

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E TRIBOLÓGICO DE
PARAFUSOS DE CLASSE 10.9 PARA EMPREGO EM GUINDASTE OFF-SHORE**

ALESSANDRO DA SILVA ROLIN

Dissertação de Mestrado submetido ao corpo docente do 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. PhD. Eduardo Atem de Carvalho

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JUNHO – 2014**

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

29/2014

Rolin, Alessandro da Silva

Avaliação do comportamento mecânico e tribológico de parafusos de classe 10.9 para emprego em guindastes offshore / Alessandro da Silva Rolin. – Campos dos Goytacazes, 2014.

ix, 129f. : 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, 2014.

Orientador: Eduardo Atem de Carvalho.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

Bibliografia: f. 126-129.

1. PARAFUSOS ESTRUTURAIS 2. TRIBOLOGIA EM PARAFUSOS 3. COEFICIENTE DE ATRITO EM PARAFUSOS 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 EM GUINDASTE OFF-SHORE**

ALESSANDRO DA SILVA ROLIN

“Dissertação de Mestrado submetido ao corpo docente do 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 18 de junho de 2014.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. PAULO FELICIANO SOARES FILHO – IME

Prof. Dr. ALAN MONTEIRO RAMALHO – IFF

Prof. Dr. SAID SÉRGIO MARTINS AUATT – IFF

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

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JUNHO – 2014**

Dedico este trabalho a minha esposa e familiares que souberam compreender as minhas ausências em muitos momentos, mas sempre me incentivaram no alcance de meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Augusto e Marilda por tudo na minha vida. Por todas as lições que me formaram e me tornaram capaz dessa conquista.

À minha esposa Eliana pelo amor e compreensão.

Ao Professor PhD. Eduardo Atem de Carvalho que com sua extrema competência e experiência, me proporcionou a oportunidade, orientação, sugestões e ensinamentos.

A todos os docentes e funcionários do LAMAV-UENF.

A todos os amigos que colaboraram no trabalho e no estudo, em especial a Ronaldo Gonçalves Cruz pelo apoio direto e orientações.

À Petrobrás onde trabalho, por tornar possível a oportunidade do mestrado fornecendo alguns dos recursos necessários ao desenvolvimento deste estudo.

A todos aqueles que de alguma forma me auxiliaram na conclusão deste trabalho e que não foram citados aqui.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar os aspectos mecânicos, metalúrgicos, e principalmente, tribológicos de parafusos estruturais aplicados a guindastes de plataformas offshore. O estudo foi dividido em três etapas. A primeira foi a análise micro-estrutural com objetivos de identificar a composição química, enquadrando o material numa especificação conforme normas internacionais, identificar a matriz metalúrgica e principais micro-constituintes, e finalmente, observar o relevo da superfície utilizando MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura). A segunda etapa teve o objetivo de definir as propriedades de tensão de escoamento, limite de resistência e alongamento do parafuso através do ensaio de tração. O ensaio de dureza junto com o ensaio de tração permitiu enquadrar as propriedades mecânicas perante a norma de fabricação. Também, realizaram-se medições da rugosidade superficial de parafusos novos e usados, estes últimos, lubrificados e secos, após dez aplicações. Esta medição permitiu quantificar o nível de degradação destes parafusos após desmontagens. Finalmente, a terceira etapa foi marcada pelo, assim chamado, “ensaio de torque”. Foi desenvolvido um aparato experimental com diversos sensores que monitoravam em tempo real, variáveis tais como, força de aperto (pré-tensão) e torque aplicado. O fator de torque (K), assim como outras variáveis tribológicas, foi calculado com base em equações específicas. Os resultados foram avaliados em três níveis de aperto e em três condições de montagens, seco, lubrificado e re-lubrificado. Os valores encontrados demonstraram a superioridade do processo de aperto que utiliza parafusos lubrificados. Também se percebeu claramente que o re-aperto muda a condição de pré-tensão no parafuso devido a mudanças superficiais.

Palavras-chaves: Parafusos estruturais, tribologia em parafusos e coeficiente de atrito em parafusos.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate mechanical and metallurgical aspects, mainly tribological, of structural bolts employed in cranes working at offshore platforms. The study was divided into three stages. The first was the micro - structural analysis aimed to identify the chemical composition, material specification in accordance with international standards, to identify the main metallurgical and micro - matrix constituents, and finally to observe the surface using SEM (Scanning Electron Microscope). The second stage aimed to define the properties of the yield strength, tensile strength and elongation of the bolt through the tension test. The hardness test with the tension test frame allowed the mechanical properties against the standard of workmanship. Also, measurements were taken of the surface roughness of new and used dry bolts, the latter lubricated and after ten applications. This measurement allowed to quantify the level of degradation of these screws after disassembly. Finally, the third stage was marked by the so-called "test torque ". An experimental apparatus with various sensors monitored in real time variables such as grip force (pré-tension) was conceived and applied torque. The torque factor (K), as well as other tribological variables, was calculated based on specific equations. The results were evaluated at three levels of grip and three assembly conditions, dry, lubricated and re-lubricated. The values found show the superiority of the fastening process using bolts lubricated. Also clearly realized that the re-tightening changes the state of pre -stress in the bolt due to superficial changes.

Keywords: Structural bolts, tribology in bolts and coefficient of friction in bolts.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABELAS	X
ÍNDICE DE NOMENCLATURA	XI
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 Aspectos Gerais	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Justificativas	3
1.3.1 Importância Científica	3
1.3.2 Importância Econômica	3
1.3.3 Importância Tecnológica	3
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 O GUINDASTE OFFSHORE	4
2.2 O PARAFUSO	7
2.3 PROPRIEDADES METALÚRGICAS E MECÂNICAS DE PARAFUSOS	9
2.3.1 PROPRIEDADES METALÚRGICAS	9
2.3.1.1 Os Aços – Designação e Classificação	9
2.3.1.2 O Aço AISI/SAE 4140 (UNS-41400)	11
2.3.1.3 O Aço AISI/SAE 5140 (UNS-51400)	13
2.3.1.4 Microconstituintes	14
2.3.1.5 A norma ASTM – Aspectos Metalúrgicos	17
2.3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS	18
2.3.2.1 Propriedades Mecânicas dos Metais	19
2.3.2.2 Determinação de Propriedades Mecânicas	20
2.3.2.3 A norma ASTM – Propriedades Mecânicas	21
2.4 MÉTODOS DE APERTO DE UNIÕES APARAFUSADAS	26

2.4.1	CONTROLE DE TORQUE DE APERTO	26
2.4.2	CONTROLE DE ÂNGULO DE APERTO	29
2.4.3	CONTROLE DE APERTO AO ESCOAMENTO	29
2.4.4	MÉTODO DE ESTIRAMENTO DO PARAFUSO	29
(TENSIONAMENTO)		
2.4.5	MÉTODO DE ESTIRAMENTO PELO CALOR	30
2.5	COEFICIENTE DE ATRITO	31
2.6	SISTEMAS DE FORÇAS E ATRITO NOS PARAFUSOS	33
2.7	O FATOR DE TORQUE “K”	37
2.8	CONDIÇÃO SUPERFICIAL - MONTAGEM	39
2.8.1	RUGOSIDADE	39
2.8.1.1	Formas de medir a Rugosidade Superficial	44
2.8.2	COBERTURA DE FOSFATO	46
2.8.3	LUBRIFICANTES	47
2.8.3.1	GRAXAS	48
2.8.3.1.1	Espessantes	48
2.9	INCERTEZA DE MEDIÇÃO	49
CAPÍTULO 3:	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1	MATERIAIS A SEREM ENSAIADOS	53
3.2	MATRIZ DE ENSAIOS E MATERIAIS	53
3.2.1	Análise Micro-Estrutural	53
3.2.2	Microscopia Eletrônica de Varredura/Espectrometria	54
3.2.3	Medição de Rugosidade	55
3.2.4	Ensaio de Tração	55
3.2.5	Ensaio de Dureza	56
3.2.6	Ensaio de Torque	57
CAPÍTULO 4:	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	Análise micro-estrutural	61
4.1.1	Metalografia	61
4.1.2	Análise química do parafuso	65

4.2 Microscopia Eletrônica por MEV	67
4.3 Medição de Rugosidade	69
4.4 Ensaio de Tração	74
4.5 Ensaio de Dureza	79
4.6 Ensaio de Torque	80
4.6.1 Dados coletados no Torque Lubrificado	83
4.6.2 Dados coletados no Torque Seco	92
4.6.3 Dados coletados no parafuso Re-Lubrificado	98
4.6.4 Análise Estatística de Dados	101
4.6.4.1 Parafuso Lubrificado	102
4.6.4.2 Parafuso Seco	108
4.6.4.3 Parafuso RE-Lubrificado	112
4.6.5 Análise Global e Comparação de Resultados	114
4.6.5.1 Condição de Montagem	114
4.6.5.2 Nível de Torque	117
4.7 Incerteza do Método de Ensaio	119
4.8 Avaliação Final com MEV	120
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	122
5.1 Análise Micro-Estrutural	122
5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) – Como Recebido.	122
5.3 Medição de Rugosidade	122
5.4 Ensaio de Tração	122
5.5 Ensaio de Dureza	123
5.6 Ensaio de Torque	123
5.7 Incerteza do Método de Medição	125
5.8 Avaliação Final com MEV	125
CAPÍTULO 6: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de guindastes, conforme a API 2C.	4
Figura 2.2: Exemplos de guindaste offshore.	5
Figura 2.3: Foto apresentando a ligação aparafusada pedestal x chassi.	6
Figura 2.4: Padronização da nomenclatura das dimensões de parafusos.	7
Figura 2.5: Identificação do passo de rosca.	8
Figura 2.6: Diagrama TTT para o aço AISI 4140.	12
Figura 2.7: Curva do ensaio Jominy para o aço SAE-4140.	13
Figura 2.8: Curva do ensaio Jominy para o aço SAE-5140.	14
Figura 2.9: Formação da martensita (placas e ripas) em ligas Fe-C.	14
Figura 2.10: Local de teste para dureza arbitrária.	24
Figura 2.11: Corpo de prova de tração para parafuso com usinagem no corpo.	24
Figura 2.12: Corpo de prova extraído do parafuso.	25
Figura 2.13: Exemplo de corpo de prova de seção reduzida.	25
Figura 2.14: Aplicação manual de torqueamento.	27
Figura 2.15: Aplicação hidráulica de torqueamento.	28
Figura 2.16: Equipamento tensionador.	30
Figura 2.17: Forças agindo no plano inclinado da rosca.	33
Figura 2.18: Forças agindo no filete de rosca.	34
Figura 2.19: Diagrama de corpo livre das forças na hélice da rosca.	38
Figura 2.20: Força de atrito na rosca.	38
Figura 2.21: Micrografia elétr. de amostra de cobre polida mecanicamente	40
Figura 2.22: Micrografia eletrônica de ouro eletrodepositado em latão.	40
Figura 2.23: Perspectiva de rugosidades em função da superfície.	40
Figura 2.24: Termos básicos para a medição de uma superfície.	41
Figura 2.25: Definição de rugosidade Ra.	41
Figura 2.26: Definição de rugosidade Rp e Rt.	43
Figura 2.27: Definição das rugosidades singulares e do parâmetro Rz.	44
Figura 2.28: Operação de rugosímetros com apalpador mecânico.	45
Figura 2.29: Princípios de operação de rugosímetros ótico.	46
Figura 2.30: a) Parafuso fosfatizado à direita (preto). b) Sem revestimento.	47
Figura 3.1: Microscópio Olympus ComFocal.	54
Figura 3.2: Microscópio Shimadzu SSX-550 SuperScan.	54
Figura 3.3: Espectrômetro Test-Master Pro.	55

Figura 3.4: Máquina de ensaio de tração Instron.	55
Figura 3.5: Posição de extração de corpo de prova de tração.	56
Figura 3.6: Dimensões básicas de corpo de prova usinado.	56
Figura 3.7: Micro-Durômetro.	56
Figura 3.8: Bancada para realização de torqueamento.	57
Figura 3.9: Equipamentos utilizados no experimento: A – Torqueadeira eletrônica; B - Visor da arruela sensora; C – Arruela sensora; D – Soquete digital.	57
Figura 3.10: Torqueadeira eletrônica.	58
Figura 3.11: Células de carga para medição de Torque (soquete digital).	58
Figura 3.12: Células de carga para medição da força de aperto (arruela sensora).	59
Figura 3.13: Arranjo do experimento sugerido pela norma.	59
Figura 4.1: Amostras cortadas e preparadas.	61
Figura 4.2: Amostras embutidas (arruela).	61
Figura 4.3: Região central do parafuso ($20 \mu_m$).	62
Figura 4.4: Região próxima à superfície do parafuso ($20 \mu_m$).	62
Figura 4.5: Região roscada do parafuso – corte longitudinal (400, 200, 100, 40 e $20 \mu_m$).	63
Figura 4.6: Região central da porca ($20 \mu_m$).	64
Figura 4.7: Região central da arruela ($20 \mu_m$).	64
Figura 4.8: Composição química do parafuso.	65
Figura 4.9: Micro-análise com MEV.	65
Figura 4.10: Composição química do aço SAE-5140 (UNS-51400).	66
Figura 4.11: Composição química conforme ASTM A-304-11.	66
Figura 4.12: Relevo da rosca de parafuso – “como recebido”. a) 19x; b) 45 x.	67
Figura 4.13: Relevo da rosca de parafuso – “como recebido” a) 50 x; b) 150 x.	67
Figura 4.14: Detalhe do filete (Ampliação de 400x).	67
Figura 4.15: Medição da rugosidade da rosca.	69
Figura 4.16: Região de rosca para medição – “como recebida” ($100 \mu_m$).	69
Figura 4.17: Resultados da medição na rosca nova (como recebida).	70
Figura 4.18: Região de rosca para medição – Lubrificada ($100 \mu_m$).	70
Figura 4.19: Rugosidade na Rosca Lubrificada.	71

Figura 4.20: Região de rosca para medição – Seca ($100 \mu_m$).	72
Figura 4.21: Rugosidade na Rosca Seca.	72
Figura 4.22: Gráfico de força x deslocamento (CP1, CP2, CP3 e CP4).	74
Figura 4.23: Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Absoluta (CP1, CP2, CP3 e CP4).	75
Figura 4.24: Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Relativa (CP1, CP2, CP3 e CP4).	75
Figura 4.25: CP-1. Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Relativa. A linha preta no gráfico indica a tensão de escoamento a 0,2% de deformação (tensão de escoamento a 0,2 % de off-set).	76
Figura 4.26: CP-2. Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Relativa.	76
Figura 4.27: CP-3. Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Relativa. A linha preta no gráfico indica a tensão de escoamento a 0,2% de deformação (tensão de escoamento a 0,2 % off-set).	77
Figura 4.28: CP-4. Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Relativa.	77
Figura 4.29: Impressões de dureza Vickers (HV).	79
Figura 4.30: Equipamentos utilizados no experimento: A – Torqueadeira eletrônica; B - Visor da arruela sensora; C – Arruela sensora; D – Soquete digital.	80
Figura 4.31: Variação de força versus ciclo com torque de 1450 Nm.	84
Figura 4.32: Variação do atrito total versus ciclo com torque de 1450 Nm.	84
Figura 4.33: Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 1450 Nm.	85
Figura 4.34: Variação de força versus ciclo com torque de 2034 Nm.	87
Figura 4.35: Variação do atrito total versus ciclo com torque de 2034 Nm.	87
Figura 4.36: Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 2034 Nm.	88
Figura 4.37: Variação de força versus ciclo com torque de 2441 Nm.	90
Figura 4.38: Variação do atrito total versus ciclo com torque de 2441 Nm.	90
Figura 4.39: Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 2441 Nm.	91
Figura 4.40: Variação de força versus ciclo com torque de 1450 Nm.	93
Figura 4.41: Variação do atrito total versus ciclo com torque de 1450 Nm.	93
Figura 4.42: Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 1450 Nm.	94
Figura 4.43: Variação de força versus ciclo com torque de 2441 Nm.	96
Figura 4.44: Variação do atrito total versus ciclo com torque de 2441 Nm.	96
Figura 4.45: Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 2441 Nm.	97

Figura 4.46: Variação de força versus ciclo com torque de 2034 Nm.	99
Figura 4.47: Variação do atrito total versus ciclo com torque de 2034 Nm.	99
Figura 4.48: Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 2034 Nm.	100
Figura 4.49: Valores médios (móvel) de K com torque de 1450 Nm.	102
Figura 4.50: Valores médios (fixo) de K com torque de 1450 Nm.	102
Figura 4.51: Valores médios (móvel) de K com torque de 2034 Nm.	104
Figura 4.52: Valores médios (fixo) de K com torque de 2034 Nm.	104
Figura 4.53: Valores médios (móvel) de K com torque de 2441 Nm.	106
Figura 4.54: Valores médios (fixo) de K com torque de 2034 Nm.	106
Figura 4.55: Valores médios (móvel) de K com torque de 1450 Nm.	108
Figura 4.56: Valores médios (fixo) de K com torque de 1450 Nm.	108
Figura 4.57: Valores médios (móvel) de K com torque de 2441 Nm.	110
Figura 4.58: Valores médios (fixo) de K com torque de 2441 Nm.	110
Figura 4.59: Valores médios (móvel) de K com torque de 2034 Nm.	112
Figura 4.60: Valores médios (fixo) de K com torque de 2034 Nm.	112
Figura 4.61: Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 1450, 2034 e 2441 Nm – Parafuso Lubrificado.	114
Figura 4.62: Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 1450 e 2441 Nm – Parafuso seco.	115
Figura 4.63: Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 1450, 2034 e 2441 Nm - Parafuso lubrificado e re-lubrificado.	116
Figura 4.64: Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 1450 Nm lubrificado e seco.	117
Figura 4.65: Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 2034 Nm lubrificados e Re-lubrificados.	117
Figura 4.66: Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 2441 Nm lubrificado e Seco.	118
Figura 4.67: Imagem do MEV geradas após dez torqueamentos.	120

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Designação básica de alguns aços (NBR NM 87:2000, p.3)	10
Tabela 2.2: Requisitos químicos para parafusos Tipo 1	17
Tabela 2.3: Dureza para tamanhos de parafusos M12 a M36, inclusive.	21
Tabela 2.4-a: Requisitos de tração para parafusos de corpo inteiro.	22
Tabela 2.4-b: Requisitos de tração para parafusos de corpo inteiro.	22
Tabela 2.5: Resistência a tração para corpos de prova usinados.	23
Tabela 2.6: Precisão de Métodos de Aplicação de Pré-carga em Parafuso.	26
Tabela 2.7: Exemplo de tabela de torque versus pressão.	28
Tabela 2.8: Definição de rugosidade Ra com classe de rugosidade.	42
Tabela 2.9: Várias rugosidades Ra com processos de usinagem.	42
Tabela 3.1: Descrição da Matriz de Ensaios.	53
Tabela 3.2: Planejamento de ensaios de torque nos parafusos.	59
Tabela 3.3: Registro dos ensaios de torque.	60
Tabela 4.1: Medições de Rugosidade das roscas novas (como recebida).	70
Tabela 4.2: Medições de Rugosidade das roscas lubrificadas.	71
Tabela 4.3: Medições de Rugosidade das roscas secas.	72
Tabela 4.4: Resumo das medições de Rugosidade das roscas.	73
Tabela 4.5: Propriedades mecânicas do ensaio de tração.	78
Tabela 4.6: Medições de dureza no parafuso.	79
Tabela 4.7: Matriz de ensaios de torqueamento.	81
Tabela 4.8: Torque de 1450 Nm e Lubrificado.	83
Tabela 4.9: Torque de 2034 Nm e Lubrificado.	86
Tabela 4.10: Torque de 2441 Nm e Lubrificado.	89
Tabela 4.11: Torque de 1450 Nm e Seco.	92
Tabela 4.12: Torque de 2441 Nm e Seco.	95
Tabela 4.13: Torque de 2034 Nm e RE-Lubrificado.	98
Tabela 4.14: Esquema mostrando o tratamento de dados.	101
Tabela 4.15: Tratamento estatístico de K (1450Nm lubrificado).	103
Tabela 4.16: Tratamento estatístico de K (2034 Nm lubrificado).	105
Tabela 4.17: Tratamento estatístico de K (2441 Nm lubrificado).	107
Tabela 4.18: Tratamento estatístico de K (1450 Nm seco).	109
Tabela 4.19: Tratamento estatístico de K (2441 Nm seco).	111
Tabela 4.20: Tratamento estatístico de K (2034 Nm lubrificado).	113

ÍNDICE DE NOMENCLATURA

- API - American Petroleum Institute
- API SPEC 2c - Specification for offshore pedestal mounted cranes
- AISI - American Iron and Steel Institute
- NBR - Norma Brasileira
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- SAE - American Society Engineering
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- CCC - Cúbico de corpo centrado
- TCC - Tetragonal de corpo centrada
- ASTM A-490 - Standard Specification for Structural Bolts, Alloy Steel, Heat Treated, 150 ksi Minimum Tensile Strength
- ASTM F606 - Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, Direct Tension Indicators, and Rivets¹
- ISO - International Organization for Standardization
- ISO 16047 - Fasteners — Torque/clamp force testing
- DIN - Deutsches Institut für Normung
- DIN 946 - Determination of Coefficient of Friction of Bolt/nut Assemblies under specified conditions
- JIS - Japanese Industrial Standards
- VDI 2601 - Requirements on the surface structure to cover function capability of surfaces manufactured by cutting: List of parameters
- VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia
- MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura
- RBC Rede Brasileira de calibração

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 – Aspectos Gerais

Os guindastes são máquinas que se destinam à movimentação de cargas na indústria e nos canteiros de obra.

