	Aço carbono	--	0,55	0,05	0,06	0,003	--
5.6 e 5.8	Aço carbono	0,13	0,55	0,05	0,06	0,003	--
8.8	Aço carbono com aditivos (ex.: Boro, Manganês ou Cromo) temperado e revenido	0,15	0,40	0,035	0,035	0,003	425
	Aço carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,035	0,035		425
9.8	Aço carbono com aditivos (ex.: Boro, Manganês ou Cromo) temperado e revenido	0,15	0,35	0,035	0,035	0,003	425
	Aço carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,035	0,035		425
10.9	Aço carbono com aditivos (ex.: Boro, Manganês ou Cromo) temperado e revenido	0,15	0,35	0,035	0,035	0,003	340
10.9	Aço carbono temperado e revenido ou	0,25	0,55	0,035			425
	Aço carbono com aditivos (ex.: Boro, Manganês ou Cromo) temperado e revenido	0,20	0,55		0,035	0,003	
	Aço liga temperado e revenido	0,20	0,55	0,035	0,035		
12.9	Aço liga temperado e revenido	0,28	0,50	0,035	0,035	0,003	380

Existe uma grande variedade de revestimentos superficiais disponíveis para parafusos, tais como: galvanização, cadmiado, fosfatizado, enegrecimento por tempera, pintura e tratamentos organometálico (figura 2.16). Esses acabamentos visam proteger contra oxidação, atuar como lubrificante promotor de resistência ao desgaste e reter o óleo funcionando como um lubrificante sólido controlador do coeficiente de atrito. (MATALAC, 2013).



Figura 2.16 - Foto de parafusos com vários tratamentos superficiais. (metalac.com.br).

Nos parafusos de alta resistência, deve-se ter uma preocupação quanto à fragilização por hidrogênio, que é associada a parafusos com dureza superior a 30 HRC e produzidos com aço carbono ou aço liga. Seu efeito pode causar diminuição da ductilidade, trincas ou rupturas nos fixadores, ainda que aplicados sob tensões bem abaixo da resistência de prova.

A absorção do hidrogênio livre do banho eletrolítico, ou de qualquer outra fonte, pode provocar a fragilidade do material. A decapagem ácida e a eletrodeposição de zinco estão entre os tratamentos superficiais mais comuns que causam a hidrogenização. Isso ocorre porque o hidrogênio atômico se difunde nos contornos dos grãos e migra para os pontos de maiores concentrações de tensões quando o fixador é solicitado mecanicamente, aumentando a tensão até que a resistência do metal base seja excedida, e em pouco tempo ocorrem rupturas na superfície. (MATALAC, 2013).

Uma das alternativas para evitar a fragilização por hidrogênio em parafusos de alta resistência é utilizar um processo de tratamento superficial que não tenha oferta de hidrogênio, como por exemplo, tratamentos organometálicos.

Outra preocupação é a fragilização por corrosão sob tensão que é um fenômeno que ocorre em fixadores de alta resistência com elevadas forças tensores geradas durante aperto e que estão montados em locais susceptíveis a uma atmosfera indutora a corrosão, tais como: locais quentes e úmidos, com pouca ventilação, ambiente marinho, etc. Apesar do mecanismo da corrosão sob tensão

não ser totalmente esclarecido, em termos práticos, o que ocorre é que trincas microscópicas são desenvolvidas em regiões de alta concentração de tensões, normalmente agravadas pelo efeito deletério do hidrogênio, o qual é quimicamente gerado pela ação da corrosão. (MATALAC, 2013).

## **2.9 - Determinação de propriedades mecânicas**

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 a inutilização do material. Existem ainda os ensaios chamados não-destrutivos utilizados para determinação de algumas propriedades físicas do metal, bem como para detectar falhas internas e superficiais do mesmo. Na categoria de ensaios destrutivos, estão classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão torção, fadiga, impacto, compressão e outros. Os ensaios de dureza que, embora possam, em certos casos, não inutilizar a peça ensaiada, também está incluído nessa categoria.

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. (Souza, 1982).

Segundo a norma ASTM F606 (2011), os procedimentos para a condução de ensaios tais como: dureza prova de carga pelo método da medição do comprimento, prova de carga pela resistência ao escoamento, prova de carga pela uniformidade da dureza, ensaio de tração com parafuso de corpo inteiro, tração com cunha com parafuso de corpo inteiro e ensaio de tração com corpo de prova usinado.

Dureza – 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.

Ensaio de Tração de corpo de prova usinado – 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 a 2.17. (ASTM F606, 2011).

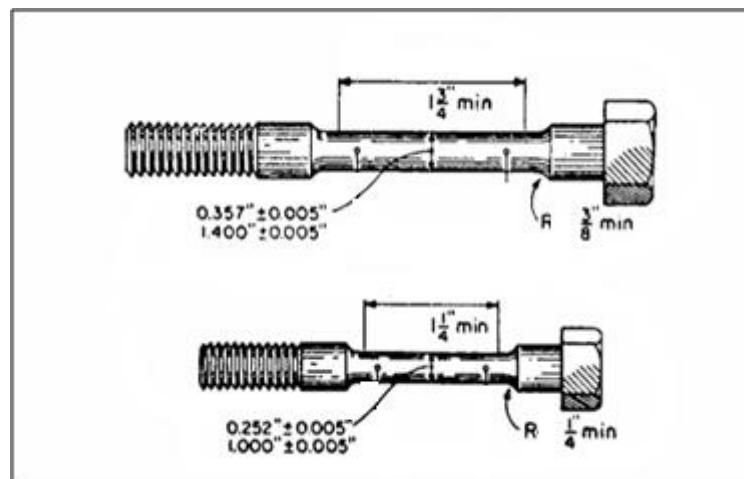


Figura 2.17 – Exemplo de corpos de prova de seção reduzida. (ASTM F606).

## 2.10 - Tribologia

A Tribologia é a ciência que estuda a interação das superfícies em movimento relativo. A natureza e consequência das interações resultantes na interface de contacto 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).

O nome Tribologia foi criado em 1966 e vem do grego, sendo que a palavra “tribo” significa atrito, e “logos” significa estudo. A Tribologia inclui o estudo da lubrificação, atrito e desgaste resultante da interação entre corpos. 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).

O estudo tribológico da interação das superfícies em contato nos parafusos requer uma abordagem diferente das formas habituais encontradas nos livros que versam sobre o assunto. (Muniz, 2007).

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 re-utilizados na desmontagem de uma junta. Um bom número de pesquisadores tem reportado uma mudança nas características de fricção de parafusos em torques repetidos. Morgan e Henshall (1996) relataram que estojos podem experimentar uma redução significativa (50%) na sua tensão axial após algumas re-utilizações. Contudo, eles descobriram que uma recuperação a condição original pode ser alcançada pelo uso de óleo como lubrificante (Eccles, 2010).

Estudos prévios tem estabelecido que o coeficiente de fricção é largamente independente da velocidade de aperto do parafuso e substancialmente independente da pré-carga. Jiang, Zhang e Park (2002) também 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 (Eccles, 2010).

### **2.10.1 - Atrito**

Atrito e gravidade são as duas forças com as quais os engenheiros se deparam com mais frequência ao longo do desenvolvimento de projetos mecânicos, contudo essas são ainda as forças da natureza menos compreendidas. Ao longo dos últimos séculos esforços combinados de engenheiros, e pesquisadores tem fracassado em responder questões a respeito de suas origens e natureza. Tal como o fogo ou a



energia nuclear, o atrito é extremamente útil e importante em algumas circunstâncias e exerce uma função vital.

Para definirmos atrito podemos tomar por base a mais elementar das situações de movimento, ou seja, dois corpos deslizando um sobre o outro, neste a resistência ao movimento é chamada de atrito. Isto pode ser ilustrado por um experimento simples, se colocarmos um corpo sólido sobre uma superfície, a esse fixarmos de forma rígida uma escala de mola, e imprimirmos uma força, podemos obter um registro da variação da força com o movimento, conforme a figura 2.18. (Muniz, 2007).

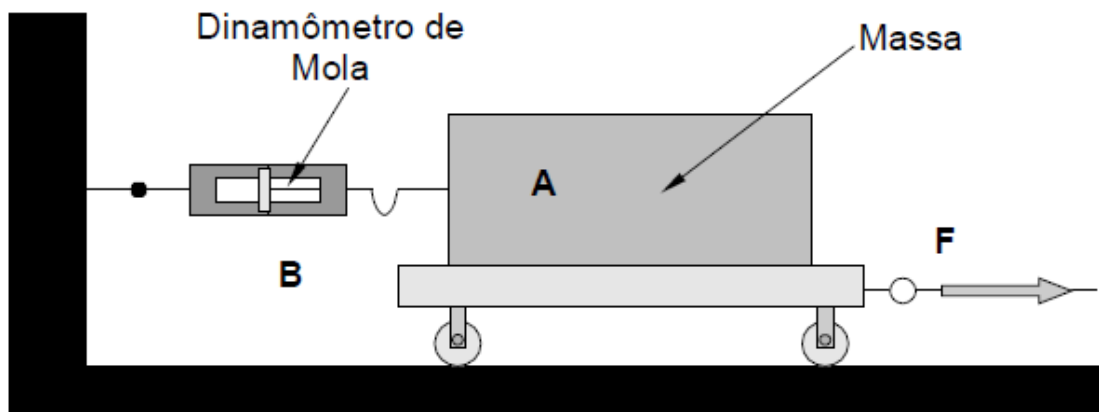


Figura 2.18 - Experimento para determinação da força de atrito. (Stoeterau, 2004).

Aplicando uma força no corpo B, e realizando leituras da força no dinamômetro de mola, observa-se que a força aumenta proporcionalmente com o aumento da tração, até o momento em que ocorre o escorregamento. Uma vez iniciado o escorregamento entre os blocos, o valor da força sofre uma pequena queda, permanecendo constante e independente da força F, que atua sobre o corpo B.

Observando a relação entre as forças f e F, conforme o gráfico da figura 2.19, pode-se extrair que a relação entre a máxima força de atrito que age na interface das duas superfícies e a força normal é denominada de coeficiente de atrito estático.

$$\mu e = \frac{f^{max}}{N} \quad (1.1)$$

Já o coeficiente de atrito dinâmico é definido como a relação entre a força de atrito e a força aplicada.

$$\mu d = \frac{f_{esc}}{N} \quad (1.2)$$

O atrito dinâmico acontece quando a força tangencial for medida durante o movimento das partes em contato e o Estático quando esta força for aquela 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).

#### 2.10.2 . Atritos e forças que atuam em parafusos

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

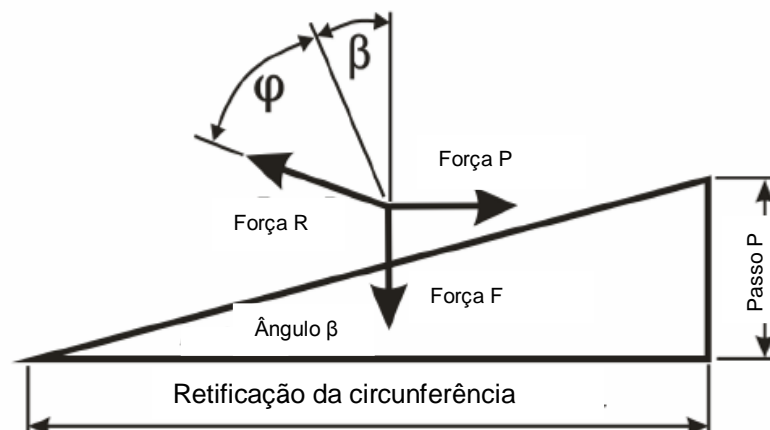


Figura 2.19 – Forças atuando no plano inclinado da rosca. (ASTM F606).

Da figura 2.19, pode ser notado que quando a força “P” está na horizontal, a força de reação “R” deve estar em um ângulo  $\varphi$  da vertical, então:

$$\tan\varphi = \frac{\text{Força } P}{\text{Força } F} = \mu_t \quad (1.3)$$

Onde  $\mu_t$  é o coeficiente de atrito das roscas.

O diagrama de força para o plano inclinado admite a relação entre a força P e F podendo:

$$P = F \cdot \tan(\beta + \varphi)$$

Desde que o torque agindo na rosca seja  $T_{im} = P \cdot d_2/2$  substituindo o valor de P:

$$P = \frac{2T_{im}}{d_2} = F \cdot \tan(\beta + \varphi)$$

Então,

$$T_{im} = (F \cdot d_2/2) \cdot \tan(\beta + \varphi) \quad (1.4)$$

A figura 2.20 mostra a seção através da rosca com as forças atuando, o ângulo do flanco da rosca é anotado como  $2\alpha$ . Em ordem, para contar a inclinação da força normal neste plano, do diagrama:

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

A força de atrito é:

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

Onde,

$$\mu' = \frac{\mu_t}{\cos(\alpha)} \quad (1.5)$$

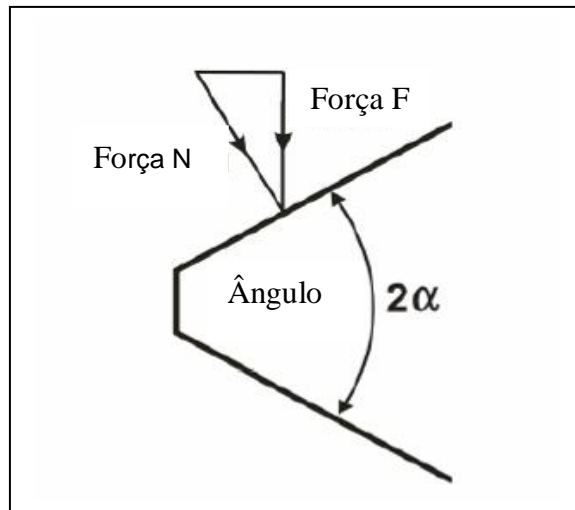


Figura 2.20 - Forças atuando no filete de rosca. (Muniz, 2007).

Da equação 1.4, expandindo o termo em colchetes resulta em:

$$T_m = F \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left[ \frac{\tan \beta + \tan \varphi}{1 - \tan \beta \cdot \tan \varphi} \right]$$

Da figura 2.19

$$\tan \beta = \frac{p}{\pi \cdot d_2}$$

E das equações 1.3 e 1.5

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

Substituindo estes valores na equação para  $T_m$ ,

$$T_m = F \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left[ \frac{\frac{p}{\pi \cdot d_2} + \frac{\mu_t}{\cos(\alpha)} }{1 - \frac{p}{\pi \cdot d_2} \cdot \frac{\mu_t}{\cos(\alpha)}} \right]$$

Desde que o produto da linha inferior seja muito pequeno, uma aproximação fechada é:

$$T_{im} = F \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left[ \frac{p}{\pi \cdot d_2} + \frac{\mu_t}{\cos(\alpha)} \right] \quad (1.6)$$

A força de atrito desenvolvida pela porca ou pela cabeça do parafuso durante o aperto é:

$$T_{nut} = F \cdot \mu_n \cdot \frac{D_e}{2} \quad (1.7)$$

Onde:

$\mu_n$  é o coeficiente de atrito sob a porca;

“De” é o diâmetro do círculo onde o atrito pode ser considerado atuando.

Combinando o torque na rosca e na face da porca temos:

$$T = F \cdot \left[ \frac{p}{2 \cdot \pi} + \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\mu_t}{\cos(\alpha)} + \mu_n \cdot \frac{D_e}{2} \right] \quad (1.8)$$

O ângulo do flanco da rosca para sistema métrico e unificado é de 60°, então para sistema métrico, a equação 1.8 se simplifica para:

$$T = F \cdot \left[ 0,159 \cdot p + 0,578 \cdot \mu_t \cdot d_2 + \mu_n \cdot \frac{D_e}{2} \right] \quad (1.9)$$

O valor de “De” pode ser tomado como:

$$D_e = \frac{d_o + d_i}{2} \quad (1.10)$$

Os testes executados consistidos de aperto da porca nos ensaios enquanto medindo o torque aplicado “T”, torque de reação na rosca  $T_{im}$  e a força de aperto F gerada pelo processo de aperto. A equação 1.9 pode ser re-escrita como:

$$T = F \cdot [0,159 \cdot p + 0,578 \cdot \mu_t \cdot d_2] + F \cdot \left[ \mu_n \cdot \frac{D_e}{2} \right] \quad (1.11)$$

Por exemplo: 
$$T = T_{tm} + (T - T_{tm}) \quad (1.12)$$

Destas, é de importância mostrar que o coeficiente de atrito médio, da rosca e sob a porca é:

$$\mu_{ges} = \frac{\frac{T}{F} - 0,159 \cdot P}{0,578 \cdot d_2 + \frac{De}{2}} \quad (1.12)$$

$$\mu_t = \frac{\frac{T_{tm}}{F} - 0,159 \cdot p}{0,578 \cdot d_2} \quad (1.13)$$

$$\mu_n = \frac{2 \cdot (T - T_{tm})}{D_e \cdot F} \quad (1.14)$$

Onde:

T – torque total de aperto;

F – Pré-carga no parafuso;

$d_2$  – Diâmetro primitivo base da rosca;

p – Passo de rosca;

$D_e$  – Diâmetro de rolamento efetivo da porca;

$d_o$  – Diâmetro externo de rolamento da porca;

$d_i$  – Diâmetro interno de rolamento da face da porca.

A equação 1.9, também conhecida como equação de forma longa, permite calcular o torque no parafuso, no entanto, existem equações mais simples com a mesma finalidade. Estas são chamadas de equações de forma curta. Tal equação se baseia no fato da pré-carga inicial criada no parafuso ser igual ao torque aplicado dividido por uma constante. É simples, mas somente se a constante é conhecida (Bickford, 1995).

$$T = F_p \cdot K \cdot D \quad (1.15)$$

Onde:

T – Torque aplicado (N.m, por exemplo);

- $F_p$  – Força de aperto ou pré-carga alcançada (N, por exemplo);  
 $D$  – Diâmetro nominal do parafuso (mm, por exemplo);  
 $K$  – Fator de torque (adimensional).

O fator de torque não é um coeficiente de atrito, ao invés disto, trata-se de uma constante experimental.

Um aspecto deste fator é que ele sumariza tudo que possa afetar a relação entre torque e pré-carga no experimento, incluindo atrito, torção, flexão, deformação plástica de rosca e qualquer outro fator que se pode ou não antecipar. (Bickford, 1995).

Um aspecto negativo é que o fator só pode ser determinado experimentalmente, e a experiência mostra que se deve determinar o fator de torque para cada aplicação. A experiência mostra ainda que para alcançar precisão no experimento deve-se ter um número de experimentos para definir a média de  $K$ , desvio padrão, etc. (Rolin, 2014).

## 2.11 - Atrito no Nível Molecular

Em última análise as forças de atração e repulsão entre átomos e moléculas são a origem do atrito. As forças moleculares são compreendidas, ou explicadas, em sua totalidade pela mecânica quântica. A força entre dois átomos pode ser mostrada pela figura 2.21, onde a força  $F$  é expressa em função da distância  $r$  entre ambos.

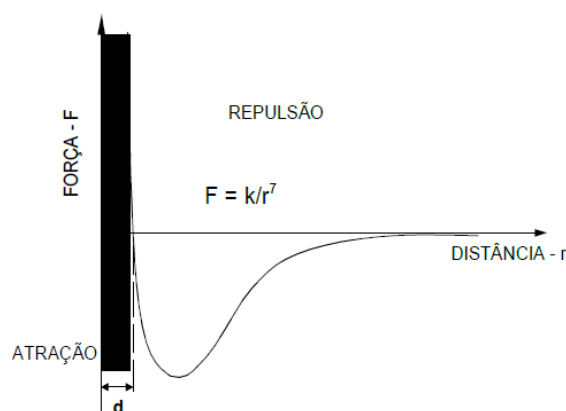


Figura 2.21 - Força entre dois átomos em função de suas distâncias de separação. (Stoeterau, 2004).

Um dos exemplos mais comum na engenharia mecânica de atração molecular esta no empilhamento de blocos padrão para metrologia. Os blocos padrão caracterizam-se por terem elevada exatidão dimensional, geométrica e superfícies com alta qualidade superficial, obtida por lapidações sucessivas.

Se um bloco padrão é escorregado sobre outro com muito cuidado, a elevada planicidade das superfícies permite a adesão dos blocos através da atração entre átomos de ambas às superfícies em contato. (Stoeterau, 2004).

### 2.11.1 - Área de Contato Real

Quando colocado duas superfícies em contato, somente algumas regiões na sua superfície estarão em contato, ao passo que outras estarão afastadas. A determinação dos átomos que interagem fortemente com os átomos correspondentes da outra superfície, e quais deles não interagem. É sabido que a distâncias muito pequenas forças atômicas muito fortes se estabelecem, em geral, distâncias na ordem de angstroms ( $10^{-10}\text{m}$ ), o que representa o tamanho médio dos átomos. Assim é possível simplificar o problema assumindo que todas as interações ocorrem nestas regiões onde há contato entre os átomos. Estas regiões são denominadas de junções, e a soma das áreas destas junções constitui a área real de contato -  $A_r$ . A área de interferência total consiste da área real de contato mais a área que aparenta estar em contato, mas não está, ou seja, é uma área de contato aparente -  $A_a$ . (Figura 2.22)

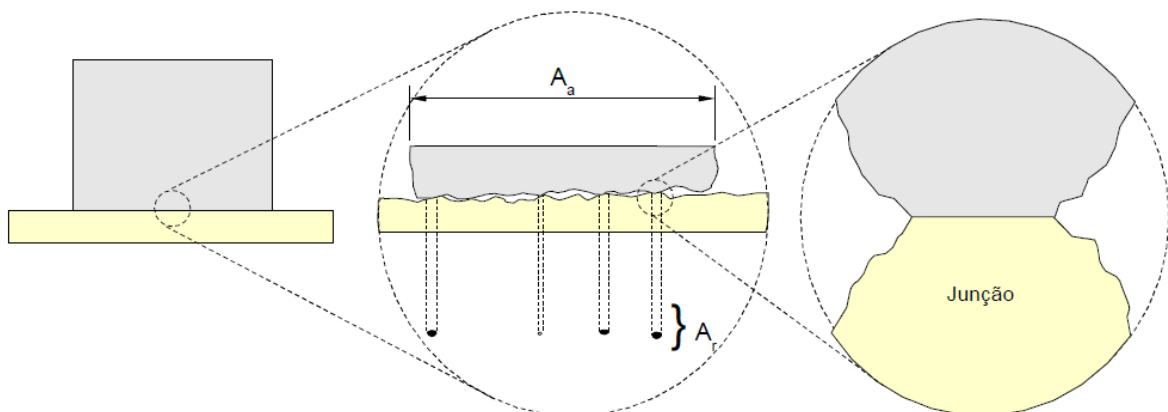


Figura 2.22- Representação de área aparente e área real de contato (Stoeterau, 2004).



A principal resistência ao movimento surge da necessidade de cisalhar as fortes adesões dos átomos das superfícies dos materiais em contato. Apesar de isso quase sempre acontecer para 90%, ou mais de todas as forças de atrito, existe inúmeros outros fatores que devem ser considerados.

Uma dessas componentes seria a rugosidade que surge da necessidade das asperezas das superfícies subirem umas sobre as outras. Se a aspereza tem uma inclinação, uma contribuição ao coeficiente de atrito será produzida em função da tangente. A figura 2.23 apresenta o escorregamento entre duas superfícies ásperas, uma aspereza escorregando em uma componente positiva. Posteriormente haverá uma componente negativa (Stoeterau, 2004).

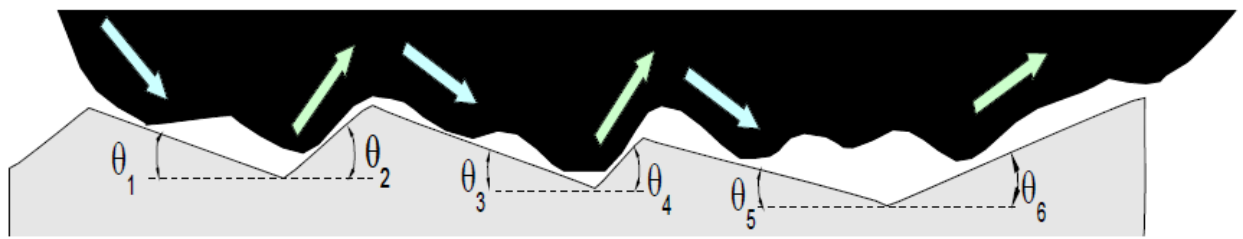


Figura 2.23 - Escorregamento em superfície rugosa. (Stoeterau, 2004).

Com base na figura 2.23 podemos concluir que na região coexistem tanto ângulos positivos quanto negativos, e que na soma destes contatos tendem a se cancelar a elevação do atrito devido à rugosidade. O que permanece é que a rugosidade tende a contribuir com cerca de 0,05% de todo o coeficiente de atrito, representando uma força flutuante superposta as componentes principais de adesão na força de atrito.

Uma aparente exceção a regra que a rugosidade tem pouco efeito sobre o atrito, algumas vezes falha para superfícies lubrificadas por líquidos. Para certas velocidades uma superfície menos rugosa pode proporcionar uma melhor condição de lubrificação hidrodinâmica, enquanto que para superfícies muito rugosas pode ocorrer o caso de lubrificação limite (Stoeterau, 2004).

Se uma superfície dura, com maior rugosidade está escorregando sobre uma superfície macia, estas tendem a penetrar na superfície macia durante o deslizamento, produzindo um arranhão, similarmente a um aplainamento. Assim, a

energia de deformação representada pelo arranhão deve ser fornecida pela força de atrito, a qual vai a partir daí ser maior do que se o arranhão não estivesse sendo produzido. Novamente se produz uma adição a força de atrito. (Stoeterau, 2004).

### 2.11.2 - Atrito em Metais

Considerando o atrito e seus efeitos nos metais, já que eles estão presentes na grande maioria dos contatos por deslizamento das máquinas. Na maioria das aplicações práticas, o contato metálico com o escorregamento ocorre na presença de substâncias lubrificantes como óleos, graxas, ou filmes sólidos lubrificantes. As propriedades de superfícies lubrificadas serão discutidas mais tarde. Vamos considerar aqui a situação, que ocorre com frequência, em que é impossível ou impraticável o fornecimento de um lubrificante, ou esse fornecimento falha por acidente, ou o lubrificante é aquecido acima de sua temperatura de trabalho, e, então, os metais entram em contato sob condições essencialmente secas.

Antes de discutir as propriedades de atrito de metais não lubrificadas, é preciso salientar que essas propriedades são bastante afetadas pela presença de filmes superficiais nos metais, e que, em geral, um metal não lubrificado encontrado em um ambiente industrial será recoberto por uma série desses filmes, conforme mostra a figura 2.24. (Stoeterau, 2004).

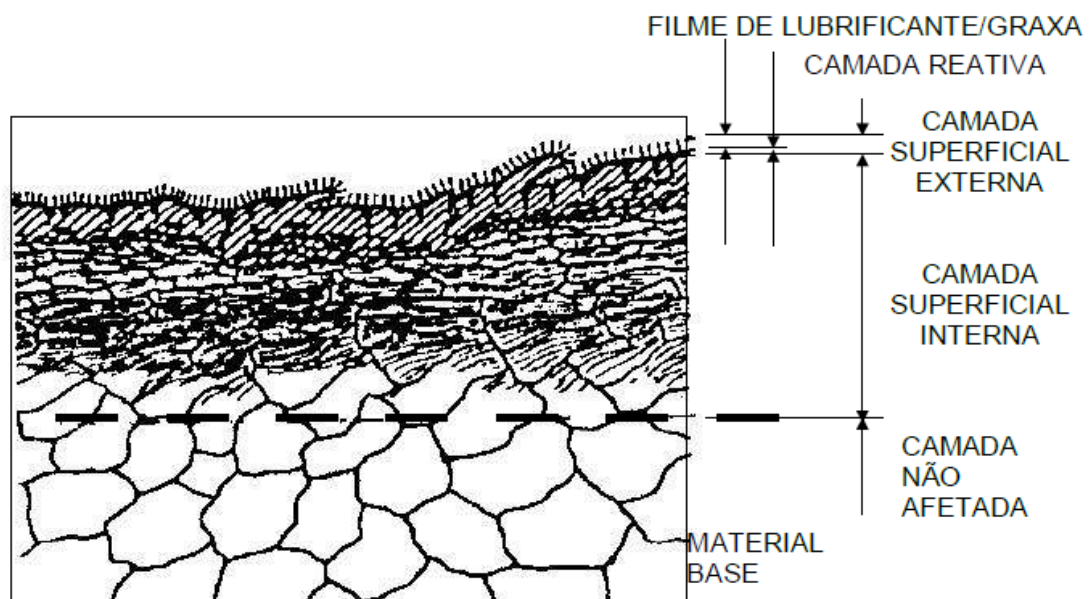


Figura 2.24 – Ilustração esquemática de filmes em uma superfície metálica. (Stoeterau, 2004).

Partindo do interior do metal, encontra-se, primeiramente, uma camada de óxido, produzida pela reação do oxigênio do ar com o metal, e presente em todos os metais com exceção dos metais nobres como ouro. A seguir vem uma camada absorvida da atmosfera, cujos principais constituintes são moléculas de vapor d'água e de oxigênio. Por último, tem-se uma camada contaminante constituída, geralmente, por graxa ou filmes de óleo, que pode substituir parcialmente a camada absorvida (Stoeterau, 2004).

Superfícies de metais contaminados como descrito anteriormente, geralmente possuem coeficiente de atrito inicial na faixa de 0,1 a 0,5 quando em escorregamento uma contra a outra. Valores maiores são alcançados com a continuação do escorregamento porque o filme graxo pode ser eventualmente, expulso de entre as superfícies.