Numa plataforma offshore, de exploração e/ou produção de petróleo, o guindaste é o principal mecanismo de movimentação de cargas. O mesmo é responsável por todas as cargas que excedem a capacidade humana, que vai desde uma simples organização do convés, movimentações com a sonda, passando por retirar cargas de um rebocador, até o transporte de passageiros em operações de “transbordo” de pessoal de uma unidade para outra.

Este equipamento é caracterizado como crítico a bordo de suas unidades, pois a sua inoperância pode ser sinônimo de parada de produção e a sua falha em operação pode resultar num acidente com a planta de processo e até mesmo custar vidas humanas. Por este motivo as manutenções preventivas devem ser seguidas rigorosamente, conforme os intervalos definidos.

Neste equipamento, sua ligação ao pedestal (tubulão offshore) é constituída através de uma junta aparafusada.

Os parafusos desta junta, devido a sua função estrutural e responsabilidade, são cuidadosamente especificados seguindo as orientações do fabricante. Sua montagem também é efetuada, buscando-se uma força de aperto adequada e homogênea, de modo a se obter a máxima durabilidade e segurança. Além disso, a manutenção da força de aperto é verificada periodicamente nas manutenções de rotina.

Um parâmetro fundamental neste processo, e que contribui decisivamente para o sucesso do aperto, é o conhecimento dos atritos atuantes na junta, sejam sob a porca e entre os fios de rosca. Apesar da literatura especializada apresentar uma grande variedade de abordagens teóricas, neste trabalho serão determinados estes parâmetros específicos para a junta aparafusada em questão.

1.2 - Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo avaliar os aspectos mecânicos, metalúrgicos, e principalmente, tribológicos de parafusos estruturais aplicados a guindastes de plataformas offshore. Foram estudados os parafusos com diâmetro nominal de 1 ¼ in, com passo de rosca de 7 fios por polegada, classe de resistência 10.9, sem revestimento anti-corrosivo (apenas oleado de têmpera), fabricados conforme a norma ASTM A-490 (1 ¼"x7UNC).

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Verificar e quantificar as propriedades mecânicas e metalúrgicas destes materiais, caracterizando a microestrutura das condições de como recebido;
- Utilizar espectrometria de emissão ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para confirmar a composição química da liga. Ainda com MEV, avaliar qualitativamente a condição superficial do relevo antes do primeiro aperto (como recebido);
- Verificar e quantificar a rugosidade dos parafusos no estado de como recebidos, utilizando microscópio COMFOCAL;
- Verificar e quantificar o fator de torque para a condição de montagem seco, lubrificado e re-lubrificado em três patamares de pré-tensão;
- Verificar e avaliar o aspecto superficial do relevo pós-aperto utilizando (MEV);
- Verificar e avaliar o fator de torque (K), em três níveis de aperto e três condições de montagem, seco, lubrificado e re-lubrificado. Observar como esta variável se comporta ao longo de apertos sucessivos.

1.3 - JUSTIFICATIVAS

1.3.1 – Importância Científica

Do ponto de vista científico, a literatura disponível sobre o assunto possui uma gama de valores de coeficientes de atrito para várias condições de montagem e vários diâmetros de parafusos, no entanto, alguns autores divergem sobre aspectos do mesmo assunto. Percebe-se também certa carência destas informações para parafusos de grandes diâmetros, especialmente, para o uso “offshore”.

1.3.2 – Importância Econômica

Os aspectos econômicos estão associados à durabilidade dos parafusos em serviço e ao ajuste no intervalo de manutenção, que eventualmente, poderá ser efetuado após conhecimento mais detalhado dos aspectos técnicos pretendidos.

1.3.3 – Importância Tecnológica

As condições especiais dos parafusos de guindastes, sob o aspecto da segurança, associado a grande responsabilidade destes elementos (não podem falhar em serviço) justificam o investimento de recursos para a definição dos parâmetros envolvidos na sua instalação ou manutenção. Dentre tais parâmetros são especialmente importantes os aspectos tribológicos (atrito) inerentes ao contato do parafuso, porcas e roscas, como citado acima.

A durabilidade dos parafusos estruturais em serviço está diretamente ligada à aplicação e manutenção de uma força de aperto especificada. Tal parâmetro, força de aperto, assim como o valor de torque correspondente, são fundamentais em processos de manutenção, por exemplo. Neste contexto, o conhecimento dos fatores de atrito é determinante de modo a relacionar adequadamente estes dois parâmetros (força e torque).

A Uenf, com seu laboratório LAMAV (Laboratório de Materiais Avançados) possui grande parte dos equipamentos necessários à realização dos ensaios. Alguns equipamentos serão cedidos pela Petrobrás para viabilização plena dos trabalhos. A cooperação se dá devido ao interesse da companhia em melhorar sua eficiência operacional, visto que a área de petróleo na região está em franca expansão.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O GUINDASTE OFFSHORE

A norma API SPEC 2c especifica e detalha os requisitos para projeto, construção e testes de guindaste montados em pedestal offshore. Guindastes offshore são definidos na norma como dispositivos de içamento montados em pedestal capazes de elevar e girar com cargas e pessoas de embarcações e estruturas, conforme as figuras 2.1 e 2.2-a e b (API SPEC 2C, 2004).

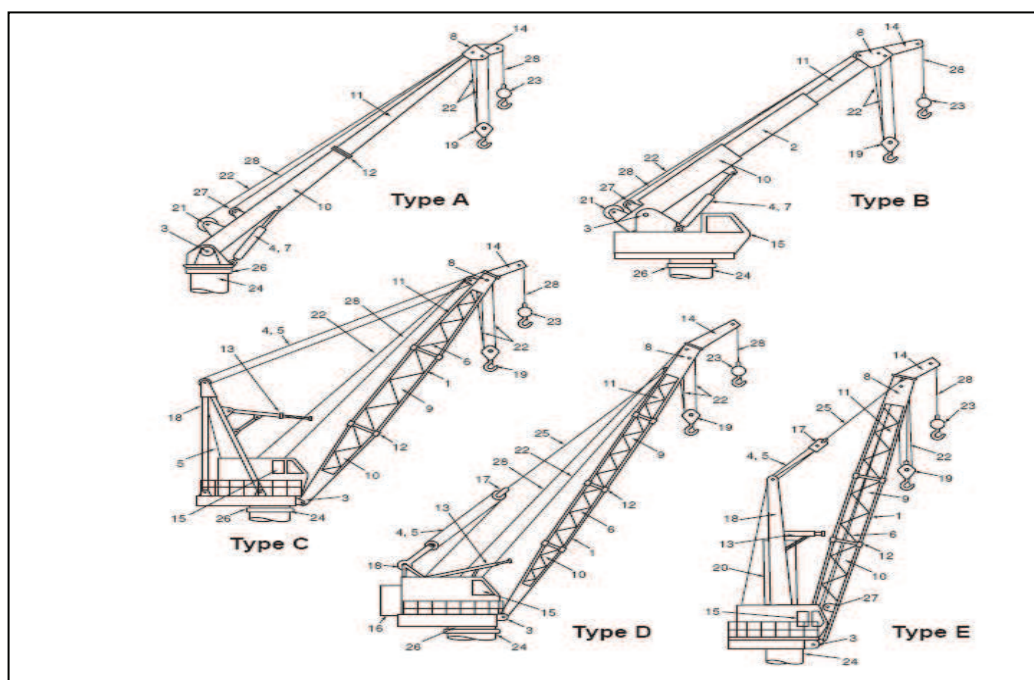


Figura (2.1) – Tipos de guindastes (API SPEC 2C, 2004).

O objetivo desta especificação é estabelecer os limites de carga de trabalho segura. Esta, por sua vez, é baseada na tensão admissível e nos fatores de segurança. Operações do guindaste fora desta especificação podem resultar em falha catastrófica até incluindo a separação do guindaste de sua fundação (API SPEC 2C, 2004).



(a)



(b)

Figura (2.2a e 2.2b) – Exemplos de guindaste offshore.

Neste contexto, a correta especificação e manutenção do elemento de fixação que une o equipamento ao pedestal é fundamental. O parafuso desempenha este papel, e por isso, ocupa lugar de destaque em todo este processo.



(a)

(b)

Figura (2.3a e 2.3b) – Foto apresentando a ligação aparafusada pedestal x chassi.

Nas figuras 2.3a e b, ilustram junta aparafusada com parafusos da união rolamento de giro ao chassi e outros parafusos da união rolamento de giro ao pedestal. Esta é a principal aplicação dos parafusos estruturais ao equipamento guindaste offshore, pois a consequência da eventual falha destes elementos pode causar danos materiais sérios ou mesmos à vida humana.

Em um guindaste de terra, chamado de onshore, a reação promovida pelo equipamento para manter o equilíbrio se dá pelo peso próprio do chassi, com apoio do contra-peso, ou até mesmo, a chamada “patola”. Já no guindaste offshore, tal responsabilidade é atribuída integralmente ao parafuso do rolamento de giro (citado acima).

2.2 O PARAFUSO

Especificamente em uma junta aparafusada a 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 sobretensão (Bickford, 1995).

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

Quanto à geometria e terminologias, a figura 2.4 apresenta os aspectos mais importantes.

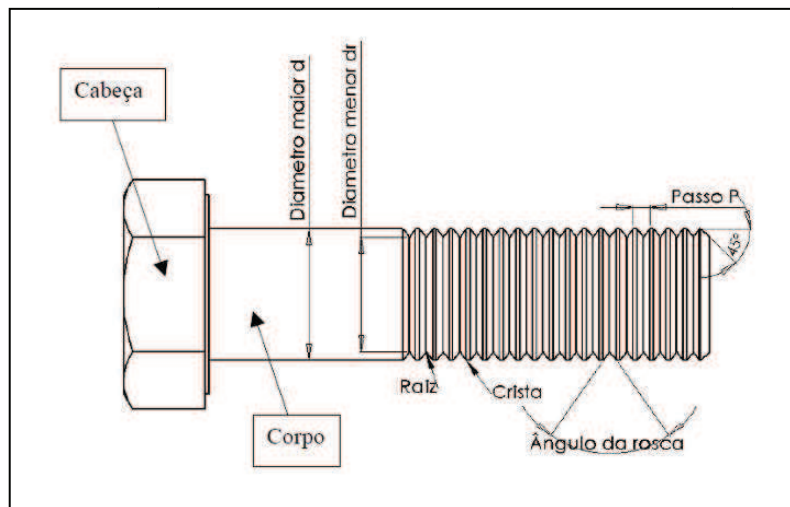


Figura (2.4) – Padronização da nomenclatura das dimensões de parafusos.

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

A figura 2.5 apresenta a forma de identificação do passo de rosca através de calibre normalizado.



Figura (2.5) – Identificação do passo de rosca.

O diâmetro “d” é o maior diâmetro de uma rosca de parafuso. O diâmetro “ d_r ” é o menor diâmetro de uma rosca de parafuso.

A norma de rosca American National (Unified) foi aprovada nos Estados Unidos e na Grã-Bretanha para uso em todos os produtos rosqueados padronizados. O ângulo de rosca é de 60 graus, e as cristas da rosca podem ser planas ou arredondadas (Shigley, 2005). É comum encontrar no Brasil roscas Withworth (também denominado rosca inglesa) cujo ângulo do filete é 55 graus.

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

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

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

2.3 PROPRIEDADES METALÚRGICAS E MECÂNICAS DE PARAFUSOS

2.3.1 PROPRIEDADES METALÚRGICAS

2.3.1.1 Os Aços – Designação e Classificação

De uma forma geral, o aço é uma liga metálica composta principalmente de ferro e de pequenas quantidades de carbono, geralmente entre 0,008% a 2,14% C. Os ferros fundidos também são ligas ferro-carbono, que, no entanto diferem-se dos aços por terem em sua estrutura uma maior quantidade de carbono, que está compreendida entre 2,14 e 6,7% C. Além disso, os aços são agrupados em função de seu teor de carbono, como aços de alto, médio e baixo carbono, e ainda temos outras designações como aços-liga, aços-ferramentas e diversos aços especiais que vêm sendo desenvolvidos para as mais diversas aplicações (Callister, 2002).

Devido a grande quantidade de aços e ligas que surgiram, houve a necessidade de um sistema de identificação que permitisse a rápida rastreabilidade sobre o tipo de material com o qual se está lidando, algumas entidades internacionais buscaram estabelecer um método que padronizasse e que estabelecesse algum critério para possibilitar essa identificação. Para isso, a designação desenvolvida foi uma metodologia numérica que com sua leitura é possível definir os elementos de liga e o conteúdo de carbono dos aços.

A ABNT, (Associação Brasileira de Normas Técnicas), conta em seu acervo com algumas normas técnicas de referência para a designação dos aços. A tabela abaixo foi construída a partir de dados extraídos da norma ABNT NBR NM 87:2000 afim de elucidar e demonstrar a aplicação do critério supracitado.

Tabela (2.1) – Designação básica de alguns aços (NBR NM 87:2000, p.3)

Designação básica de alguns aços		
Aços carbono	de baixo e médio manganês	10XX
	com adição de Nb	14XX
	de alto manganês	15XX
Aços ligados ao	Níquel	23XX
	níquel-cromo	30XX
	cromo-molibdênio	41XX
	níquel-cromo-molibdênio	43XX
Aços carbono e ligados	Boro	XXBXX
	Chumbo	XXLXX
	Enxofre	XXSXX

O sistema de numeração possibilitou a identificação e caracterização primária da composição química dos materiais, como segue abaixo.

O aço carbono comum: É designado com 1 como primeiro dígito e 0 como segundo, já que não há nenhum elemento de liga além do carbono. Os aços de baixo carbono são os de numeração AISI 1005 a 1030, os de médio carbono de 1035 a 1055 e os de alto carbono, de 1060 a 1095 (Norton, 2004).

Os aços liga: Contêm vários elementos adicionados em pequenas quantidades para melhorar a resistência do material, sua capacidade de ser endurecido, resistência à temperatura, resistência à corrosão e outras propriedades. Qualquer nível de carbono pode ser combinado com esses elementos de liga. Adiciona-se cromo para melhorar resistência, ductilidade, tenacidade, resistência ao desgaste e capacidade de ser endurecido. Também se adiciona níquel para melhorar a resistência sem perda de ductilidade, e ele também eleva a capacidade de receber endurecimento superficial. O molibdênio, utilizado em combinação com níquel e/ou cromo, acrescenta dureza, reduz fragilidade e aumenta a tenacidade. Muitos outros elementos de liga podem ser adicionados em combinações variadas para alcançar propriedades específicas (Norton, 2004).

Dentre a grande família existente de aços, destacamos aqui o aço ABNT4140 (UNS-41400), objeto desse estudo, como sendo um aço ligado ao cromo-molibdênio de média temperabilidade, que combina alta resistência com elevada tenacidade.

É muito utilizado em peças que exigem elevada dureza, resistência e tenacidade. Usado em automóveis, aviões, virabrequins, bielas, eixos, engrenagens, armas, parafusos, equipamentos para a indústria do petróleo.

Apresenta diversas condições de fornecimento, tais como: barras laminadas trefiladas, barras laminadas retificadas ou sem acabamento, barras forjadas dentre outras.

2.3.1.2 O Aço AISI/SAE 4140 (UNS-41400)

Os aços da família AISI/SAE 41XX são usados em aplicações de engenharia na condição “temperado e revenido” ou “normalizado”, este último quando é necessário assegurar elevados níveis de tenacidade. Os aços baixa liga dessa família, especialmente o 4130 e o 4140, estão entre os aços mais usados na indústria do petróleo em aplicações de alta resistência. Esses aços se apresentam em destaque do ponto de vista de utilização porque são facilmente tratados termicamente para os níveis de resistência requeridos pelos códigos API (American Petroleum Institute), são relativamente baratos e bastante disponíveis no mercado (Dufour, 2002). Entre suas aplicações, podemos citar a fabricação de parafusos, onde o mesmo é largamente empregado nas classes de resistência 10.9, apesar da norma de fabricação não especificá-lo diretamente.

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

A partir dos principais aços dessa classe (AISI/SAE 4130, 4140 e 4150), são feitas modificações na composição química para se alcançar otimização de alguma propriedade específica, porém nenhum novo aço comercial foi desenvolvido durante os últimos anos. Os estudos voltados para essa classe de aços têm objetivado o aumento da ductilidade e tenacidade, a minimização da variação das propriedades e conseqüentemente uma maior confiabilidade em serviço, através da melhoria e inovações de técnicas de refino e processamento e também através de um maior controle do processamento e inspeção (Philip, 1990).

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

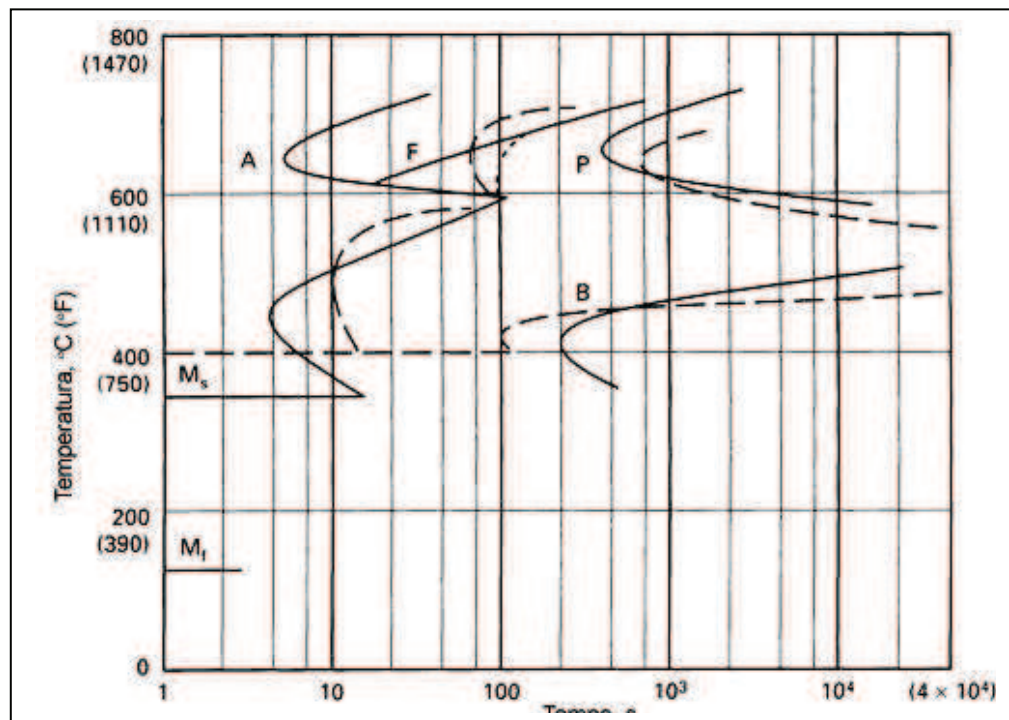


Figura (2.6) - Diagrama TTT para o aço AISI 4140 (Ericsson, T. 1991).

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

A figura 2.7 apresenta a curva do ensaio Jominy para o aço SAE-4140 (UNS 41400).

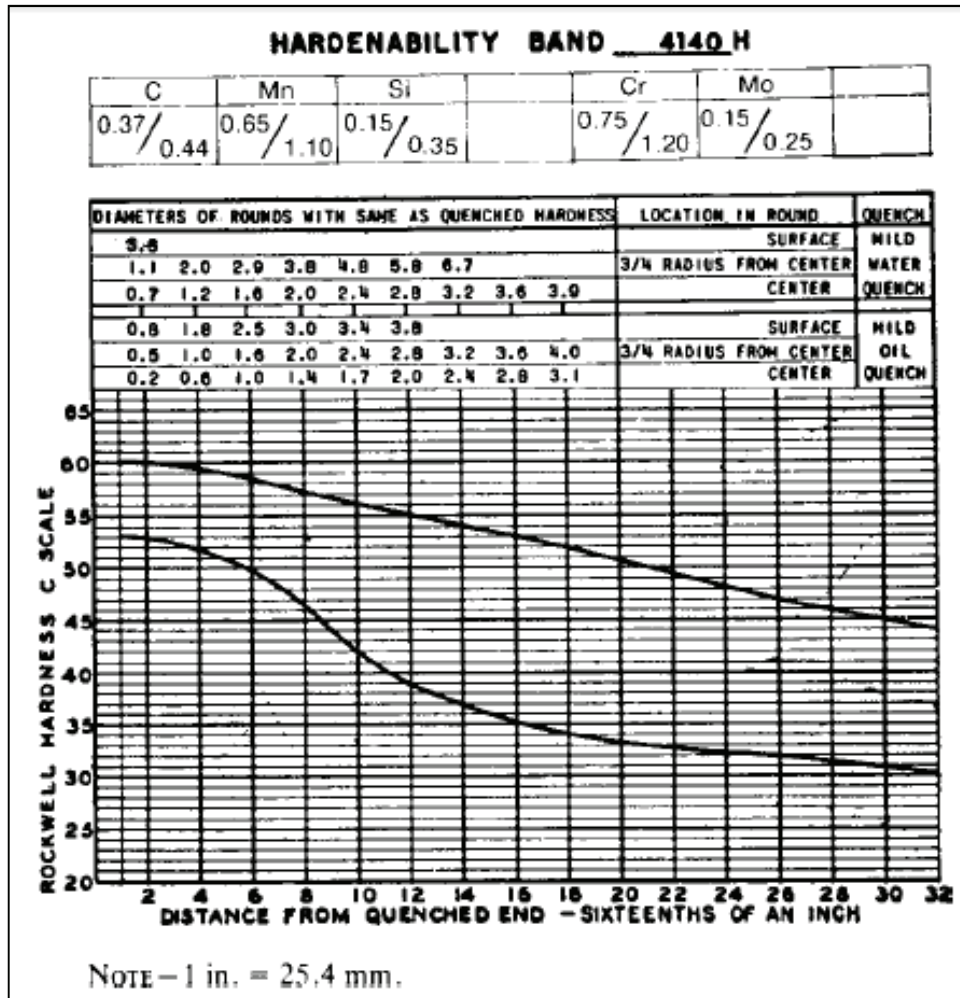


Figura (2.7) - Curva do ensaio Jominy para o aço SAE-4140 (ASTM A304-2011).

2.3.1.3 O Aço AISI/SAE 5140 (UNS-51400)

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

A figura 2.8 apresenta a curva do ensaio Jominy para o aço SAE-4140 (UNS 41400).

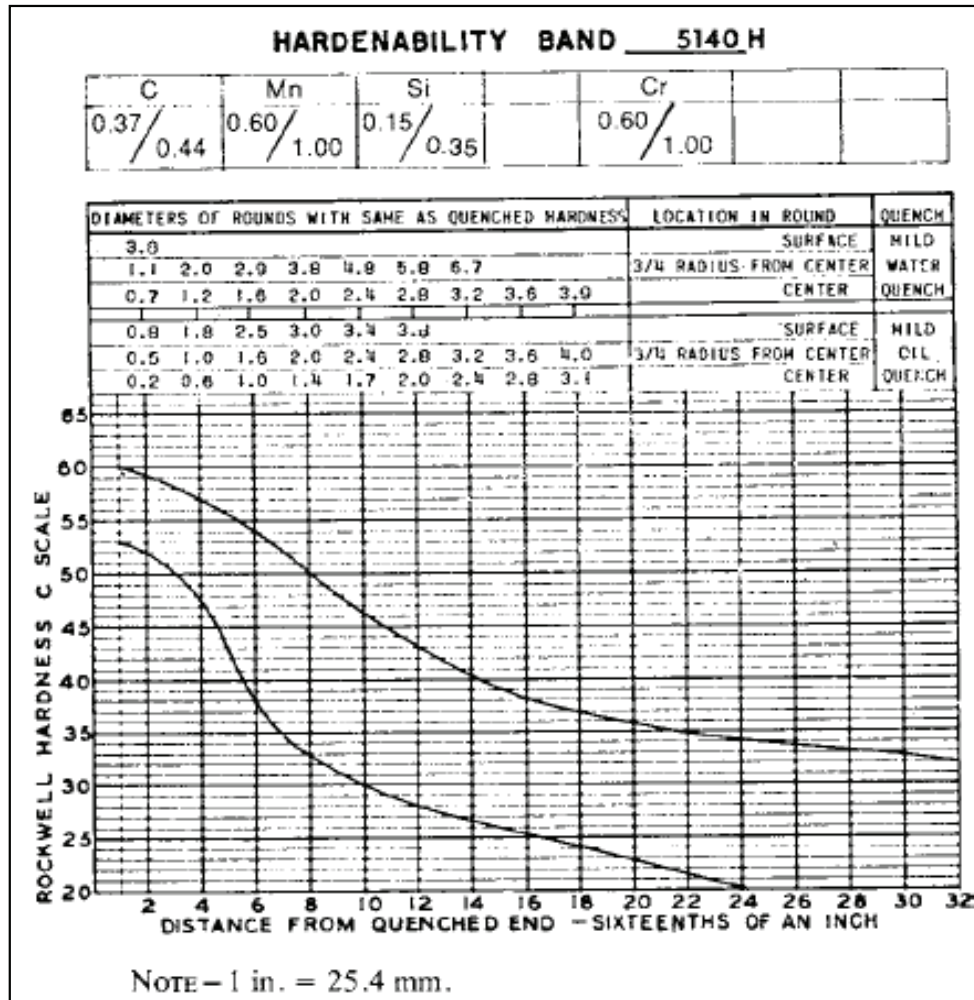


Figura (2.8) - Curva do ensaio Jominy para o aço SAE-5140 (ASTM A304-2011).

2.3.1.4 Microconstituintes

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).

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, sendo esta explicação válida para um aço ao carbono.

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 sendo também classificada como transformação atérmica. (Jacobs, 2004) 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).

No diagrama tempo-temperatura-transformação dos aços pode-se observar que existe uma faixa larga de temperatura em que não há formação de perlita ou martensita. Nesta região ocorre a formação de agregados finos de ripas de ferrita e partículas de cementita, cuja estrutura é denominada bainita. A bainita pode ser formada com altas taxas de resfriamento para impedir a formação de perlita, sem, no entanto, formar martensita. Todavia, existem semelhanças estruturais e de transformação tanto com a perlita quanto com a martensita (Bhadeshia, 2002).

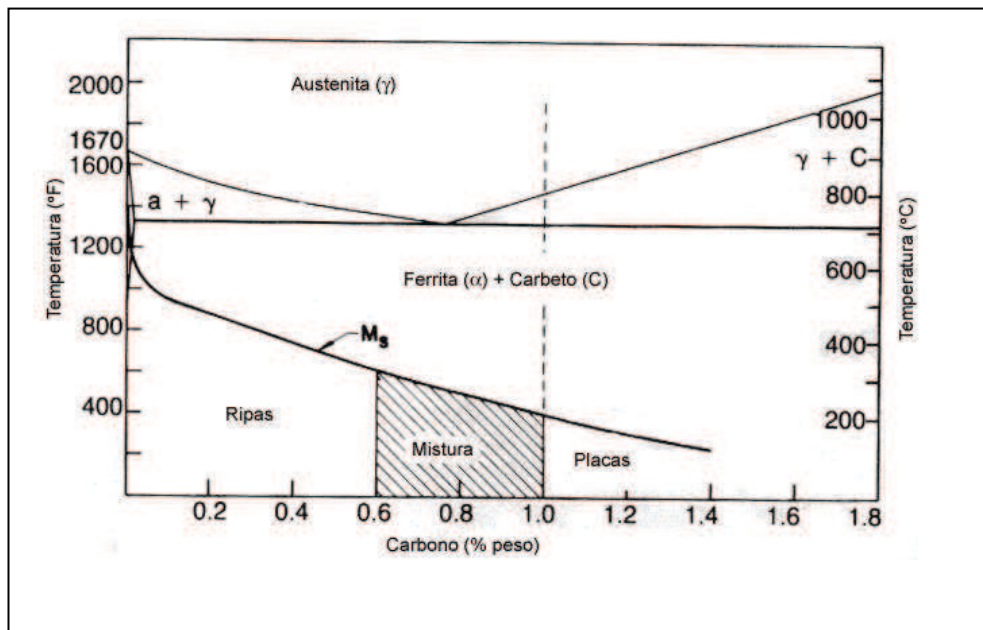


Figura (2.9) - Faixas de formação da martensita em placas e da martensita em ripas em ligas Fe-C. (Krauss, G., 1995)

Da mesma forma que a perlita, a bainita é uma mistura das fases ferrita e cementita, e é por isso dependente da divisão controlada por difusão dos átomos de carbono entre ferrita e cementita. Por outro lado, a estrutura da bainita difere da perlita uma vez que a ferrita e a cementita são arranjadas de forma não lamelar cuja característica depende da composição da liga e da temperatura de transformação. Semelhante à martensita, a ferrita da bainita pode estar na forma de ripas ou placas contendo uma estrutura de discordâncias e, por isso, em determinada extensão, o mecanismo de formação da bainita envolve tanto cisalhamento como difusão (Krauss, 1995).

Podem ser identificadas algumas formas da bainita, basicamente superior, inferior e granular, entretanto nos aços baixa liga tratáveis termicamente, a bainita que se forma é consequência de uma velocidade de resfriamento inefetiva para a completa transformação martensítica, que na prática seria a desejada, e a bainita é do tipo granular formada em resfriamento contínuo.

A bainita granular não é facilmente distinguível das bainitas superior ou inferior formadas em transformação isotérmica quando examinadas no microscópio eletrônico de transmissão uma vez que seus mecanismos de formação não são diferentes. No entanto, como a microestrutura se forma gradualmente durante o resfriamento, os feixes de bainita podem ser maiores. No microscópio óptico a

microestrutura tem a aparência de blocos de bainita e austenita, sendo considerado apropriado empregar o termo "granular" (Bhadeshia, 2002).

2.3.1.5 A norma ASTM – Aspectos Metalúrgicos

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 aborda parafuso de aço de alta resistência, classes 10.9 e 10.9.3 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 hexagonais estruturais pesados com resistência a tração de 1040 a 1210 Mpa.

Estes parafusos são entendidos 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. (ASTM A-490)

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

Tabela (2.2) – 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 1 3/8", inclusive.		
Para tamanho 1 1/2".	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 1 3/8", inclusive.	0,30 a 0,48	0,28 a 0,50
Para tamanho 1 1/2".	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 o máximo range dado 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 range definido, 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, columbio, molibidênio, níquel, titânio, tungstênio, vanádio, zircônio, ou qualquer outro elemento de liga adicionado para obter os efeitos da liga desejados.

2.3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.3.2.1 Propriedades mecânicas dos metais

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

No entanto, essas propriedades podem ser afetadas por parâmetros diversos. Os principais fatores que afetam os valores medidos das propriedades mecânicas são a composição química, o histórico termomecânico do material, a geometria, temperatura, estado de tensões e velocidade de deformação da estrutura. O fator mais importante na determinação das propriedades de certo tipo de aço é a composição química. Nos aços carbono comuns, os elementos Carbono e Manganês tem influência no controle da resistência, ductilidade e soldabilidade. A maior parte dos aços carbono estruturais tem mais de 98% de Ferro, de 0,2 a 1% de Carbono e aproximadamente 1% de manganês (em peso). O Carbono aumenta a dureza e a resistência, mas, por outro lado, afeta a ductilidade e a soldabilidade. Assim, pequenas quantidades de outros elementos de liga são utilizadas na melhoria das propriedades do aço, obtendo o máximo em propriedades de uma liga contendo um baixo teor de Carbono.

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

2.3.2.2 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 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 estão incluídos nessa categoria (Souza, 1982).

Os ensaios mecânicos são realizados pela aplicação, em um material de um dos tipos de esforços possíveis tração, compressão, flexão, torção, cisalhamento e pressão interna, para determinar a resistência do material a cada um desses esforços (Souza, 1982).

A escolha do ensaio mecânico mais interessante ou mais adequado para cada produto metálico depende da finalidade do material, dos tipos de esforços que esse material vai sofrer e das propriedades mecânicas que se deseja medir. Os ensaios mecânicos podem também servir para a comparação de materiais distintos e, juntamente com a análise química do material, avaliar grosso modo a história prévia de um material desconhecido, sem a necessidade de um exame metalográfico mais demorado, isto é, avaliar o tipo de material, o processo de fabricação e sua aplicação possível. Alguns dos ensaios mencionados permitem obter dados ou elementos numéricos que podem ser utilizados no cálculo das tensões de trabalho e no projeto de uma peça. Outros, porém fornecem apenas resultados comparativos ou qualitativos do material e servem somente para auxiliar ou completar o estudo ou o projeto (Souza, 1982).

2.3.2.3 A norma ASTM – Propriedades Mecânicas

Quanto às propriedades mecânicas, a norma ASTM A-490 recomenda que a dureza dos parafusos esteja conforme a tabela abaixo.

Tabela (2.3) – Requisitos de dureza para tamanhos de parafusos de M12 a M36, inclusive.

Diâmetro nominal do Parafuso, mm	Comprimento, "A"	Brinell		Rockwell C	
		Min.	Máx.	Min.	Máx.
M12 a M24, inclusive.	Menor que 2D	311	352	33	38
	2D e maior	352	38
Acima de M24 até M36, inclusive	Menor que 3D	311	352	33	38
	3D e maior	352	38

"A" – Parafuso estrutural de cabeça hexagonal pesado M24 e menor e mais curto que 2D estão sujeitos somente a dureza mínima e máxima. Parafuso estrutural de cabeça hexagonal pesado maior que M24 a M36 inclusive e mais curto que 3D estão sujeitos somente a dureza mínima e máxima. Quanto aos requisitos de resistência a tração, a norma especifica, com algumas exceções, que parafusos de diâmetro nominal M24 e menores, tendo um comprimento de 2D e maior, e parafusos com diâmetro nominal maiores que M24 tendo um comprimento de 3D e maior, devem ser testados de corpo inteiro pelo método da cunha e devem estar conforme com os requisitos mínimos de carga de tração para cunha e carga de prova, ou a prova de carga alternativa especificada, conforme a tabela 2.4.

Tabela (2.4-a) – Requisitos de tração para parafusos de corpo inteiro.

Diâmetro nominal do parafuso e Passo, mm.	Área tensionada ^A , mm ²	Carga de Tração ^B KN		Carga de Prova ^B KN	Carga de Prova ^B Alternativa KN
		Min.	Máx.	Min.	Min.
Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
M12 x 1,75	84,3	87,7	103	70	79,2
M16 x 2	157	163	190	130	148
M20 x 2,5	245	255	296	203	230
M22 x 2,5	303	315	366	251	285
M24 x 3	353	367	427	293	332
M27 x 3	459	477	555	381	431
M30 x 3,5	561	583	679	466	527
M36 x 4	817	850	989	678	768

“A” – A área de tensão é calculada como: $A_s = 0,7854 \cdot [D - (0,9382 \cdot n)]^2$

Onde: A_s – Área tensionada em mm²; D – Diâmetro nominal do parafuso, mm; n – Passo de rosca, mm.

“B” – Cargas tabuladas e cargas para serem usadas para testes de parafusos de corpo inteiro com diâmetro maior que M36 são baseados no seguinte:

Tabela (2.4-b) – Requisitos de tração para parafusos de corpo inteiro.

Diâmetro nominal do parafuso, mm.	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
M12 a M36, inclusive	1040MPa	1210 MPa	830 MPa	940 MPa

Na tabela (2.4-a) as colunas 3,4,5 e 6, de cargas de tração ou de prova, devem ser relacionadas as colunas correspondentes na tabela (2.4-b) em parafusos maiores ao M-36, por não estarem tabelados. Por exemplo: A carga de tração mínima da coluna 3 (tabela2.4-a) foi definida utilizando a tensão correspondente na coluna 3 da tabela 2.4-b, calculando-se tensão vezes a área resistente.

Quando o comprimento dos parafusos torna o teste de corpo inteiro ser impraticável, corpos de prova usinados devem ser testados e devem estar conforme os requisitos especificados na tabela 2.5. Quando os parafusos são testados por ambos métodos o teste de corpo inteiro deve ser precedente.

Tabela (2.5) – Requisitos de resistência à tração para corpos de provas usinados de Parafusos.

Diâmetro Nominal do parafuso, mm	Resistência a Tração, Mpa		Resistência ao Escoamento (0,2% offset)min, Mpa	Alongamento em 50 mm, min, %	Redução de Área, min, %
	Min.	Máx.			
M12 a M36, inclusive	1034	1210	896	14	40

Os procedimentos para a condução dos ensaios mecânicos estão na norma ASTM F606. Dentre os ensaios estão: 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 devem ser tomadas de cada amostra de parafuso acabado. Para testes de dureza arbitrários, a norma define que a medição deve ser conduzida no raio médio ($r/2$) da seção transversal da rosca tomada a uma distância de aproximadamente um diâmetro da extremidade. Quatro leituras devem ser efetuadas a aproximadamente 90 graus uma da outra, no mesmo plano, se o produto permitir. Deve-se destacar que, de acordo com a ASTM F606 o teste em local arbitrário (item 3.1.3) recomenda que uso de dureza Brinell seja limitado a diâmetros maiores que 2 ¼ in. A figura 2.8 ilustra este teste (ASTM F606, 2011).

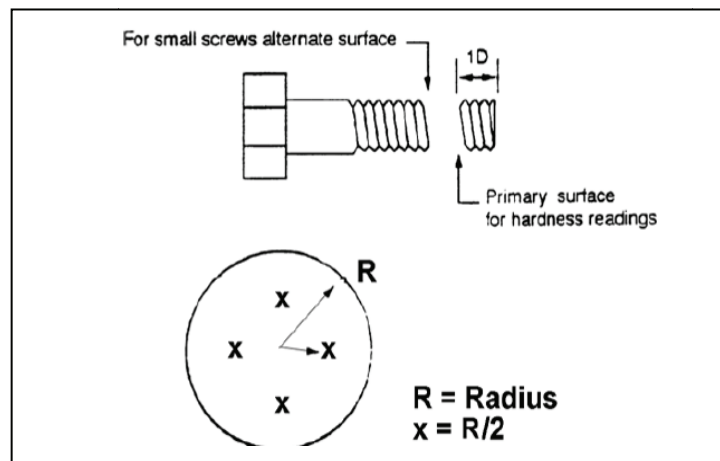


Figura (2.10) – Local de teste para dureza arbitrária (ASTM F606, 2011).

Ensaio de Tração de corpo de prova usinado – Quando parafusos e estojos não podem ser testados de corpo inteiro, testes conduzidos usando corpos de prova usinados de parafusos podem ser usados. Parafusos e 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 e estojos com diâmetro de 5/8" até 1 1/4" podem ter seus corpos usinados concêntricos com o eixo do parafuso ou estojo, em que a cabeça e a seção roscada ficam intactas como mostrado na figura 2.9.

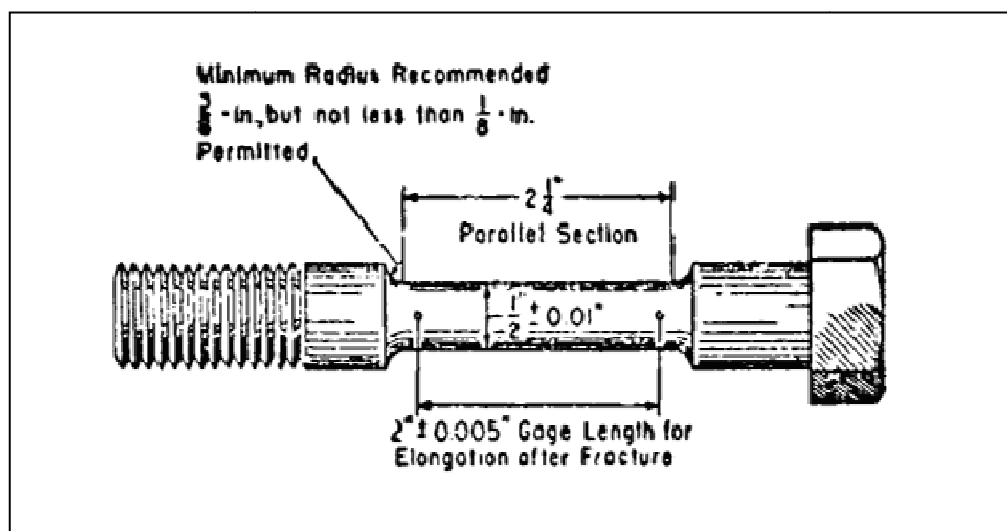


Figura (2.11) – Corpo de prova de tração para parafuso com usinagem no corpo. (ASTM F606, 2011).

Alternativamente, parafusos e estojos com diâmetro de 5/8 in até 1 1/4" podem ter seus corpos usinados a um corpo de prova com eixo localizado entre o eixo do parafuso e a superfície externa do parafuso, conforme a figura 2.10.

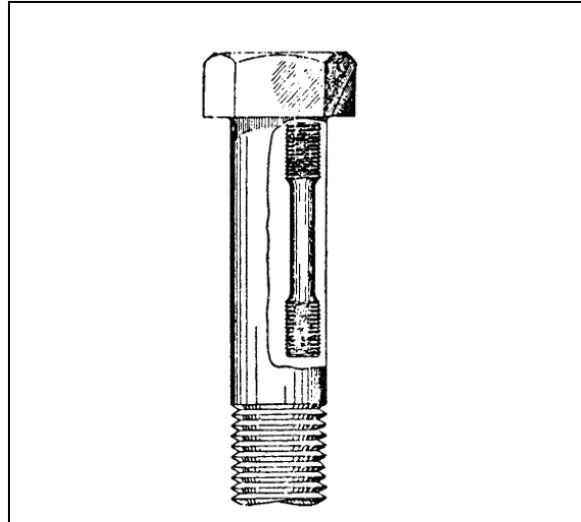


Figura (2.12) – Corpo de prova extraído do parafuso. (ASTM F606, 2011).

Parafusos de seção transversal pequena que não permita ter diâmetro de 0,5 polegadas, e 2 polegadas de comprimento de medição no corpo de prova devem 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. A figura 2.11 ilustra este detalhe.

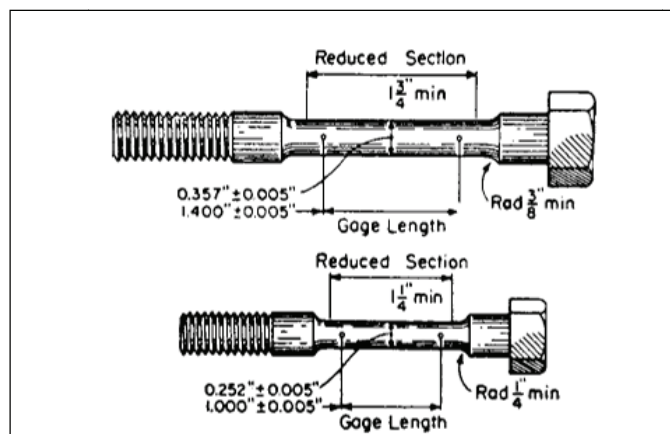


Figura (2.13) – Exemplo de corpo de prova de seção reduzida. (ASTM F606, 2011).

2.4 MÉTODOS DE APERTO DE UNIÕES APARAFUSADAS

Dependendo do método de aperto, a precisão da aplicação da pré-carga pode variar até 25% ou mais. Cuidados devem ser tomados para manter a calibração do torque e indicador de carga. Precauções devem ser tomadas para as incertezas na carga do parafuso para prevenir sobre-tensão no parafuso ou falta na obtenção de pré-carga suficiente (Machinery HandBook, 2012).