Quando superfícies livres de elementos graxos escorregam entre si, o tipo de atrito encontrado varia com a natureza dos metais em contato e, em menor intensidade com outras variáveis, como carga, área superficial, rugosidade superficial e velocidade. Como regra geral, pode-se dizer que dois tipos de comportamentos são comuns: o atrito severo e o atrito moderado. Em algumas circunstâncias, o atrito varia continuamente entre os dois.

Como regra geral, atrito severo ocorre quando as duas superfícies em escorregamento são do mesmo metal, ou quando consistem de metais bastante similares, que tenham habilidade em formar ligas, ou que haja solubilidade dos átomos de um na estrutura atômica do outro. O atrito de cobre em cobre, por exemplo, é elevado, acima de 1,0, porque o mesmo metal é usado nas duas superfícies. Alumínio no ferro ou em aço de baixo carbono fornecem atritos também elevados, valores de 0,8 e acima, porque esses dois metais interagem fortemente formando uma grande quantidade de compostos intermetálicos. Ambos os sistemas ocasionam dano superficial severo. Onde os metais são diferentes e com pequena afinidade, prevalece o atrito moderado. A prata em ferro ou aço de baixo carbono dá valor de coeficiente de atrito da ordem de 0,3, porque esses dois metais não se ligam e não formam compostos intermetálicos. (Stoeterau, 2004).

As regras gerais acima sofrem modificações em algumas circunstâncias especiais. Nota-se que o atrito severo ocorre quando um dos elementos é muito macio, por exemplo, chumbo ou índio quando comparado ao outro. Isto ocorre

porque o metal mais macio desgastando-se cobre o outro com uma camada de seus próprios fragmentos, e o sistema de escorregamento se transforma em um metal deslizando sobre si próprio. Alguns metais duros apresentam o mesmo efeito. Nota-se, também, em segundo lugar, que metais duros como o aço, cromo e níquel não apresentam sempre atrito severo, mesmo quando deslizam contra si mesmo. Isto ocorre, principalmente, na presença de atmosfera úmida, quando o filme de mistura absorvido na superfície do metal age como um lubrificante. Com os metais macios, entretanto, condições de atrito severo ocorrem tanto em atmosfera seca quanto úmida. (Stoeterau, 2004).

## **2.12 - Lubrificação**

A lubrificação é usada para reduzir o atrito e o desgaste entre duas superfícies sólidas em movimento relativo.

Na montagem industrial é muito importante obter uma força de aperto definida dentro dos valores especificados. Através da utilização de lubrificantes para parafusos especiais, o coeficiente de atrito necessário da união roscada pode ser ajustado em conformidade. Na prática, a desmontagem de uma união roscada deveria decorrer sem problemas. No entanto, na maioria dos casos não é isso que se passa, pois os parafusos podem "ficar fixos" por corrosão, particularmente nos casos de longos períodos de utilização e com condições de utilização agressivas. 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 de custos (OKS-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. (OKS-germany, 2014).

A confiabilidade de uma união roscada e a respectiva desmontagem sem problemas colocam exigências elevadas aos lubrificantes utilizados, tais como pastas, graxas ou revestimentos de verniz lubrificante. Além de um coeficiente de atrito ótimo e uma excelente proteção contra a corrosão, têm de ser também garantidas características como resistência à água e aos produtos químicos,

adequação para a indústria alimentar, compatibilidade com plásticos e o ambiente, segurança no trabalho e facilidade de utilização. ( OKS-germany, 2014).

#### **2.12.1 - Lubrificantes empregados para montagem de juntas aparafusadas**

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

As graxas 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.

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).

## CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por finalidade apresentar os procedimentos e as principais técnicas que foram utilizadas para o estudo das características tribológicas em parafusos M12 x 1,75, classe: 10.9, com acabamento superficial enegrecido por tempera torquados sem e com lubrificação, que desempenham papel estrutural nas montagens de componentes mecânicos, bem como algumas de suas propriedades mecânicas.

### 3.1 - Materiais a serem ensaiados

Para realização dos ensaios mecânicos e de torque, foi adquirido um lote de quarenta e dois parafusos M12 x 1,75 x 85 mm, classe 10.9, corpo com rosca parcial medindo 30 mm, porcas classe 10 e arruelas F- 436M. Todos com acabamento superficial enegrecido por têmpera.

A tabela a 3.1 traz a quantidade de conjuntos de parafuso, porca e arruela empregados em cada ensaio realizado.

Tabela 3. 1 - Número de parafuso empregado em cada ensaios.

Ensaio	Tração	Dureza	Metalografia	Torque	Análise química
Quantidades	2	1	1	37	1

### 3.2 - Equipamento para teste de torque.

O aparato experimental dispõe de um equipamento eletro-mecânico projetado e fabricado para realizar os testes de torque nos parafusos, com objetivo de identificar o fator de torque e os coeficientes de atrito entre as partes em estudo. O mesmo é composto de um chassi em aço ANSI 1020, com perfis nervurados para garantir assim a rigidez necessária à junta.

Apresenta também uma célula de carga comercial de 200KN marca DINATESTES, composta de elementos elásticos e extensômetros elétricos em ponte completa, que capta as deformações, posteriormente transformadas em valores de

força de tração aplicada ao parafuso durante o torque. A conexão do parafuso à célula de carga é feita através de um carro com dois rolamentos rígidos de esferas apoiados em duas guias fixas no chassi, dessa forma não permitindo o giro do carro durante o torque aplicado ao conjunto. A cabeça do parafuso recebe outro fixador em relação ao carro para que não ocorra o giro do mesmo. (Ver detalhe na figura 3.1).

Um torquímetro instrumentado com extensômetro elétrico fornece os dados de deformação por torção que serão tratados no computador, identificando assim o torque, e um mancal com rolamento para que não ocorra flexão no mesmo durante a torção.

Para a aplicação do torque foi utilizada uma parafusadeira à bateria com redutor, acoplada ao transdutor de torque com rotação constante de 0,6 RPM.

Na configuração do equipamento para medição do coeficiente de atrito entre as roscas e o contato entre porca e arruela, foi acrescentado sob a porca um rolamento axial de rolos cilíndricos com um flange, para que não houvesse contato entre as superfícies da porca e arruela.

Os dados de deformação dos transdutores de torque e força aplicados à junta foram coletados em tempo real através de um módulo de medição de deformação da National Instruments modelo (NI 9237) com quatro canais de entrada, e o programa utilizado foi elaborado no ambiente do software LabVIEW, de onde os resultados de torque e força são obtidos e salvos para posterior tratamento. A figura 3.1 detalha o equipamento.

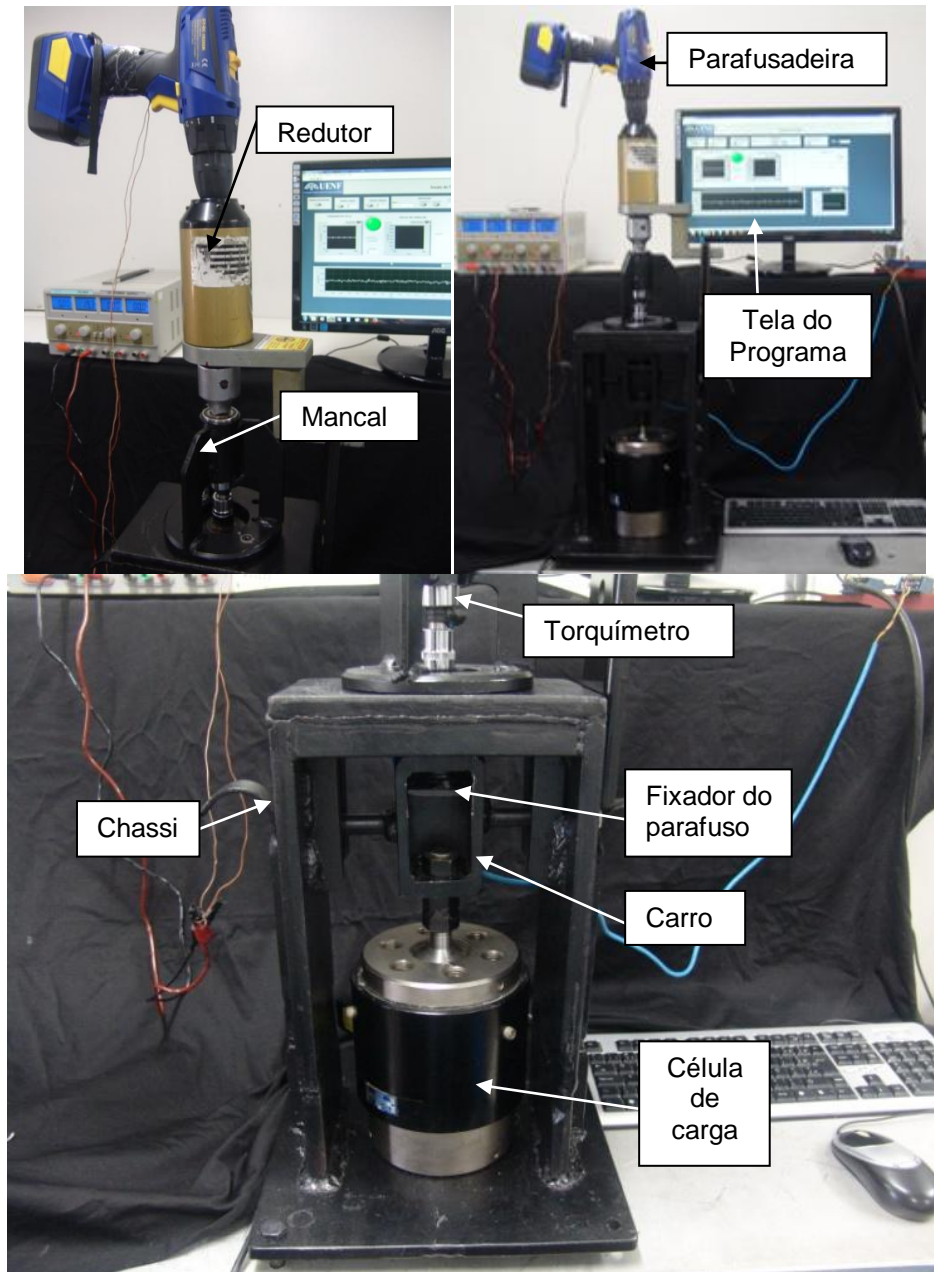


Figura 3.1 - Equipamento fabricado para ensaios de torque.

### 3.2.1 - Desenvolvimento do transdutor de torque.

Para a construção do transdutor de torque inicialmente foi definido a faixa de torque em que o equipamento trabalharia em função do parafuso a ser testado.

Com o intuito de agilizar a fabricação do elemento elástico a ser utilizado para construção do torquímetro instrumentado, foram adquiridas duas extensões de chave soquete do mesmo lote de fabricação (com conexão de  $\frac{1}{2}$ "). Sendo uma para determinação de suas propriedades mecânicas. (Figura 3.2)





Figura 3.2 - Extensões adquiridas para fabricação de transdutor de torque.

As duas extensões passaram por processo de usinagem. Na primeira foi realizado a usinagem de roscas nas extremidades para fixação da mesma às garras da máquina de ensaios universal, a superfície externa de seu corpo foi desbastada para garantir uma geometria cilíndrica com bom acabamento, para posterior colagem do extensômetro e futura determinação do coeficiente de poisson e módulo de elasticidade do material. Através dos dados coletados da máquina de ensaios e as deformações transversais e longitudinais do elemento, adquirido com os extensômetros.

(Figura 3.3).

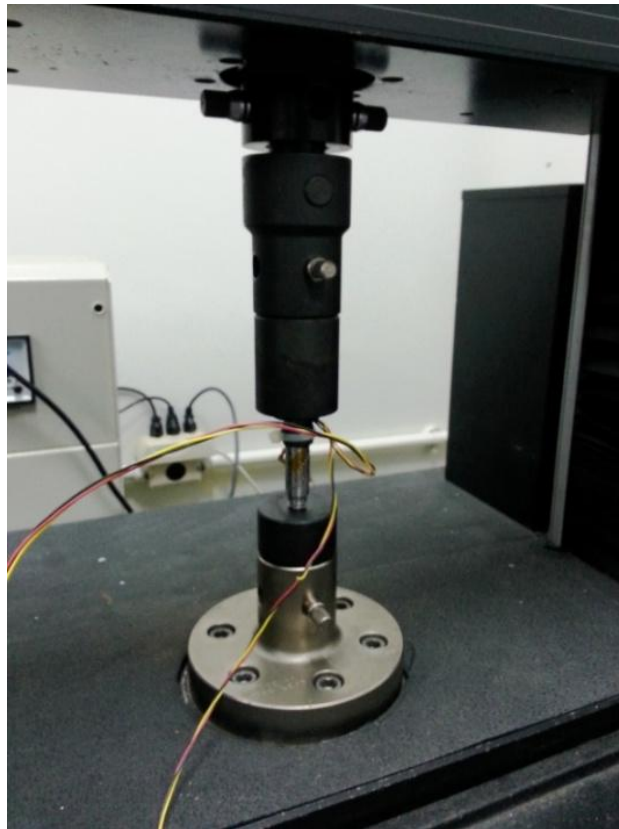


Figura 3.3 – Teste para determinação de características mecânica do material.

Os resultados obtidos foram utilizados para determinação do diâmetro do elemento elástico que atendesse as solicitações mecânicas em relação à faixa de torque a ser empregada nos ensaios, com boa sensibilidade e que possibilita-se a colagem dos extensômetros.

Desta forma a segunda extensão teve o seu corpo usinado para colagem do extensômetro tipo roseta biaxial “Pa-06-125TA-350I - F.S.:2,09”, específico para medição de torque, e na região de contato com rolamento do mancal, Além de ter sido fabricado uma “camisa” fixada ao elemento elástico para proteção do extensômetro.

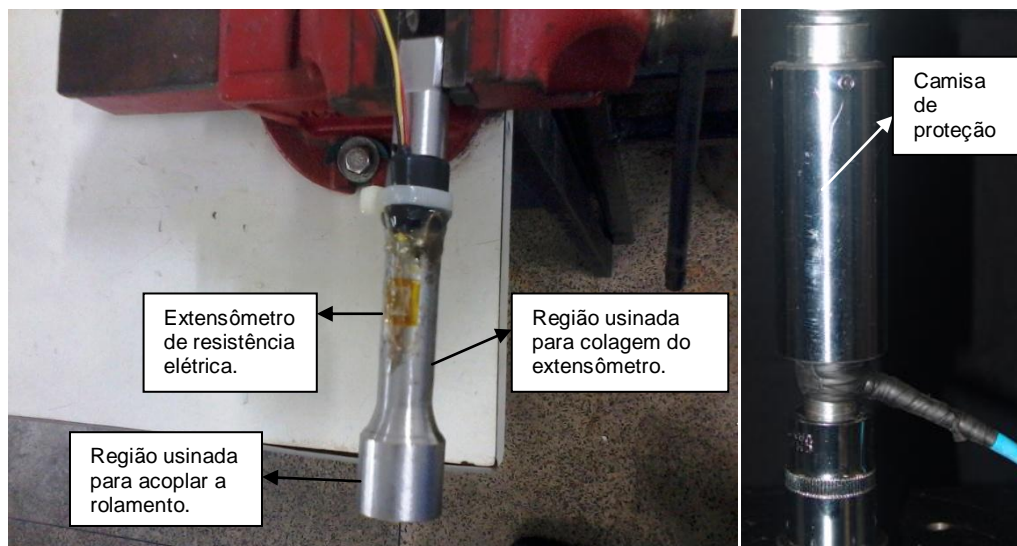


Figura 3.4 - Transdutor de torque.

### 3.2.2 - Calibração do transdutor de torque

A calibração do torquímetro iniciou-se com o mesmo sendo conectado ao programa desenvolvido para os ensaios de torque, e assim coletando-se as deformações ocorridas. A aplicação das cargas foi realizada sobre um braço de alavanca, carregado por peso morto aferido.

Para realização da calibração foi desenvolvida e fabricada uma base de fixação para torquímetro com apoio, para que não houvesse durante o carregamento esforços de flexão que interferissem na calibração. E também um suporte para os pesos.

O braço de alavanca que durante o carregamento sofre deformação, e tem o seu comprimento reduzido, foi medido a cada peso adicionado utilizando um instrumento de medição a laser. (Figura 3.5).

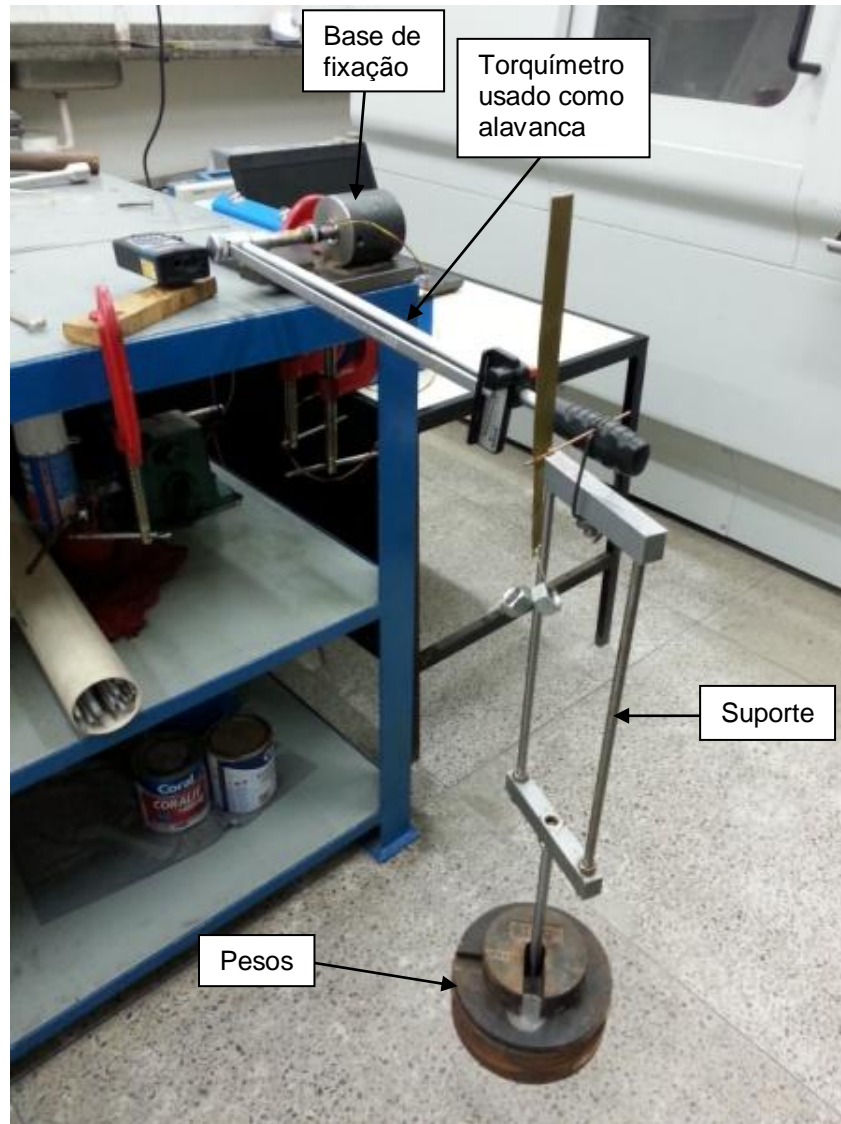


Figura 3.5 - Aparato para calibração do torquímetro.

Na sequência de calibração foram realizados oito carregamentos, com cargas progressivas e registrado as deformações em cada patamar (tabela-3.1). Com os dados obtidos foi plotado o gráfico de torque x deformação (figura 3.6), e assim gerada a equação da curva que foi inserida no programa. A equação obtida apresentou boa linearidade como pode ser verificado através do coeficiente de correção de  $(R^2) = 0,999996$ .

Tabela 3. 2 - Dados de calibração do transdutor de torque.

$\epsilon$ ( $\mu\epsilon$ )	Carga (N)	Torque (Nm)	L (m)	Regressão	$\Delta$ (%) Torque
128,000	26,487	13,244	0,500	13,121	0,928
601,900	124,685	62,343	0,500	62,485	-0,228
790,000	164,121	82,061	0,500	82,079	-0,022
976,500	203,361	101,477	0,499	101,505	-0,028
1163,000	242,601	120,815	0,498	120,932	-0,097
1348,000	281,841	140,357	0,498	140,203	0,110
1442,000	301,854	150,021	0,497	149,995	0,018
1537,000	322,357	159,889	0,496	159,891	-0,001
Média $\Delta$ (%)					0,085

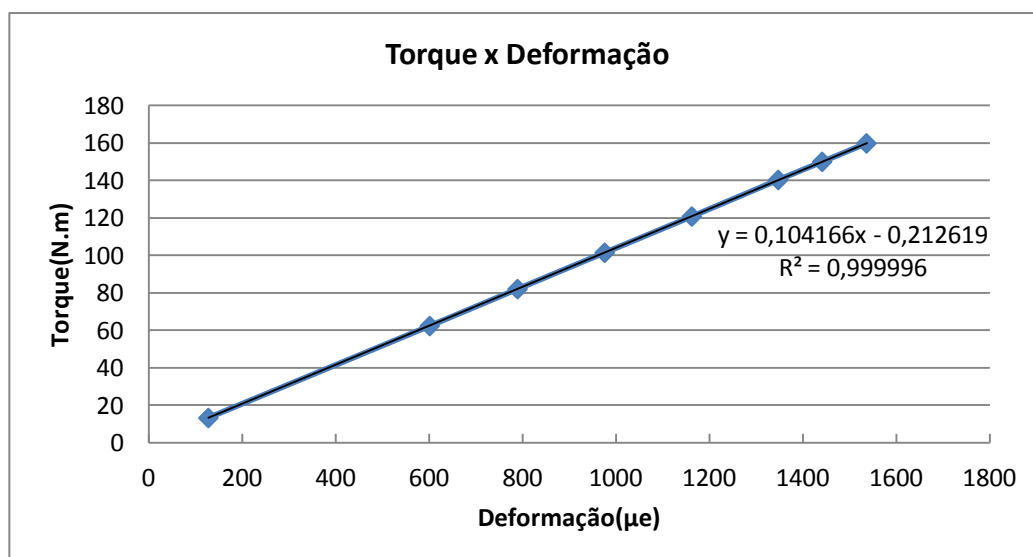


Figura 3.6 - Gráfico da curva de calibração do transdutor de torque.

### 3.2.3 - Calibração da célula de carga de tração.

Para a calibração da célula de carga de tração, foi utilizada a máquina de ensaio universal com carregamento em compressão. Os dados de carga foram coletados via célula de carga da máquina de ensaios. E as deformações adquiridas através do programa do equipamento de torque. Na calibração, a célula de carga foi carregada dez vezes com cargas aumentadas progressivamente, conforme tabela 3.3.

Os resultados de carga e deformação obtidos foram usados para gerar o gráfico (figura-3.7), e assim determinada a equação inserida no programa, que apresentou um ajuste do coeficiente de correção de  $(R^2) = 0,999999$ .

Tabela 3. 3 - Dados de calibração da célula de carga de tração.

Carga(KN)	$\mu\epsilon$	Regressão	$\Delta\%$ Carga
12,190	206	12,180	0,079
22,230	375	22,233	0,014
30,080	507	30,084	0,016
40,740	686	40,732	0,019
51,510	867	51,498	0,022
62,350	1050	62,384	0,054
70,530	1187	70,533	0,004
81,840	1377	81,834	0,006
91,830	1545	91,828	0,002
99,690	1677	99,679	0,010
<b>Média <math>\Delta(\%)</math></b>			0,005

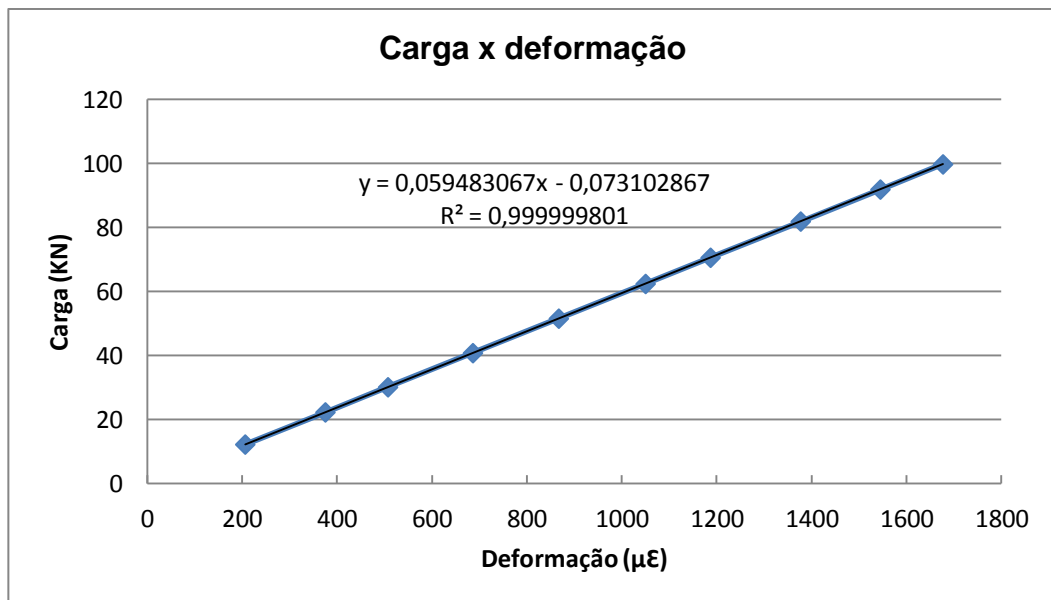


Figura 3.7 - Gráfico da curva de calibração da célula de carga de tração.

### 3.2.4 - Projeto e fabricação de garras para ensaio de tração.

Devido ao tamanho e geometria dos parafusos foram projetadas e fabricadas conforme figura 3.9, duas garras em aço ANSI 4140 temperadas e revenidas, para realização dos ensaios de tração nos corpos de prova usinados. O desenho de conjunto da figura 3.8 demonstra como foi realizada a montagem do corpo de prova na garra.

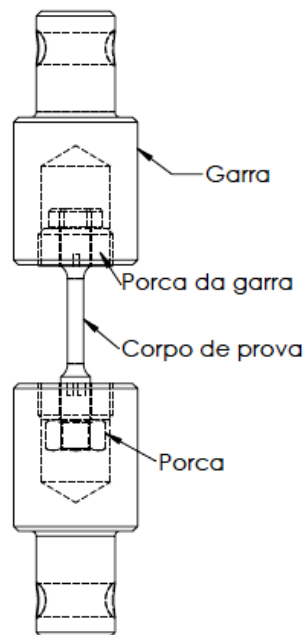


Figura 3.8 - Desenho de conjunto, corpo de prova e garras.



Figura 3.9 - Foto da garra em processo de fabricação.



### 3.2.5 - Determinação de propriedades mecânicas

Os ensaios de tração foram realizados em três corpos de prova ensaiados em uma máquina universal de ensaios marca INSTRON modelo: 8852, para construção do gráfico de tensão deformação e verificação das propriedades mecânicas. A figura 3.10 ilustra o equipamento que foi utilizado para os ensaios com o corpo de prova e as garras fabricadas.

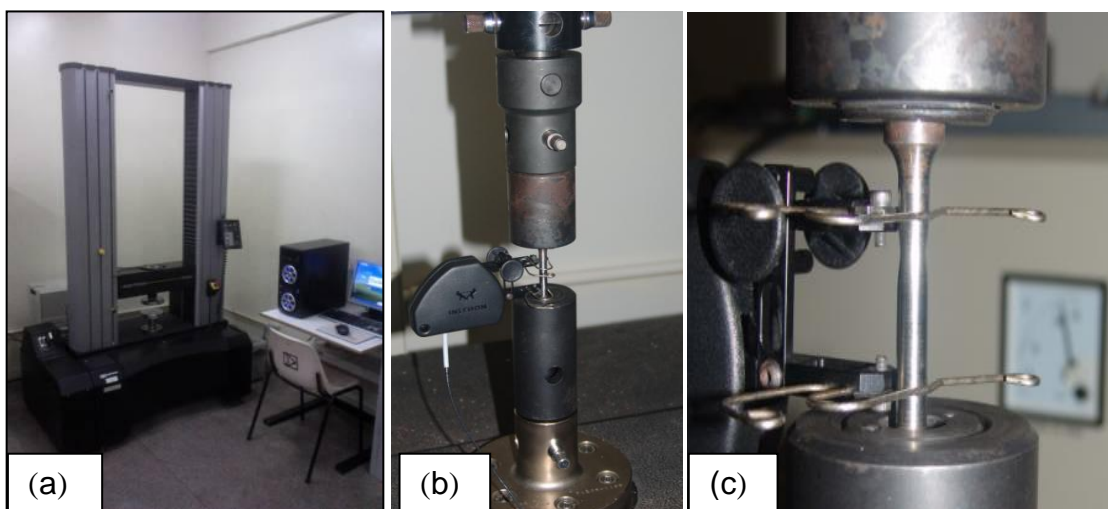


Figura 3.10 - Máquina de ensaio (a), garras durante ensaio de tração (b) e corpo de prova (c).

Os corpos de prova de tração (figura 3.11) foram usinados a partir dos parafusos com as dimensões padronizadas pela norma ASTM F 606M em um torno CNC horizontal MAZAK – Modelo QSM 200 M.

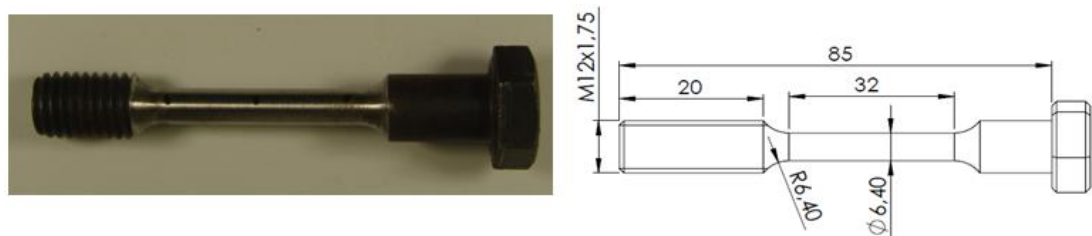


Figura 3.11 - Corpo de prova de tração.

Também foram realizados ensaios de dureza visando avaliar se os parafusos, porcas e arruelas correspondiam às especificações de norma. Os pontos de medição verificados seguiram as recomendações da norma ASTM F606 para fixadores. A figura 3.12 apresenta o durômetro de bancada que foi utilizado para medir das durezas em escala Rockwell C, e pontos recomendados para medição das durezas.

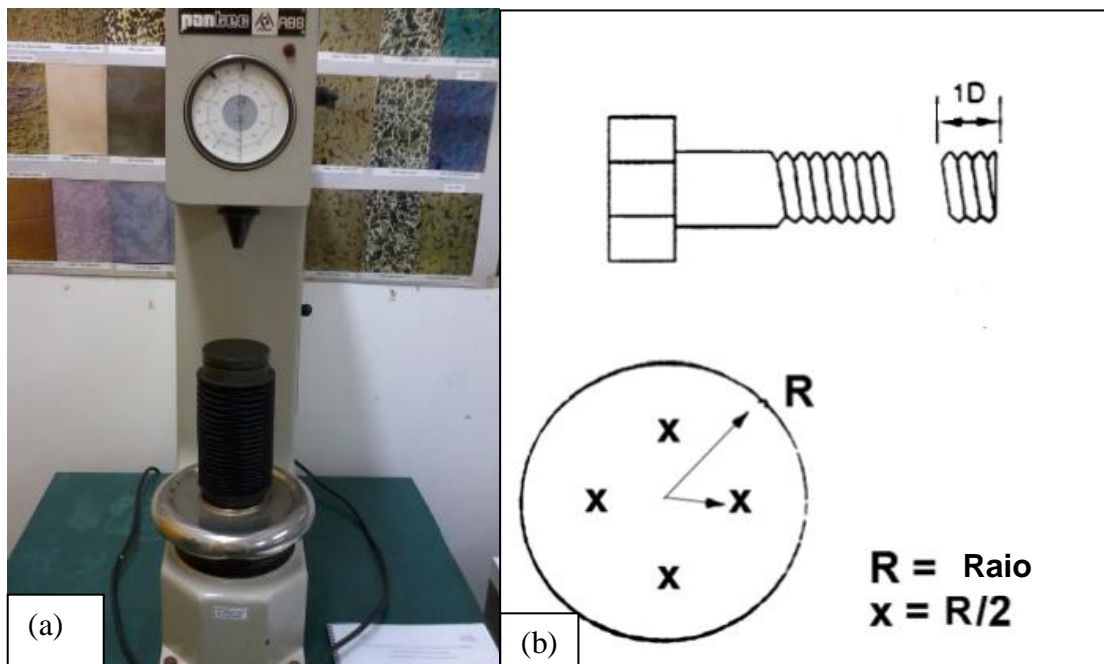


Figura 3.12 - Durômetro de Bancada (a) e região de medição da dureza recomendada (b).

### 3.2.6 - Determinação de propriedades metalúrgicas

O parafuso, porca e arruela passaram por processo de corte em suas seções longitudinais e transversais em uma máquina com disco abrasivo, com refrigeração adequada. Após os cortes e limpeza as amostras foram embutidas para posterior lixamento, polimento e atacadas com reativo químico Nital 2%, para realização da análise estrutural do aço de cada componente.

A figura 3.13, apresenta as amostras após corte e embutimento, na seguinte sequência:



Amostra número um, seção transversal da arruela.

Amostra dois, seção longitudinal da porca.

Amostra três, seção transversal do parafuso.

Amostra quatro, seção longitudinal do parafuso cortado na região da rosca.

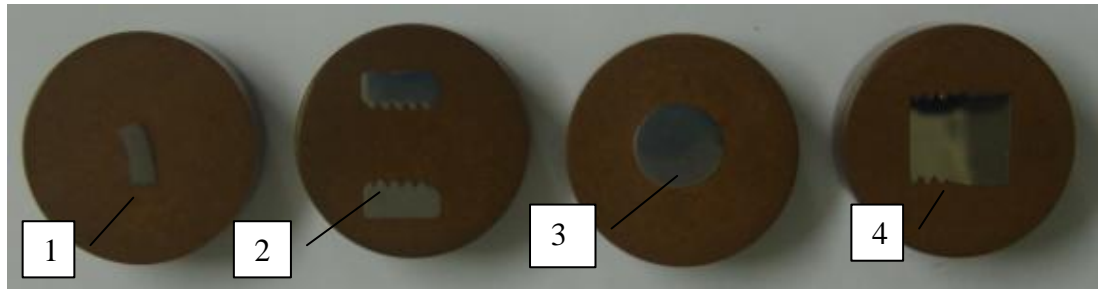


Figura 3.13 - Amostras embutidas.

O microscópio utilizado para observação micro-estrutural dos mesmos foi o ComFocal modelo OLS 4100, conforme figura 3.14.



Figura 3.14 - Microscópio Olympus Confocal.

### 3.2.7 - Análise de superfícies

Foram analisadas as superfícies das seguintes regiões: rosca dos parafusos, de contato das porcas e de contato das arruelas, sendo os componentes como recebido do fabricante e após uma sequência de dez torqueamentos com e sem

lubrificantes, com objetivo de identificar alterações quanto à perda de proteção superficial, deformação plástica aderente e rugosidade.

O equipamento usado para realização dessas verificações foi o microscópio Olympus Confocal conforme figura anterior 3.14.

### **3.2.8 - Ensaio para determinação do fator de torque e do coeficiente de atrito médio do conjunto parafuso, porca e arruela.**

O fator de torque (K) e o coeficiente de atrito médio ( $\mu_{ges}$ ) foram determinados em parafusos do mesmo lote, sem lubrificação e com lubrificação. Nos 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.

O primeiro passo para realização dos testes se deu pela identificação dos parafusos em números 1, 2 e 3, para cada grupo de pré-carga e lubrificação.

No segundo passo os parafusos foram limpos de forma mecânica com tecido umedecido por solvente, sem retirar a camada enegrecida.

Em seguida foi realizada a fixação do parafuso à máquina, configurando no programa o torque calculado em função de um fator de torque (K) fixo, para atingir a pré-carga em cada situação de montagem .

Após o torque ser aplicado, os resultados eram salvos no computador e aguardava-se cinco minutos para resfriamento. O parafuso era desmontado e limpo, no caso dos lubrificados um novo filme de lubrificante era inserido. Esta sequência se deu dez vezes para cada parafuso.

A partir dos resultados salvos, os valores do fator de torque (K) foram calculados utilizando-se a equação (1.15), e o coeficiente de atrito médio ( $\mu_{ges}$ ) pela equação (1.13) segundo norma ISO 16047.

A configuração do equipamento para realização desse teste segue na figura 3.15.

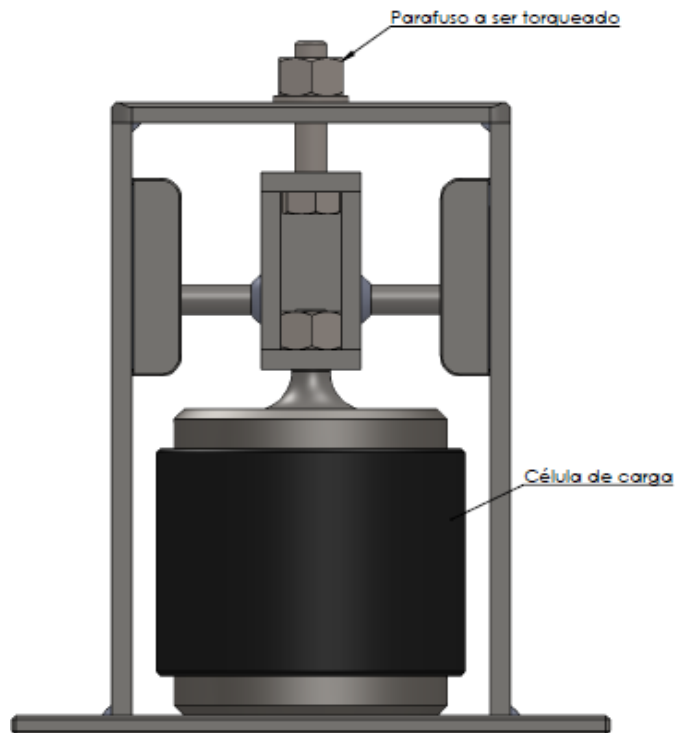


Figura 3.15 - Equipamento configurado para determinação de fator de torque e atrito total.

### 3.2.9 - Coeficiente de atrito da rosca e do contato da porca

A determinação do coeficiente de atrito de contato entre porca e arruela, ( $\mu_n$ ) e das roscas ( $\mu_t$ ) será determinado utilizando os mesmos parâmetros e quantidade de amostras do item anterior, alterando-se a configuração do equipamento como pode ser visto na figura (3.16). Para esta configuração foi acrescentado um rolamento de rolos cilíndricos de contato axial com um flange de apoio para a porca, já que o diâmetro interno do rolamento é maior do que o externo da porca, a função do rolamento é de retirar o atrito da porca sobre arruela. Os coeficientes de atrito das roscas são calculados pela equação (1.14), e os do contato da porca com a arruela pela equação (1.15), segundo a norma ISO 16047.

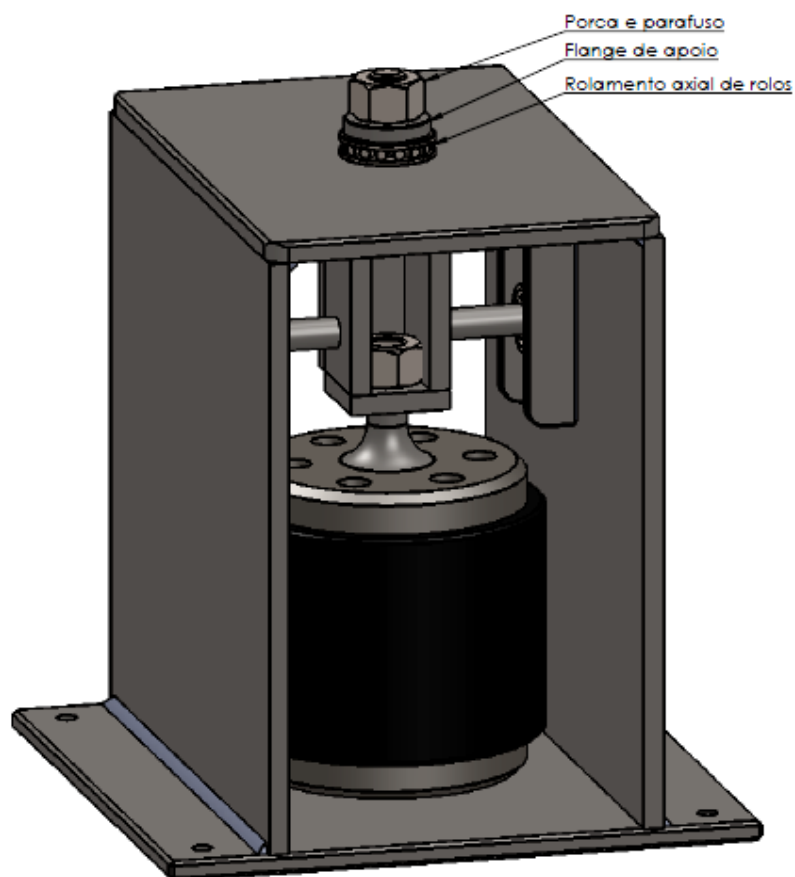


Figura 3.16 - Equipamento de torque com rolamento axial.

## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 - Ensaios Mecânicos

#### 4.1.1 - Ensaios de tração.

Os ensaios de tração foram realizados para avaliar se os parafusos atendiam as propriedades mecânicas definidas para fixadores de sua classe pela norma NBR 8855.

A figura 4.1, apresenta gráfico com as curvas de tensão deformação plotadas a partir dos dados obtidos nos ensaios de tração realizados nos dois corpos de prova retirados do lote de parafusos.

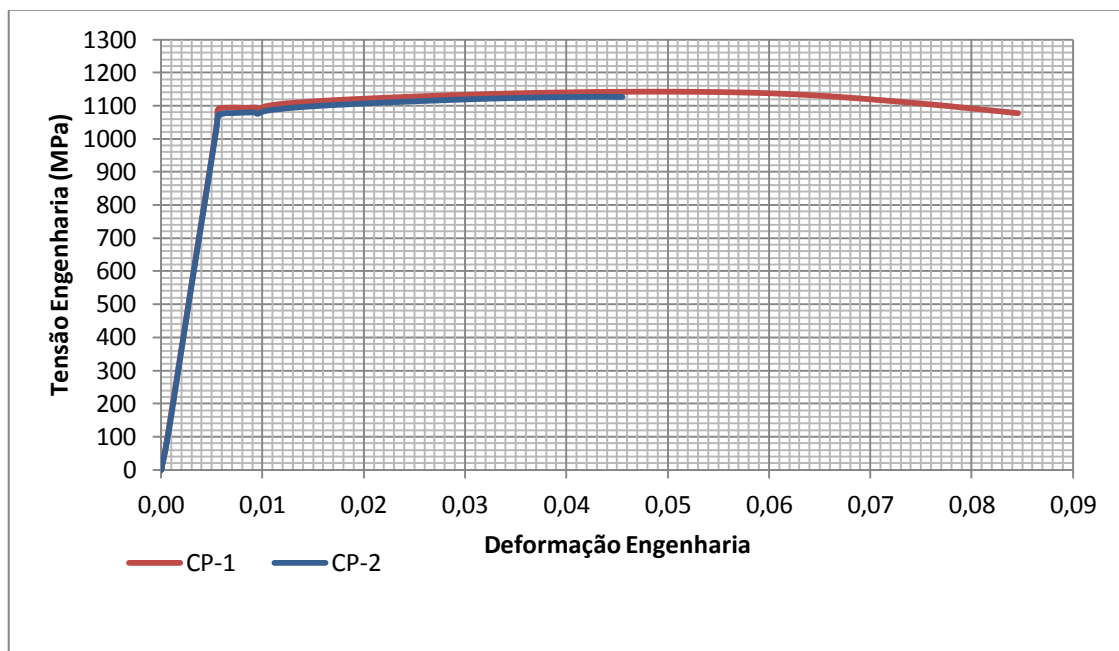


Figura 4.1 - Gráfico com as curvas de tensão deformação.

Na figura 4.2 é possível verificar os módulos de elasticidade dos dois corpos de prova protados a partir dos dados obtidos nos ensaios de tração.

A tabela 4.1 trás os valores determinados através do ensaio de tração para os dois corpos de prova.

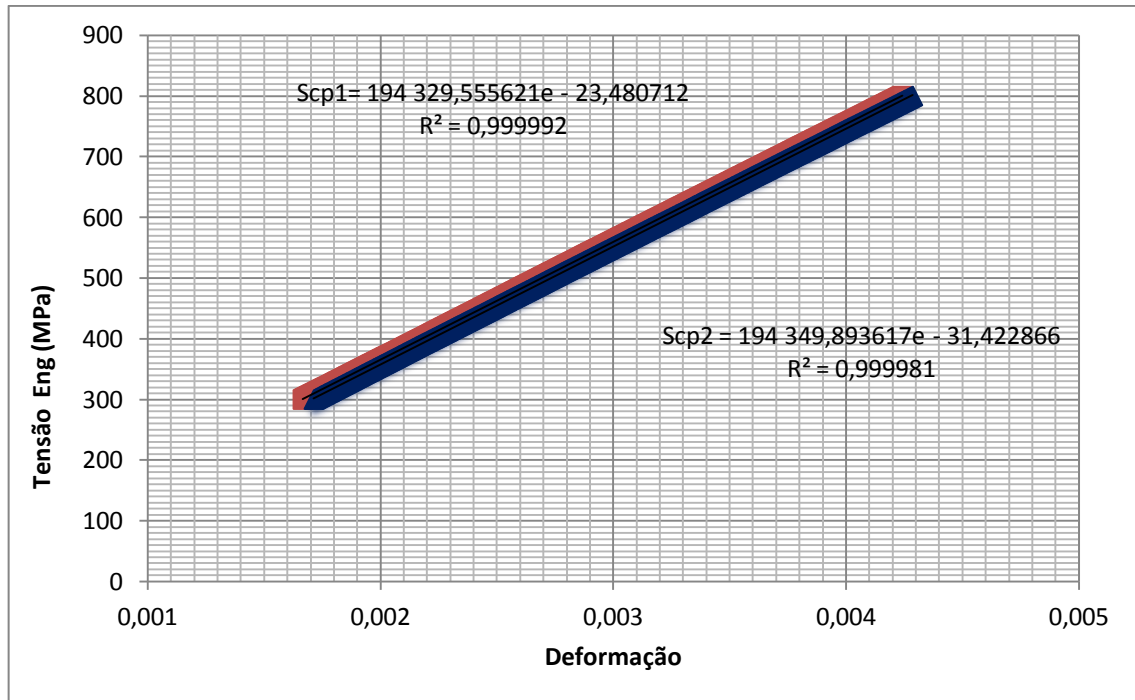


Figura 4.2 - Gráfico para determinação dos módulos de elasticidade.

Tabela 4. 1 - Propriedades mecânicas determinadas pelo ensaio de tração.

	Corpo de Prova-1	Corpo de Prova-2
Diâmetro	6,43 mm	6,42 mm
Área Média A0	32,44 mm <sup>2</sup>	32,40 mm <sup>2</sup>
Comprimento L0	31,75 mm	31,75 mm
Comprimento Lf	36,38 mm	36,53 mm
Diâmetro Estricção	3,74 mm	3,73 mm
Alongamento	15%	15%
Força Max	37,12 KN	36,52 KN
Tensão Max	1144 MPa	1126 MPa
Tensão de escoamento	1095 MPa	1079 MPa
Módulo de elasticidade	194 GPa	194 GPa
Tensão proporcional	1090 MPa	1075 MPa

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 940 MPa, e os parafusos ensaiados atingiram 1095 MPa e 1079 MPa.

Já o alongamento mínimo recomendado é de 9%, e os corpos de prova obtiveram 15%.

Na tabela 4.2, estão os resultados dos ensaios de dureza HRc medidos no parafuso, porca e arruela.

Tabela 4. 2 - Resultados dos ensaios de dureza obtidos.

	Porca	Arruela	Parafuso
1	30 HRc	41 HRc	37 HRc
2	31 HRc	38 HRc	38 HRc
3	33 HRc	39 HRc	38 HRc
Médias	31 HRc	39 HRc	38 HRc

Os ensaios de dureza feitos nas amostras da porca e arruela, retiradas do lote atenderam as especificações das normas, ASTM F 436M para as arruelas e DIN ISO 898 para as porcas.

A dureza do parafuso ensaiado atingiu 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.

## 4.2 - Propriedades metalúrgicas

### 4.2.1 - Avaliação Metalográfica

Os componentes: parafuso, porca e arruela foram preparados e atacados para posterior verificação de suas estruturas no microscópio Confocal.

A Figura 4.3 revela a micrografia da seção transversal do parafuso com ampliação de 2136 vezes, que mostrou uma estrutura martensítica característica de aços temperados e revenidos.



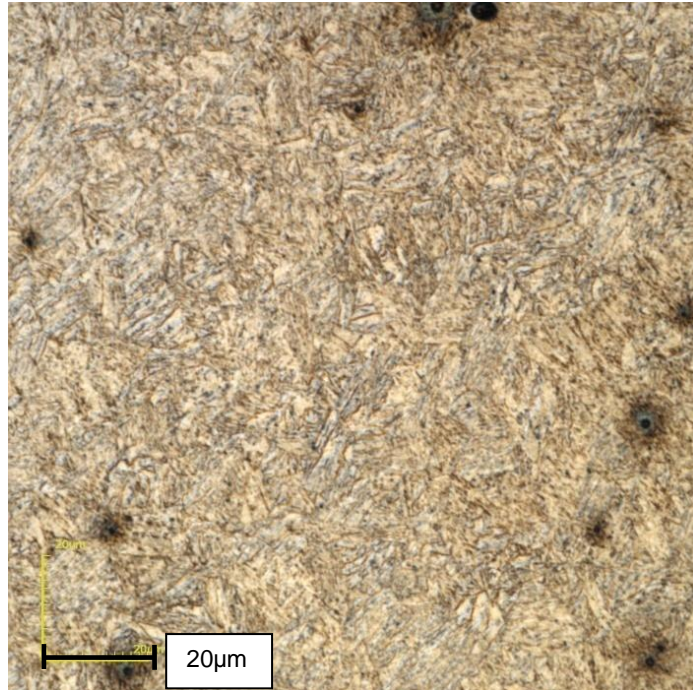


Figura 4.3 – Micrografia da seção transversal do parafuso com aumento de 2.136 vezes realizada no microscópio Confocal.

As verificações das estruturas da porca e da arruela também apresentaram estruturas martensítica revenida. Conforme figuras 4.4 e 4.5.

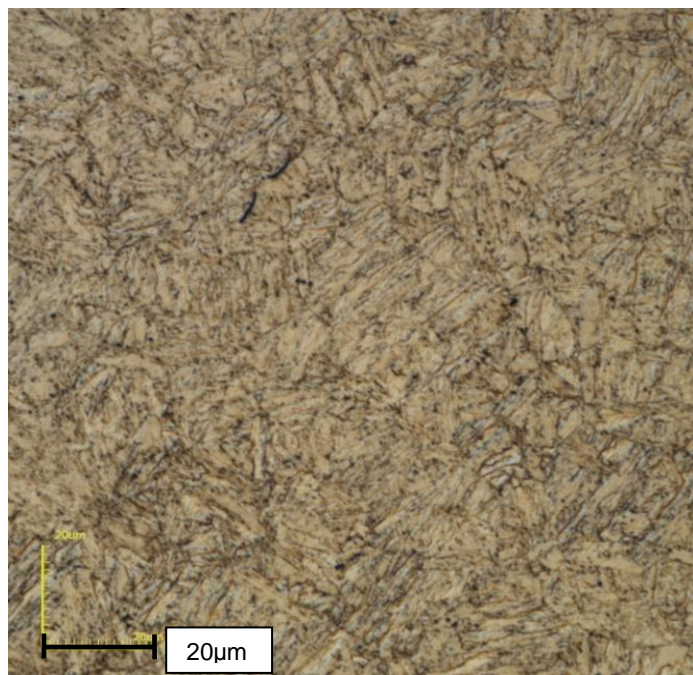


Figura 4.4 -Micrografia da porca com aumento de 2136 vezes.



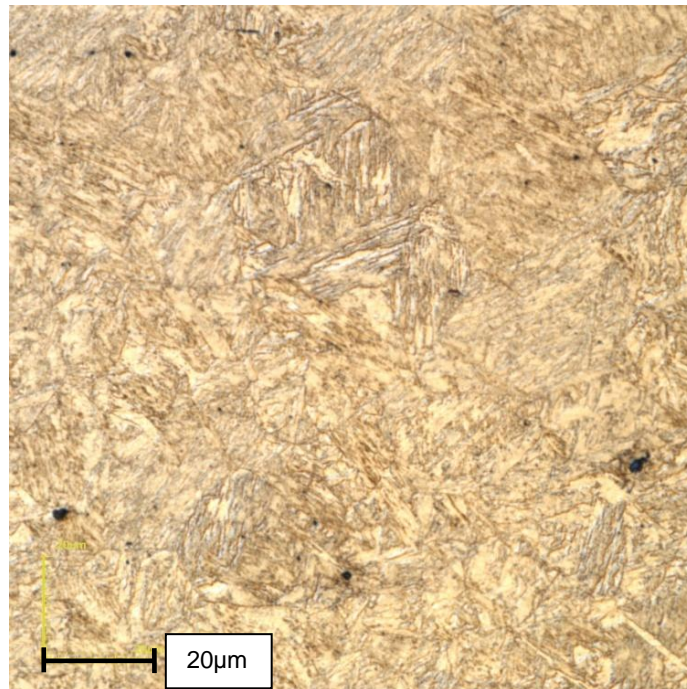


Figura 4.5 - Micrografia da arruela com aumento de 2136 vezes.

#### 4.2.2 - Análise Química do conjunto parafuso, porca e arruela.

Os componentes foram analisados em um espectrômetro de emissão ótica.

O parafuso, segundo norma NBR 5588, 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.

No caso da classe 10.9 os aços podem ser: aço carbono, aço carbono microligados ou aços liga, com no máximo de 0,55% de carbono, 0,35% de fósforo e 0,035% de enxofre. E que sejam suficientemente temperáveis, para assegurar que a estrutura da região roscada tenha aproximadamente 90% de martensita após o tratamento de tempera.

A norma também recomenda que nos limites de composição química são obrigatórios para parafusos que não possam ser avaliados por ensaio de tração.

Na análise da composição química do parafuso, foram encontrados os elementos que seguem na figura 4.6.

Composição Química										
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
1	98,3	0,258	0,143	0,842	0,345	< 0,0100	< 0,0050	0,0449	< 0,0100	< 0,0100
2	98,2	0,295	0,143	0,846	0,348	< 0,0100	< 0,0050	0,0628	< 0,0100	< 0,0100
Ave	98,3	0,276	0,143	0,844	0,346	< 0,0100	< 0,0050	0,0539	< 0,0100	< 0,0100
	Nb	Ti	V	W	Pb	Zr				
1	< 0,0100	0,0228	< 0,0100	< 0,0500	< 0,100	< 0,0035				
2	< 0,0100	0,0278	< 0,0100	< 0,0500	< 0,100	< 0,0035				
Ave	< 0,0100	0,0253	< 0,0100	< 0,0500	< 0,100	< 0,0035				

Figura 4.6 - Composição química do parafuso.

Através desta análise foi possível verificar que os parafusos adquiridos foram fabricados de um aço carbono de alta resistência e baixa liga (ARBL).

A figura 4.7 apresenta a composição química do aço da porca. A análise identificou também um aço (ARBL).

Composição Química					
	Fe	C	Si	Mn	Cr
1	98,0	0,331	0,263	1,23	0,138
2	98,1	0,239	0,261	1,19	0,146
Ave	98,0	0,285	0,262	1,21	0,142

Figura 4.7 - Composição química do material da porca.

Figura 4.8 traz a composição da arruela que caracteriza o aço como sendo de alto carbono microligado.

Composição Química					
	Fe	C	Si	Mn	Cr
1	97,3	0,745	0,316	1,33	0,225
2	97,5	0,780	0,302	1,12	0,205
Ave	97,4	0,763	0,309	1,22	0,215

Figura 4.8 - Composição química do material de fabricação da arruela.

### 4.3 - Análise das superfícies

#### 4.3.1 - Medição de rugosidade

A rugosidade foi verificada nos três componentes antes e depois dos testes de torque após dez ciclos de aperto, nos parafusos foram verificados os filetes, nas porcas a superfície de contato entre a porca arruela e nas arruelas a superfície de contato arruela porca.

O parafuso sem uso apresentou nos filetes da rosca as rugosidades indicadas na tabela 4.3.

Na figura 4.9 é possível verificar o acabamento da superfície do filete do parafuso sem uso, ainda com a camada enegrecida pelo tratamento de têmpera em óleo.

Tabela 4. 3 – Rugosidade da rosca parafuso sem uso.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	0,589
2	0,687
3	0,747
4	0,663
5	0,633
Média	<b>0,664</b>

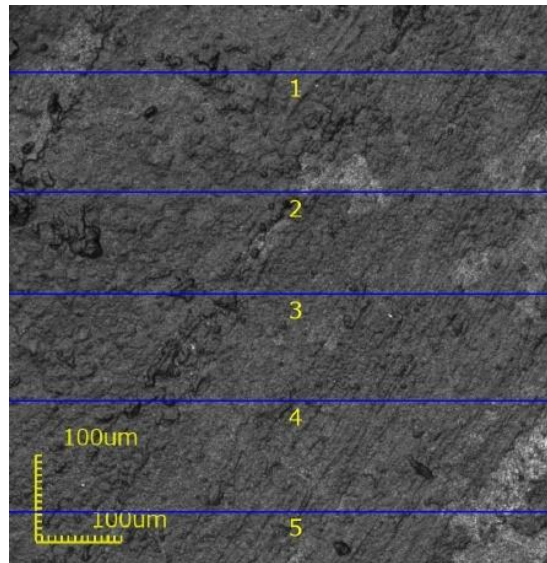


Figura 4.9- Superfície do filete do parafuso sem uso.

A região de contato da porca nova apresentou a média de rugosidade de sua superfície em  $Ra = 0,424 \mu m$ , verificadas em cinco linhas na mesma direção e paralelas entre si. Conforme tabela 4.4 e figura 4.10.

Tabela 4. 4 - Rugosidade do superfície da porca nova.