A tabela 2.6 lista os métodos mais freqüentemente usados na aplicação da pré-carga e a precisão aproximada de cada método.

Tabela (2.6) - Precisão de Métodos de Aplicação de Pré-carga em Parafuso. (Machinery HandBook, 2012).

Método	Precisão
Pelo tato	+35%
Chave de Torque	+25%
Giro de Porca	+15%
Chave controlada por computador sob escoamento (giro de porca)	+15%
Arruela indicadora de pré-carga	+10%
Sensor de ponto de escoamento	+8%
Alongamento do parafuso	+3 a 5%
Medidores de Deformação (strain gages)	+1%
Sensor Ultra-sônico	+1%

Métodos de aperto usando dispositivos de potência são similares em precisão a métodos manuais equivalentes.

2.4.1 CONTROLE DE TORQUE DE APERTO

O método mais comum de controle de tensão no parafuso é indireto porque isso é usualmente difícil ou não é prático medir a tensão produzida em cada parafuso durante a montagem. Para muitas aplicações, a tensão em parafusos pode ser satisfatoriamente controlada com certos limites pela aplicação de um torque conhecido no parafuso. Teste de laboratório tem mostrado, considerando que uma relação satisfatória de torque e tensão pode ser estabelecida para um dado conjunto

de condições, uma mudança de algumas das variáveis, tal como material do parafuso, acabamento superficial, e a presença ou ausência de lubrificante, pode severamente alterar a relação. Isto ocorre porque muito do torque aplicado é absorvido na fricção intermediária, então, uma mudança na rugosidade superficial da superfície de rolamento ou uma mudança na lubrificação afetará drasticamente a fricção e a relação torque e tensão.

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

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

As figuras 2.12 e 2.13 ilustram a aplicação manual e hidráulica destes métodos.



Figura (2.14) – Aplicação manual de torqueamento.

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 (2.15) – Aplicação hidráulica de torqueamento.

Na figura 2.13 percebe-se a aplicação do controle de torque através de ferramenta hidráulica chamada de chave de torque. O valor de torque, já conhecido também, é relacionado à pressão à ser ajustada na bomba (figura à direita). Esta relação é possibilitada através de uma tabela torque versus pressão para cada tipo de chave. A tabela 2.7 é um exemplo. Com a bomba, então, regulada na pressão, aplica-se o torque no parafuso utilizando uma chave especificada.

Tabela (2.7) - Exemplo de tabela de torque versus pressão.

TABLE 2.3-1															
PRESSURE / TORQUE CONVERSION CHART FOR RSL TOOLS															
PRESSURE		RSL2		RSL4		RSL6		RSL8		RSL14		RSL20		RSL30	
PSI	BAR	lb-ft	Nm	lb-ft	Nm	lb-ft	Nm	lb-ft	Nm	lb-ft	Nm	lb-ft	Nm	lb-ft	Nm
1000	69	123	167	290	393	457	620	725	983	961	1303	1957	2653	2298	3116
1200	83	152	206	352	477	564	765	884	1199	1188	1611	2332	3162	2869	3890
1400	97	180	244	414	561	672	911	1043	1414	1414	1917	2708	3672	3440	4664
1600	110	209	283	476	645	780	1058	1201	1628	1641	2225	3083	4180	4012	5439
1800	124	236	323	538	729	888	1204	1360	1844	1867	2531	3458	4688	4583	6214
2000	138	267	362	600	813	995	1349	1518	2058	2094	2839	3822	5182	5154	6988
2200	152	296	401	662	898	1103	1495	1677	2274	2320	3145	4209	5707	5725	7762
2400	165	324	439	724	982	1211	1642	1836	2489	2547	3453	4584	6215	6296	8536
2600	179	353	479	786	1066	1318	1787	1994	2703	2773	3760	4959	6723	6868	9312
2800	193	382	518	848	1150	1426	1933	2153	2919	3000	4067	5334	7232	7439	10086
3000	207	411	557	910	1234	1534	2080	2311	3133	3226	4374	5710	7742	8010	10880
3200	221	439	595	972	1318	1641	2225	2470	3349	3453	4682	6085	8250	8581	11634
3400	234	468	635	1034	1402	1749	2371	2629	3564	3679	4988	6460	8758	9152	12408
3600	248	497	674	1096	1486	1857	2518	2787	3779	3906	5296	6835	9267	9724	13184
3800	262	525	712	1158	1570	1964	2663	2946	3994	4132	5602	7210	9775	10295	13958
4000	276	554	751	1220	1654	2072	2809	3104	4208	4359	5910	7586	10285	10866	14732
4200	290	583	790	1282	1738	2180	2956	3263	4424	4585	6216	7961	10794	11437	15506
4400	303	611	828	1344	1822	2288	3102	3422	4640	4812	6524	8336	11302	12008	16280
4600	317	640	868	1406	1906	2395	3247	3580	4854	5038	6831	8711	11810	12579	17055
4800	331	669	907	1468	1990	2503	3394	3738	5069	5285	7138	9087	12320	13161	17830

2.4.2 CONTROLE DE ÂNGULO DE APERTO

Tem-se tentado usar torque como o principal controle de pré-carga de parafusos, no entanto, mesmo um torque perfeito pode resultar numa variação de $\pm 25\%$ da pré-carga. Quando se aplica torque a porca gira. Pode-se usar o giro ao invés do torque para controlar a pré-carga (Bickford, 1995).

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

2.4.3 CONTROLE DE APERTO AO ESCOAMENTO

Este método é conhecido também pelo nome de “método do controle da união”. Pré-cargas muito exatas podem ser conseguidas por este método minimizando a influência da fricção e da flutuação. O método tem raízes em um especialista, o qual lhe permitia que detectasse o ponto de escoamento do parafuso através do sentido (tato) com precisão razoável. Como equivalente eletrônico deste método, um sistema de controle é usado que seja sensível ao gradiente de torque do parafuso que está sendo apertado. A detecção rápida da mudança na inclinação deste gradiente indica que o ponto de escoamento está sendo alcançado e pára-se o processo de aperto. Isto é conseguido incorporando sensores para ler o torque e o ângulo durante o processo de aperto. Desde que o ângulo de rotação e do torque seja medido pelo sistema de controle, valores permissíveis podem ser usados para detectar os parafusos que se encontram fora de sua especificação (Bickford, 1995).

2.4.4 MÉTODO DE ESTIRAMENTO DO PARAFUSO (TENSIONAMENTO)

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

Um problema relacionado ao aperto de grandes parafusos é que torques muito elevados são requeridos. Embora isto possa em parte ser superado pelo uso de chaves de torque hidráulicas (a reação do torque, entretanto pode ser um problema), o uso de dispositivos tensionadores hidráulicos, figura 2.14, é comum para os parafusos acima de 20 mm de diâmetro. O método usa um pequeno pistão hidráulico (A) o qual é ajustado sobre a porca, a parcela roscada do parafuso projeta-se bem após a porca (B) e um extrator roscado é acoplado (C). O óleo hidráulico de uma bomba pequena age em cima do pistão hidráulico, que age, por sua vez, em cima do extrator. Isto é transmitido ao parafuso tendo por resultado a extensão. A porca pode então ser girada pela mão com a ajuda de um soquete integral auxiliado por uma barra (Pizzio, 2005).

O 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).

As figuras 2.16 ilustram o funcionamento do tensionador.

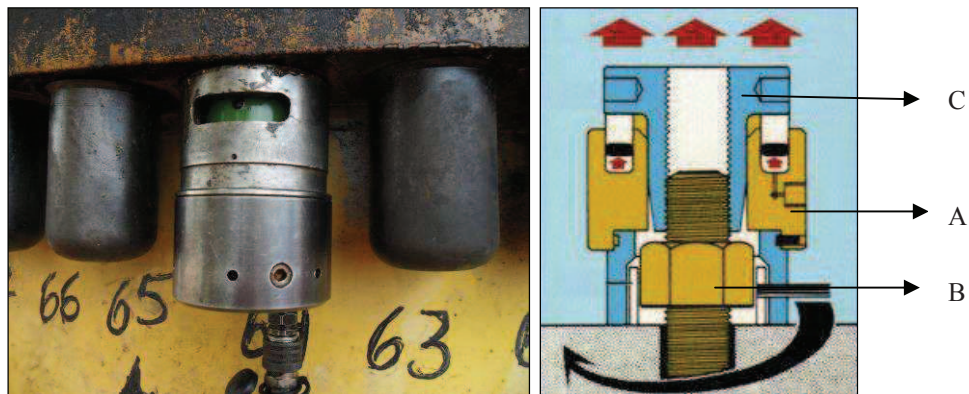


Figura (2.16) – Equipamento tensionador, onde: A-Pistão; B- Porca; C-Extrator roscado.

2.4.5 MÉTODO DE ESTIRAMENTO PELO CALOR

O controle de aperto pelo calor utiliza as características da expansão térmica do parafuso. O parafuso é aquecido e expande: a porca é posicionada (usando o ângulo do método da volta) e o sistema permite a refrigeração. Enquanto o parafuso tenta se contrair ele está restringido longitudinalmente pelo aperto do material e disso resulta a pré-carga. O processo é lento, especialmente se a tensão no

parafuso deve ser medida, desde que o sistema deva retornar a temperatura ambiental para cada medida. Este não é um método extensamente usado e é aplicado geralmente em parafusos muito grandes (Pizzio, 2005).

2.5. COEFICIENTE DE ATRITO

Hutchings (1992, p.1) define Tribologia como: “A ciência e a tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo”. E abrange o estudo do Atrito, do Desgaste abrasivo e da Lubrificação. A palavra Tribologia vem do Grego: τριβοζ = Esfregar ou atritar.

Para aplicarmos o conceito de Tribologia no estudo das juntas fixadas por rosqueamento algumas considerações devem ser observadas.

- 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.

- 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.

- O desgaste sempre ocorre quando a lubrificação ou proteção superficial for deficiente. Surgem, então, os fenômenos conhecidos por “galling, scuffing ou scoring”. Que são, na verdade, fenômenos de “soldagem” a frio causada pela alta pressão resultante do rosqueamento, nas quais as superfícies em contato não foram suficientemente separadas por algum elemento lubrificante ou pelos elementos presentes no tratamento superficial dos componentes das juntas rosqueadas.

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

A magnitude da fricção é usualmente expressada como um coeficiente de atrito μ , o qual é a razão da força requerida para iniciar ou sustentar a movimentação relativa tangencial para a força normal N (ou peso) o qual pressiona as duas superfícies juntas. Então $\mu = F/N$. Nos primeiros anos destes estudos, o valor de F/N foi sendo razoavelmente constante para cada classe de materiais. Nos estudos

modernos, μ é amplamente considerado, dependendo de variáveis operacionais, lubrificantes, propriedades do substrato, e filmes superficiais (CRC Handbook, 1983).

Pode ser percebido experimentalmente que há duas leis básicas da fricção as quais cobrem a maioria das aplicações. A primeira lei estabelece que o atrito é independente da área aparente de contato entre os corpos em contato, e a segunda lei estabelece que a força de atrito F é proporcional a carga normal W entre os corpos. Estas leis são muitas vezes referidas como Leis de Amontons, após a engenharia francesa Amontons ter apresentado a mesma em 1699 (Dowson, 1979).

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 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. Jiang e Zhang e Park (2002) relatam que o dobro do coeficiente de fricção pode ocorrer na cabeça destorcida prevalecendo o torque na porca (Eccles, 2010).

Estudos prévios (Sakai, 1978; Jiang et al.2002) 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).

O coeficiente de atrito μ é interpretado de duas maneiras: Coeficiente de atrito estático e dinâmico.

Dinâmico, quando a força tangencial for medida durante o movimento das partes em contato e Estático quando esta força for àquela necessária para tirar do repouso, um dos corpos em contato (Muniz, 2007).

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

2.6 SISTEMAS DE FORÇAS E ATRITO NOS 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 a 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).

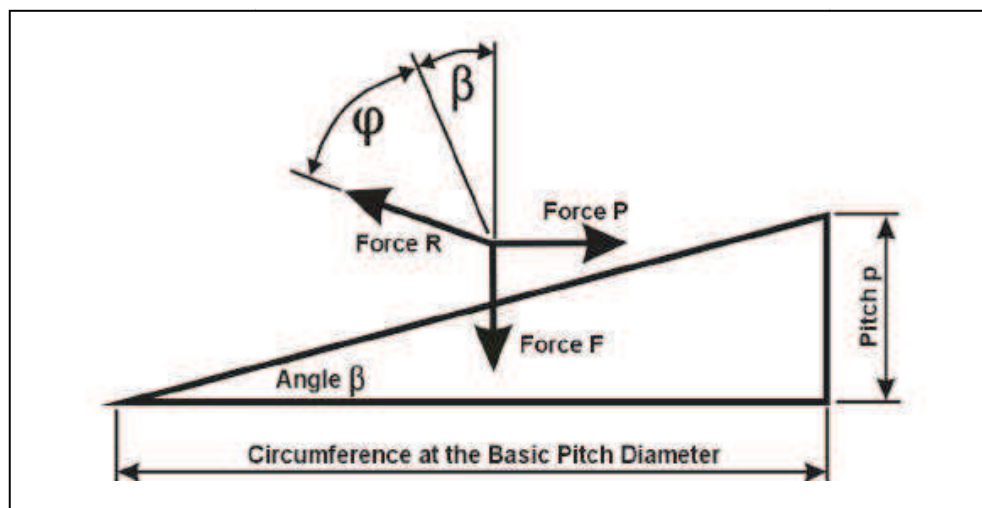


Figura (2.17) – Forças agindo no plano inclinado da rosca (Eccles, 2010).

Da figura 2.15, pode ser notado que quando a força “P” está na horizontal, a força de reação “R” deve estar em um ângulo φ da vertical, então:

$$\tan \varphi = \frac{\text{Força } P}{\text{Força } F} = \mu_t \quad (1.1)$$

Onde μ_t é o coeficiente de fricção das roscas.

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

$$P = F \cdot \tan(\beta + \varphi) \quad (1.2)$$

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

$$P = \frac{2T_{im}}{d_2} = F \cdot \tan(\beta + \varphi) \quad (1.3)$$

Então,

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

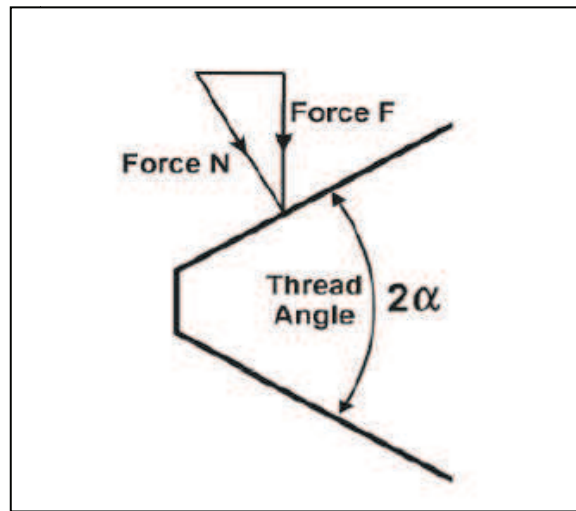


Figura (2.18) – Forças agindo no filete de rosca.

A figura 2.16 mostra a seção através da rosca com as forças atuando, o ângulo do flanco da rosca é anotado como 2α . Em ordem, para contar a inclinação da força normal neste plano, do diagrama:

$$N \cdot \cos(\alpha) = F \quad \text{ou} \quad N = \frac{F}{\cos(\alpha)} \quad (1.5)$$

A força de atrito é:

$$\mu_t \cdot N = \frac{\mu_t \cdot F}{\cos(\alpha)} = \mu' \cdot F \quad (1.6)$$

Onde,

$$\mu' = \frac{\mu_t}{\cos(\alpha)} \quad (1.7)$$

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

$$T_{im} = F \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left[\frac{\tan \beta + \tan \varphi}{1 - \tan \beta \cdot \tan \varphi} \right] \quad (1.8)$$

Da figura 2.15

$$\tan\beta = \frac{p}{\pi \cdot d_2} \quad (1.9)$$

E da equação 1.1 e 1.7

$$\tan\varphi = \mu' = \frac{\mu_t}{\cos(\alpha/2)} \quad (1.10)$$

Substituindo estes valores na equação para T_{tm} ,

$$T_{tm} = F \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left[\frac{\frac{p}{\pi \cdot d_2} + \frac{\mu_t}{\cos(\alpha)}}{1 - \frac{p}{\pi \cdot d_2} \cdot \frac{\mu_t}{\cos(\alpha)}} \right] \quad (1.11)$$

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

$$T_{tm} = F \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left[\frac{p}{\pi \cdot d_2} + \frac{\mu_t}{\cos(\alpha)} \right] \quad (1.12)$$

A força de atrito desenvolvida pela porca ou pela cabeça do parafuso (dependendo de qual gira) durante o aperto é:

$$T_{nut} = F \cdot \mu_n \cdot \frac{D_e}{2} \quad (1.13)$$

Onde:

μ_n é o coeficiente de atrito sob a porca;

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

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

$$T = F \cdot \left[\frac{p}{2 \cdot \pi} + \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\mu_t}{\cos(\alpha)} + \mu_n \cdot \frac{D_e}{2} \right] \quad (1.14)$$

O ângulo do flanco da rosca para sistema métrico e unificado (UN) é de 60 graus, então para sistema métrico, a equação 1.14 se simplifica para:

$$T = F \cdot \left[0,159 \cdot p + 0,578 \cdot \mu_t \cdot d_2 + \mu_n \cdot \frac{D_e}{2} \right] \quad (1.15)$$

O valor de “ D_e ” pode ser tomado como:

$$D_e = \frac{d_o + d_i}{2} \quad (1.16)$$

Os testes executados consistidos de apertamento da porca nos ensaios enquanto medindo o torque aplicado "T", torque de reação na rosca T_{im} e a força de aperto F (clamping) gerada pelo processo de apertamento. A equação 1.15 pode ser re-escrita como:

$$T = F \cdot [0,159 \cdot p + 0,578 \cdot \mu_i \cdot d_2] + F \cdot \left[\mu_n \cdot \frac{D_e}{2} \right] \quad (1.17)$$

Por exemplo:

$$T = T_{im} + (T - T_{im}) \quad (1.18)$$

Destas, é de importância mostrar que o coeficiente de fricção na rosca e sob a porca é:

$$\mu_i = \frac{\frac{T_{im}}{F} - 0,159 \cdot p}{0,578 \cdot d_2} \quad (1.19)$$

$$\mu_n = \frac{2 \cdot (T - T_{im})}{D_e \cdot F} \quad (1.20)$$

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.

Estas equações estão presentes na norma DIN 946 (Deutsche Norm, 1991). A norma ISO 16047 (British Standards, 2005) foi introduzida, mas é substancialmente a mesma norma DIN 946, em termos de conteúdo.

2.7 O FATOR DE TORQUE “K”

A equação 1.15, 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).

O padrão industrial japonês (JIS) B 1803 define torque no parafuso T_f como a soma do torque da superfície de rolamento T_w e o torque da porção roscada T_s . A relação entre o torque de aperto aplicado e a pré-carga F_{ft} é como se segue: $T_f = T_s + T_w = K \cdot F_{ft} \cdot d$. Nesta, d é o diâmetro nominal do parafuso roscado, e K é o coeficiente de torque, definido como: (Machinery HandBook, 2005).

$$K = \frac{1}{2 \cdot d} \cdot \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s \cdot d_2 \cdot \sec \alpha' + \mu_w \cdot D_w \right) \quad (1.21)$$

Onde P é o passo da rosca do parafuso; μ_s é o coeficiente de atrito entre as roscas; d_2 é o diâmetro primitivo da rosca; μ_w é o coeficiente de atrito entre as superfícies de rolamento; D_w é o diâmetro equivalente do torque de fricção das superfícies de rolamento; e α' é o ângulo do flanco num cume de seção perpendicular a crista da rosca, definido por $\tan \alpha' = \tan \alpha \cos \beta$, onde α é o ângulo da metade da rosca (30° por exemplo), e β é o ângulo da hélice da rosca, ou ângulo de avanço. β pode ser encontrado da $\tan \beta = L \div 2 \pi r$, onde “ L ” é o avanço da rosca, e “ r ” é o raio da rosca (por exemplo $\frac{1}{2}$ do diâmetro nominal “ d ”). Quando a área de contato da superfície de rolamento é circular, D_w pode ser obtido da seguinte forma:

$$D_w = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{D_0^3 - D_i^3}{D_0^2 - D_i^2} \right) \quad (1.22)$$

Onde D_0 e D_i são os diâmetros externos e internos, respectivamente, da área de contato da superfície de rolamento.

As figuras 2.17 e 2.18 apresentam diagrama de corpo livre tridimensional para o cálculo das equações.

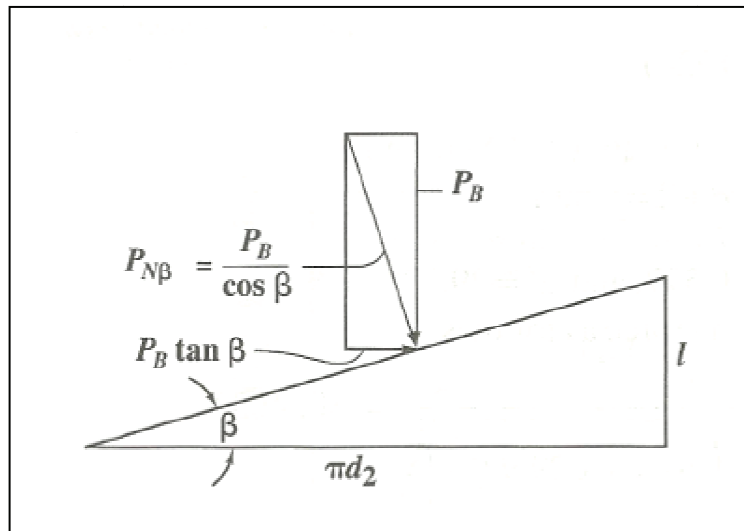


Figura (2.19) - Diagrama de Corpo livre das forças na hélice da rosca (Machinery HandBook, 2005).

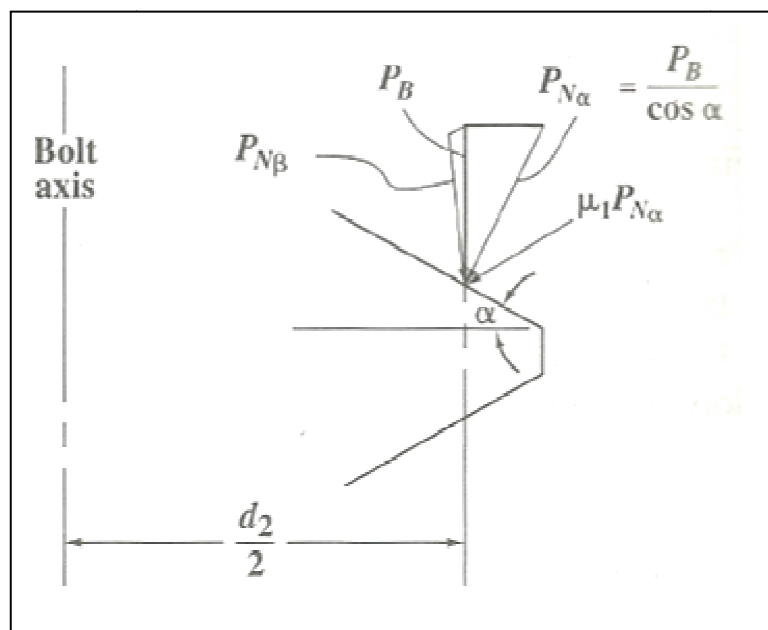


Figura (2.20) - Força de atrito na rosca (Machinery HandBook, 2005).

A equação de “forma curta” é então:

$$T_{in} = F_p \cdot K \cdot D \quad (1.23)$$

Onde:

T_{in} – Torque aplicado (Nm, 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 (Bickford, 1995).

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 se ter uma precisão no experimento deve-se ter um número de experimentos para definir a média de K, desvio padrão, etc (Bickford, 1995).

2.8 CONDIÇÃO SUPERFICIAL - MONTAGEM

O conhecimento da condição superficial na montagem de um parafuso é fundamental para a correta determinação dos fatores de torque associados. Dentre os quais: rugosidade, tratamento superficial e aplicação de lubrificante (CRC Handbook of Lubrication, 1983).

2.8.1 RUGOSIDADE

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

Texturas superficiais encontradas na engenharia moderna variam muito. A figura 2.19, por exemplo, mostra uma superfície polida mecanicamente, enquanto a figura 2.20 mostra uma na qual foi eletro-depositada. A figura 2.21 coloca a rugosidade em perspectiva contra outras superfícies relacionadas de interesse da engenharia (CRC Handbook of Lubrication, 1983).

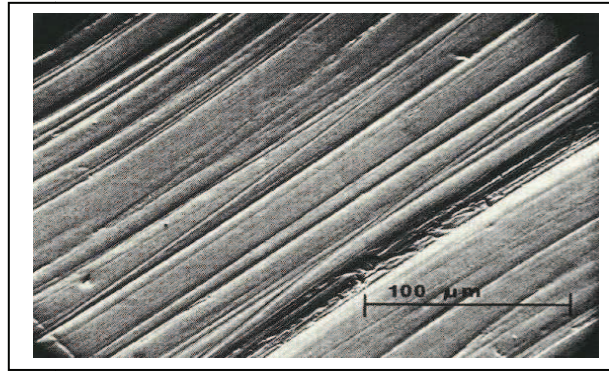


Figura (2.21) – Micrografia eletrônica de amostra de cobre polida mecanicamente. (CRC Handbook of Lubrication, 1983).

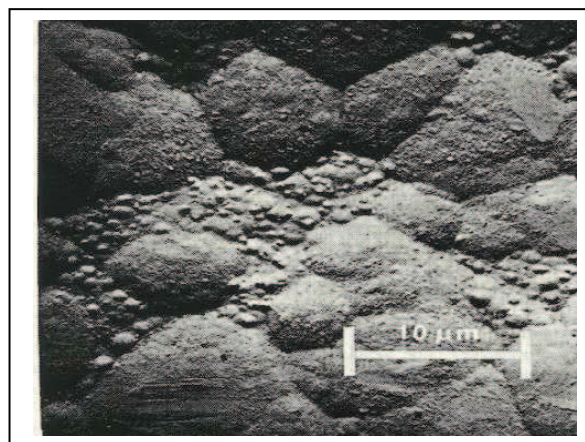


Figura (2.22) – Micrografia eletrônica de ouro eletro depositado em latão. (CRC Handbook of Lubrication, 1983).

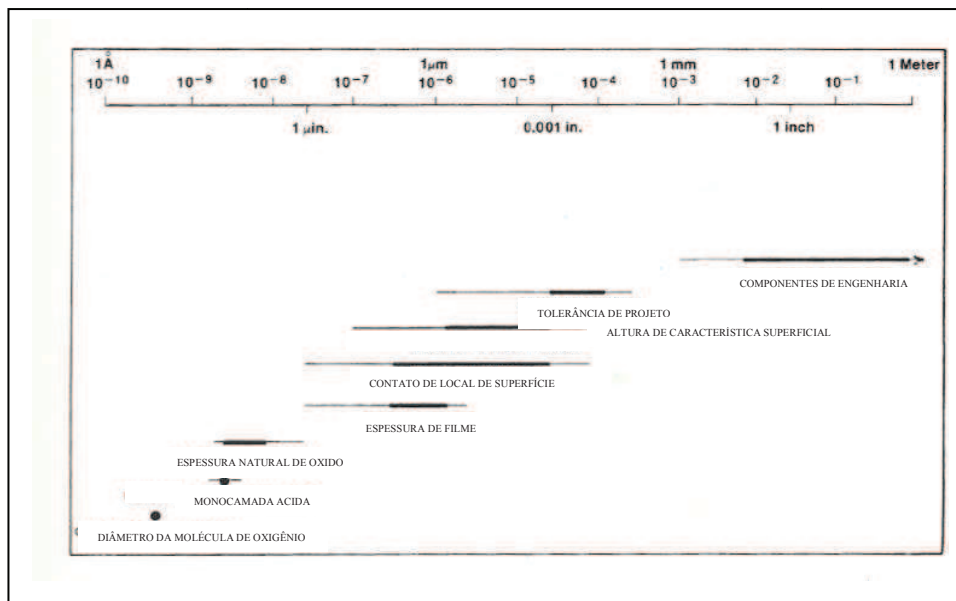


Figura (2.23) – Perspectiva de rugosidades em função da superfície. (CRC Handbook of Lubrication, 1983).

O perfil de uma superfície pode ser definido como a linha produzida pela apalpação de uma agulha sobre uma superfície. A medição de uma superfície através de um sistema mecânico de apalpação produz uma linha conforme a figura 2.22 (Stoeterau, 2004).

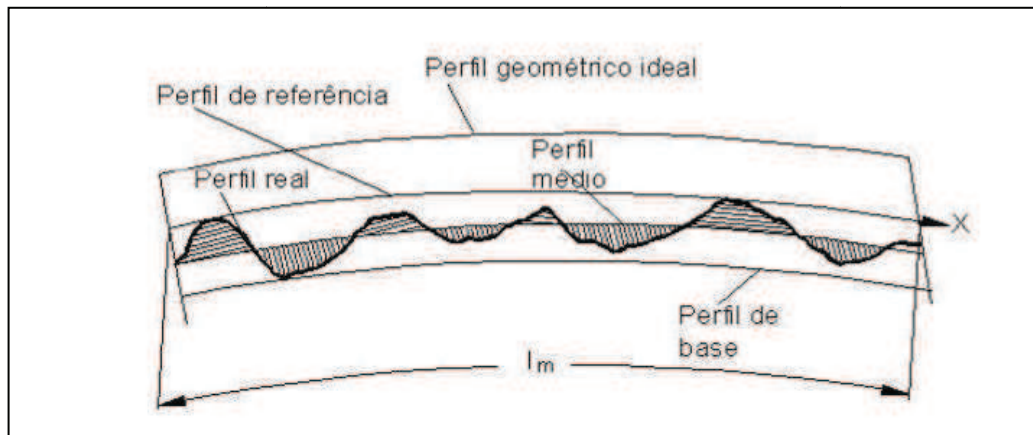


Figura (2.24) – Termos básicos para a medição de uma superfície. (Stoeterau, 2004).

A Rugosidade Média R_a é definida como sendo a média aritmética dos valores absolutos dos afastamentos Y_i do perfil médio (Stoeterau, 2004).

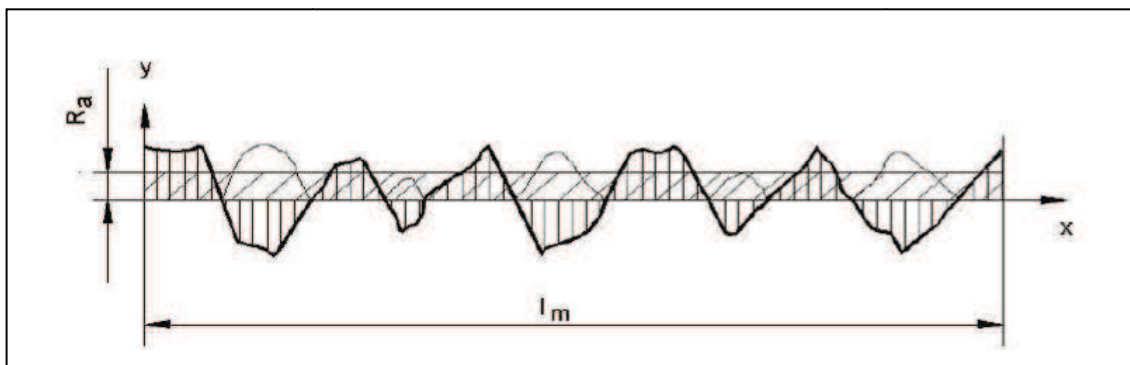


Figura (2.25) – Definição da rugosidade R_a . (Stoeterau, 2004).

A mesma pode ser expressa pela equação abaixo:

$$R_a = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (1.24)$$

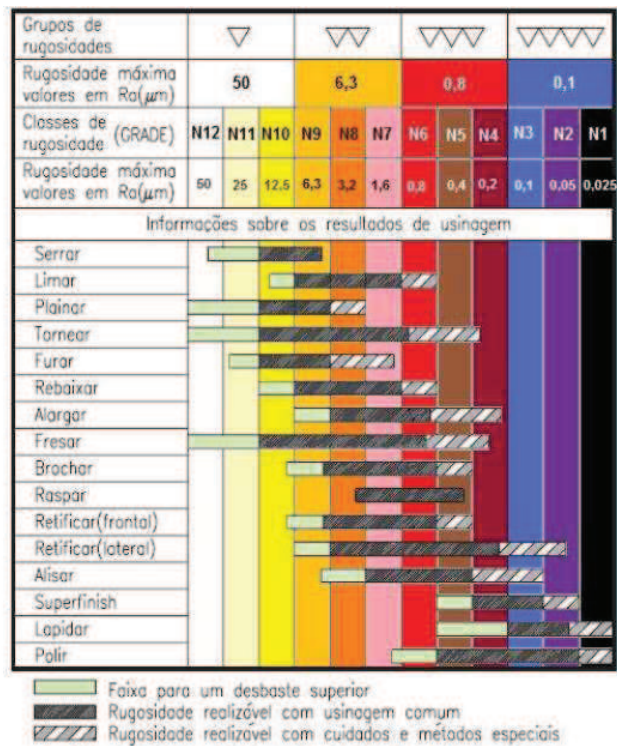
A rugosidade R_a também pode ser expressa pelos números classe, como na tabela 2.8.

Tabela (2.8) – Definição da rugosidade Ra com classe de rugosidade (Stoeterau, 2004).

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

No quadro comparativo 2.9 estão algumas rugosidades Ra típicas de processos de usinagem.

Tabela (2.9) – Comparativo de várias rugosidades Ra com processos de usinagem. (Stoeterau, 2004).



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

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

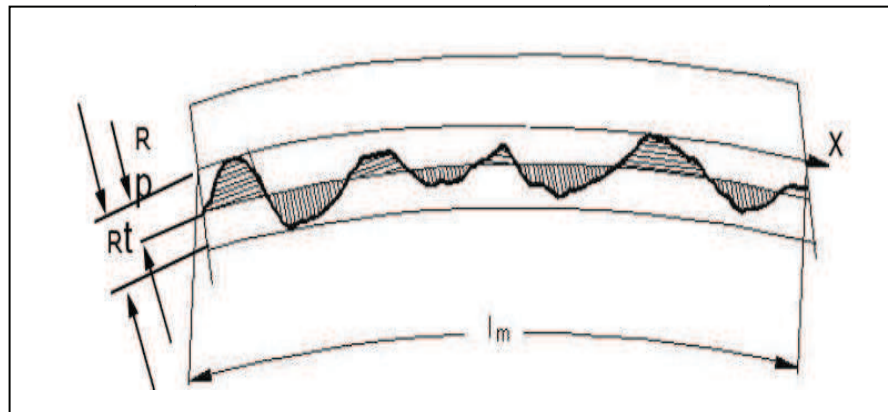


Figura (2.26) – Definição da rugosidade R_p e R_t (Stoeterau, 2004).

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

A rugosidade singular é definida como sendo a distância entre duas linhas paralelas a linha média (perfil médio), as quais tocam os pontos máximos e mínimos dentro do trecho selecionado de medição singular (i), que tangenciam o perfil de rugosidade no ponto mais elevado e mais baixo.

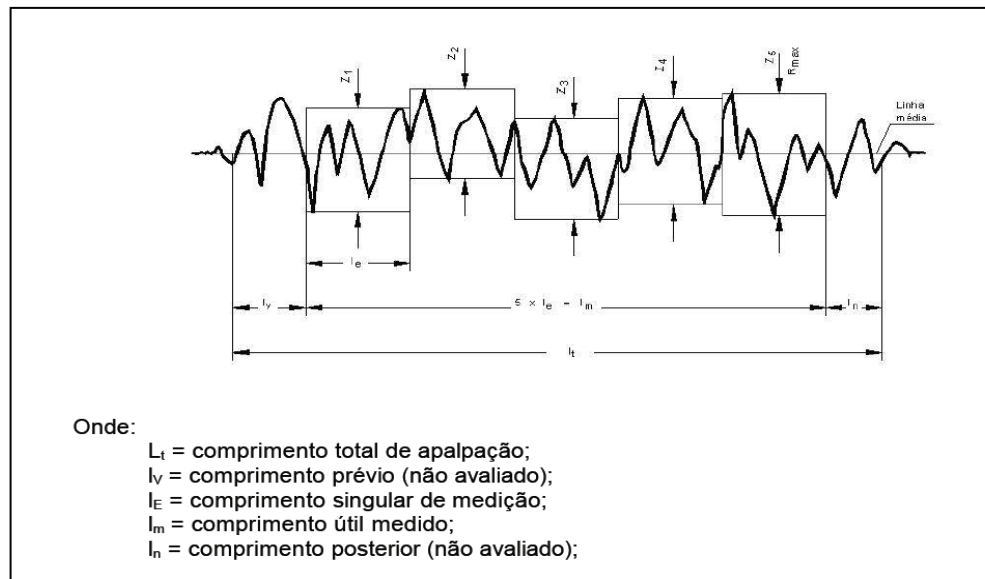


Figura (2.27) – Definição das rugosidades singulares e do parâmetro Rz. (Stoeterau, 2004).

A rugosidade RZ, ou média das rugosidades RZ_i , é definida como sendo a média aritmética das rugosidades singulares em cinco trechos de medição sucessivos.

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

2.8.1.1 Formas de medir a Rugosidade Superficial

A - Princípio de Medição Mecânica - O princípio de medição mecânica da rugosidade de uma superfície segue o mesmo princípio de funcionamento empregado no perfilômetro desenvolvido por Gustav Schultz em 1934. Nestes apalpadores mecânicos, em geral fabricados em material de altíssima dureza e resistência ao desgaste (ex.: diamante), percorrem o comprimento total de medição, sofrendo uma amplificação por meio mecanismos finos (alavancas, engrenagens, cremalheiras, etc.) que fornece um sinal de saída proporcional ao deslocamento sofrido pelo apalpador.

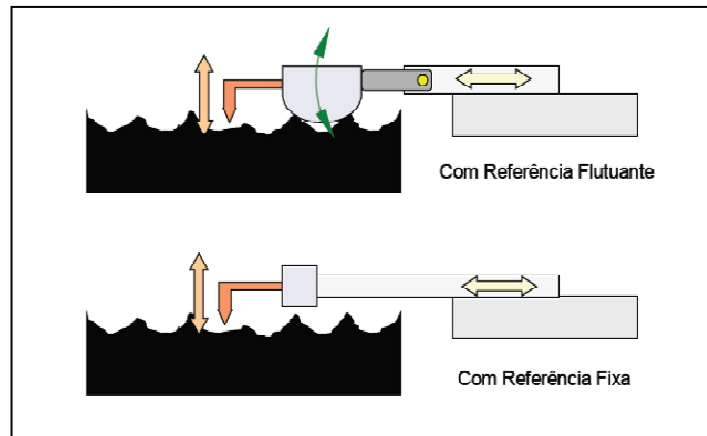


Figura (2.28) – Princípios de operação de rugosímetros com apalpador mecânico.

As soluções de projeto variam muito entre os rugosímetros mecânicos, de acordo com: 1- mecanismos de amplificação do movimento; 2- forma de integração com sistemas eletroeletrônicos ou eletromecânicos; 3- maneira de tratar e armazenar os dados; 4- forma de apresentar os resultados. (Stoeterau, 2004).

A principal limitação dos sistemas mecânicos está na incapacidade do apalpador em penetrar em vales muito pequenos, ou deste riscar a superfície quando em deslocamento, além de problemas inerentes aos sistemas mecânicos em processar e amplificar microdeslocamentos (problema de sensibilidade).

Os apalpadores mecânicos apresentam grande versatilidade, e são capazes de proporcionar muitas informações sobre a qualidade em uma ampla faixa de superfícies, além de poderem apresentar resultados de rugosidade de várias formas (Stoeterau, 2004).

Contudo os processos com apalpadores mecânicos apresentam uma série de limitações, as quais podem ser listadas:

- técnica muito lenta;
- a força de medição dos apalpadores podem em alguns casos danificar a superfície, de acordo com o uso;
- limitação quanto à área de medição.

Como vantagens os processos dotados de apalpadores mecânicos apresentam:

- versatilidade de acomodação a diversas formas;
- alta amplitude de resolução na direção vertical;
- alta amplitude espacial.

B - Princípio de Medição Óptica - As vantagens e desvantagens dos métodos de avaliação de superfícies com apalpadores mecânicos foram apresentadas no item anterior, porém as deficiências deste método podem ser superadas através de outras técnicas, tais como a óptica.

Por ser uma técnica de medição sem contato esta permite a obtenção de parâmetros de rugosidade, forma, aplicação de filtros, levantamento da curva de sustentação, tudo em 2-D ou 3-D, além de dados estatísticos. Em função do pequeno diâmetro focal (cerca de 1mm), este método permite a obtenção de informações bem mais precisas do que pelo método mecânico. O princípio de funcionamento esta baseado no ajuste contínuo do foco sobre a superfície, e a comparação das variações das distâncias focais sucessivas com a referência, conforme a figura 2.27 (Stoeterau, 2004).

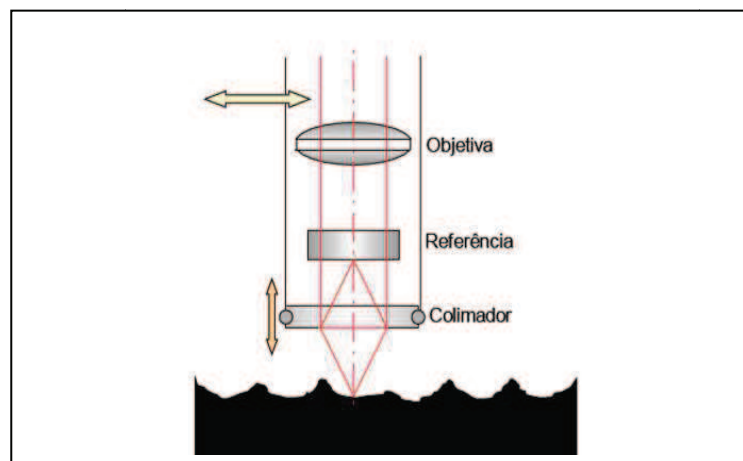


Figura (2.29) – Princípio de operação de um rugosímetro óptico.

2.8.2 COBERTURA DE FOSFATO

A fosfatização de aço, ferro, ou alumínio, etc., consiste em um tratamento do metal, mergulhado em uma solução diluída de ácido fosfórico e outros produtos químicos (aceleradores) de maneira a se formar sobre este, uma camada, densa, contínua, não-metálica, insolúvel de fosfato cristalino ou amorfo. Os mais comuns são os fosfatos de Mn, Fe e Zn (Muniz, 2007).

As aplicações mais freqüentes da proteção por fosfato são (1) proteção fraca temporária à corrosão (2) base preparatória para pintura (3) base de preparação para trabalho a frio (4) lubrificante promotor de resistência ao desgaste, ao Galling, ao Scoring de peças sujeitas a contato em movimento, com ou sem óleo. (Bhushan

e Gupta, 1997). A função básica do fosfato no parafuso é reter o óleo e funcionar como um lubrificante sólido controlador do coeficiente de atrito (Muniz, 2007).