Medições	Rugosidade $Ra (\mu_m)$
1	0,415
2	0,389
3	0,463
4	0,356
5	0,497
Média	<b>0,424</b>

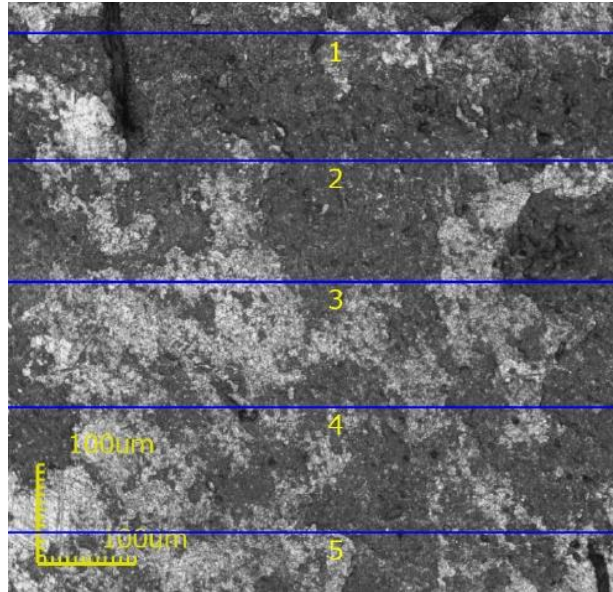


Figura 4.10 - Superfície de contato da porca sem uso.

Os dados de rugosidade da superfície da arruela sem uso seguem na tabela 4.5.

Tabela 4. 5 - Rugosidade da superfície da arruela sem uso.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	1,367
2	1,546
3	0,765
4	0,667
5	0,833
Média	<b>1,035</b>

Na figura 4.11, é possível verificar que a camada superficial formada pelo tratamento térmico da arruela não é homogênea, portanto se justifica a mesma ter apresentando maior rugosidade.

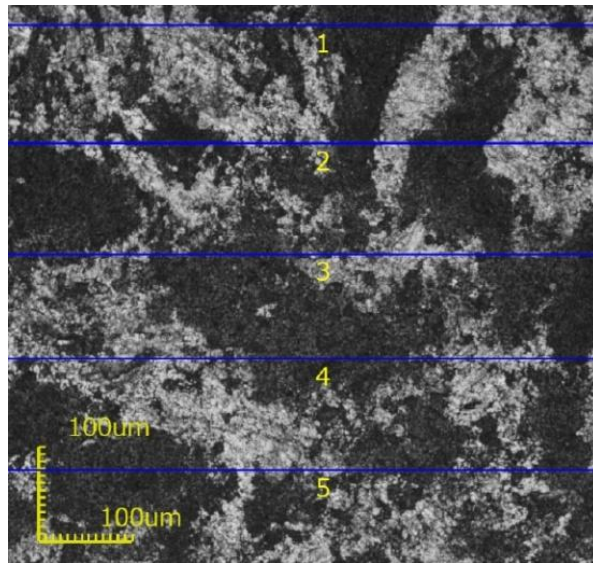


Figura 4.11 - Superfície de contato da arruela não torqueada.

Após os ensaios de torque serem realizados, as rugosidades dos componentes foram novamente verificadas.

A rugosidade do filete do parafuso lubrificado com a graxa Lubrax Autolith 2, e torquado de 111 N.m após dez ciclos, apresentou os valores que seguem na tabela 4.6.

Tabela 4. 6 - Rugosidade do parafuso na região do filete lubrificado com graxa a 75% da tensão de serviço após 10 ensaios.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	1,810
2	1,845
3	1,806
4	1,850
5	1,994
Média	<b>1,861</b>

A rugosidade da superfície da porca lubrificada com graxa Lubrax Autolith 2, com carga pretendida de 75% da tensão de serviço é apresentada na Tabela 4.7.

Tabela 4. 7 - Rugosidade da superfície da porca lubrificada com graxa a 75% da tensão de serviço após dez ensaios.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	1,543
2	1,539
3	1,685
4	1,694
5	1,881
Média	<b>1,668</b>

Na tabela 4.8 é possível verificar a rugosidade média da superfície da arruela depois de dez ensaios.

Tabela 4. 8 - Rugosidade da superfície da arruela lubrificada com graxa a 75% da tensão de serviço.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	0,671
2	0,606
3	0,788
4	0,842
5	0,602
Média	<b>0,702</b>

Na sequência foi verificado a rugosidade dos filetes do parafuso lubrificado com a graxa Lubrax Autolith 2, solicitado a uma carga pretendida de 90% da tensão. (Tabela 4.9).

Tabela 4. 9 - Rugosidade do filete do parafuso lubrificado com graxa e torque de 133Nm.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	1,985
2	1,901
3	1,984
4	2,021
5	1,948
Média	<b>1,968</b>

A tabela 4.10 indica as rugosidades obtidas na superfície de contato entre porca e arruela com torque aplicado de 133 Nm.

Tabela 4. 10 - Rugosidade da face da porca lubrificada com graxa a 90% da tensão de serviço.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	2,389
2	2,465
3	2,328
4	2,681
5	2,855
Média	<b>2,544</b>

Na tabela 4.11 é possível verificar as rugosidades medidas na superfície de contato da arruela com torque aplicado de 133 Nm.



Tabela 4. 11 - Rugosidade da arruela lubrificado com graxa e torque de 133Nm.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	0,875
2	0,868
3	0,867
4	0,837
5	0,860
Média	<b>0,861</b>

A seguir a tabela 4.12 apresenta a rugosidade dos filetes do parafuso lubrificado com a pasta de montagem LOCTITE LB 8008, com carga pretendida de 75% da tensão de serviço e torque de 111 Nm.

Tabela 4. 12 - Rugosidade do parafuso na região do filete lubrificado com pasta de montagem a 75% da tensão de serviço.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	1,394
2	1,424
3	1,531
4	1,451
5	1,557
Média	<b>1,471</b>

A tabela 4.13 apresenta a rugosidade da superfície da porca lubrificada com pasta LOCTITE LB 8008, e carga pretendida de 75% da tensão de serviço.

Tabela 4. 13 - Rugosidade da superfície da porca lubrificada com pasta e torque de 111Nm após dez ensaios.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	0,320
2	0,276
3	0,278
4	0,305
5	0,279
Média	<b>0,292</b>

Na tabela 4.14 é possível verificar as rugosidades da superfície da arruela.

Tabela 4. 14 - Rugosidade da superfície da arruela lubrificada com pasta a 75% da tensão de serviço.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	0,440
2	0,373
3	0,324
4	0,295
5	0,360
Média	<b>0,358</b>

Na tabela 4.15, a rugosidade dos filetes do parafuso lubrificado com a pasta LOCTITE LB 8008, solicitado a uma carga pretendida de 90% da tensão.

Tabela 4.15 - Rugosidade do filete do parafuso lubrificado com pasta e torque de 133Nm.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	1,275
2	1,633
3	1,233
4	1,277
5	1,292
Média	<b>1,342</b>

A tabela 4.16 indica as rugosidades obtidas na superfície de contato entre porca e arruela com torque aplicado de 133 Nm.

Tabela 4. 16 - Rugosidade da face da porca lubrificada com pasta e torquada com 133Nm.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	0,508
2	0,531
3	0,522
4	0,470
5	0,502
Média	<b>0,507</b>

Na tabela 4.17 verifica-se as rugosidades medidas na superfície de contato da arruela com torque aplicado de 133 N.m.

Tabela 4. 17 - Rugosidade da arruela lubrificado com pasta e montada com torque de 133Nm.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	0,279
2	0,266
3	0,315
4	0,416
5	0,647
Média	<b>0,385</b>

A seguir a tabela 4.18 apresenta a rugosidade dos filetes do parafuso montados a seco (sem lubrificante), com torque de 111 Nm.

Tabela 4. 18 - Rugosidade do parafuso na região do filete montado a seco com torque de 111Nm.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	3,832
2	3,749
3	3,429
4	3,235
5	3,391
Média	<b>3,527</b>

Na tabela 4.19, rugosidade da superfície da porca montada sem lubrificação, e torquada com 111Nm.

Tabela 4. 19 - Rugosidade da superfície da porca montada a seco com torque de 111Nm.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	3,631
2	3,830
3	4,554
4	4,328
5	4,533
Média	<b>4,175</b>

A tabela 4.20 apresenta as rugosidades da superfície da arruela montada a seco com 111Nm.

Tabela 4. 20 - Rugosidade da superfície da arruela torqueada a seco com torque de 111Nm.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	1,764
2	1,463
3	1,462
4	1,620
5	1,368
Média	<b>1,535</b>

A rugosidade dos filetes do parafuso montados sem o uso de lubrificante, e torqueadas com 133Nm. Segue na tabela 4.21.

Tabela 4. 21 - Rugosidade do filete do parafuso montado a seco com torque de 133Nm.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	6,958
2	7,074
3	6,198
4	3,689
5	3,915
Média	<b>5,567</b>

A tabela 4.22 apresenta as rugosidades obtidas na superfície de contato entre porca e arruela com torque aplicado de 133 Nm.

Tabela 4. 22 - Rugosidade da face da porca sem lubrificação com torque de 133Nm.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	3,897
2	3,828
3	6,571
4	6,291
5	5,856
Média	<b>5,289</b>

Na tabela 4.23, as rugosidades na superfície de contato da arruela torqueada sem lubrificante com torque de 133 Nm.

Tabela 4. 23 - Rugosidade da superfície da arruela montada a seco e torque de 133Nm.

Medições	Rugosidade Ra ( $\mu_m$ )
1	1,807
2	1,749
3	1,856
4	1,838
5	1,661
Média	<b>1,782</b>

A tabela 4.24 faz um resumo das rugosidades em escala Ra do filete de rosca sem lubrificação, lubrificado com graxa e com pasta, em dois níveis de torquemento do parafuso.

A figura 4.12 apresenta as fotos com aumento 430 vezes da região de contato do filete do parafuso depois de dez apertos.

Realizando uma análise qualitativa das superfícies, é possível notar que os parafusos montados com lubrificação tiveram menor deformação dos filetes nas duas situações de montagem.

Na comparação quantitativa das montagens que utilizaram um torque de 111Nm e 133Nm sem lubrificação a deformação se acentuou, e a rugosidade medida apresentou um aumento considerável de aproximadamente 63%.

Comparando os filetes lubrificados com graxa, a rugosidade teve um aumento menor e no caso dos lubrificados com pasta a rugosidade se apresentou menor no torque de 133Nm comparado ao torque de 111Nm.

Tabela 4. 24 - Rugosidades médias do filete do parafuso após dez apertos.

Torques	Sem lubrificante	Lubrificado com graxa	Lubrificado com pasta
111Nm	3,527 $\mu_m$	1,861 $\mu_m$	1,471 $\mu_m$
133Nm	5,567 $\mu_m$	1,968 $\mu_m$	1,342 $\mu_m$

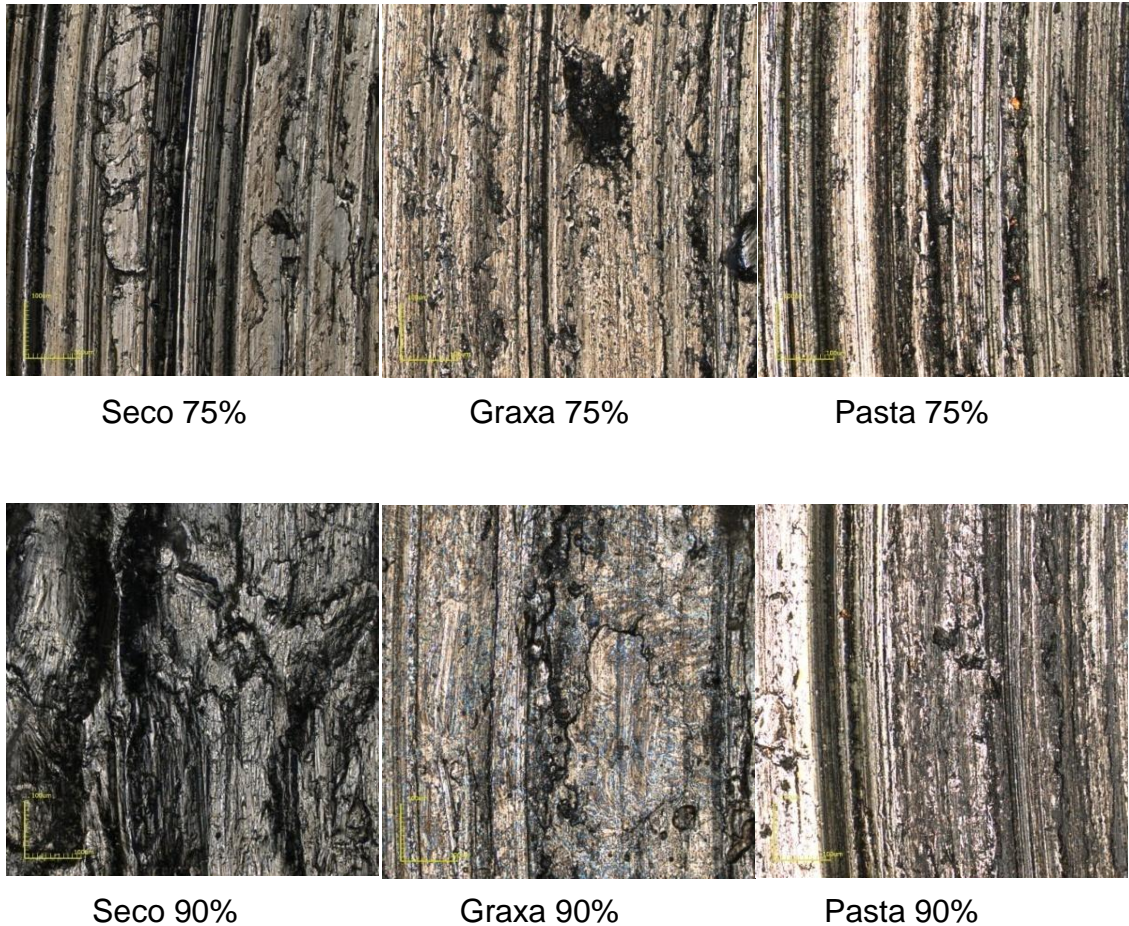


Figura 4.12 - Superfícies deformadas do filete.

Na tabela 4.25 é apresentado o resumo das médias de rugosidade verificadas na região de contato da porca. Comparando as rugosidades nas superfícies de contato da porca e arruela lubrificadas, também se apresentaram menores, com destaque para as lubrificadas com a pasta de montagem.

Figura 4.13 ilustra a região de contato das porcas após ter sido torquadas dez vezes.

Tabela 4. 25 - Rugosidades médias da superfície de contato da porca.

Torques	Sem lubrificante	Lubrificado com graxa	Lubrificado com pasta
111N.m	4,175 $\mu_m$	1,668 $\mu_m$	0,292 $\mu_m$
133N.m	5,289 $\mu_m$	2,544 $\mu_m$	0,507 $\mu_m$





Seco 75%

Graxa 75%

Pasta 75%



Seco 90%

Graxa 90%

Pasta 90%

Figura 4.13 - Superfície de contato da porca.

Na tabela 4.26 estão colocados os resultados da rugosidade em escala Ra do local da arruela que entrou em contato com a porca durante o aperto por torque.

Tabela 4. 26 - Rugosidades médias da superfície de contato da arruela.

Torques	Sem lubrificante	Lubricado com graxa	Lubricado com pasta
111N.m	1,538 $\mu_m$	0,702 $\mu_m$	0,358 $\mu_m$
133N.m	1,782 $\mu_m$	0,861 $\mu_m$	0,385 $\mu_m$

A figura 4.14 expõe fotos das regiões de contato das arruelas após os dez retorqueamentos.

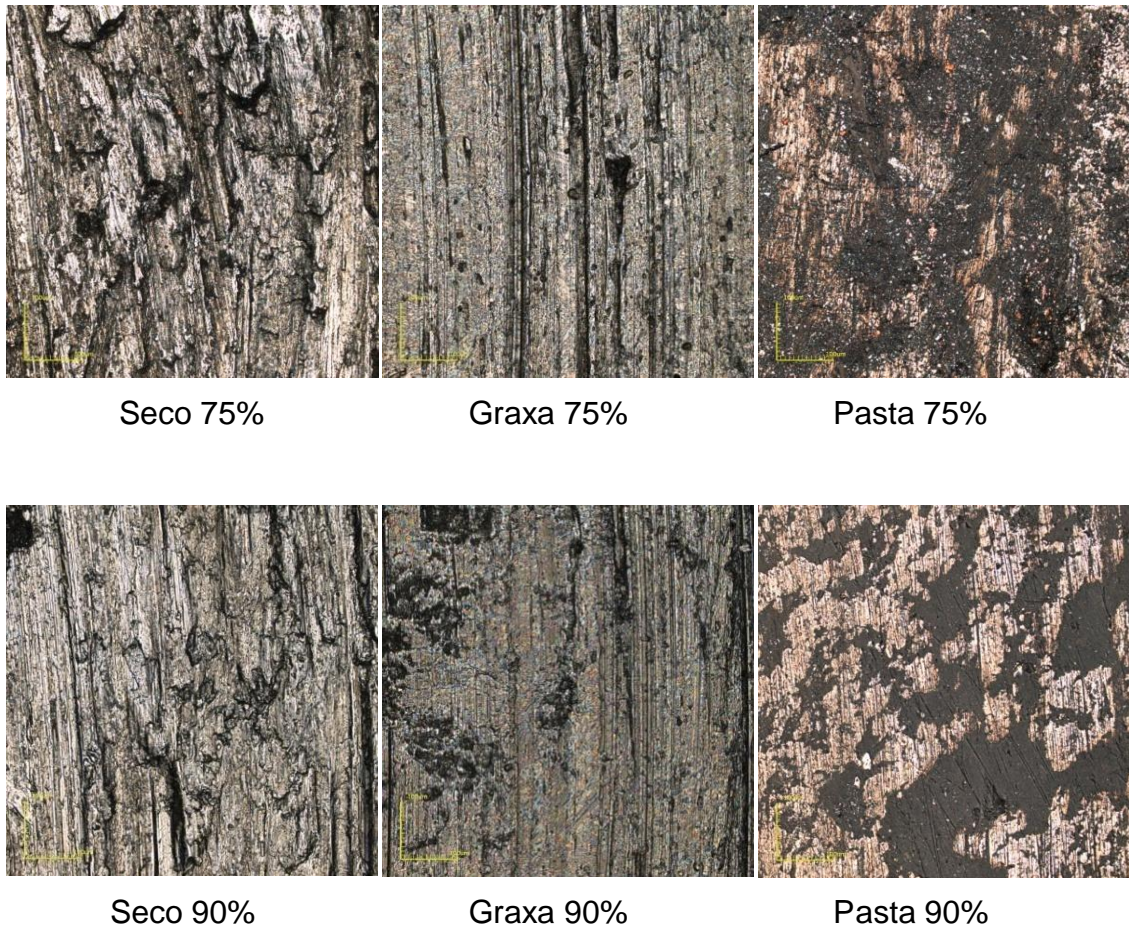


Figura 4.14 - Superfície de contato da arruela.

Também é possível constatar que as superfícies lubrificadas apresentaram menor deformação, e que tanto para os filetes do parafuso como para as porcas e arruelas a lubrificação com a pasta de montagem a base de cobre apresentou menor alteração das superfícies e, portanto, menores valores de rugosidade.



#### 4.4 - Ensaios para determinação do fator de torque e dos coeficientes de atrito.

Os ensaios de torque foram inicialmente realizados nos parafusos sem lubrificação com torque de 111 Nm. Para o cálculo deste torque foi usado um fator de torque (K) de 0,18 extraído da literatura [Shighey, 2008], aplicando este fator para atingir uma carga de pré-tensão de 51387 N, cerca de 75% da tensão de serviço.

Três parafusos foram ensaiados nessa condição, com dez montagens para cada parafuso e mais três parafusos para determinar os coeficientes de atrito do contato da porca e das roscas.

Os resultados de carga e torque obtidos durante os ensaios realizados no equipamento descrito na seção 3.2, foram coletados e salvos em planilha para a realização dos cálculos. Esses dados estão em tabelas no anexo, e os gráficos são apresentados a seguir.

O gráfico da figura 4.15 traz o fator de torque (K) calculado para cada aperto, sendo que o parafuso número 3 rompeu no oitavo aperto.

O que pode ser observado nessa condição de montagem é que o fator (K) aumenta à medida que os parafusos são retorqueados.

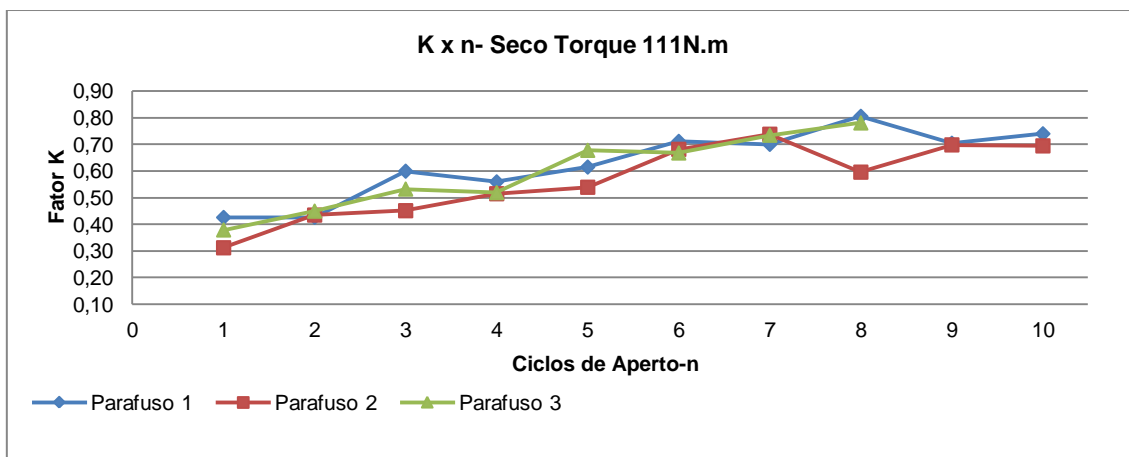


Figura 4.15 – Fatores de torque a seco torqueados com 111Nm.

Nas figuras a seguir é possível verificar a relação da força tensora a cada ciclo, que tem o seu valor reduzido em função dos coeficientes de atrito que aumentaram a cada ciclo em que o parafuso foi torquado.

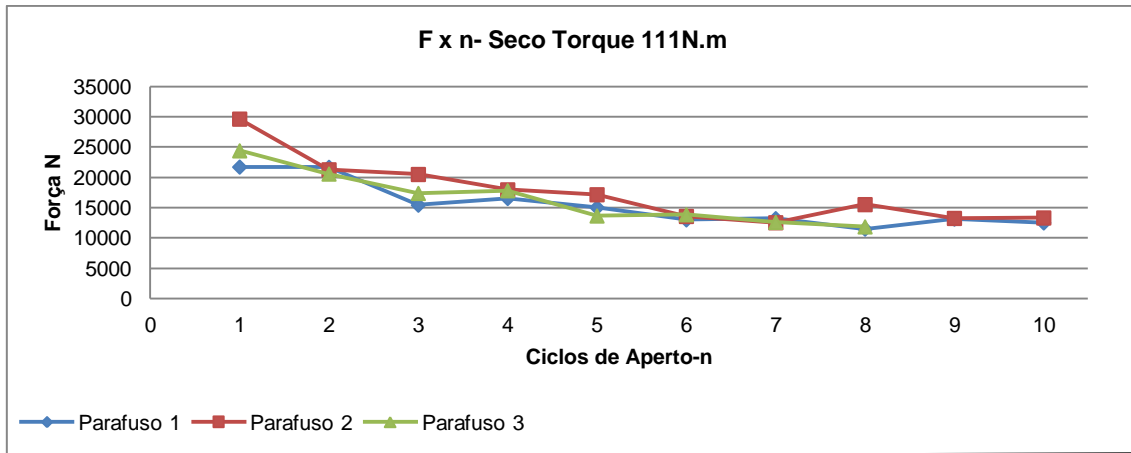


Figura 4.16 - Força tensora para cada torque na condição sem lubrificante.

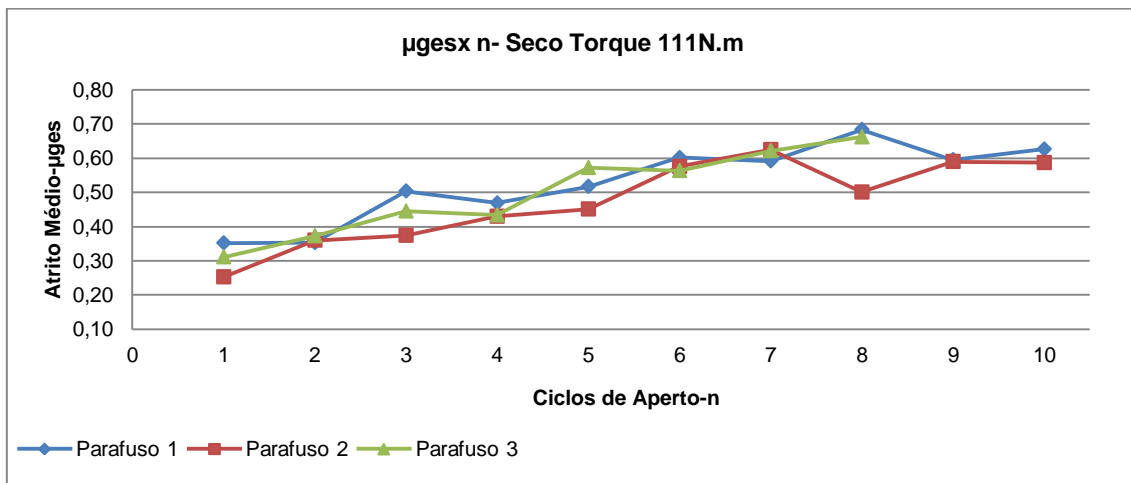


Figura 4.17 - Coeficientes de atrito médios.

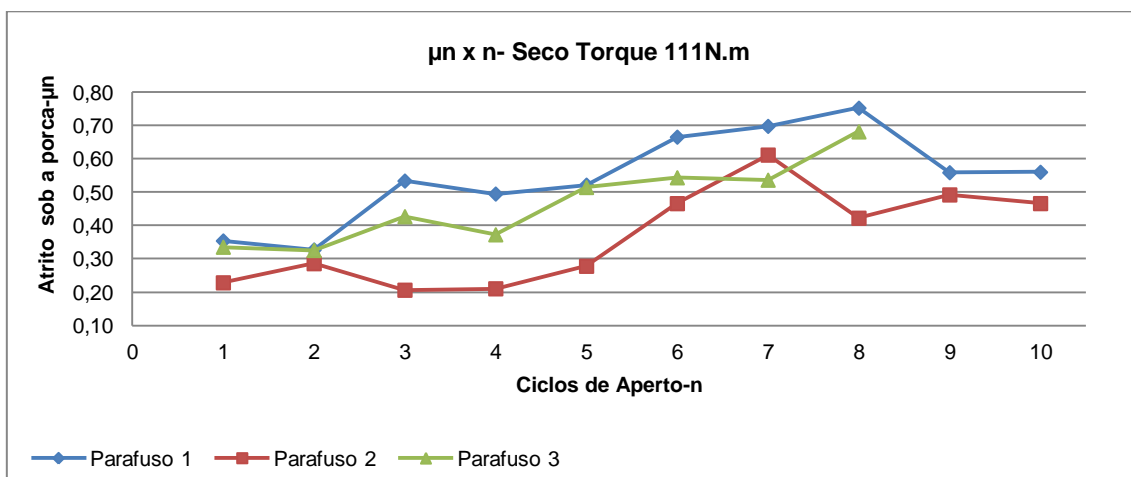


Figura 4.18 - Coeficientes de atrito entre os contatos da porca e arruela.

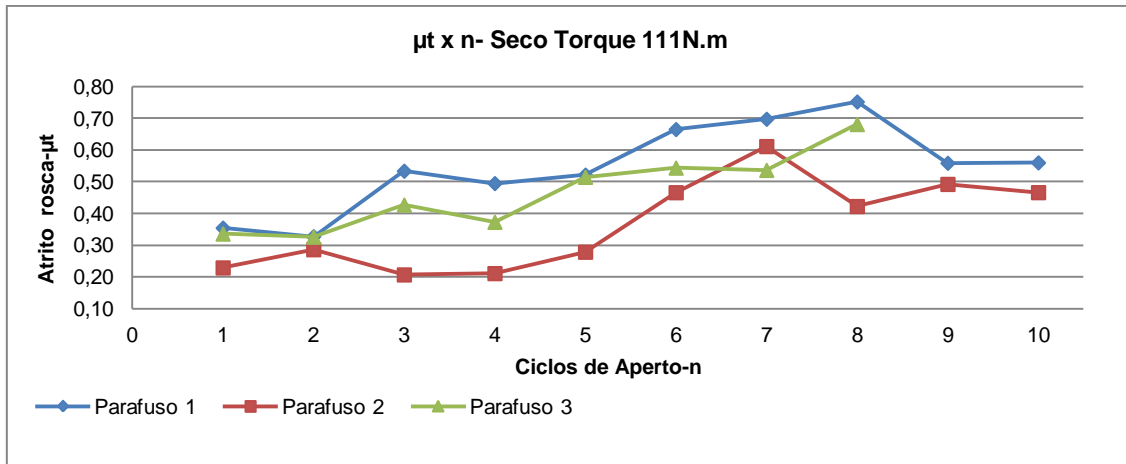


Figura 4.19 - Coeficientes de atrito das roscas.

Na condição em que se buscava atingir uma carga de 61644 N para uma tensão no parafuso de 90% da tensão de serviço, utilizando um fator de torque de 0,18 para o parafuso seco, obteve-se o torque a ser aplicado de 133 Nm.

As figuras na sequência retratam os resultados coletados para o fator de torque, para a força atingida e para os coeficientes de atrito nos dez ciclos de aperto.

Nessa condição ocorreu a falha de dois parafusos, nos quais não foi possível realizar os dez apertos.

O parafuso “2” rompeu no primeiro ciclo, e o número “1” no oitavo ciclo. Os mesmos falharam na desmontagem devido ao grimpamento ocorrido nas suas roscas.

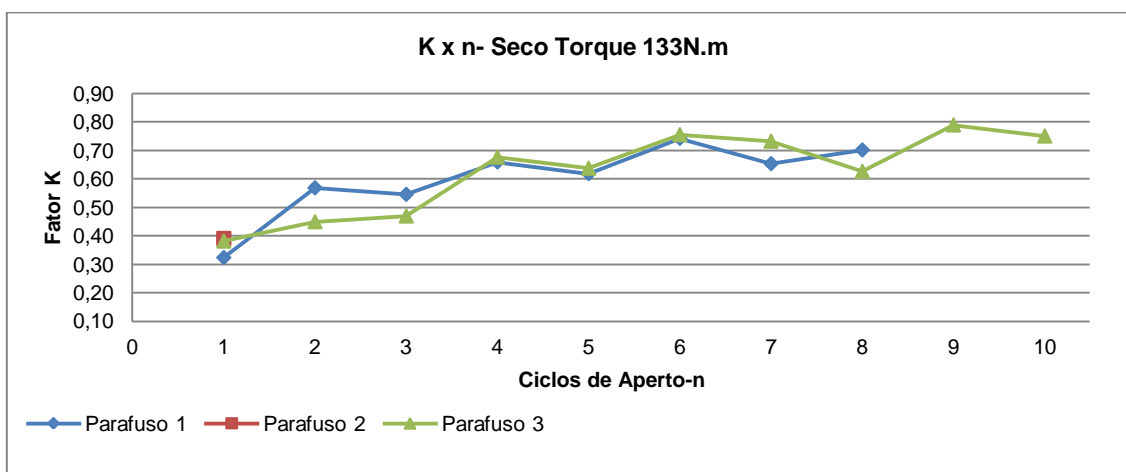


Figura 4.20 - Fatores de torque calculados na condição sem lubrificação com torque de 133 Nm.

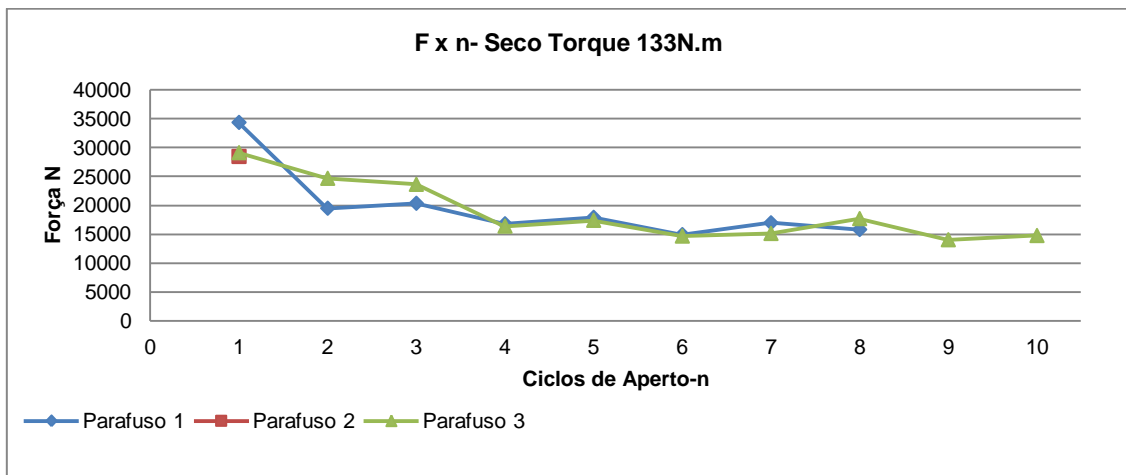


Figura 4.21 - Forças atingidas a cada ciclo com torque de 133 Nm.

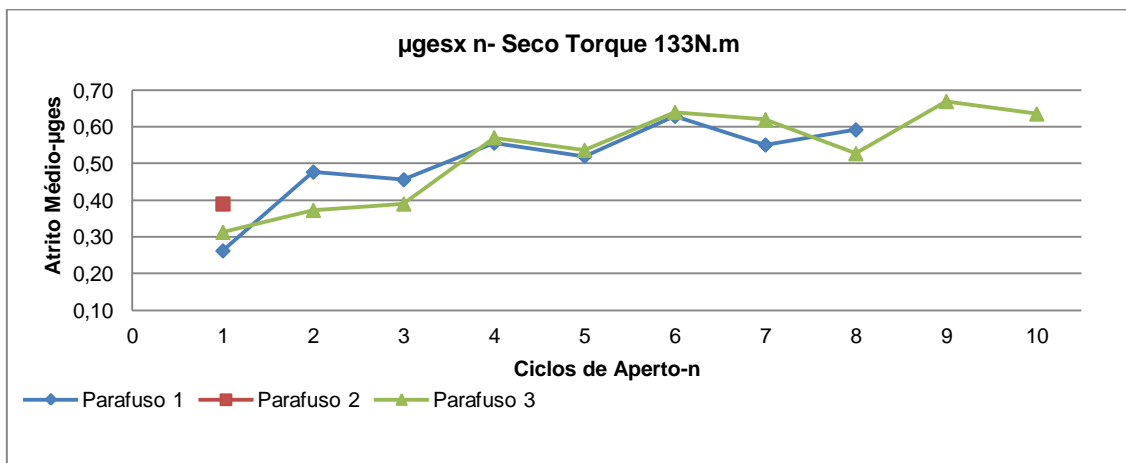


Figura 4.22 - Coeficientes de atrito médios calculados com torque de 133 Nm.

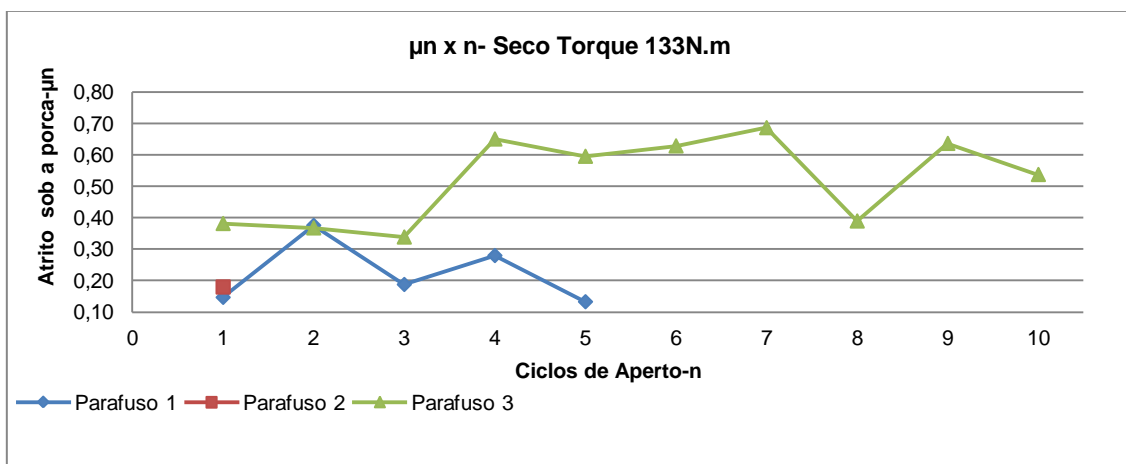


Figura 4.23 - Coeficientes de atrito nas regiões de contato da porca e arruela.

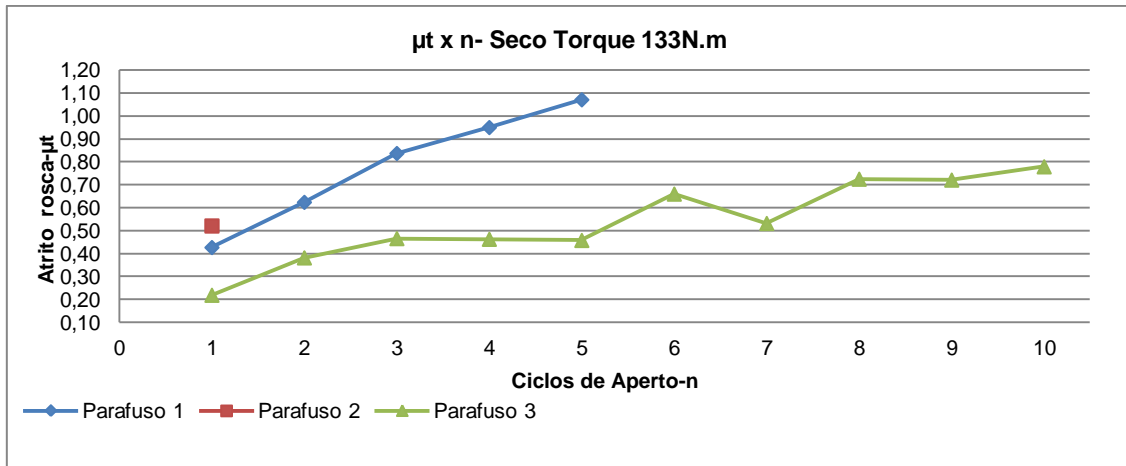


Figura 4.24 - Coeficientes de atrito das roscas sem lubrificação e torquedas com 133 Nm.

Na sequência foi realizada a montagem utilizando como lubrificante a graxa, nas mesmas configurações do ensaio anterior, aplicando um torque de 111 Nm.

Com a graxa é possível notar nas figuras a seguir que o fator e os coeficientes de atrito se mantiveram mais estáveis, com exceção do parafuso número um que no terceiro torque teve um aumento considerável do atrito do contato porca e arruela. As forças de aperto nos parafusos dois e três em alguns ciclos superaram a carga pretendida. E todos os parafusos atingiram os dez apertos sem quebrar.

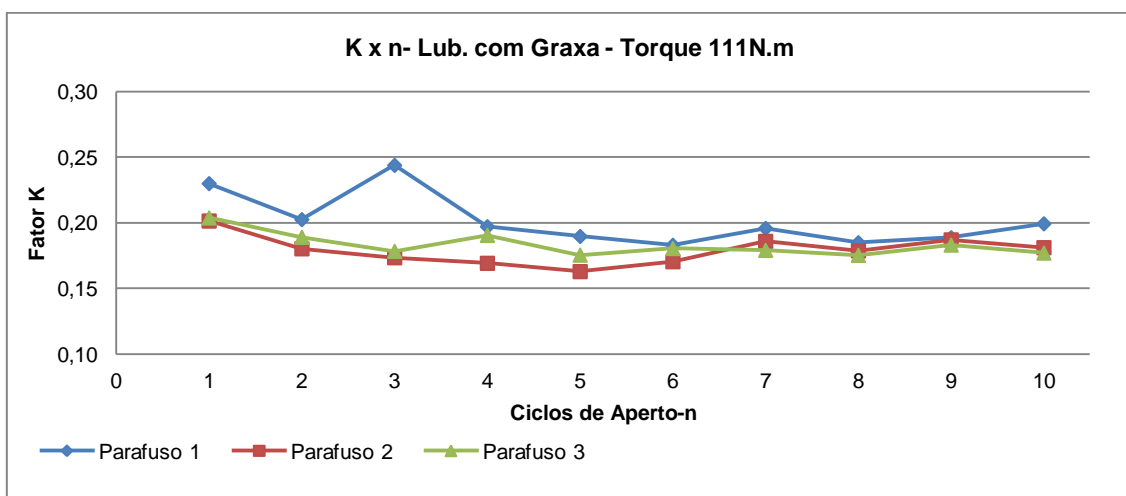


Figura 4.25 - Fator de torque em parafuso montado com graxa e torque de 111 Nm.

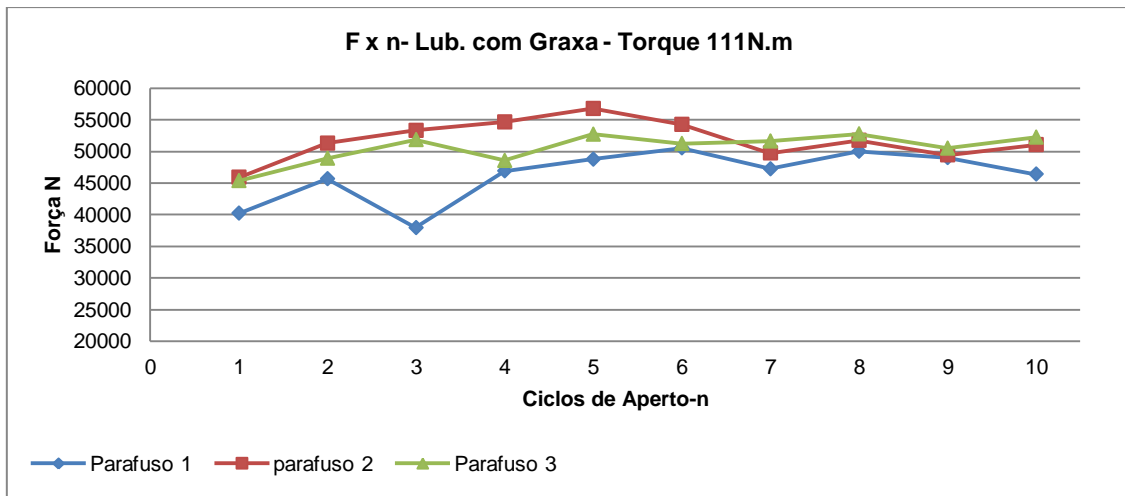


Figura 4.26 - Forças alcançadas em parafusos lubrificados com graxa.

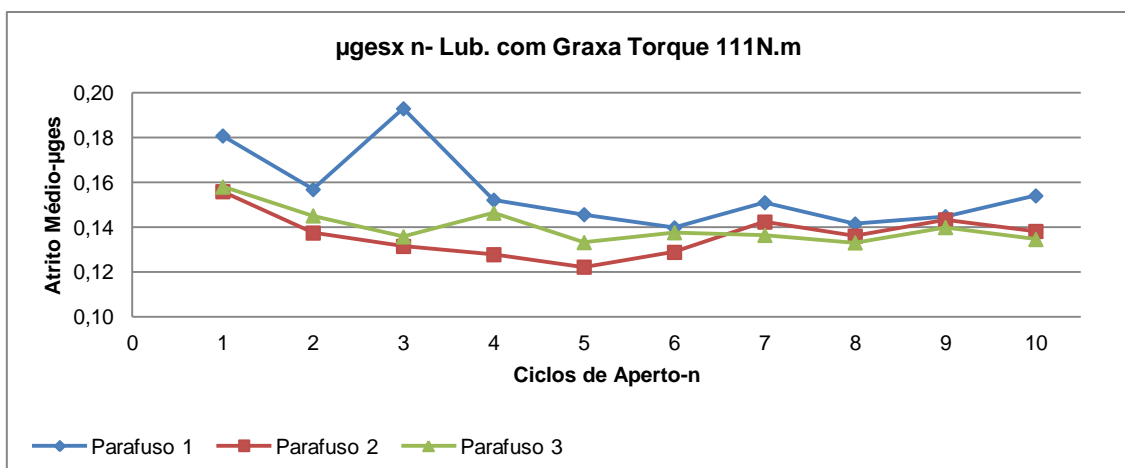


Figura 4.27 - Coeficientes de atrito médios em parafusos lubrificados com graxa e torque de 111 Nm.



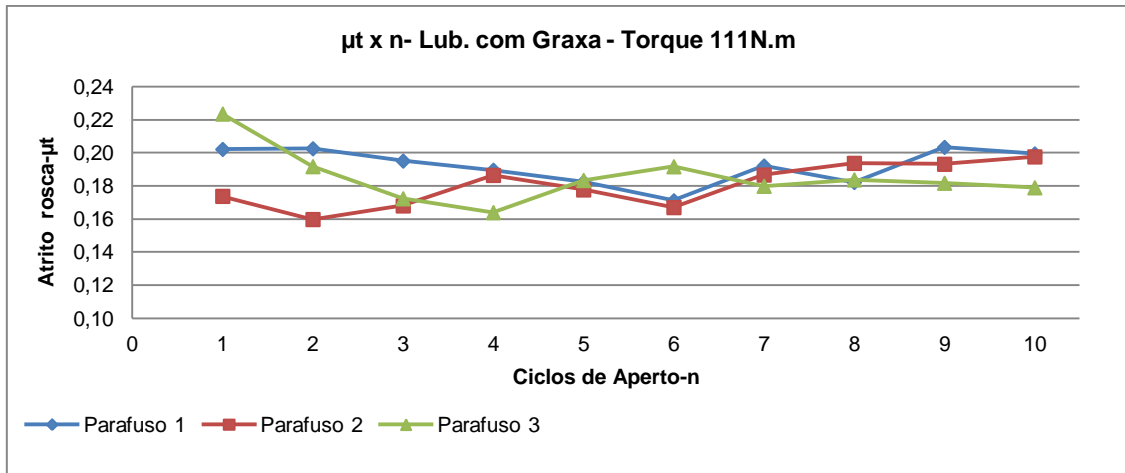


Figura 4.28 - Coeficientes de atrito das roscas lubrificadas com graxa e torque de 111 Nm.

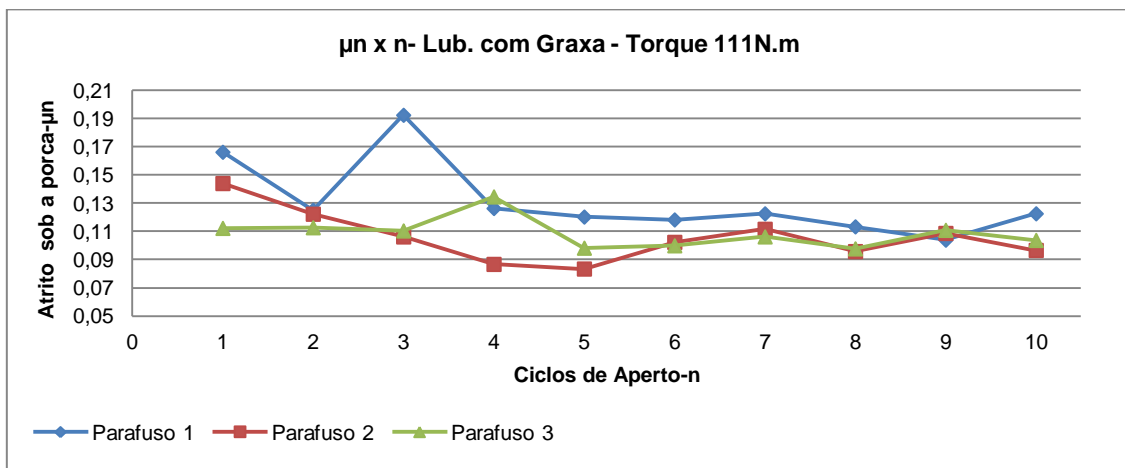


Figura 4.29 - Coeficiente de atrito do contato da porca lubrificada com graxa e torque de 111 Nm.

Na sequência novos parafusos foram lubrificadas com graxa e torquedados com 133 Nm. Nos gráficos plotados a seguir pode-se notar que a força pretendida não foi atingida devido ao fator de torque, que se manteve acima de 0,18 e tendendo a aumentar a partir do sétimo ciclo de aperto, em função do atrito na superfície de contato da porca ter aumentado como pode ser verificado na figura 4.34.

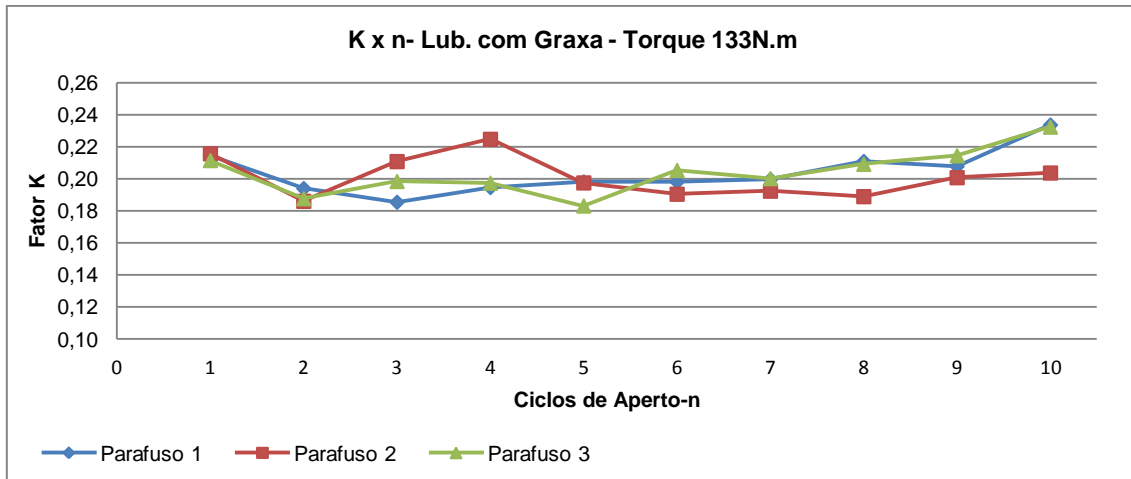


Figura 4.30 - Fator de torque em parafusos lubrificado com graxa e torquados com 133 Nm.

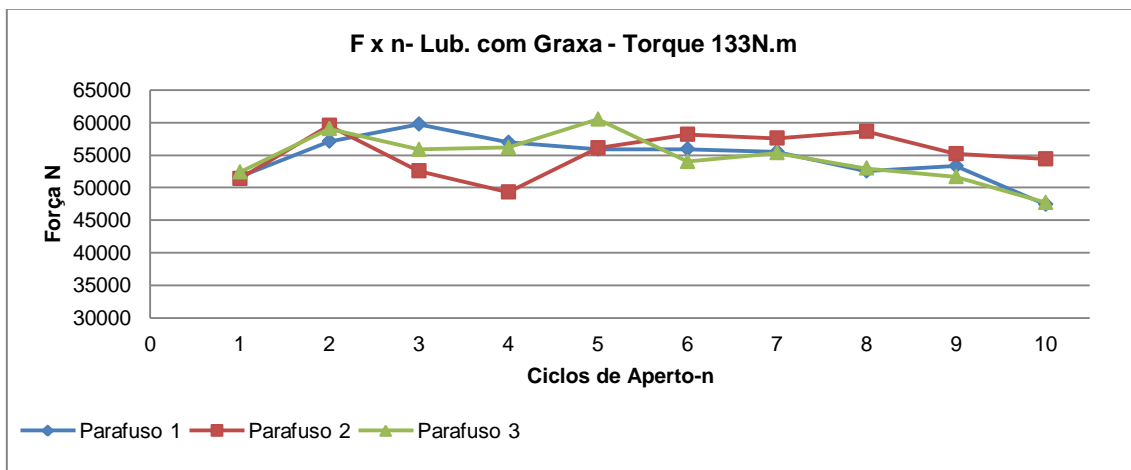


Figura 4.31 - Forças tensoras atingidas nos parafusos lubrificado com graxa e torque de 133 Nm.

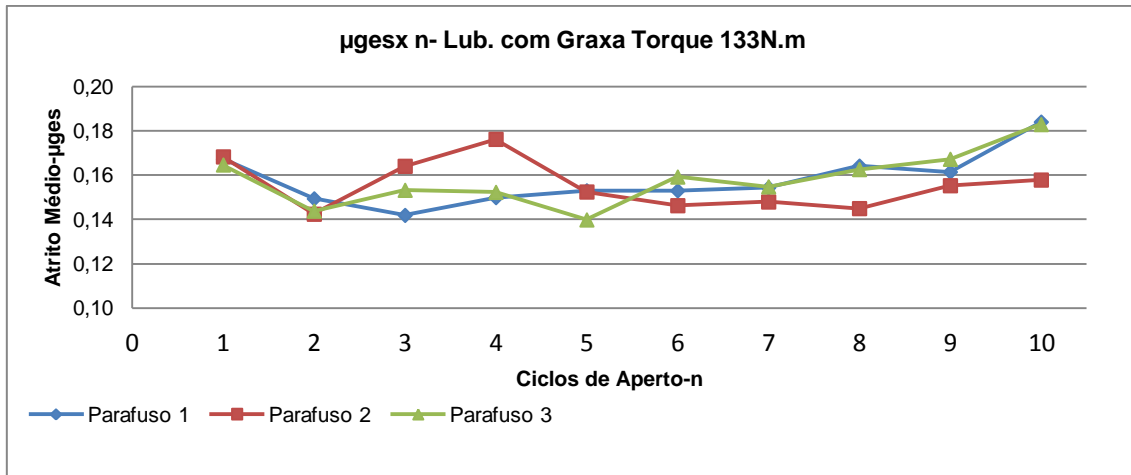


Figura 4.32 - Coeficiente de atrito médio na condição lubrificado com graxa e torquado com 133 Nm.

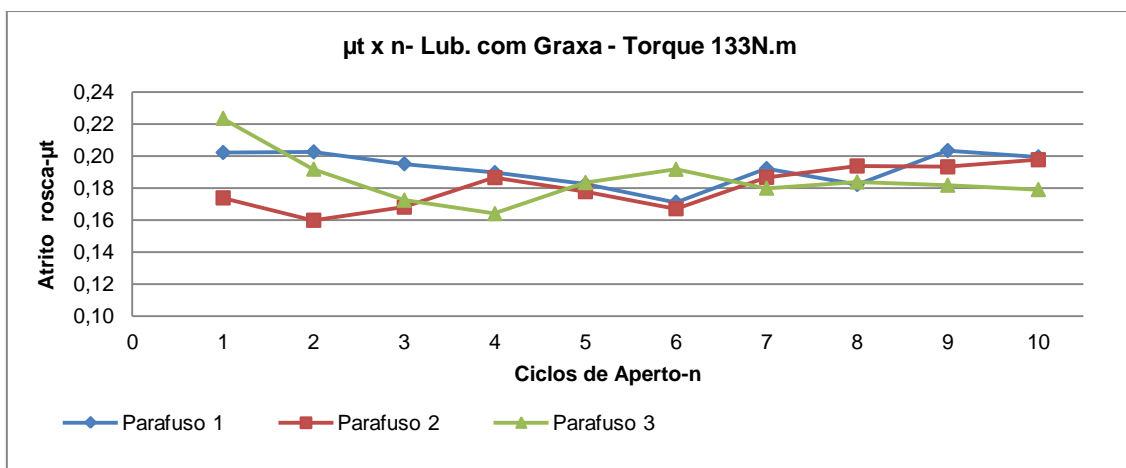


Figura 4.33 - Coeficiente de atrito das roscas lubrificadas com graxa e torque de 133 Nm.

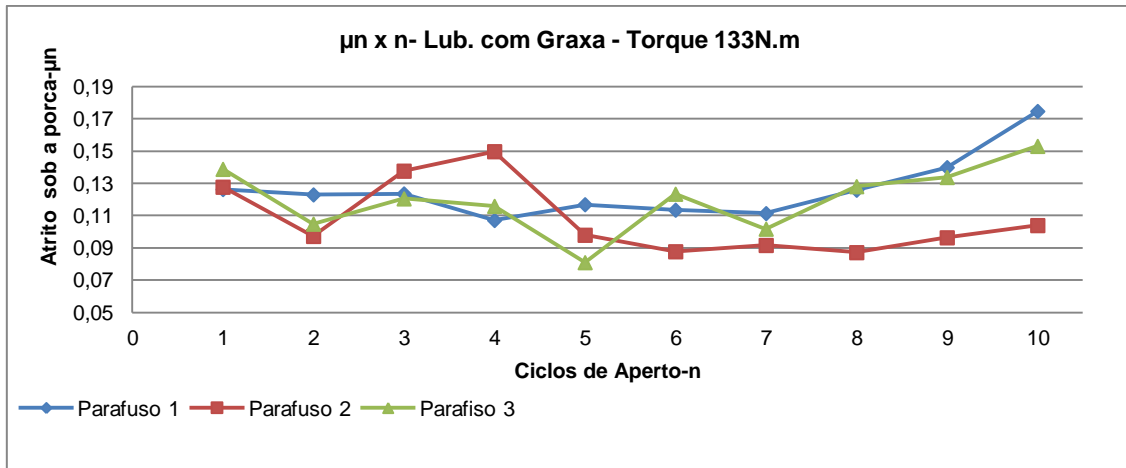


Figura 4.34 - Coeficientes de atrito no contato das porcas lubrificadas com graxa e torque de 133 Nm.

Após os ensaios com lubrificação por graxa, os parafusos foram torquados com a pasta de montagem à base de cobre, mantendo as condições anteriores. Primeiro aplicando um torque de 111 Nm e lubrificando com a pasta de montagem a cada ciclo. Os gráficos das figuras a seguir apresentam os valores alcançados.