Figura (2.30) – a) Parafuso fosfatizado à direita (preto). b) Sem revestimento.

2.8.3 LUBRIFICANTES

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

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

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

Quanto aos lubrificantes não-sólidos, foi dada atenção será dada a graxa, especificamente a Lubrax Lithplus SM-2, antiga GMA-2, muito comum em plataforma de petróleo.

2.8.3.1 GRAXAS

Graxa é um lubrificante semi-sólido consistindo essencialmente de um líquido misturado com um espessante; o líquido faz a lubrificação, o espessante primariamente retém o óleo no lugar e provém variação na resistência de fluxo. Ele pode ser duro suficiente para ser cortado inicialmente em blocos, ou macio suficiente para passar através de funil.

2.8.3.1.1 Espessantes

Variações nas características das graxas são largamente determinados pelo material usado como espessante. Se o espessante pode resistir ao calor, a graxa será usada em altas temperaturas. Se o espessante não é afetado pela água, a graxa será usada também nesta condição. Os muitos diferentes tipos de espessantes usados em graxas comerciais podem ser divididos em duas classes primárias: **sabão e não-sabão**.

O sabão é um elemento metálico reagido com ácido gordo ou gorduroso. Elementos metálicos incluem lítio, cálcio, sódio, alumínio, bário, e outros. Óleos gordurosos podem ser de origem animal ou vegetal, variando de bovino, suíno, peixe, coco e outros. A escolha destes e as condições de reação oferecem uma grande variedade de sabão e controle das características das graxas.

Entre as graxas tipo sopa, lítio contabiliza a maior utilização nos Estados Unidos, seguida pela cálcio, alumínio, sódio, e outros.

Espessante não-sabão. Estes podem ser separados em classificações: inorgânico, orgânico e material sintético. Espessantes inorgânicos são pós muito finos os quais tem suficiente superfície de área e porosidade espessa para absorver óleo. Sílica e bentonita modificada tem sido muito bem sucedido comercialmente. Ambos tipos são muito sensitivos a água a menos as partículas espessantes que são protegidas por uma cobertura, a qual pode ser quebrada abaixo de 149°C.

Graxa sabão à base de Lítio. Desenvolvimento da graxa de lítio em larga escala foi iniciada antes e durante a segunda guerra mundial. Ela pode ser feita por procedimento virtual ou comendo qualquer procedimento convencional sem nenhum problema usual. Produtos correntes podem ser divididos inicialmente naqueles usados 12-hidroxystearate e aqueles usando radicais ácidos orgânicos.

Sabão de Lítio 12-hidroxystearate pode geralmente ser disperso em temperaturas em torno de 93°C, enquanto muitas das outras sopas de lítio requerem

temperaturas no range de 204°C ou mais. Uma larga variação de fibras estruturais e propriedades das graxas resultam em sopas derivadas de compostos orgânicos ácidos.

A graxa Lubrax Lithplus SM-2 possui os seguintes dados técnicos, segundo folheto do fabricante:

Graxa lubrificante à base de sabão complexo de lítio, contendo em sua formulação dissulfeto de molibdênio. Disponível no grau NLGI 2. É uma graxa acinzentada com sabão complexo de lítio, do tipo múltiplas aplicações, contendo em sua formulação aditivos de extrema pressão (EP) e bissulfeto de molibdênio.

É caracterizada por seu elevado ponto de gota (é uma propriedade qualitativa que apresenta a temperatura na qual uma graxa lubrificante, ou qualquer substância de alta viscosidade, passa do estado sólido ou plástico (altamente viscoso) ao líquido, sob condições determinadas de pressão e movimento, por exemplo), acima de 260°C, e é formulada com um pacote de aditivos especial para prover uma melhor proteção contra ferrugem e corrosão, resistência à lavagem com água, estabilidade a oxidação e proteção ao desgaste sob cargas elevadas. É recomendada para equipamentos de construção, terraplenagem, mineração e máquinas agrícolas onde existam pontos de lubrificação à graxa tais como os encontrados em: tratores, escavadeiras, motoniveladoras, compactadores, colheitadeiras, equipamentos agrícolas, etc.

2.9. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Uma medição tem imperfeições que dão origem aos erros nos resultados de medição. Tradicionalmente, um erro é examinado como tendo duas componentes, chamadas, componentes aleatórias e componentes sistemáticas. O erro é um conceito idealizado e não pode ser exatamente conhecido (Franco, 2008).

A incerteza do resultado de medição reflete a falta de conhecimento do valor do mensurando. O resultado de uma medição após a correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos é, entretanto, somente uma estimativa do valor do mensurando devido à incerteza surgida dos efeitos aleatórios e das correções imperfeitas do resultado dos efeitos sistemáticos (Franco, 2008).

Segundo o VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia) é adotado a seguinte definição:

A incerteza de medição é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão de valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando.

Incerteza de medição é uma medida de um erro possível num valor estimado do mensurando proporcionado pelo resultado de uma medição.

Incerteza de medição é uma estimativa caracterizando uma série de valores, entre os quais o valor verdadeiro de uma medição se encontra (VIM, 1º edição, 1984, item 3.09).

Incerteza Padrão

Incerteza do resultado de medição expresso com um desvio padrão.

Avaliação de Incerteza Tipo A

Método de avaliação da incerteza por análise estatística de uma série de observações.

Avaliação de Incerteza Tipo B

Método de avaliação da incerteza por meio de outras análises estatísticas de uma série de observações.

Incerteza Padrão Combinada

A incerteza padrão combinada do resultado de medição, quando o resultado é obtido por valores de um número de outras quantidades, é igual a raiz quadrada positiva da soma dos termos; os termos, sendo a variância ou covariância dessas outras quantidades ponderadas de acordo com o resultado da medição, variam com a transformação dessas quantidades (Gallas, 1998).

Incerteza Expandida

Quantidade definindo um intervalo, sobre o resultado de uma medição, que pode ser esperado para compreender uma fração de uma distribuição dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos a um mensurando.

A fração pode ser examinada como uma probabilidade média ou nível de confiança do intervalo.

Para se associar um nível de confiança específico a um intervalo definido pela incerteza expandida, se requer uma suposição quanto à relação da probabilidade da distribuição caracterizada pelo resultado de medição e suas incertezas padrão combinadas (Gallas, 1998). Para maior detalhamento, consultar literatura especializada do assunto.

Fator k

Fator numérico usado como um multiplicador para a incerteza padrão combinada para obter uma incerteza expandida. Este fator k, é tipicamente da ordem de 2 a 3.

Determinando a incerteza padrão combinada

Muitas vezes a grandeza que se quer obter não é medida diretamente, mas determinada indiretamente a partir de cálculo, empregando-se uma relação conhecida, na qual figuram as grandezas medidas diretamente. Existem situações em que todas as grandezas de entrada são independentes, o que chamamos de grandezas não correlacionadas e situações em que duas ou mais grandezas de entrada são correlacionadas (Gallas, 1998).

Grandezas de entrada não correlacionadas

Supondo que o mensurando Y que não é medido diretamente, mas a partir de N outras grandezas X_1, X_2, \dots, X_N , através de uma relação funcional f:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1.25)$$

Chamando de y a estimativa do mensurando Y ($y = \bar{Y}$), a incerteza padrão de y é obtida pela combinação apropriada de incertezas padrão das estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_n ($x = \bar{X}$). A incerteza padrão combinada $u_c(y)$ é a raiz quadrada positiva da variância combinada $u_c^2(y)$, que é dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (1.26)$$

onde f é a função dada na equação (1.15). Cada $u(x_i)$ é uma incerteza padrão avaliada como descrito na equação. A incerteza padrão combinada $u_c(y)$ é um desvio padrão estimado e caracteriza a dispersão dos valores que poderiam, razoavelmente, ser atribuídos ao mensurando Y. Pode-se expressar o resultado na forma: (Sousa, 2013).

$$Y = y \pm u_c(y) \quad (1.27)$$

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS ENSAIADOS

Neste item são apresentados os procedimentos e as principais técnicas utilizadas para o estudo dos principais aspectos tribológicos que podem influenciar de alguma forma a determinação do fator de torque K.

Como objetivos detalhados, são destacados:

A - Verificar e quantificar as propriedades mecânicas e metalúrgicas destes materiais;

B - Verificar e quantificar a rugosidade dos parafusos no estado de como recebidos, utilizando microscópio COMFOCAL;

C - Verificar e quantificar o fator de torque para a condição de montagem lubrificada e seca em três patamares de pré-tensão;

D - Verificar e avaliar o aspecto superficial antes e pós-aperto utilizando microscópio eletrônico de varredura – MEV;

E - Verificar e avaliar o fator de torque, como mencionado em “C”, para cada aplicação de torque. Já o aspecto superficial, como mencionado em “D”, será reavaliado após dez aplicações.

3.2. MATRIZ DE ENSAIOS E MATERIAIS

Serão ensaiados 19 parafusos de diâmetro 1 ¼ in x 7 UNC da classe 10.9, fabricados conforme a norma ASTM A-490, enegrecido por tratamento térmico, com e sem aplicação de lubrificante.

A Tabela 3.1 apresenta os ensaios previstos neste trabalho bem como as condições avaliadas e o objetivo de cada um deles.

Tabela (3.1) – Descrição da Matriz de Ensaios

Tipo de Ensaio	Descrição / Objetivo
Análise Micro-Estrutural	Caracterizar microestrutura das condições como recebido.
Microscopia Eletrônica por MEV/Espectrometria	Caracterização por análise química (EDS-MEV) e por espectrometria. Avaliar qualitativamente a condição superficial antes do primeiro aperto (como recebido).
Medição de Rugosidade	Quantificar a rugosidade da condição de como recebido.
Ensaio de Tração	Avaliar as propriedades mecânicas à tração.
Ensaio de Dureza	Avaliar as propriedades mecânicas de dureza.
Ensaio de Torque	Avaliar o fator de torque para a condição inicial (primeiro aperto), lubrificado e seco, utilizando células de carga. Repetir este processo em dez aplicações.
Microscopia Eletrônica por MEV	Avaliar qualitativamente a condição superficial antes do primeiro aperto (como recebido), e também após o décimo retorqueamento.

3.2.1. Análise Micro-Estrutural

Os corpos de prova foram cortados em uma máquina politriz, com refrigeração adequada. Os mesmos, com e sem embutimento, foram lixados numa seqüência normal de lixas de S₁C, e polimento com alumina fina e pasta de diamante.

O reativo químico utilizado para revelar a microestrutura dos aços foi o Nital 2% (2 ml de ácido nítrico-HNO₃ em 98 ml de etanol-C₂H₅OH). Foram analisadas as seções longitudinais e transversais dos corpos de prova.

A observação micro-estrutural se fez através do microscópio Olympus ComFocal, conforme figura 3.1.



Figura (3.1) – Microscópio Olympus ComFocal.

3.2.2. Microscopia Eletrônica por MEV/Espectrometria

Uma série de inspeções foi conduzida usando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) Shimadzu SSX-550 SuperScan, figura 3.2, para observar as superfícies de contato entre os filetes de rosca, nas condições de “como recebido”, e após dez torqueamentos.

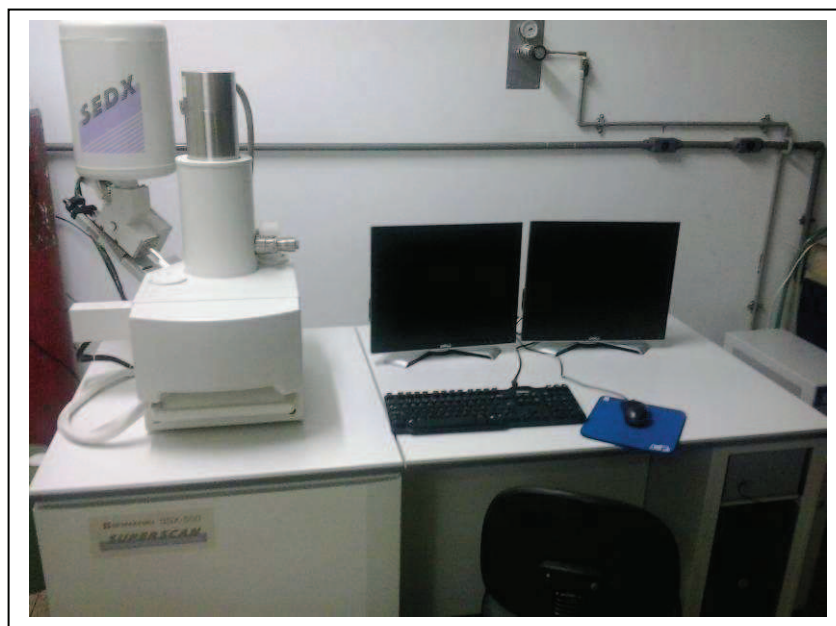


Figura (3.2) – Microscópio Shimadzu SSX-550 SuperScan.

A análise química foi realizada também utilizando o espectrômetro de emissão ótica, conforme a figura 3.3.



Figura (3.3) – Espectrômetro Test-Master Pro.

3.2.3. Medição de Rugosidade

A medição da rugosidade foi efetuada em amostra preparada de parafuso no estado de “como recebido” e também após dez torqueamentos. Para tal utilizamos o microscópio Olympus ComFocal, já apresentado na figura 3.1. As medições foram realizadas em escala Ra.

3.2.4. Ensaios de Tração

Para a caracterização das propriedades mecânicas do material estudado foram realizados ensaios de tração. Os ensaios foram realizados em uma máquina INSTRON modelo 8852. A Figura 3.4 mostra o equipamento utilizado para os ensaios de tração:



Figura (3.4) – Máquina de ensaios de tração Instron.

Os corpos de prova de tração tiveram suas dimensões de seção reduzida extraídos no próprio parafuso. A Figura 3.5 apresenta o esquema de retirada de amostras.

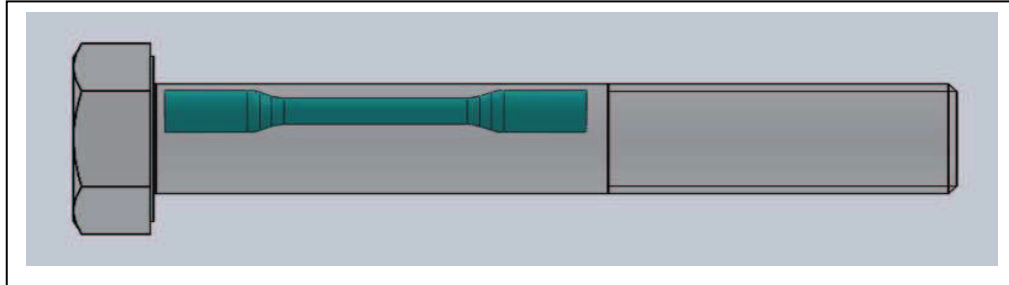


Figura (3.5) – Posição de extração de corpo de prova de tração.

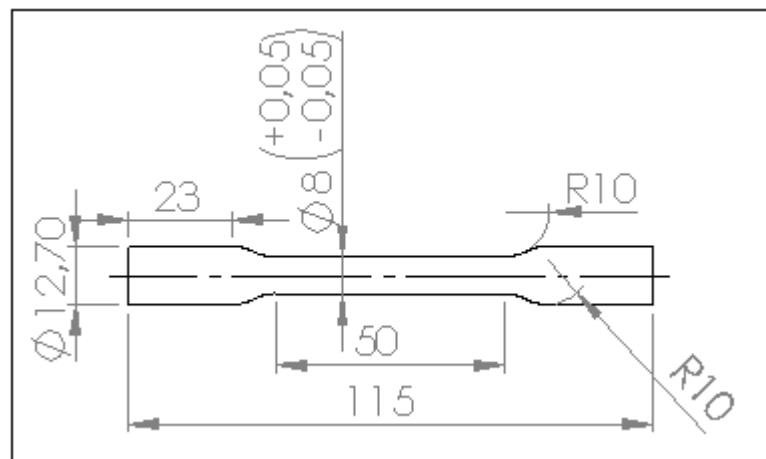


Figura (3.6) – Dimensões básicas de corpo de prova usinado.

3.2.5. Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados visando avaliar aspectos mecânicos. Utilizamos a escala Vickers, com micro-durômetro Shimadzu HMV, figura 3.7.



Figura (3.7) – Micro-Durômetro.

3.2.6. Ensaio de Torque

Os ensaios de torque foram realizados em bancada construída para esta finalidade (Figura 3.8).

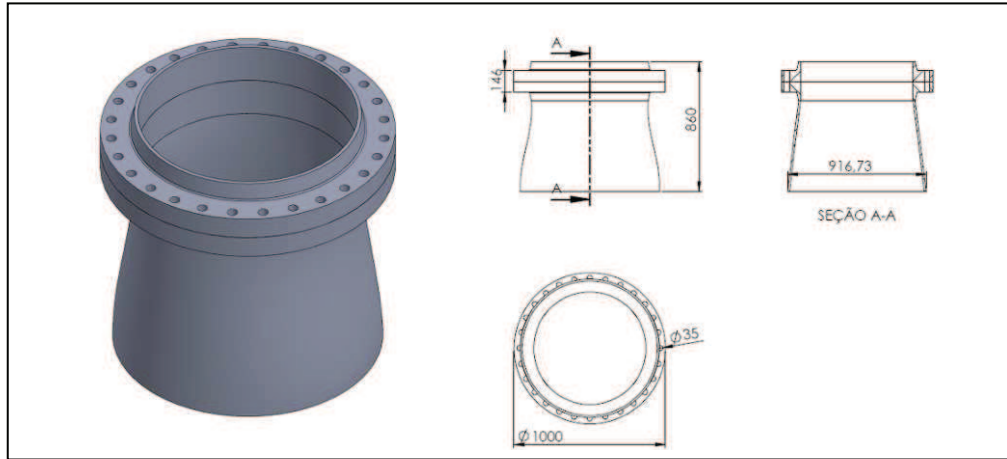


Figura (3.8) – Bancada para realização do torqueamento.

O ensaio de torque à ser realizado na bancada supracitada, foi executado com equipamentos especiais, tais como na figura 3.9.

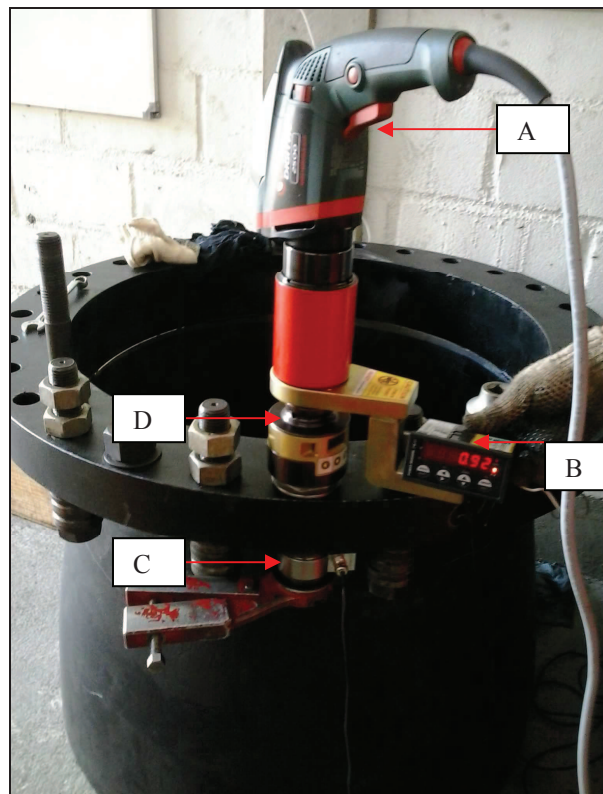


Figura 3.9 – Equipamentos utilizados no experimento: **A** – Torqueadeira eletrônica; **B** - Visor da arruela sensora; **C** – Arruela sensora; **D** – Soquete digital.

O arranjo, assim como a condução do ensaio, foi realizado de acordo com a norma ISO 16047 (antiga DIN 946).

A – Torqueadeira Eletrônica;



Figura 3.10 – Torqueadeira eletrônica.

A torqueadeira eletrônica foi selecionada devido a facilidade de ajustar o torque pretendido, assim como se tratar de torqueamento contínuo.

B – Célula de carga para medir torque de entrada;



Figura 3.11 – Células de carga para medição de Torque (soquete digital).

A célula de carga de torção foi utilizada para obter o conhecimento mais perfeito possível do torque efetivamente aplicado ao parafuso. A mesma foi calibrada em laboratório credenciado pela Rede Brasileira de Calibração (RBC).

C – Célula de carga para medir compressão;

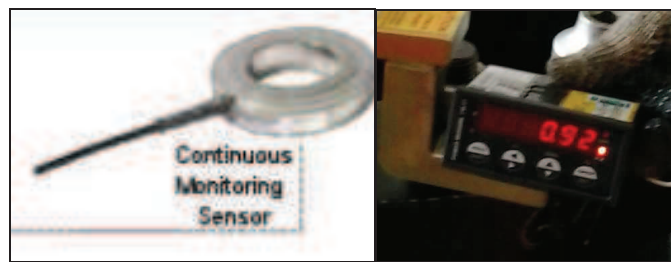


Figura 3.12 – Células de carga para medição da força de aperto (arruela sensora).

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

O arranjo sugerido pela norma ISO 16047 (antiga DIN 946) encontra-se na figura 3.13.