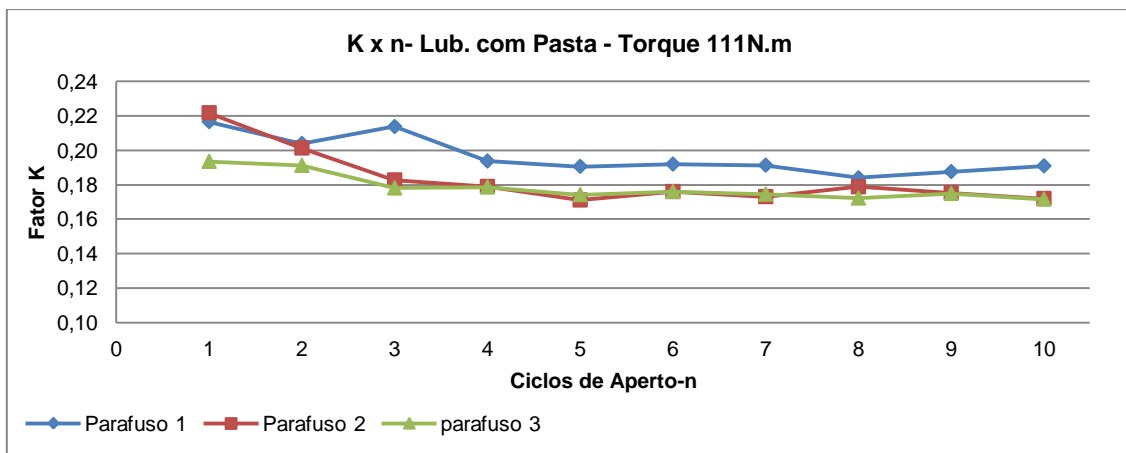


Figura 4.35 - Fator de torque de parafusos torquados com 111 Nm e lubrificadas com pasta de montagem.

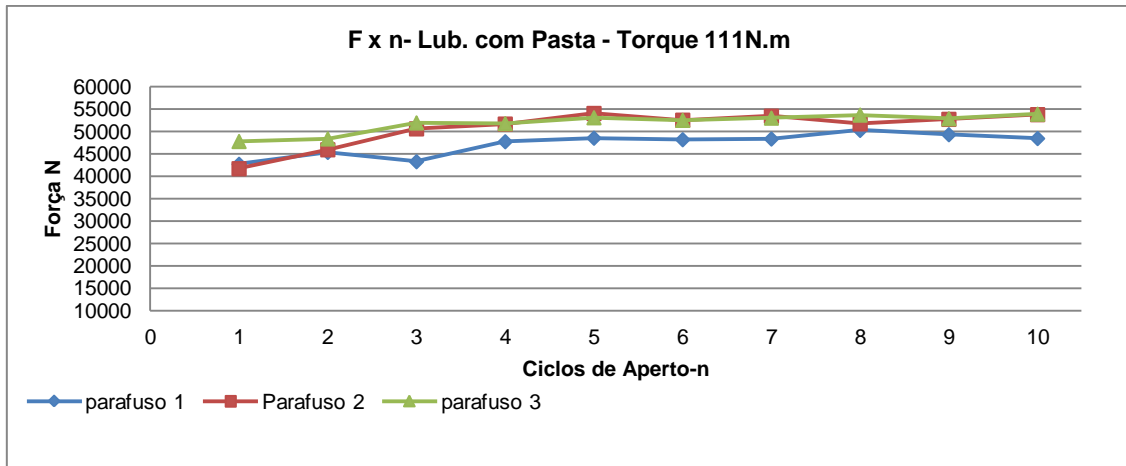


Figura 4.36 - Forças coletadas em parafusos lubrificadas com pasta e torque de 111 Nm.

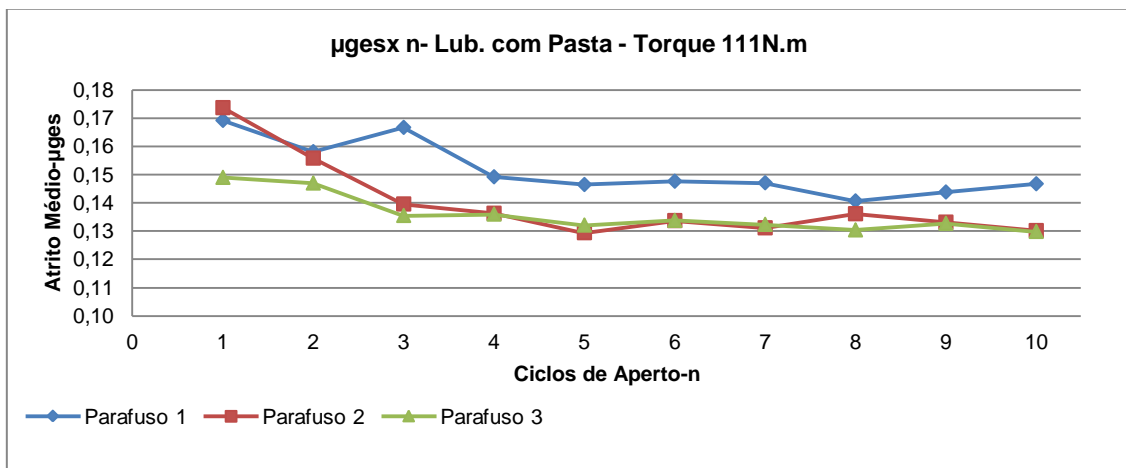


Figura 4.37 - Coeficiente de atrito médio em parafusos lubrificadas com pasta de montagem e torque de 111 Nm.

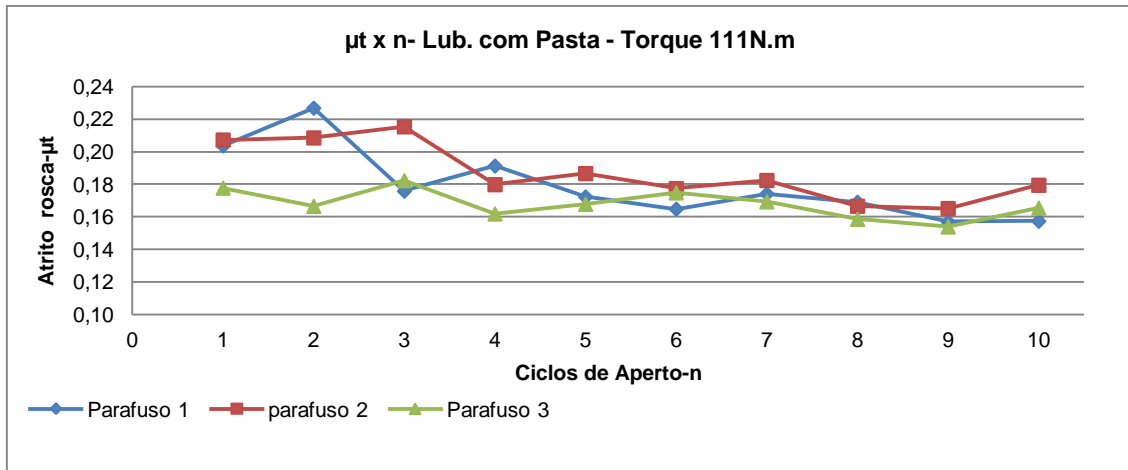


Figura 4.38 - Coeficiente de atrito da rosca nos dez ciclos de aperto lubrificado com pasta.

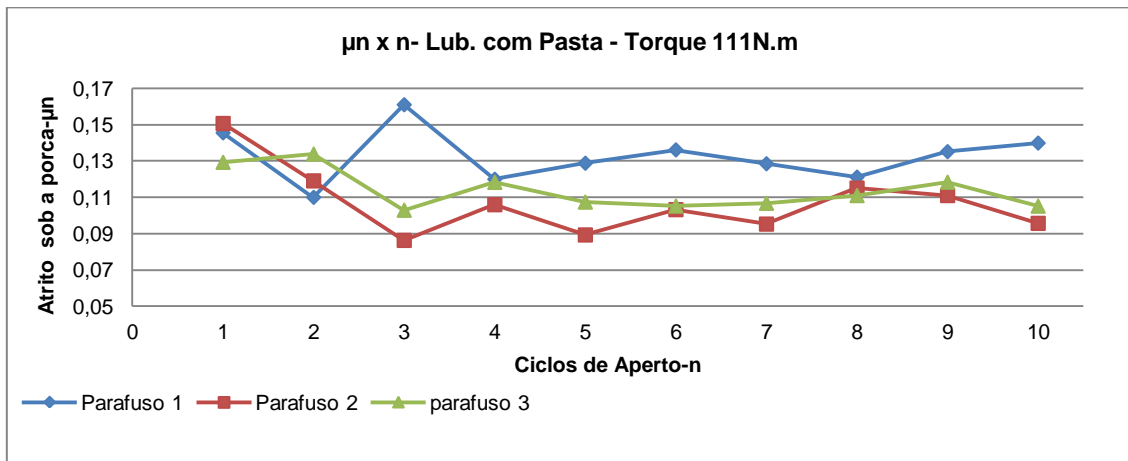


Figura 4.39 - Coeficiente de atrito na superfície sob a porca lubrificada com pasta e torque de 111 Nm.

Os valores obtidos utilizando a pasta de montagem com torque 111 Nm apresentaram-se com menor variação que os lubrificado com graxa.

Na sequência os parafusos foram torquados com torque de 133 Nm e lubrificado com pasta de montagem.

Os resultados obtidos na montagem com a pasta quando comparados aos lubrificado no mesmo torque com graxa, é possível verificar que os montados com pasta também se mostraram mais estáveis durante os dez apertos realizados.

As figuras a seguir, ilustram os gráficos obtidos nos ensaios.

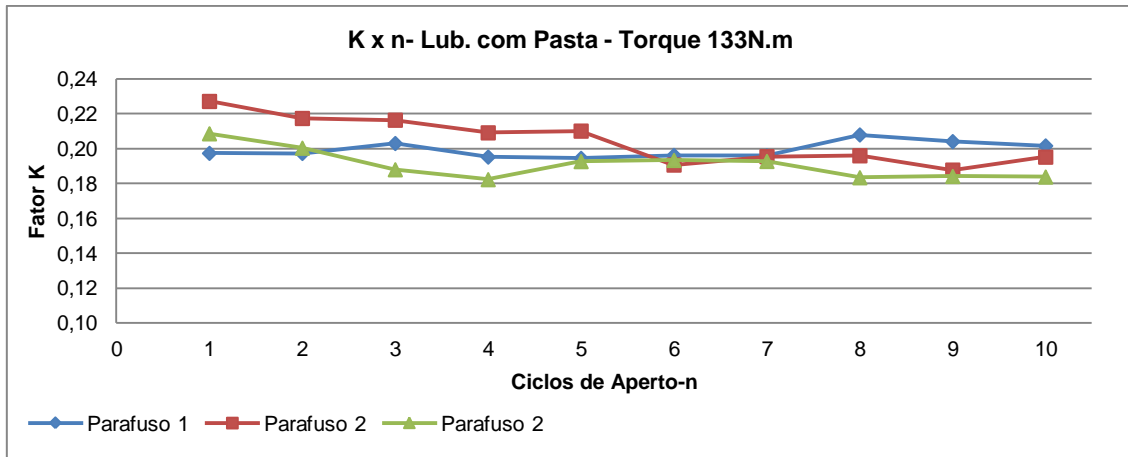


Figura 4.40 - Fatores de torque obtidos nos torques dos parafusos lubrificado com pasta de montagem e torque de 133 Nm.

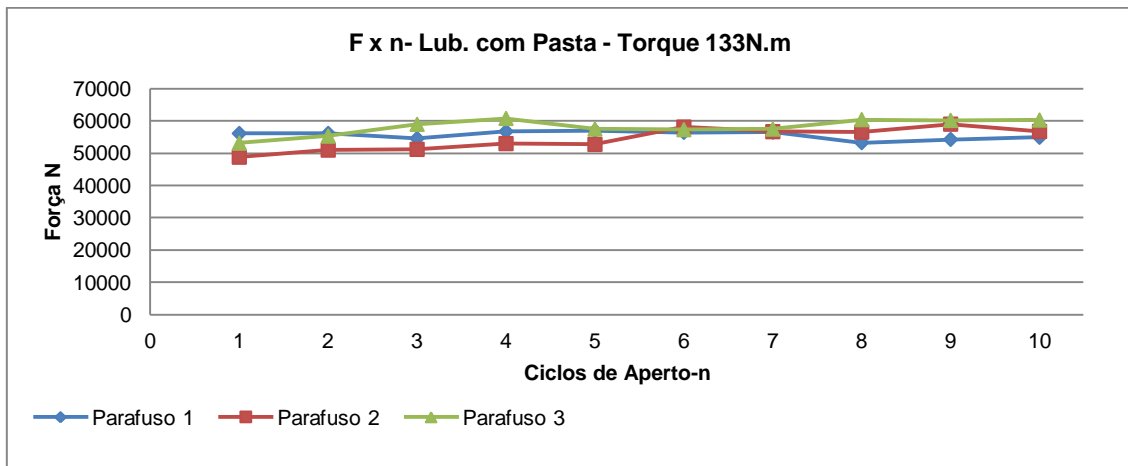


Figura 4.41 - Força em cada ciclo do parafuso torqueado com 133 Nm e lubrificado com pasta de montagem.

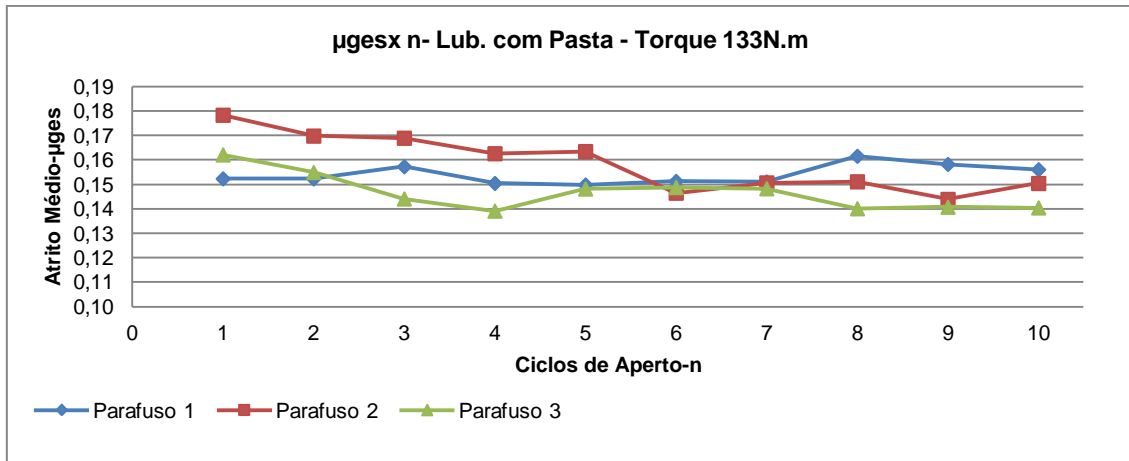


Figura 4.42 - Coeficientes de atrito médio obtidos com aplicação de torque de 133 Nm e lubrificadas com pasta de montagem.

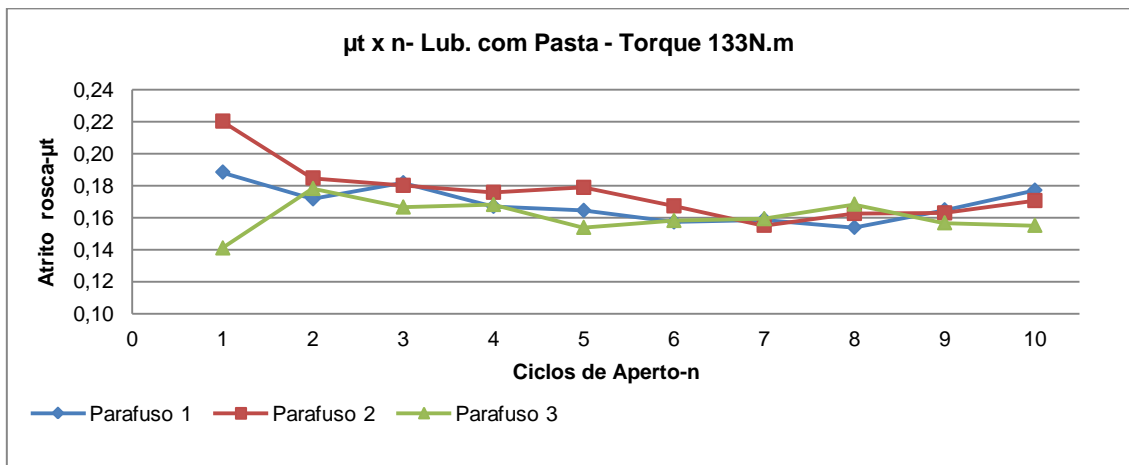


Figura 4.43 - Coeficientes de atrito das rosca na condição lubrificada com pasta e torque de 133 Nm.



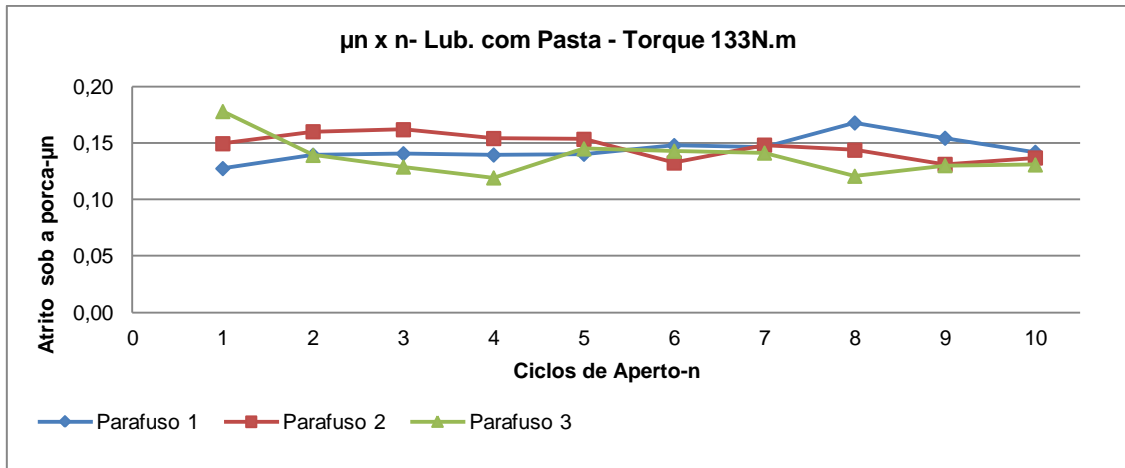


Figura 4.44 - Coeficiente de atrito na superfície de contato da porca com a arruela lubrificada com pasta e torque de 133 N.m.

Dos valores coletados entre os três parafusos foram calculadas as médias para cada situação como apresentado nos gráficos a seguir.

Na figura 4.45, os fatores de torque apresentaram aumento a cada ciclo de aperto, nos parafusos torquoados com torque de 133 Nm, o mesmo progrediu de forma irregular até a falha no quinto aperto.

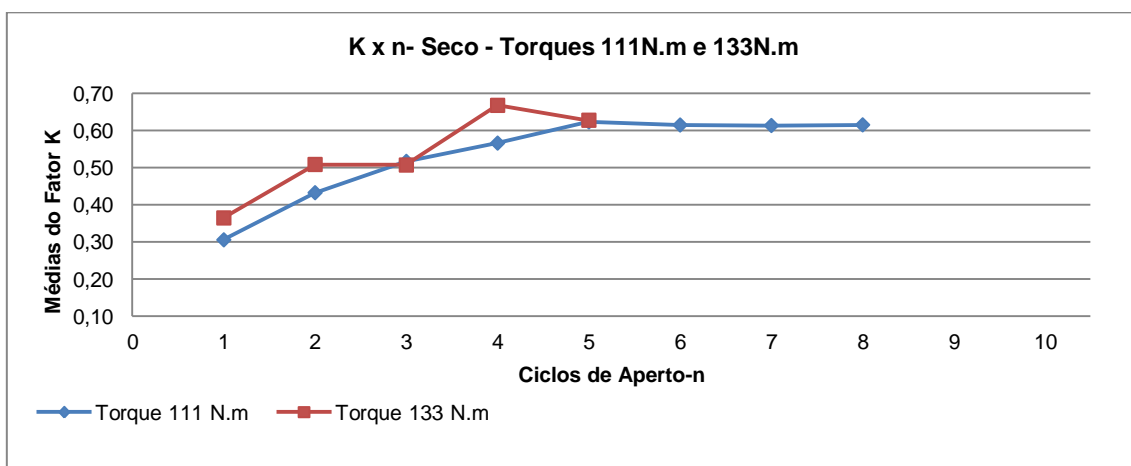


Figura 4.45 - Médias entre os fatores de torque de 111 Nm e 133 Nm ensaiados sem lubrificação.

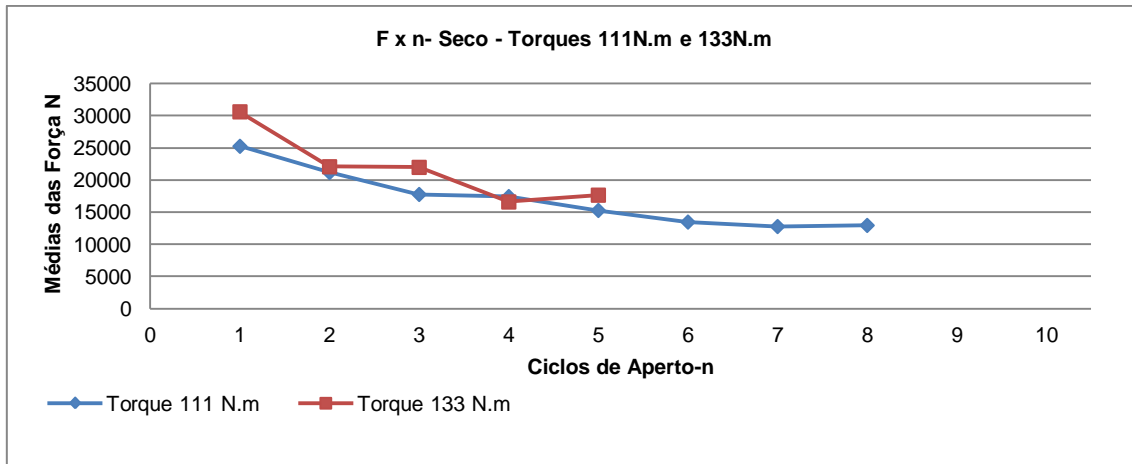


Figura 4.46 - Médias das forças em parafusos apertados a seco com torques de 111 Nm e 133 Nm.

Na figura 4.46 verifica-se que as forças decaem, sendo que os parafusos torquados com 133 Nm apresentaram uma flutuação maior. Isso se deve ao aumento do coeficiente de atrito do contato da porca, que apresentou uma maior deformação de sua superfície quando comparado ao torquado com 111 Nm.

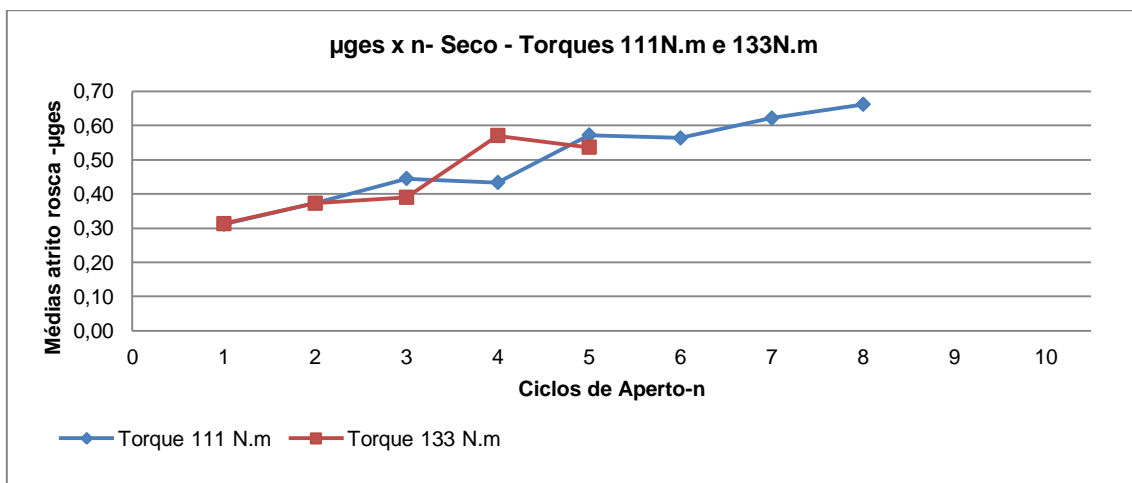


Figura 4.47 - Valores dos coeficientes de atrito médio torquados a seco com 111Nm e 133Nm.

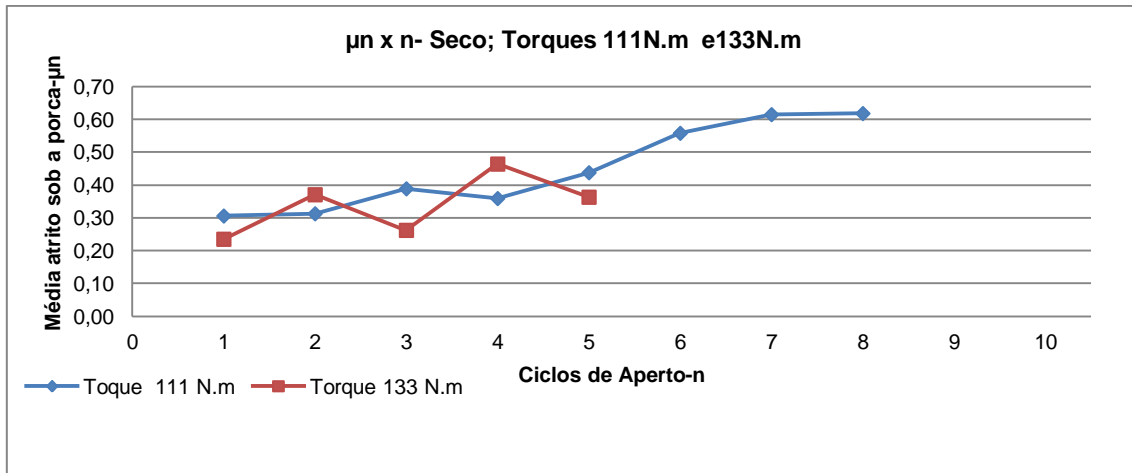


Figura 4.48 - Médias dos coeficientes de atrito dos contatos da porca com torques de 111 Nm e 133 Nm a seco.

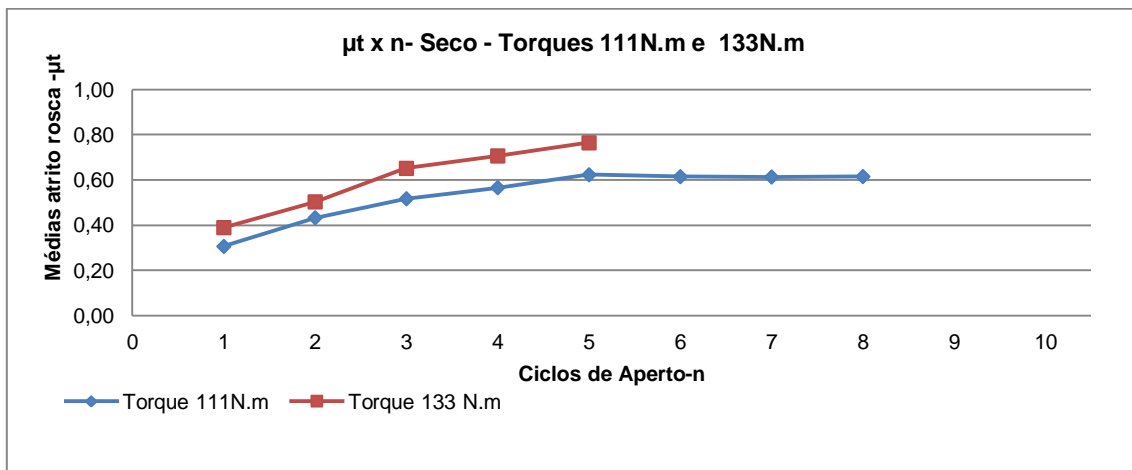


Figura 4.49 - Médias entre os coeficientes de atrito das roscas ensaiadas a seco com torque de 111 Nm e 133 Nm.

Na condição lubrificado com graxa os parafusos apertados com torque de 111 Nm apresentaram melhores resultados. É possível notar que até o terceiro aperto os fatores de torque mantiveram-se praticamente iguais, a partir desse ponto os fatores começam a se distanciar em relação aos torqueados com 133 Nm que tenderam a aumentar. Esse fato pode ser verificado no coeficiente de atrito da rosca que aumentou e se manteve no patamar entre 0,20 e 0,23. Já o coeficiente de atrito do contato da porca começa a aumentar a partir do sétimo aperto, o que explica a queda da força tensora que acaba se encontrando no décimo ciclo.

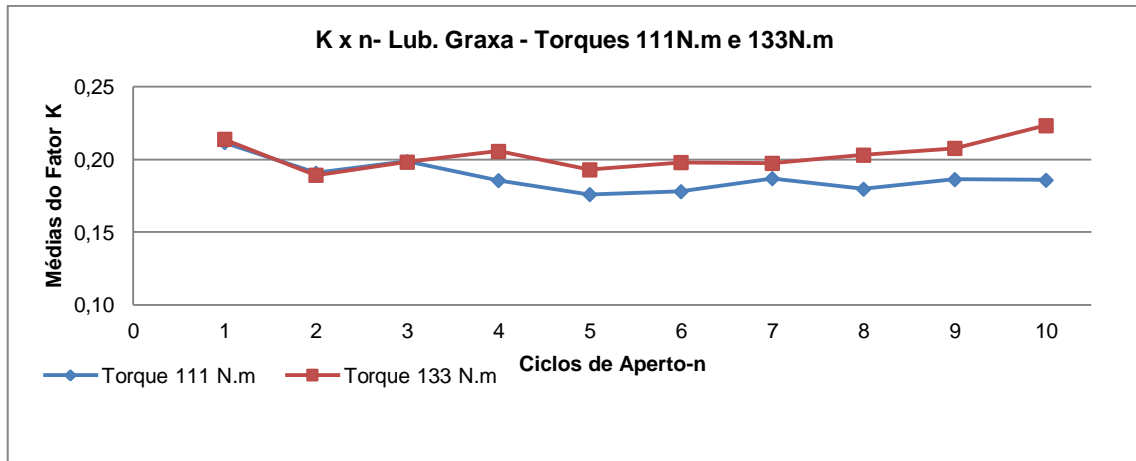


Figura 4.50 - Fatores de torque entre parafusos montados com torques de 111Nm e 133 Nm Lubrificados com graxa.

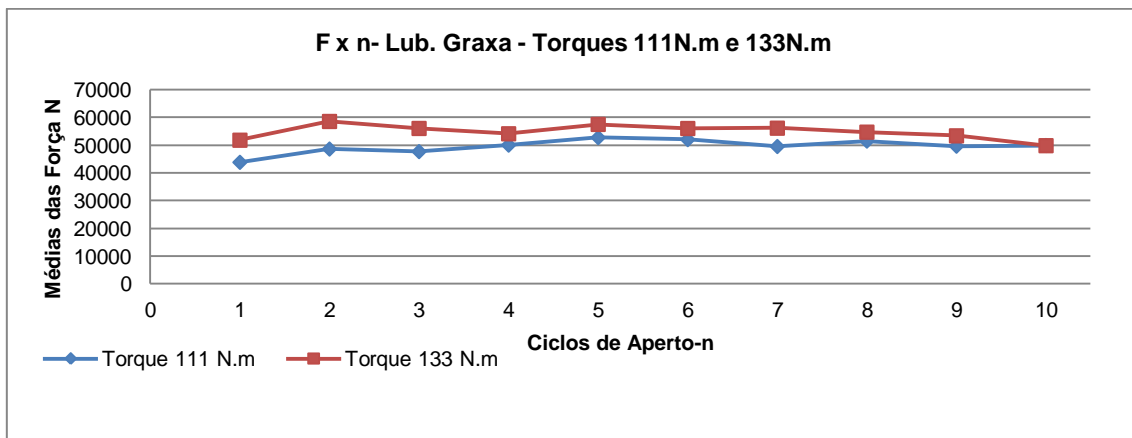


Figura 4.51 - Médias das forças na condição lubrificado com graxa e torques de 111 Nm e 133 Nm.

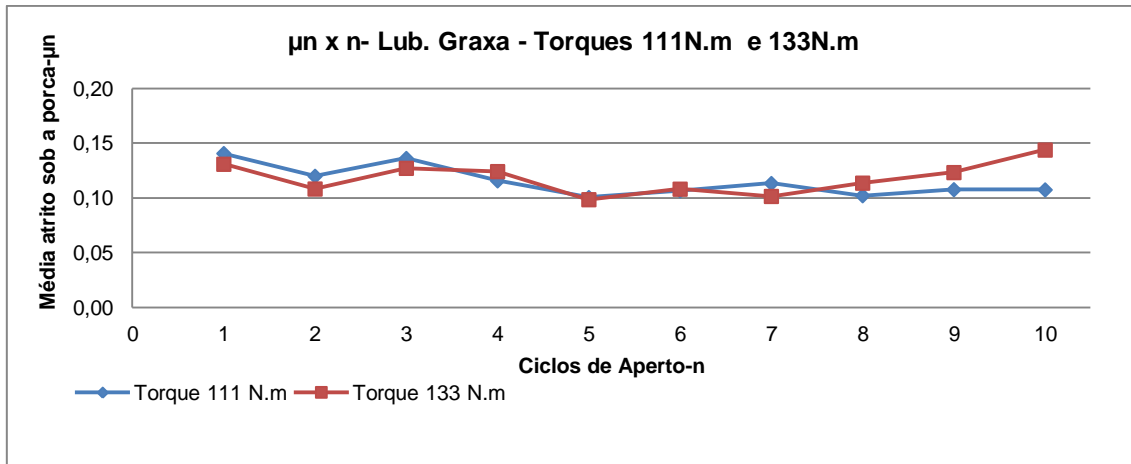


Figura 4.52 - Coeficientes de atrito dos contatos das porcas lubrificadas com graxa e torques de 111Nm e 133Nm.

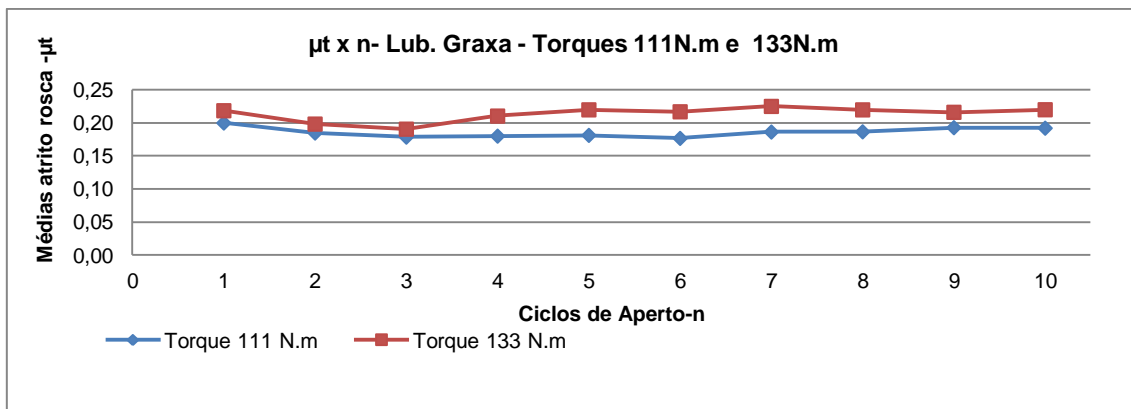


Figura 4.53 - Coeficientes de atrito das roscas lubrificadas com graxa e torques de 111Nm 133Nm.

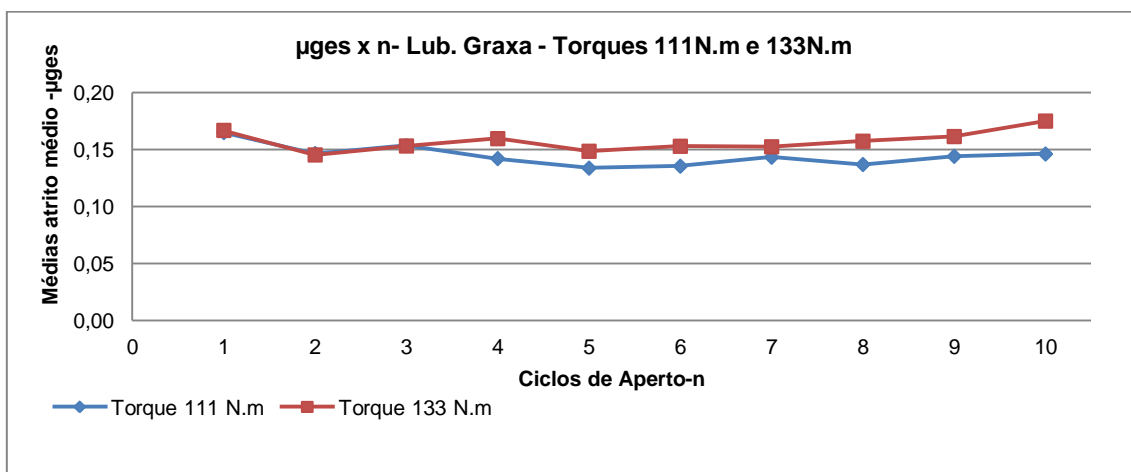


Figura 4.54 - Coeficientes de atrito médio na condição lubrificado com graxa e torque de 111 Nm e 133 Nm.

Na montagem com pasta, os fatores de torque nos parafusos apertados com torque de 111 Nm e 133 Nm apresentaram-se semelhantes no primeiro ciclo, já do segundo aperto em diante os fatores se afastam, e a partir do quarto ciclo se estabilizam.

As forças aumentam do primeiro ciclo ao quarto, e se mantêm estáveis a partir desse ponto, mantendo assim uma relação direta com os coeficientes de atrito.

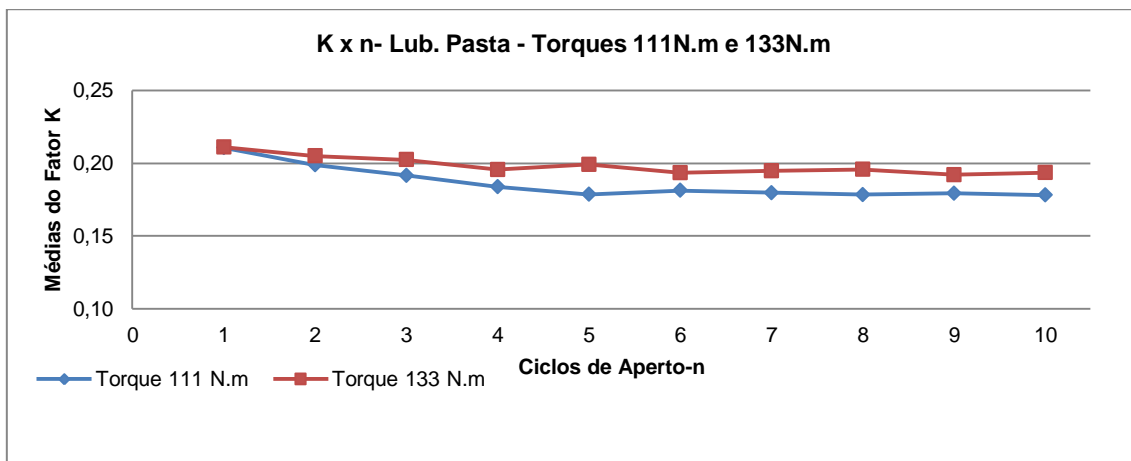


Figura 4.55 - Fatores de torque montados com pasta e apertados com torques de 111 Nm e 133 Nm.

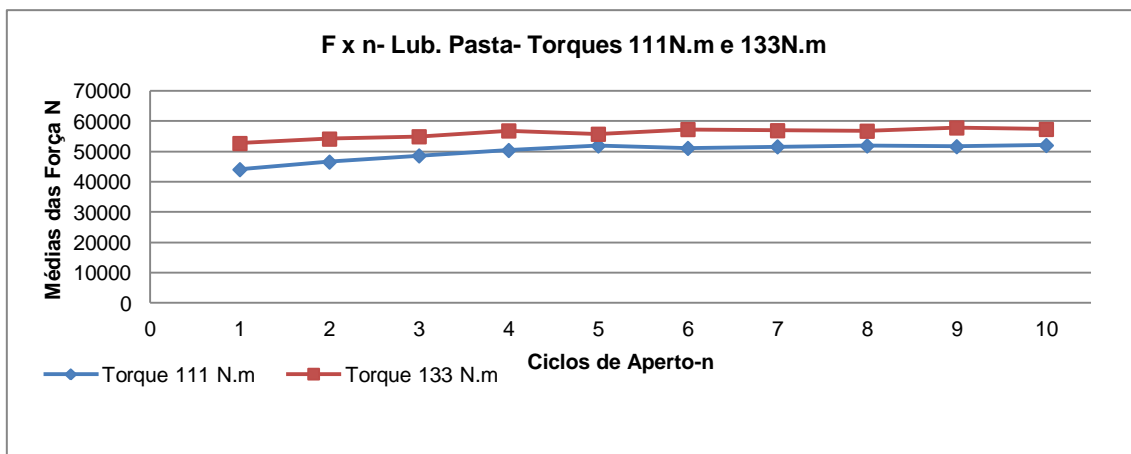


Figura 4.56 - Forças atingidas na condição lubrificada com pasta e torques de 111 Nm e 133 Nm.

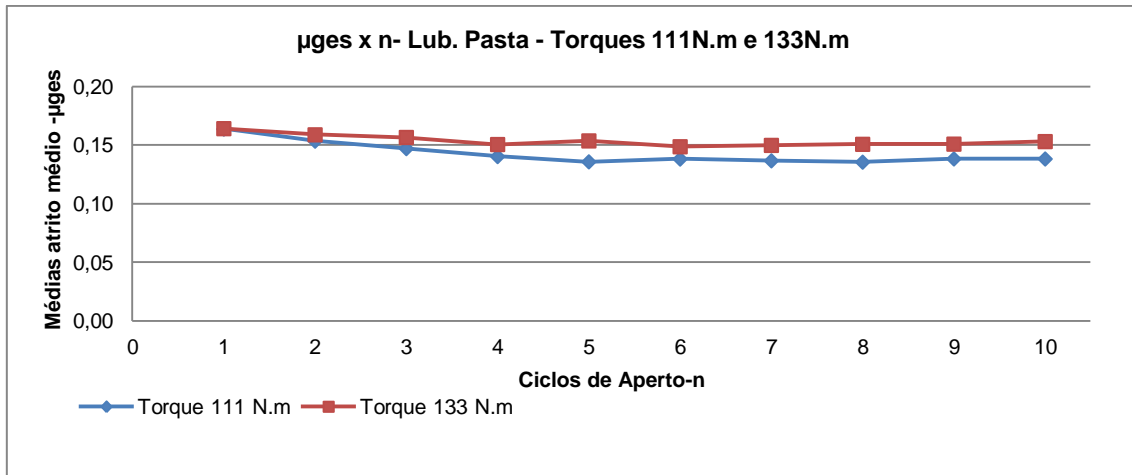


Figura 4.57 - Coeficientes de atrito médios em parafusos torqueados com pasta e torques de 111 Nm e 133 Nm.

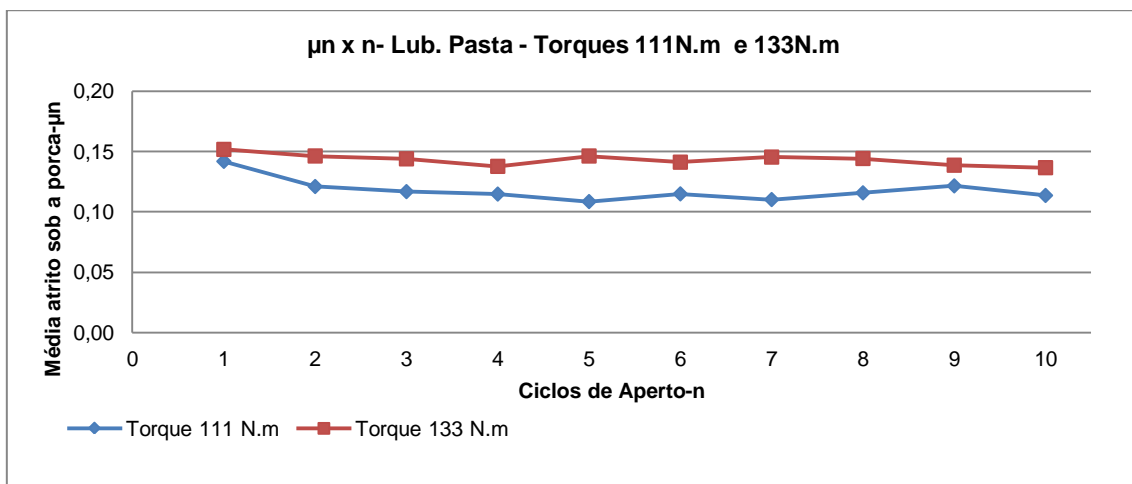


Figura 4.58 - Coeficiente de atrito nas superfícies de contato das porcas montadas com pasta e torques de 111 Nm e 133 Nm.

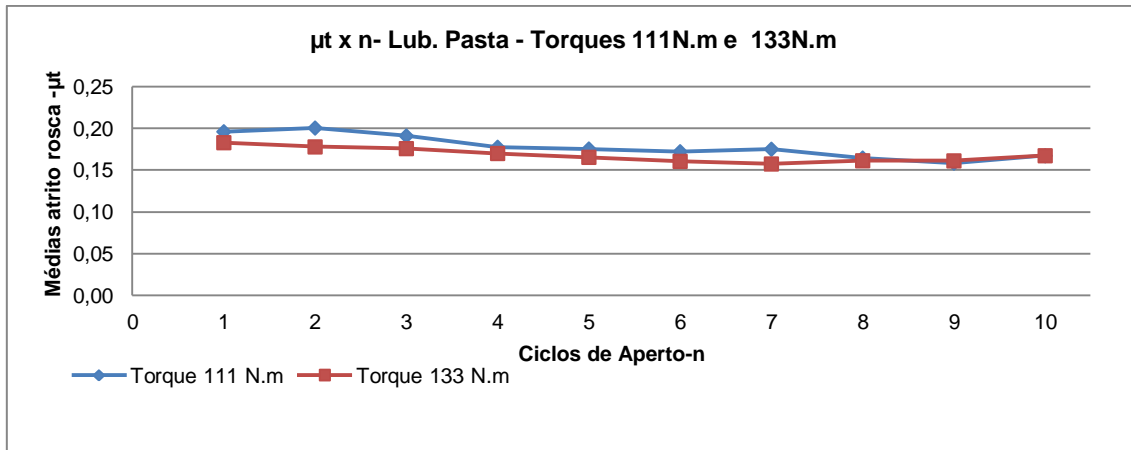


Figura 4.59 - Coeficientes de atrito das roscas montadas na condição lubrificadas com pasta e torques de 111 Nm e 133Nm.

Os gráficos a seguir trazem as médias das montagens sem lubrificação e lubrificadas com graxa e pasta, torqueadas com 111 Nm.

É possível verificar que os fatores de torque e coeficientes de atrito extraídos na condição a seco aumentaram de forma progressiva até a falha do parafuso no oitavo ciclo.

Na condição lubrificada todos os parâmetros mantiveram-se dentro da estabilidade, a montagem com graxa no terceiro torque apresentou aumento do coeficiente de atrito no contato da porca, a partir de sexto ciclo o coeficiente de atrito das roscas apresentou tendência de aumento, o que contribuiu para a redução da força tensora nos últimos ciclos.

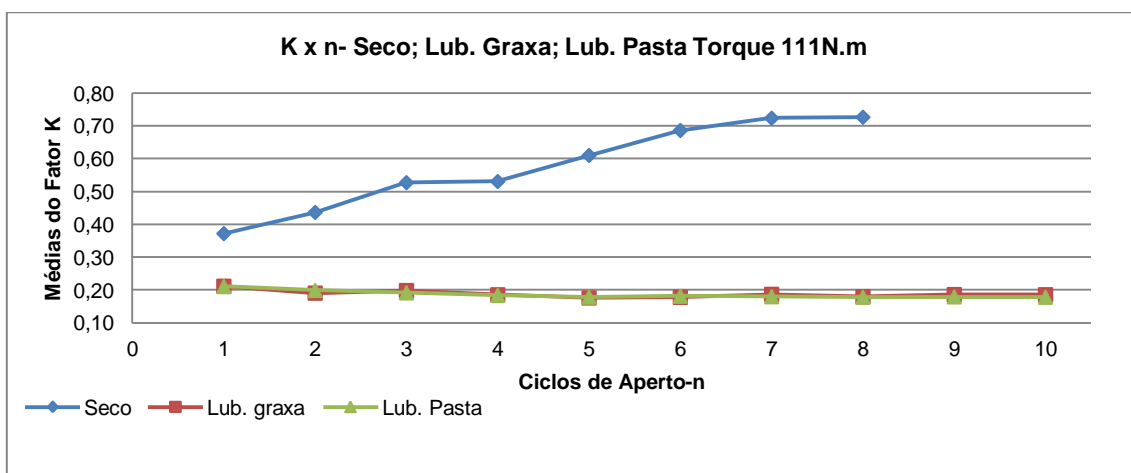


Figura 4.60 - Fatores de torque médio para as condições de montagem seco e lubrificadas com torque de 111 Nm.



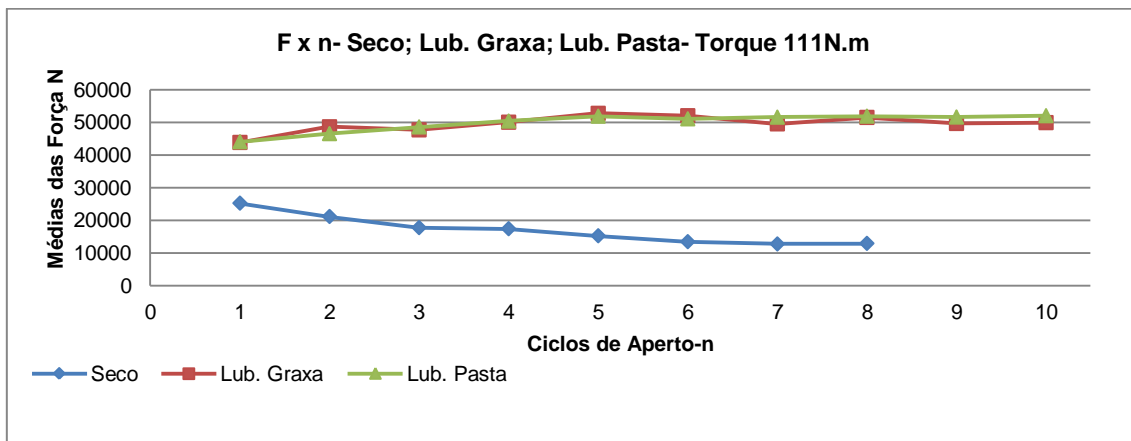


Figura 4.61 - Médias entre forças na condição de montagem a seco e com lubrificantes.

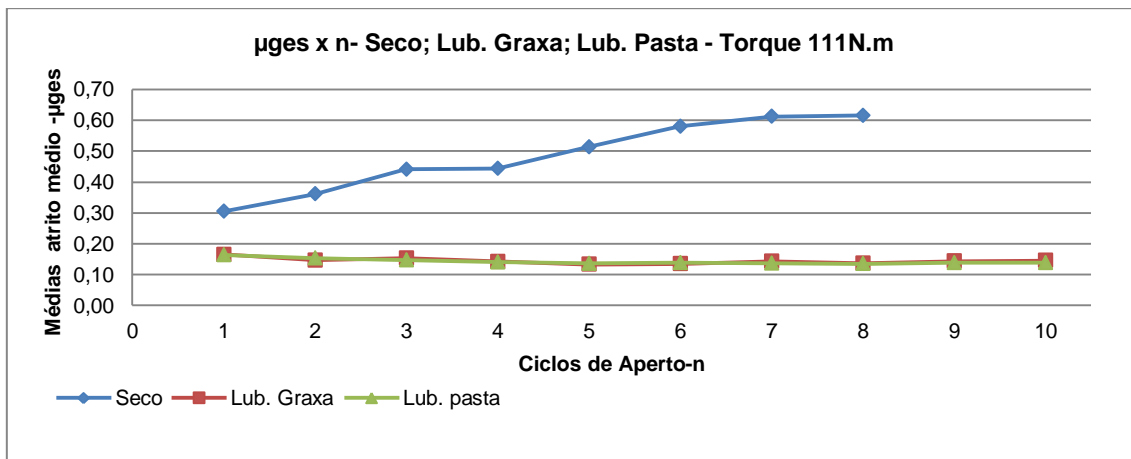


Figura 4.62 - Coeficientes de atrito médio.

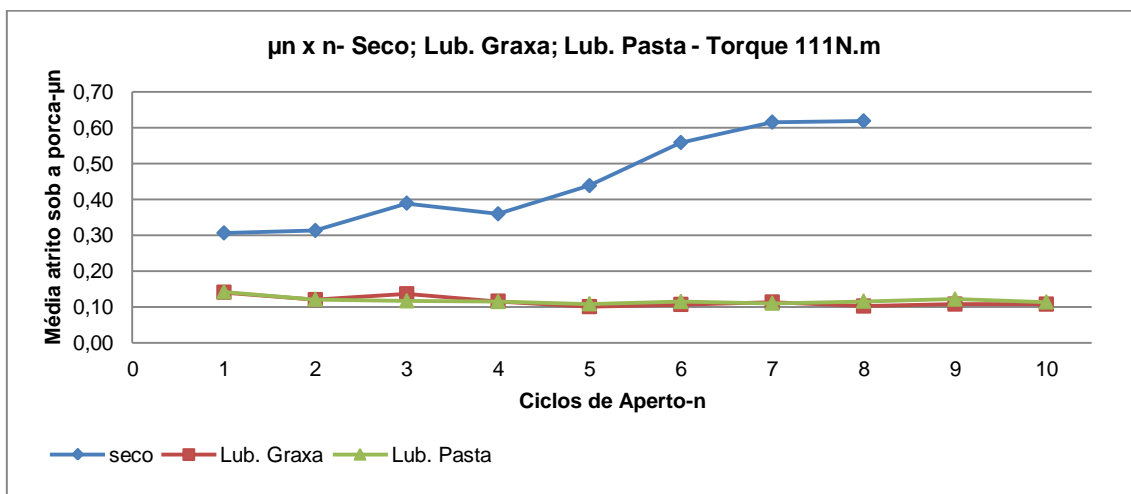


Figura 4.63 - Coeficiente de atrito no contato entre porca e arruela a seco e com lubrificantes.

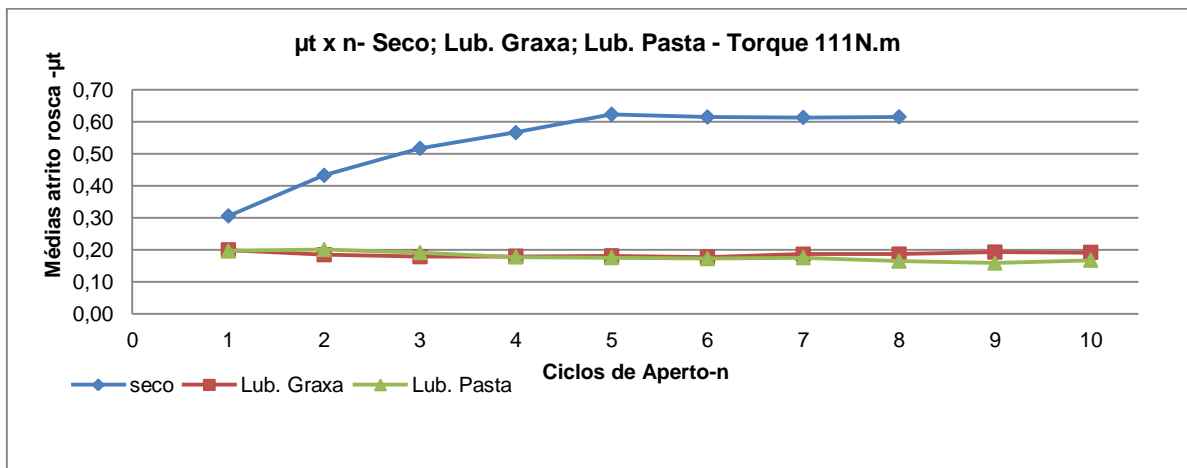


Figura 4.64 - Coeficiente de atrito das roscas montadas na configuração a seco e lubrificadas com graxa e pasta de montagem.

Dos parafusos torqueados a seco e com lubrificação por graxa e pasta de montagem com 133 Nm, foram extraídas as médias dos gráficos a seguir.

Através dos gráficos é possível verificar que nos ensaios a seco os fatores de torque aumentaram a cada ciclo até o sexto, a partir desse ponto começou a decair e o parafuso rompeu no oitavo.

Os parafusos lubrificadas com graxa apresentaram uma redução da força tensora a partir do sexto ciclo decorrente do aumento do atrito das roscas e do contato da porca sobre a arruela.

Já os parafusos torqueados com pasta de montagem apresentaram valores uniformes durante os ciclos de aperto, o que pode ser confirmado pela análise das superfícies que apresentaram menor desgaste nessa situação de montagem.

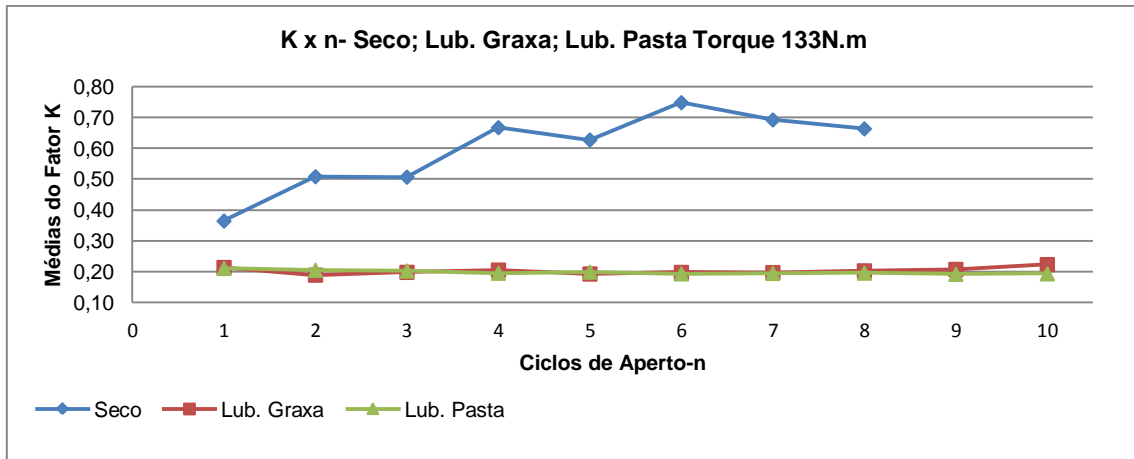


Figura 4.65 - Fatores de torque extraídos dos ensaios com torque de 133 Nm sem lubrificação e com lubrificantes.