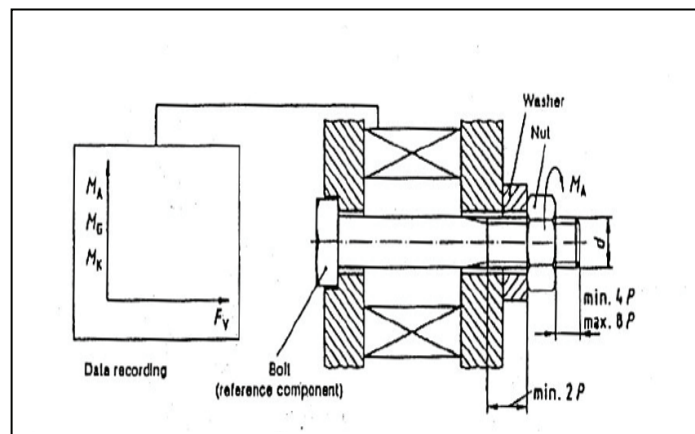


Figura 3.13 – Arranjo do experimento sugerido pela norma.

O ensaio de torque será realizado seguindo a tabela 3.2:

Tabela (3.2) – Planejamento de ensaios de torque nos parafusos.

Torque	Condição de Montagem/Quantidade de Parafusos		
	Seco	Lubrificado	Re-Lubrificado
1450 Nm	3	3	0
2034 Nm	0	3	3
2441 Nm	3	4	0

Na tabela 3.2, percebe-se três valores médios de torque, **1450, 2034 e 2441Nm**. Estas faixas de torque foram selecionadas com objetivo de gerar força de pré-tensão axial de 55, 75 e 85% do limite de escoamento do material do parafuso.

Foram selecionadas três condições de montagem, consideradas típicas na indústria: **seco, lubrificado e relubrificado**. Na condição “lubrificado”, com uso de graxa **Lubrax Autolith 2**, o parafuso será lubrificado apenas antes da primeira montagem. Já na condição “Re-lubrificado”, a graxa será re-aplicada a cada torqueamento, aguardando-se um tempo de cinco minutos entre cada re-aplicação.

Algumas combinações de carga e lubrificação não serão testadas devido a falta de corpos de prova (indicado zero na tabela).

Os resultados serão organizados em tabelas, como abaixo.

Tabela (3.3) – Registro dos ensaios de torque.

Ciclo (n)	Parafuso D			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Todos os parafusos foram identificados com letras em baixo relevo na lateral da cabeça sextavada (“D” – parafuso D, por exemplo).

O torque “T” e a força de aperto “F” são medidos através de sensores. O fator de torque “K”, calculado através da equação 1.13. O μ_t , coeficiente de atrito total, calculado através da equação da norma ISO 16047. Cada parafuso foi apertado e re-apertado “n” vezes (10 aplicações). A primeira coluna, ciclos, trata justamente deste aspecto. Entre cada aperto (n) foi dado um tempo de 5 minutos para resfriamento e acomodação.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise micro-estrutural

4.1.1 Metalografia

As amostras foram cortadas e preparadas para avaliação metalográfica, conforme figuras abaixo.



Figura (4.1) – Amostras cortadas e preparadas.



Figura (4.2) – Amostras embutidas (arruela).

A avaliação metalográfica no parafuso revelou uma estrutura martensítica revenida, típica de aços baixa liga, temperados e revenidos, conforme figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4,6 e 4.7.

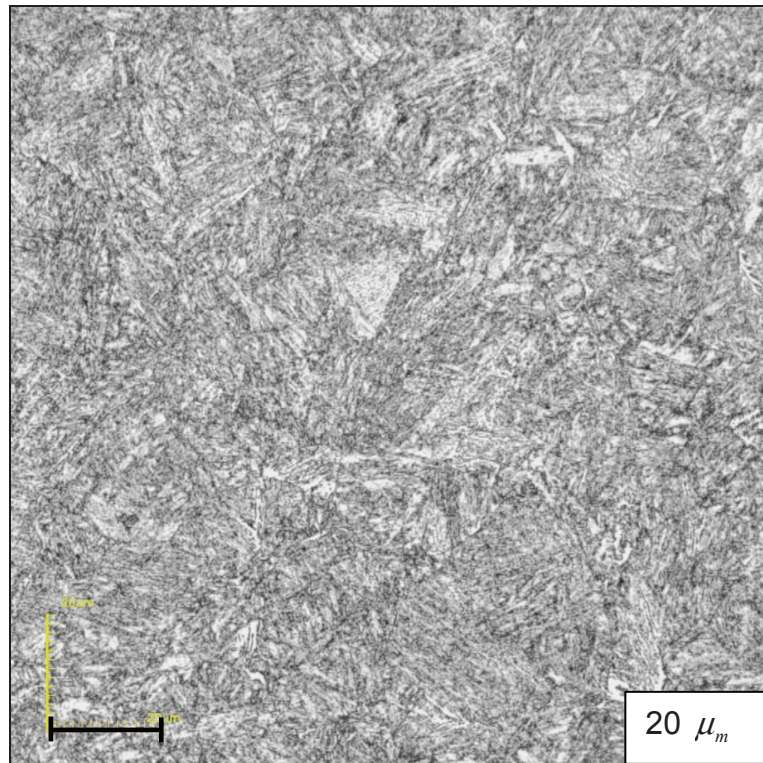


Figura (4.3) – Região central do parafuso ($20 \mu_m$).

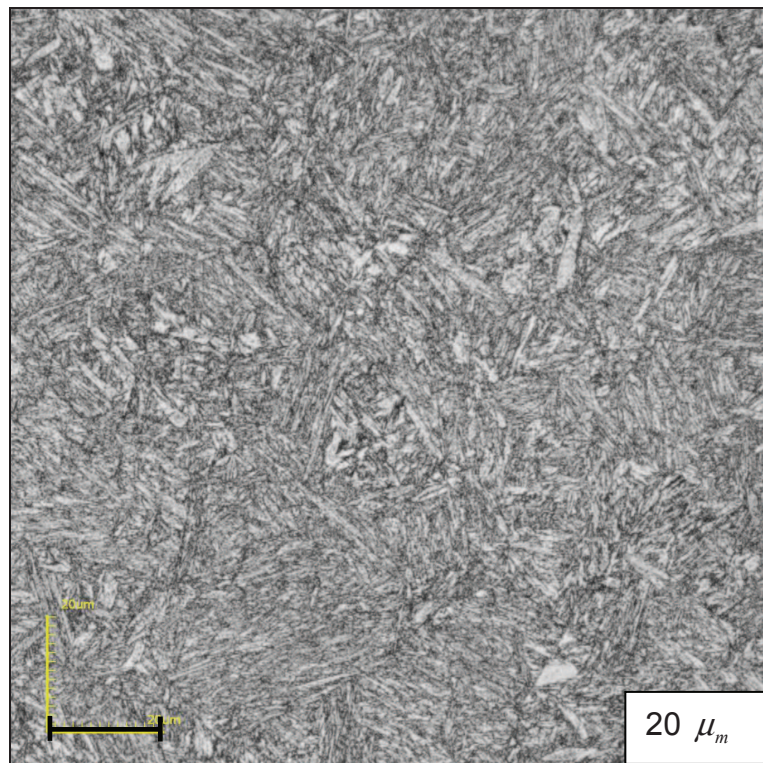


Figura (4.4) – Região próxima à superfície do parafuso ($20 \mu_m$).

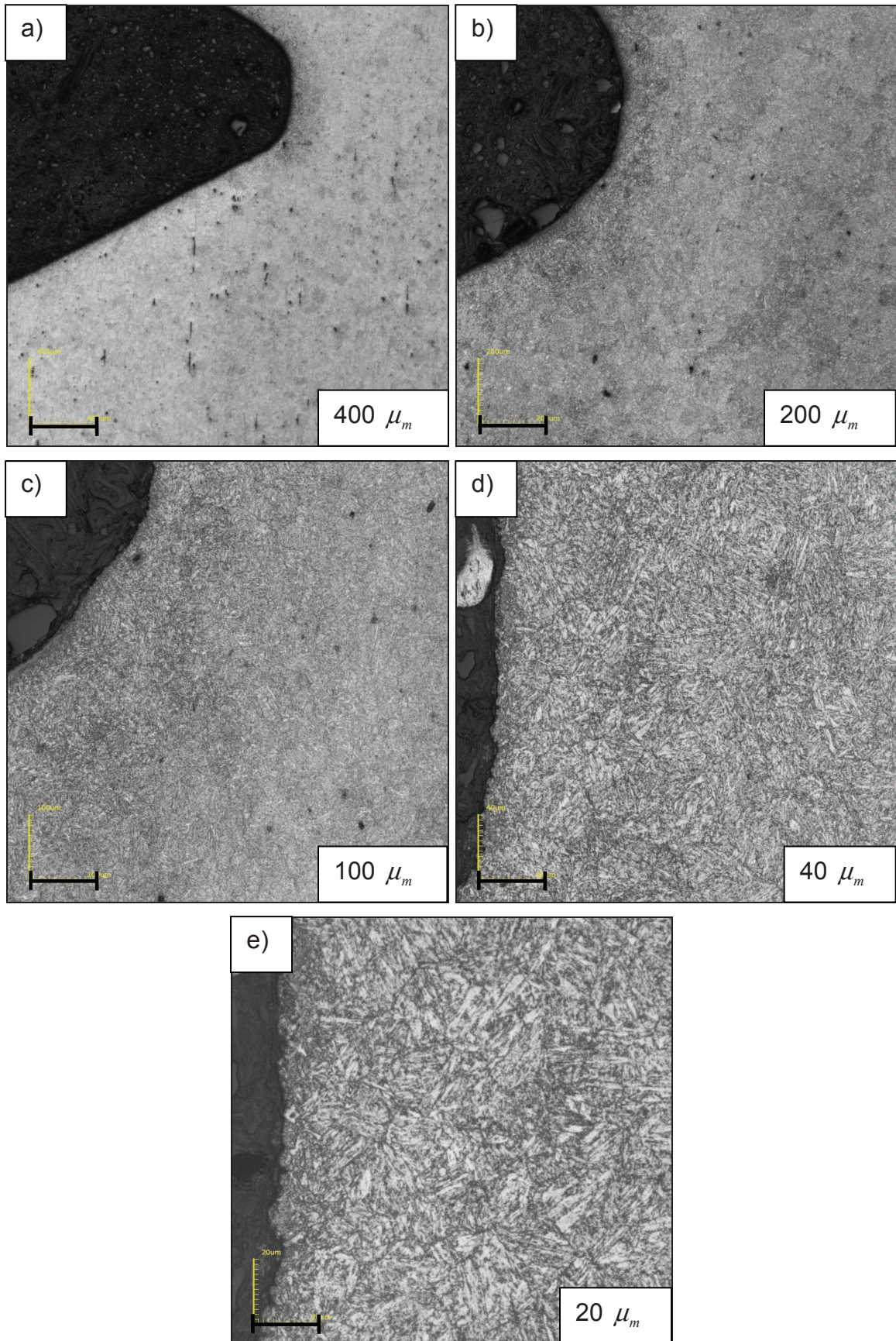


Figura (4.5) – Região roscada do parafuso – corte longitudinal (a-400, b- 200, c-100, d-40, e-20 μ_m).

Avaliações metalográfica da porca e da arruela também revelaram uma estrutura de martensita revenida, conforme figura 4.6.

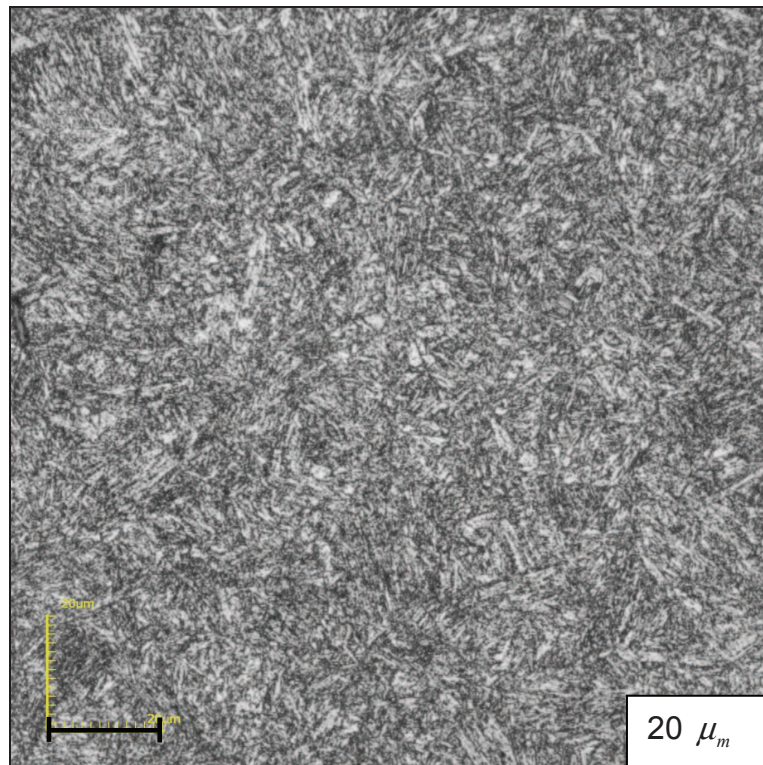


Figura (4.6) – Região central da porca ($20 \mu_m$).

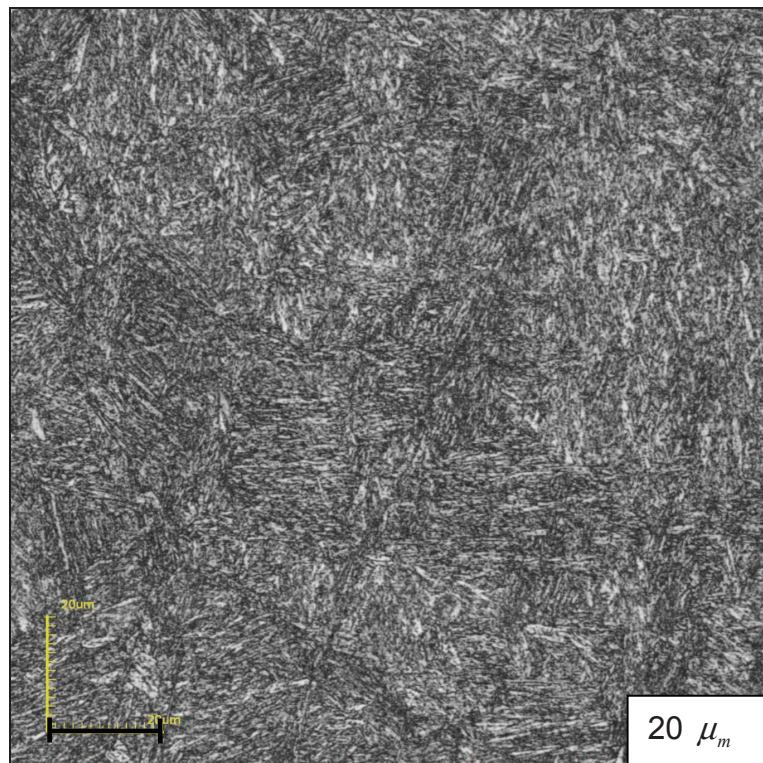


Figura (4.7) – Região central da arruela ($20 \mu_m$).

4.1.2 Análise Química do Parafuso

A análise química realizada com espectrômetro de emissão ótica revelou a seguinte composição:

Material : parafuso 10.9		Hora: 14:00:45			
Data: 12/8/2013		Ordem			
Amostra					
Composição Química					
	Fe	C	Si	Mn	Cr
1	97,8	0,386	0,212	0,773	0,779
2	97,8	0,394	0,205	0,785	0,770
3	97,9	0,369	0,198	0,762	0,767
Ave	97,8	0,383	0,205	0,773	0,772

Figura (4.8) – Composição química do parafuso.

A composição química não evidenciou a presença do elemento químico molibdênio que caracterizaria o material como SAE 4140 (UNS-41400).

Outra análise, agora qualitativa, utilizando micro-análise do microscópio eletrônico de varredura (MEV com EDS - Energia Dispersiva) indicou resultado semelhante, conforme abaixo.

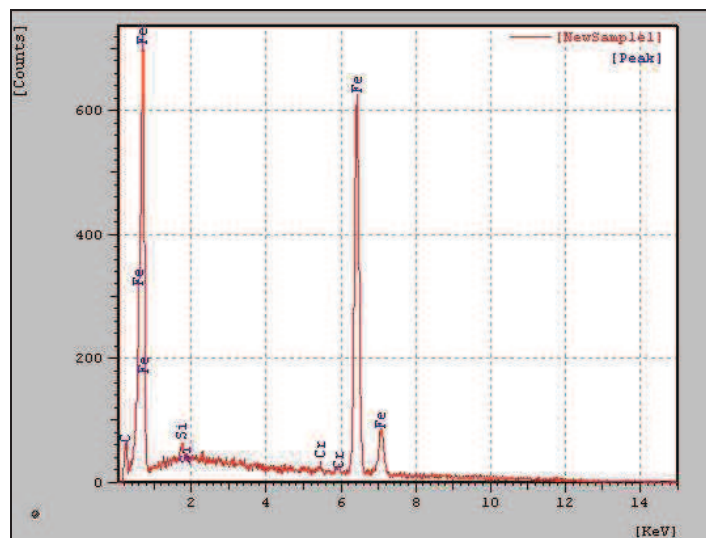


Figura (4.9) – Micro-análise com MEV.

A composição encontrada é característica do aço de baixa liga conforme a norma SAE-5140 (UNS-51400).

Este material também pode ser enquadrado, conforme a norma ASTM A-304-11 (“Standard Specification for Carbon and Alloy Steel Bars Subject to End-Quench Hardenability Requirements”).

Component Elements Properties	Metric
Carbon, C	0.38 - 0.43 %
Chromium, Cr	0.70 - 0.90 %
Iron, Fe	97.395 - 98.07 %
Manganese, Mn	0.70 - 0.90 %
Phosphorous, P	<= 0.035 %
Silicon, Si	0.15 - 0.30 %
Sulfur, S	<= 0.040 %

Figura (4.10) – Composição química do aço SAE-5140 (UNS-51400).

A304 - 11							
TABLE 1 Continued							
UNS Designation ^a	Grade Designation	Chemical Composition, %					
		Carbon	Manganese	Silicon	Nickel	Chromium	Molybdenum
H 48200	4820 H	0.17-0.23	0.40-0.80	0.15-0.35	3.20-3.80	...	0.20-0.30
H 50401	50B40 H ^c	0.37-0.44	0.65-1.10	0.15-0.35	...	0.30-0.70	...
H 50441	50B44 H ^c	0.42-0.49	0.65-1.10	0.15-0.35	...	0.30-0.70	...
H 50460	5046 H	0.43-0.50	0.65-1.10	0.15-0.35	...	0.13-0.43	...
H 50481	50B46 H ^c	0.43-0.50	0.65-1.10	0.15-0.35	...	0.13-0.43	...
H 50501	50B50 H ^c	0.47-0.54	0.65-1.10	0.15-0.35	...	0.30-0.70	...
H 50601	50B60 H ^c	0.55-0.65	0.65-1.10	0.15-0.35	...	0.30-0.70	...
H 51200	5120 H	0.17-0.23	0.60-1.00	0.15-0.35	...	0.60-1.00	...
H 51300	5130 H	0.27-0.33	0.60-1.00	0.15-0.35	...	0.75-1.20	...
H 51320	5132 H	0.29-0.35	0.50-0.90	0.15-0.35	...	0.65-1.10	...
H 51350	5135 H	0.32-0.38	0.50-0.90	0.15-0.35	...	0.70-1.15	...
H 51400	5140 H	0.37-0.44	0.60-1.00	0.15-0.35	...	0.60-1.00	...
H 51450	5145 H	0.42-0.49	0.60-1.00	0.15-0.35	...	0.60-1.00	...
H 51470	5147 H	0.45-0.52	0.60-1.05	0.15-0.35	...	0.80-1.25	...
H 51500	5150 H	0.47-0.54	0.60-1.00	0.15-0.35	...	0.60-1.00	...
H 51550	5155 H	0.50-0.60	0.60-1.00	0.15-0.35	...	0.60-1.00	...
H 51600	5160 H	0.55-0.65	0.65-1.10	0.15-0.35	...	0.60-1.00	...
H 51601	51B60H ^c	0.55-0.65	0.65-1.10	0.15-0.35	...	0.60-1.00	...

Figura (4.11) – Composição química conforme ASTM A-304-11.

O elemento químico Molibdênio (Mo) tem por finalidade aumento da resistência em altas temperaturas (fluência), melhora as propriedades de fadiga, resistência a fragilização por hidrogênio, desloca a curva TTT para a direita aumentando sua temperabilidade e influencia na estabilização de carbonetos. Deve-se notar que o parafuso analisado não tem problemas relacionados a atmosfera de hidrogênio e temperaturas de fluência.

A norma de fabricação do parafuso (ASTM-A490) não define o aço a ser utilizado, apenas indica a necessidade de que seja um aço liga.

Desta forma, a divergência encontrada não se configura uma irregularidade, à princípio, mas dependendo da aplicação pode ser (aplicação em temperaturas mais elevadas, por exemplo).

A citação ao SAE 4140 (UNS-41400), ao longo da revisão bibliográfica, se deu por ser o aço tradicionalmente escolhido para a fabricação de parafusos desta classe. Como um dos objetivos deste trabalho foi a caracterização do material empregado no lote estudado, não foi julgado necessário efetuar, agora, uma comparação mais profunda entre os materiais.

4.2. Microscopia eletrônica por MEV

Foi realizada uma avaliação com MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) visando avaliar qualitativamente o relevo da superfície na condição “como recebido”. Os resultados são apresentados abaixo.