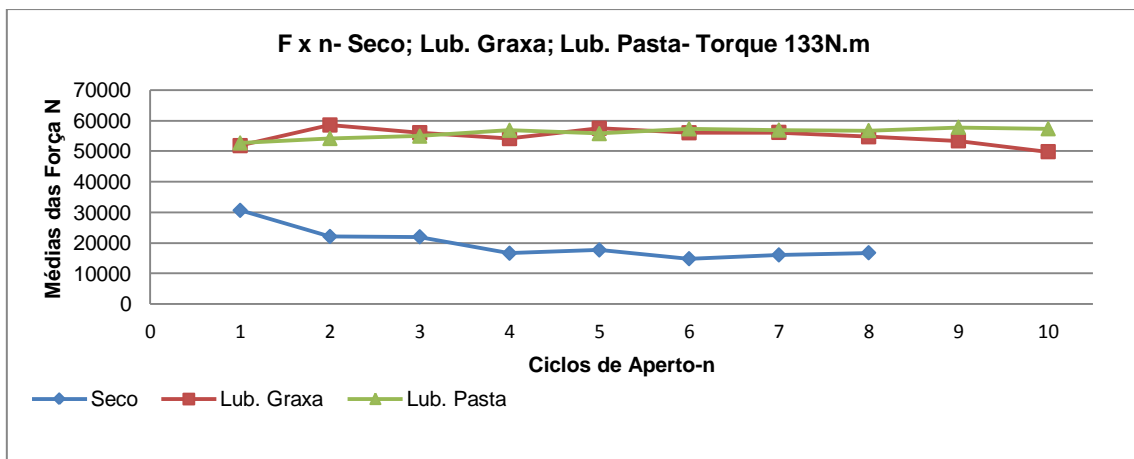


Figura 4.66 - Médias das forças dos ensaios realizados com 133 Nm a seco e lubrificados.

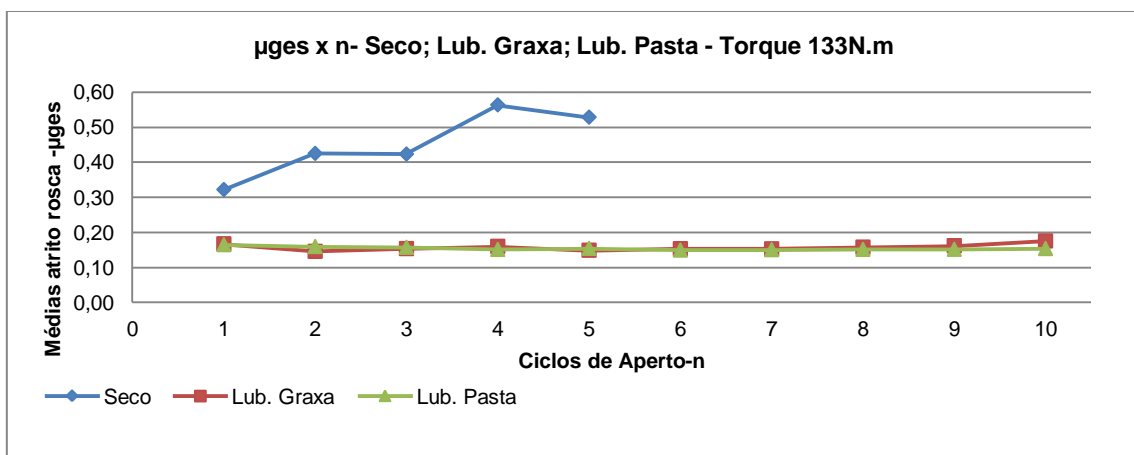


Figura 4.67 - Atritos médios torçoados a seco e lubrificados.

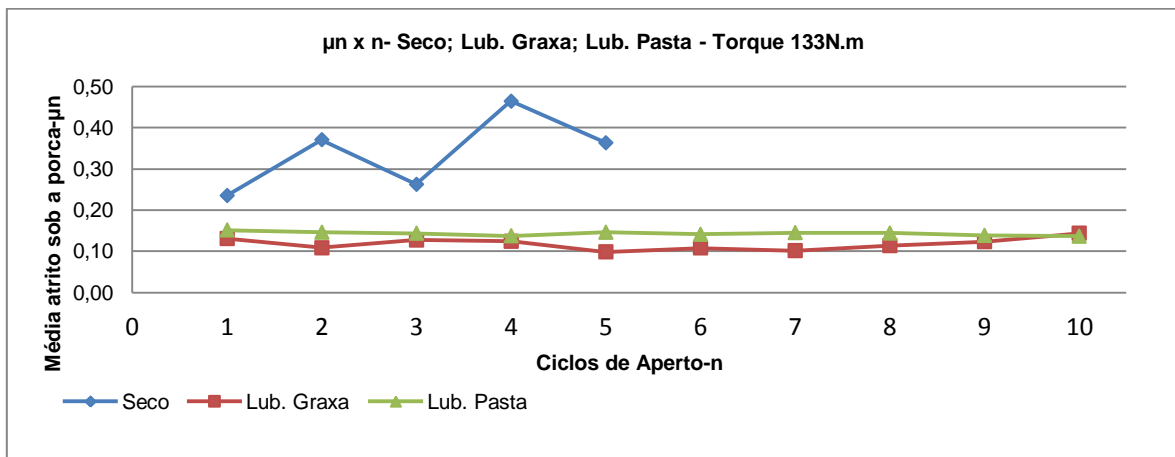


Figura 4.68 - Atrito nas superfícies das porcas apertadas com torque de 133Nm a seco e lubrificadas.

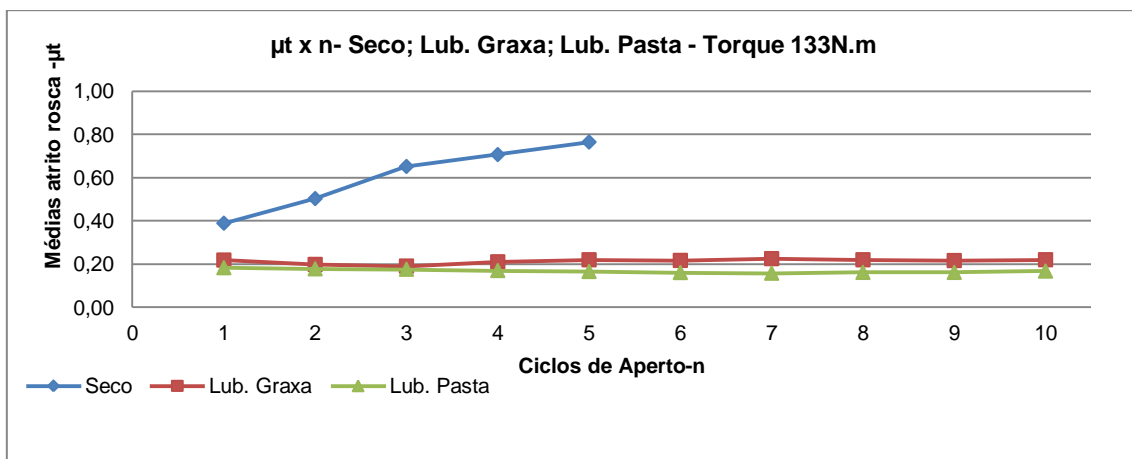


Figura 4.69 - Atrito das roscas montadas a seco e lubrificadas com torque de 133 Nm.

#### 4.5 - Efeito da velocidade de parafusamento sobre os parâmetros tribológicos.

Os gráficos das figuras 4.70 e 4.71 apresentam os resultados dos ensaios feitos em dois parafusos lubrificadas com graxa e apertados com torque de 111 Nm com as rotações de 0,6 RPM e 4,7 RPM.

Neles é possível observar ainda que, de forma prematura, devido ao reduzido número de amostras, que a rotação influencia de forma direta nos valores do fator de torque, coeficientes de atrito médios e por consequência nos resultados de força tensora na junta.

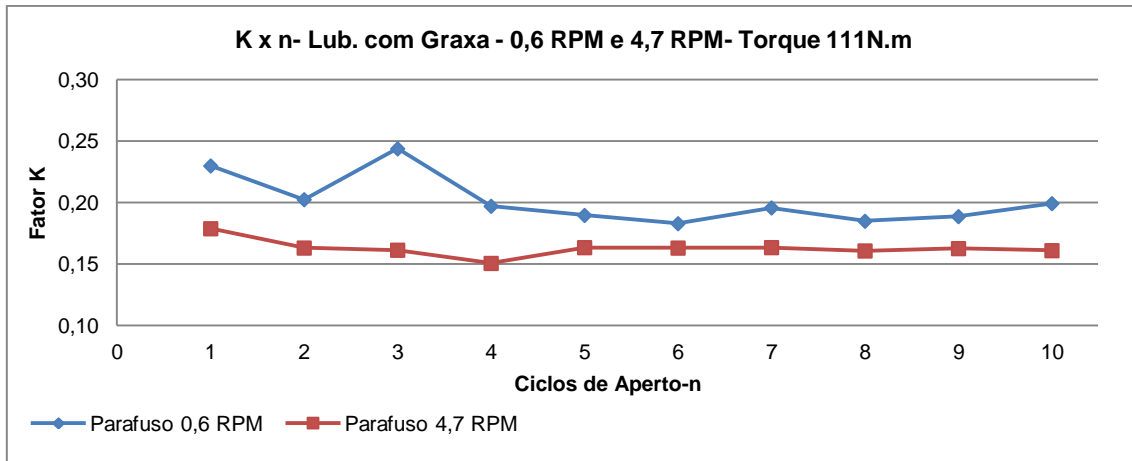


Figura 4.70 - Fatores de torque em parafusos apertados com 111 Nm com graxa e rotações de 0,6 e 4,7 RPM.

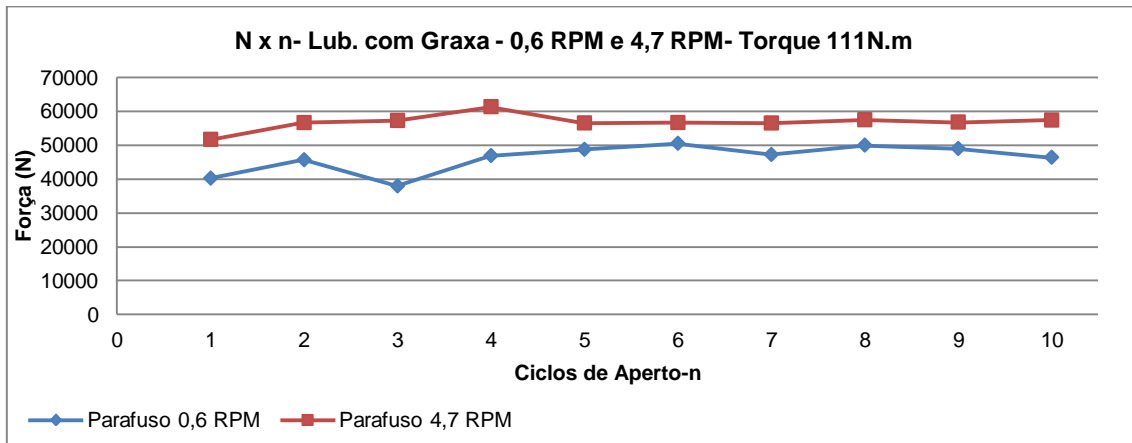


Figura 4.71 - Forças obtidas em parafusos torçoados com 111 Nm com graxa e rotações de 0,6 e 4,7 RPM.

## **CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.**

### 5.1 - Conclusões

Com os ensaios mecânicos realizados foi possível verificar que os parafusos, porcas e arruelas adquiridos atendiam às propriedades especificadas pela norma NBR 8855.

O ensaio metalográfico dos componentes, como esperado, revelou uma estrutura martensítica de aços temperados e revenidos.

A análise química do aço usado para produção dos parafusos e porcas determinou um aço de baixo carbono microligado. E das arruelas um aço alto carbono microligado.

As superfícies avaliadas dos componentes sem uso apresentou uma camada negra uniforme formada no tratamento térmico de têmpera em óleo. Após os ciclos de aperto essa camada ainda era visível na condição lubrificada pela pasta de montagem.

Nos conjuntos parafuso, porca e arruela montados sem lubrificação ocorreu grande deformação gerada por micro-adesão, já que as superfícies em contato direto alcançam valores extremamente altos de pressão de contato, e o movimento de baixa rotação favorece a essa situação.

Nas montagens utilizando os lubrificantes, tanto as avaliações quantitativas realizadas através dos ensaios de rugosidade, quanto qualitativa, da análise do estado das superfícies, evidenciaram que a pasta de montagem alcançou melhores resultados.

O equipamento fabricado no LAMAV atendeu às expectativas, possibilitando a determinação dos fatores de torque e dos coeficientes de atrito. Quando os mesmos são comparados quanto à condição lubrificadas com graxa ou com pasta de montagem é possível verificar que tanto as forças de pré-tensão como os coeficientes de atrito se apresentaram mais estáveis, na condição lubrificadas com pasta.

Na condição do torque de 111Nm, os coeficientes de atrito dos elementos lubrificadas com pasta foram um pouco maiores dos que os lubrificadas com graxa, isso se deve aos lubrificantes sólidos e líquidos existente nos mesmos.

No caso da graxa Lubrax Autolith SM-2, que contém pequena quantidade de lubrificante sólido (dissulfeto de molibdênio), este possui coeficiente de atrito menor que o do cobre, encontrado na pasta de montagem que foi utilizada. Mas no geral os coeficientes de atrito se mostraram mais estáveis na pasta, principalmente com torque de 133 Nm.

Como nas montagens utilizando parafusos, o mais importante não é só a força de pré-tensão, mas também como essas forças estão distribuídas entre os elementos de fixação para que não ocorra sobrecarga nos mesmos. Esse melhor resultado da pasta de montagem permite uma maior confiabilidade dos conjuntos mecânicos fabricados por método de montagem não permanente.

## **CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES**

- Sugere-se para futuros trabalhos uma avaliação de um número maior de parafusos em cada condição apresentada nesse trabalho para um futuro tratamento estatístico dos dados obtidos.

- A utilização de outros lubrificantes específicos para montagem de parafusos.

- Uma avaliação da quebra de torque, ou seja, o quanto de torque é necessário para a retirada do elemento de fixação em função dos lubrificantes utilizados, ou a não utilização dos mesmos, em relação o tempo de montagem e o ambiente a que eles são expostos.

- Uma avaliação do quanto a deformação do ângulo dos filetes altera o fator de torque e os coeficientes de atrito, já que as equações utilizadas para obtenção desses resultados levam em consideração o ângulo dos mesmos.

- E uma verificação do quanto a velocidade interfere no processo de torqueamento.



## **CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

Alimaqmix. (2014). [www.alimaqmix.com.br](http://www.alimaqmix.com.br).

ASTM A-490. Standard Specification for Structural Bolts, Alloy Steel, Heat. 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.

ÁVILA, (2014). ELEMENTOS DE MÁQUINAS. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG.

Bickford, J.H.: An introduction to the design and behavior of bolted joints. 3ed. New York : CRC. 1995. Blutcher Ltda. 1982.

Cangundo, E. M. (2009, Outubro). AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDIÇÃO TRIBOLÓGICA NO PROCESSO DE CORTE POR ARRANQUE DE APARA. Lisboa.

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

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

Fattocom, (2014). [www.fattocom.com.br](http://www.fattocom.com.br).

Garcia, R., (2008). Conceitos gerais sobre torque e processos de torque, Revista do Parafuso.

Grisa,S(2000). Efeito do torque das uniões em fadiga aparafusadas. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ISO 16047:2005. Has the status of a British Standard.

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

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

MATALAC. (2013, Dezembro). CATÁLOGO DE ENGENHARIA DE PARAFUSOS.

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, ROBERTO L, (2006). Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. Tradução João Batista de Aguiar. 2 ed. Porto Alegre : Bookman.

OKS-germany. (2014). Catálogo de lubrificantes OKS-germany.

Pizzio, E., (2005). Avaliação da vida em fadiga de uniões parafusadas – Estudo de Caso -, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Retrieved Maio (2014), from [www.oks-germany.com](http://www.oks-germany.com).

Rolin, A.,(2014). Avaliação do comportamento mecânico e tribológico de parafusos de classe 10.9/sae 4140 para emprego em guindaste off-shore.

Shighey, E. Joseph (2008). Projeto de Engenharia Mecânica.

Souza, S. Augusto; (1982). Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. Editora Edgard Blucher.

Stoeterau, R. L., (2004). "Tribologia." Departamento de engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina Centro Tecnológico.

Suski, C. A. (2007). Estudo da influência da adição de Boro nos aços de baixo carbono. *O parafuso*.

Treated, 150 ksi Minimum Tensile Strength.: ASTM; 2011.

[www.hydratight.com](http://www.hydratight.com) (2014).

[www.lojadomecanico.com.br](http://www.lojadomecanico.com.br) (2014).

[www.lumobras.com.br](http://www.lumobras.com.br)(2014).

[www.Metalac.com](http://www.Metalac.com)(2014).

[www.MolycoteDowCorningCorporation](http://www.MolycoteDowCorningCorporation)(2012).

## CAPÍTULO 8 - ANEXOS.

Tabelas de resultados obtidos nos ensaios de torque.

Tabela (1) - Parafuso 1 torquado a seco com 111Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	111	21734,659	0,426	0,352	0,351	0,354
2	111	21700,234	0,426	0,352	0,390	0,327
3	111	15439,858	0,599	0,504	0,465	0,534
4	111	16545,272	0,559	0,469	0,435	0,495
5	111	15049,981	0,615	0,517	0,515	0,521
6	111	13010,065	0,711	0,601	0,516	0,665
7	111	13220,050	0,700	0,592	0,446	0,698
8	111	11493,033	0,805	0,683	0,592	0,752
9	111	13140,392	0,704	0,595	0,651	0,559
10	111	12511,105	0,739	0,626	0,724	0,560

Tabela (2) - Parafuso 2 torquado a seco com 111Nm

ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ ges)	Atrito da rosca( $\mu$ t)	Atrito da porca( $\mu$ n)
1	111	29660,475	0,312	0,252	0,288	0,229
2	111	21287,369	0,435	0,360	0,466	0,286
3	111	20513,618	0,451	0,374	0,612	0,207
4	111	17975,464	0,515	0,430	0,741	0,211
5	111	17164,878	0,539	0,451	0,697	0,278
6	111	13582,260	0,681	0,575	0,733	0,466
7	111	12540,321	0,738	0,625	0,648	0,611
8	111	15532,551	0,596	0,500	0,614	0,422
9	111	13256,466	0,698	0,590	0,732	0,492
10	111	13328,532	0,694	0,587	0,760	0,466

Tabela (3) - Parafuso 3 torquado a seco com 111Nm.

ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ ges)	Atrito da rosca( $\mu$ t)	Atrito da porca( $\mu$ n)
1	111	29660,475	0,312	0,252	0,288	0,229
2	111	21287,369	0,435	0,360	0,466	0,286
3	111	20513,618	0,451	0,374	0,612	0,207
4	111	17975,464	0,515	0,430	0,741	0,211
5	111	17164,878	0,539	0,451	0,697	0,278
6	111	13582,260	0,681	0,575	0,733	0,466
7	111	12540,321	0,738	0,625	0,648	0,611
8	111	15532,551	0,596	0,500	0,614	0,422
9	111	13256,466	0,698	0,590	0,732	0,492
10	111	13328,532	0,694	0,587	0,760	0,466

Tabela (4) – Parafuso 1 torquado a seco com 133 Nm.

Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
133	34336,117	0,323	0,262	0,427	0,146
133	19497,781	0,568	0,477	0,624	0,375
133	20353,280	0,545	0,456	0,837	0,187
133	16811,531	0,659	0,556	0,950	0,279
133	17922,733	0,618	0,520	1,071	0,132

Tabela (5) – Parafuso 2 torquado a seco com 133 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	133	28453,660	0,390	0,320	0,521	0,179

Tabela (6) – Parafuso 3 torquado a seco com 133 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	133	29100,636	0,381	0,313	0,219	0,381
2	133	24675,204	0,449	0,372	0,382	0,367
3	133	23630,199	0,469	0,390	0,466	0,338
4	133	16401,856	0,676	0,571	0,463	0,650
5	133	17407,552	0,637	0,536	0,458	0,595
6	133	14684,972	0,755	0,640	0,660	0,628
7	133	15133,431	0,732	0,620	0,532	0,686
8	133	17703,089	0,626	0,527	0,725	0,389
9	133	14051,283	0,789	0,669	0,721	0,636
10	133	14779,089	0,750	0,635	0,779	0,537

Tabela (7) – Parafuso 1 lubrificado com graxa e torqueado com 111 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	Carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	111	40232,016	0,230	0,181	0,202	0,166
2	111	45676,160	0,203	0,157	0,203	0,125
3	111	37940,610	0,244	0,193	0,195	0,192
4	111	46921,377	0,197	0,152	0,190	0,126
5	111	48761,115	0,190	0,146	0,182	0,120
6	111	50551,230	0,183	0,140	0,171	0,118
7	111	47237,567	0,196	0,151	0,192	0,122
8	111	50010,288	0,185	0,141	0,182	0,113
9	111	49013,596	0,189	0,145	0,203	0,104
10	111	46414,006	0,199	0,154	0,199	0,122

Tabela (8) – Parafuso 2 lubrificado com graxa e torqueado com 111 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	Carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	111	45916,736	0,201	0,156	0,174	0,144
2	111	51293,542	0,180	0,137	0,160	0,122
3	111	53313,124	0,174	0,131	0,168	0,106
4	111	54650,989	0,169	0,128	0,186	0,087
5	111	56778,341	0,163	0,122	0,178	0,083
6	111	54265,010	0,170	0,129	0,167	0,102
7	111	49748,789	0,186	0,142	0,187	0,112
8	111	51748,140	0,179	0,136	0,194	0,096
9	111	49448,596	0,187	0,143	0,193	0,109
10	111	51064,957	0,181	0,138	0,198	0,097

Tabela (9) – Parafuso 3 lubrificado com graxa e torqueado com 111 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	Carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	111	45380,823	0,204	0,158	0,224	0,112
2	111	48920,545	0,189	0,145	0,192	0,113
3	111	51858,237	0,178	0,136	0,172	0,110
4	111	48563,090	0,190	0,146	0,164	0,134
5	111	52716,124	0,175	0,133	0,183	0,098
6	111	51243,986	0,181	0,138	0,192	0,100
7	111	51634,852	0,179	0,136	0,180	0,106
8	111	52765,820	0,175	0,133	0,184	0,098
9	111	50511,648	0,183	0,140	0,182	0,111
10	111	52251,348	0,177	0,135	0,179	0,104

Tabela (10) – Parafuso 1 lubrificado com graxa e torqueado com 133 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	Carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	133	51662,425	0,215	0,167	0,226	0,126
2	133	57110,894	0,194	0,149	0,188	0,123
3	133	59746,304	0,186	0,142	0,169	0,124
4	133	56931,480	0,195	0,150	0,211	0,107
5	133	55917,937	0,198	0,153	0,205	0,117
6	133	55927,351	0,198	0,153	0,210	0,113
7	133	55503,049	0,200	0,154	0,216	0,111
8	133	52537,028	0,211	0,164	0,219	0,126
9	133	53314,865	0,208	0,162	0,193	0,140
10	133	47427,639	0,234	0,184	0,199	0,175

Tabela (11) – Parafuso 2 lubrificado com graxa e torqueado com 133 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	133	51378,132	0,216	0,168	0,227	0,128
2	133	59551,949	0,186	0,142	0,207	0,097
3	133	52559,301	0,211	0,164	0,202	0,138
4	133	49307,786	0,225	0,176	0,215	0,150
5	133	56094,460	0,198	0,152	0,230	0,098
6	133	58174,176	0,191	0,146	0,230	0,088
7	133	57596,452	0,192	0,148	0,228	0,092
8	133	58637,533	0,189	0,145	0,227	0,087
9	133	55183,467	0,201	0,155	0,239	0,096
10	133	54394,875	0,204	0,158	0,235	0,104

Tabela (12) – Parafuso 3 lubrificado com graxa e torqueado com 133 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	133	52394,161	0,212	0,165	0,202	0,139
2	133	59051,315	0,188	0,144	0,200	0,105
3	133	55845,698	0,198	0,153	0,200	0,121
4	133	56142,216	0,197	0,152	0,205	0,116
5	133	60510,043	0,183	0,140	0,224	0,081
6	133	53981,486	0,205	0,159	0,211	0,123
7	133	55349,107	0,200	0,155	0,231	0,102
8	133	52985,342	0,209	0,163	0,212	0,128
9	133	51671,767	0,214	0,167	0,216	0,134
10	133	47691,865	0,232	0,183	0,226	0,153

Tabela (13) – Parafuso 1 lubrificado com pasta de montagem e torque de 111 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	111	42696,764	0,217	0,169	0,204	0,145
2	111	45349,548	0,204	0,158	0,227	0,110
3	111	43264,364	0,214	0,167	0,176	0,161
4	111	47736,241	0,194	0,149	0,191	0,120
5	111	48519,200	0,191	0,146	0,172	0,129
6	111	48180,405	0,192	0,148	0,165	0,136
7	111	48339,572	0,191	0,147	0,174	0,128
8	111	50266,691	0,184	0,141	0,169	0,121
9	111	49300,774	0,188	0,144	0,157	0,135
10	111	48441,406	0,191	0,147	0,157	0,140

Tabela (14) – Parafuso 2 lubrificado com pasta de montagem e torque de 111 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	111	41704,601	0,222	0,174	0,207	0,151
2	111	45939,771	0,201	0,156	0,209	0,119
3	111	50613,397	0,183	0,140	0,215	0,086
4	111	51675,190	0,179	0,136	0,180	0,106
5	111	54050,713	0,171	0,129	0,187	0,089
6	111	52545,172	0,176	0,134	0,177	0,103
7	111	53434,553	0,173	0,131	0,182	0,095
8	111	51729,913	0,179	0,136	0,167	0,115
9	111	52734,633	0,175	0,133	0,165	0,111
10	111	53784,133	0,172	0,130	0,179	0,096

Tabela (15) – Parafuso 3 lubrificado com pasta de montagem e torque de 111 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	111	47790,063	0,194	0,149	0,178	0,129
2	111	48363,024	0,191	0,147	0,166	0,134
3	111	51932,661	0,178	0,135	0,182	0,103
4	111	51771,151	0,179	0,136	0,162	0,118
5	111	53091,589	0,174	0,132	0,168	0,107
6	111	52518,459	0,176	0,134	0,175	0,105
7	111	53004,888	0,175	0,132	0,169	0,107
8	111	53695,362	0,172	0,130	0,159	0,111
9	111	52871,825	0,175	0,133	0,154	0,118
10	111	53890,516	0,172	0,130	0,165	0,105



Tabela (16) – Parafuso 1 lubrificado com pasta de montagem e torque de 133 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	133	56144,541	0,197	0,152	0,188	0,128
2	133	56160,900	0,197	0,152	0,172	0,139
3	133	54585,435	0,203	0,157	0,182	0,141
4	133	56763,179	0,195	0,150	0,167	0,140
5	133	56974,199	0,195	0,150	0,164	0,140
6	133	56484,013	0,196	0,151	0,157	0,148
7	133	56562,417	0,196	0,151	0,159	0,146
8	133	53294,749	0,208	0,162	0,154	0,168
9	133	54290,037	0,204	0,158	0,165	0,154
10	133	54957,217	0,202	0,156	0,177	0,142

Tabela (17) – Parafuso 2 lubrificado com pasta de montagem e torque de 133 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	133	48786,425	0,227	0,178	0,220	0,150
2	133	50976,537	0,217	0,170	0,185	0,160
3	133	51212,387	0,216	0,169	0,180	0,162
4	133	52987,401	0,209	0,163	0,176	0,154
5	133	52737,691	0,210	0,163	0,179	0,153
6	133	58118,788	0,191	0,146	0,167	0,133
7	133	56689,208	0,196	0,151	0,155	0,148
8	133	56543,647	0,196	0,151	0,162	0,144
9	133	59018,152	0,188	0,144	0,163	0,131
10	133	56771,058	0,195	0,150	0,170	0,137

Tabela (18) – Parafuso 3 lubrificado com pasta de montagem e torque de 133 Nm.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)	Atrito roscas( $\mu$ t)	Atrito porca( $\mu$ n)
1	133	53128,017	0,209	0,162	0,141	0,178
2	133	55314,775	0,200	0,155	0,178	0,139
3	133	58956,526	0,188	0,144	0,166	0,129
4	133	60792,082	0,182	0,139	0,168	0,119
5	133	57524,620	0,193	0,148	0,154	0,145
6	133	57323,445	0,193	0,149	0,158	0,143
7	133	57496,296	0,193	0,148	0,159	0,141
8	133	60428,786	0,183	0,140	0,168	0,121
9	133	60188,067	0,184	0,141	0,157	0,130
10	133	60298,853	0,184	0,140	0,155	0,131

Tabela (19) – Parafuso lubrificado com graxa, torque de 111 Nm e rotação de 4,7RPM.

Ciclos	Torque(N.m)	carga(N)	Fator K	Atrito Médio( $\mu$ Ges)
1	111	51705,838	0,179	0,136
2	111	56673,711	0,163	0,122
3	111	57291,103	0,161	0,121
4	111	61370,704	0,151	0,112
5	111	56565,017	0,164	0,123
6	111	56685,503	0,163	0,122
7	111	56553,893	0,164	0,123
8	111	57508,808	0,161	0,120
9	111	56833,271	0,163	0,122
10	111	57421,116	0,161	0,121