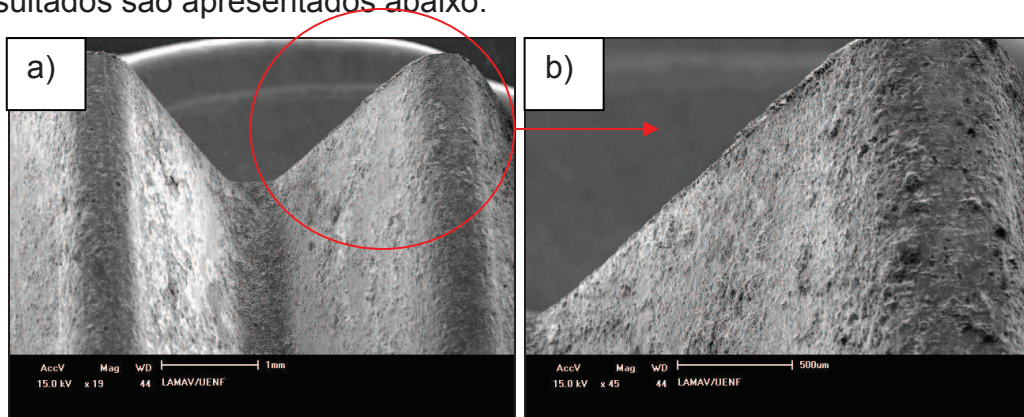


Figura (4.12) – Relevo da rosca de parafuso – “como recebido”. a) 19x; b) 45 x.

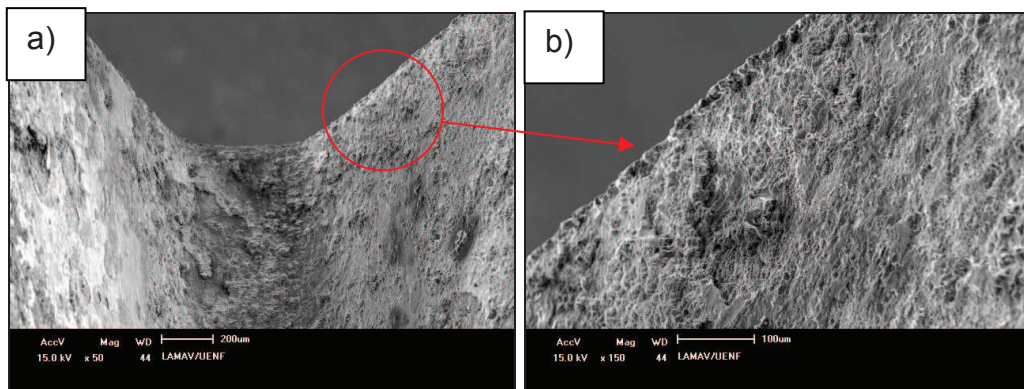


Figura (4.13) – Relevo da rosca de parafuso – “como recebido” a) 50 x; b) 150 x.

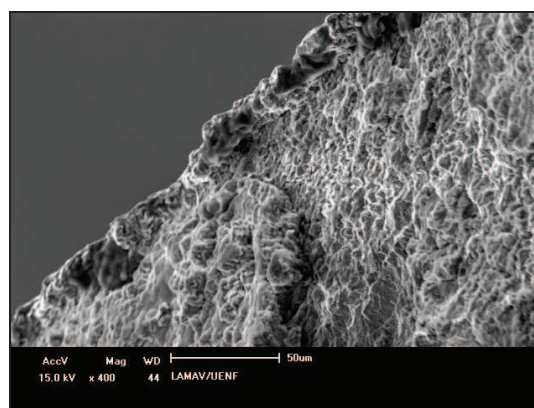


Figura (4.14) – Detalhe do filete (Ampliação de 400x).

O relevo da superfície se mostrou uniforme, conforme se espera de uma rosca rolada. Observa-se uma camada superficial, certamente oriunda do processo

de tratamento térmico. Esta camada escura é chamada de “Enegrecimento por Têmpera”.

Esta camada é formada pela carbonização do óleo da têmpera em contato com a peça aquecida que saiu do forno de tratamento térmico. Se o tratamento térmico for feito usando água para refrigerar essa camada não vai se formar. Também se forma uma camada carbonizada (ou escura) em tratamento térmico de cementação.

Este resíduo que protege a rosca contra corrosão, também age como um lubrificante sólido minimizando o atrito no primeiro aperto do parafuso. Tal camada se desprende irregularmente da superfície após alguns reapertos.

4.3. Medição de Rugosidade

Foram realizadas medições de rugosidade nas roscas dos parafusos utilizando-se o microscópio “COMFOCAL”. As medições foram efetuadas em parafusos com três condições superficiais: 1 - “como recebidos”, 2 – Lubrificado após o **décimo** retorqueamento, e 3 – Seco após o **décimo** retorqueamento.

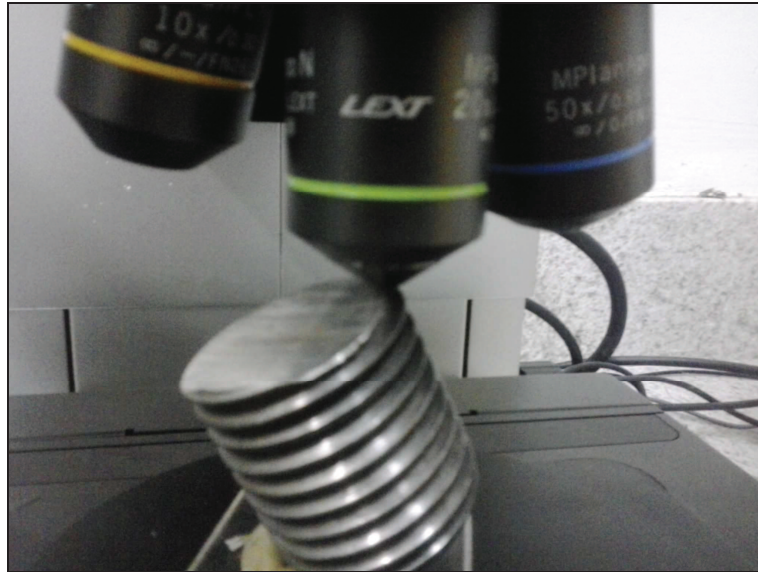


Figura (4.15) – Medição da rugosidade da rosca.

Parafuso “como recebido”

Os resultados encontram-se nas figuras 4.16, 4.18 e 4.20. As medições foram realizadas em escala Ra, nas direções e posições indicadas pelas setas em vermelho.

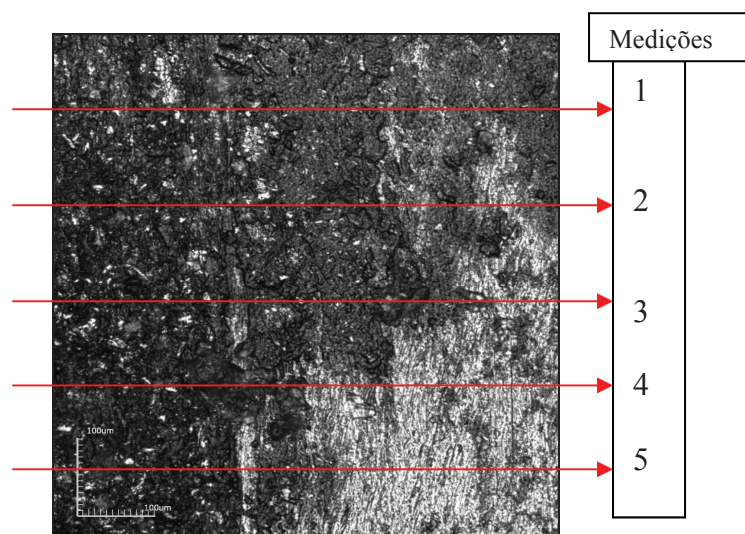


Figura (4.16) – Região de rosca para medição – “como recebida” ($100 \mu_m$).

No	Result	Ra(μm)	Rv(μm)	Rz(μm)	Rz(μm)	Rz(μm)	Rz(μm)	Rz(μm)	Rsk	Rsu	Rsm(μm)	Rdq(μm)	Rdq(μm)	Rm(%)	Rz(isum)	Aq(μm)	As(μm)	At(μm)	File name
1	12.860	4.758	17.618	5.465	17.515	1.888	1.513	0.587	8.731	37.320	76.141	23.914	100.000	10.121	-	-	-	131205_1556	
2	4.874	5.335	10.209	5.149	10.209	1.344	1.644	-0.057	2.851	36.850	66.577	25.371	100.000	8.105	-	-	-	131205_1556	
3	4.859	4.579	9.468	5.810	9.468	1.550	1.872	0.040	2.318	55.238	65.383	27.041	100.000	7.782	-	-	-	131205_1556	
4	8.749	4.597	13.245	5.625	13.245	1.864	2.346	0.730	3.528	55.580	65.232	31.308	100.000	8.312	-	-	-	131205_1556	
5	7.759	3.935	11.694	6.772	11.694	1.562	1.967	0.689	3.423	66.746	68.013	29.848	100.000	8.316	-	-	-	131205_1556	
Count	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Average	7.820	4.647	12.467	5.754	12.467	1.482	1.869	0.398	4.170	50.349	67.883	27.556	100.000	8.647					
Min	4.859	3.935	9.468	5.149	9.468	1.344	1.513	-0.057	2.318	36.850	63.202	23.914	100.000	7.782					
Max	12.860	5.335	17.618	6.772	17.618	1.864	2.346	0.730	8.731	66.746	76.141	31.308	100.000	10.121					
Range	8.001	1.400	8.150	1.623	8.150	0.776	0.833	0.787	6.413	29.896	12.939	7.394	0.000	2.339					
σr	3.335	0.499	3.240	0.513	3.240	0.288	0.322	0.376	2.595	12.950	4.945	3.058	0.000	0.922					
σr	9.919	1.497	9.721	1.940	9.721	0.863	0.956	1.128	7.266	38.980	14.835	9.175	0.000	2.765					

Figura (4.17) – Resultados da medição na rosca nova (como recebida).

Tabela (4.1) – Medições de Rugosidade das roscas novas (como recebida).

Medições	Valores em Ra (μ_m)
1	1,080
2	1,344
3	1,550
4	1,864
5	1,562
Média	1,482

Os resultados, conforme tabela acima, indicam uma rugosidade média igual a **1,482** micrômetros, medida em Ra.

Parafuso Lubrificado (após o décimo retorqueamento)

Os resultados encontram em 4.18. As medições foram realizadas em escala Ra, nas direções e posições indicadas pelas setas em vermelho.

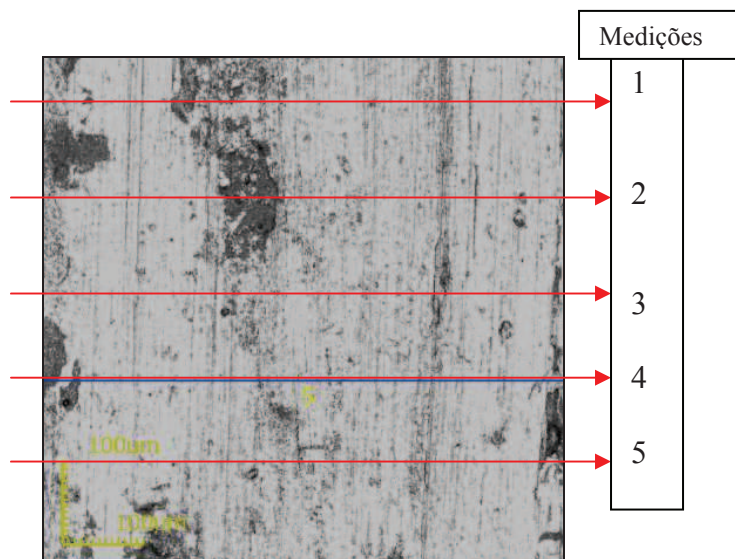


Figura (4.18) – Região de rosca para medição – Lubrificada ($100 \mu_m$).

No.	Result	Rq(μm)	Rv(μm)	Rz(μm)	Rc(μm)	Rt(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)	Rsk	Rku	Rsm(μm)	Rdq(°)	Rbc(μm)	Rrm(%)	Rzjs(μm)	Ac(μm)	As(μm)	Af(μm)	File name
<input type="checkbox"/>	1	6.168	5.371	11.539	3.637	11.539	2.400	2.781	0.085	1.901	11.433	43.953	17.225	100.000	3.637	-	-	-	131205_1638
<input type="checkbox"/>	2	5.539	5.712	11.251	3.324	11.251	2.334	2.735	0.092	1.963	33.534	52.910	17.414	100.000	4.049	-	-	-	131205_1638
<input type="checkbox"/>	3	5.694	4.774	10.467	2.763	10.467	2.261	2.627	0.158	1.901	30.548	54.396	18.919	100.000	4.514	-	-	-	131205_1638
<input type="checkbox"/>	4	6.223	5.196	11.419	2.901	11.419	2.077	2.509	0.352	2.192	38.164	48.749	17.021	100.000	4.296	-	-	-	131205_1638
<input checked="" type="checkbox"/>	5	5.279	5.466	10.745	5.145	10.745	2.354	2.734	0.072	1.901	115.706	43.871	17.595	100.000	-	-	-	-	131205_1638
Count	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Average		5.279	5.466	10.745	5.145	10.745	2.354	2.734	0.072	1.901	115.706	43.871	17.595	100.000	0.000				
Min.		5.279	5.466	10.745	5.145	10.745	2.354	2.734	0.072	1.901	115.706	43.871	17.595	100.000	0.000				
Max.		5.279	5.466	10.745	5.145	10.745	2.354	2.734	0.072	1.901	115.706	43.871	17.595	100.000	0.000				
Range		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
σ		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
3σ		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				

Figura (4.19) – Rugosidade na Rosca Lubrificada.

Tabela (4.2) – Medições de Rugosidade das roscas lubrificadas.

Medições	Valores em Ra (μ_m)
1	2,40
2	2,334
3	2,261
4	2,077
5	2,354
Média	2,354

Os resultados, conforme tabela 4.2, indicam uma rugosidade média igual a **2,354** micrômetros, medida em Ra.

Parafuso Seco (após 10 retorqueamentos)

Os resultados encontram abaixo. As medições foram realizadas em escala Ra, nas direções e posições indicadas pelas setas em vermelho.

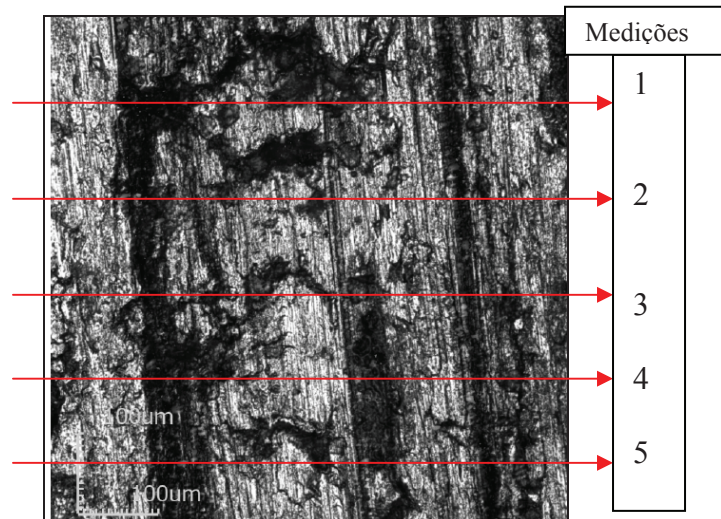


Figura (4.20) – Região de rosca para medição – Seca (100 μ_m).

No.	Result	Ra[μm]	Rv[μm]	Rz[μm]	Rzq[μm]	Rz[μm]	Ra[μm]	Rsk	Rku	Rpm[μm]	Rdq[μm]	Rzq[μm]	Rm[μm]	Rz[μm]	Ar[μm]	Ar[μm]	Ar[μm]	File name
1	29.710	21.185	50.895	23.292	50.895	6.931	9.154	0.076	3.374	132.121	131.041	68.629	100.000	-	-	-	-	fotoseca
2	43.029	24.301	67.330	31.574	67.330	8.753	11.465	0.189	3.341	103.069	225.466	55.725	100.000	31.974	-	-	-	fotoseca
3	35.773	22.102	57.935	37.935	57.935	10.182	12.605	0.319	2.909	374.738	122.399	66.676	100.000	-	-	-	-	fotoseca
4	29.586	22.975	52.561	26.307	52.561	10.707	12.879	0.107	2.246	125.659	137.654	69.597	100.000	-	-	-	-	fotoseca
5	34.838	25.638	60.476	60.476	60.476	11.371	13.766	0.183	2.312	373.483	133.636	63.547	100.000	-	-	-	-	fotoseca
Count	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Average	34.583	23.256	57.839	39.997	57.839	9.589	12.014	0.215	2.836	221.876	150.039	64.225	100.000	31.974				
Min.	29.586	21.185	50.895	23.292	50.895	6.931	9.154	0.076	2.246	103.069	122.399	55.725	100.000	31.974				
Max.	43.029	25.638	67.330	60.476	67.330	11.371	13.766	0.319	3.374	374.738	225.466	69.597	100.000	31.974				
Range	13.443	4.473	16.435	37.184	16.435	4.440	4.612	0.443	1.128	271.669	103.067	13.872	0.000	0.000				
σ	5.502	1.763	6.579	17.833	6.579	1.771	1.799	0.177	0.541	136.392	42.534	5.917	0.000	0.000				
$\bar{\sigma}$	16.536	5.288	19.736	53.496	19.736	5.312	5.393	0.531	1.624	416.177	127.602	17.751	0.000	0.000				

Figura (4.21) – Rugosidade na Rosca Seca.

Tabela (4.3) – Medições de Rugosidade das roscas secas.

Medições	Valores em Ra (μ_m)
1	6,931
2	8,753
3	10,182
4	10,707
5	11,371
Média	9,589

Os resultados, conforme tabela 4.4, indicam uma rugosidade média igual a **9,589** micrômetros, medida em Ra.

Os resultados, conforme resumidos na tabela abaixo, indicam um grande aumento na rugosidade superficial de parafusos montados à seco. Tal fato denota um limite de aplicações para este tipo de montagem, devido ao desgaste superficial. Cuidados com o valor do torque aplicado também devem ser avaliados, visto que, um relevo superficial tão diferente certamente aumenta a resistência ao deslizamento destas superfícies, demandando mais torque para um mesmo nível de aperto.

Tabela (4.4) – Resumo das medições de Rugosidade das roscas.

	Rugosidade Ra (μ_m)
Rosca como recebida (sem uso)	1,482
Rosca lubrificada (10 montagens)	2,354
Rosca Seca (10 montagens)	9,589

Na tabela 4.4 se observa que a rosca montada seca aumentou sua rugosidade **6,5 vezes** em relação à rosca nova, após 10 apertos sucessivos. Tal fato motivará uma recomendação interna para alteração da especificação de compra destes materiais.

4.4. Ensaio de Tração

As propriedades mecânicas dos parafusos foram avaliadas através de ensaio de tração, sendo as de interesse deste trabalho as listadas na norma ASTM A-490, ou seja, tensão máxima e tensão de escoamento. As curvas abaixo não devem ser usadas para cálculo do módulo de elasticidade, pois não foi efetuado o ajuste na escala da abscissa que levasse em conta somente a deformação na seção de medida. Os resultados encontram-se abaixo.

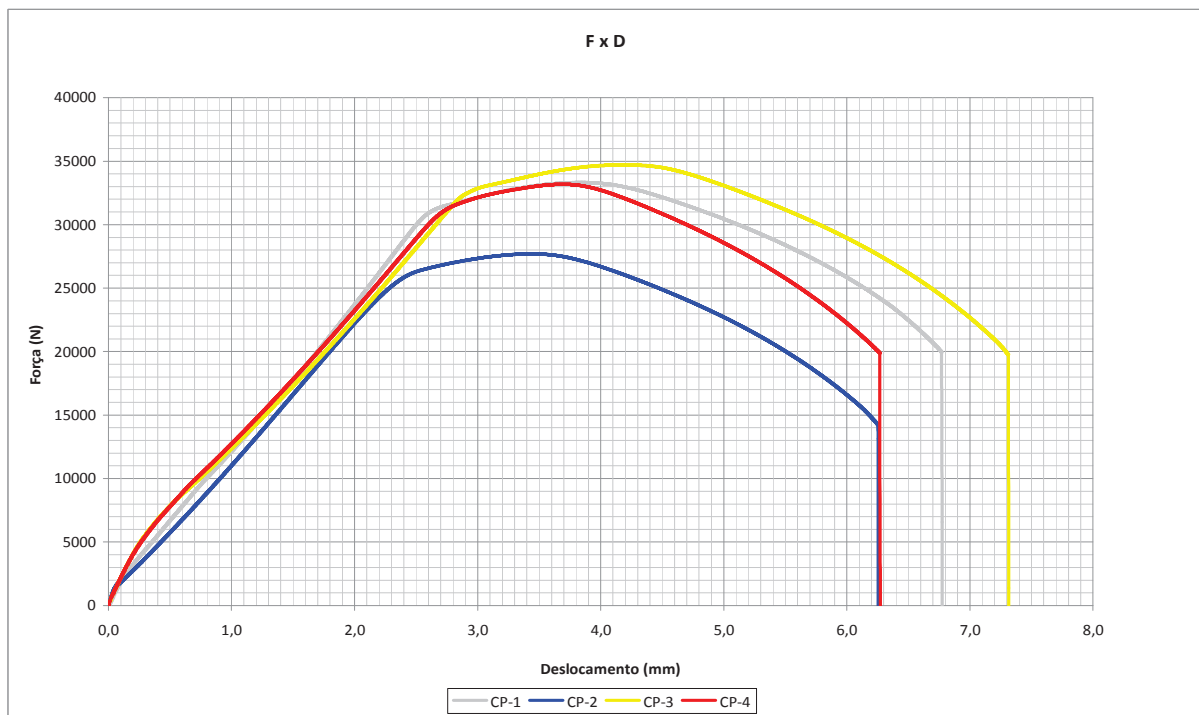


Figura (4.22) – Gráfico de força x deslocamento (CP1, CP2, CP3 e CP4).

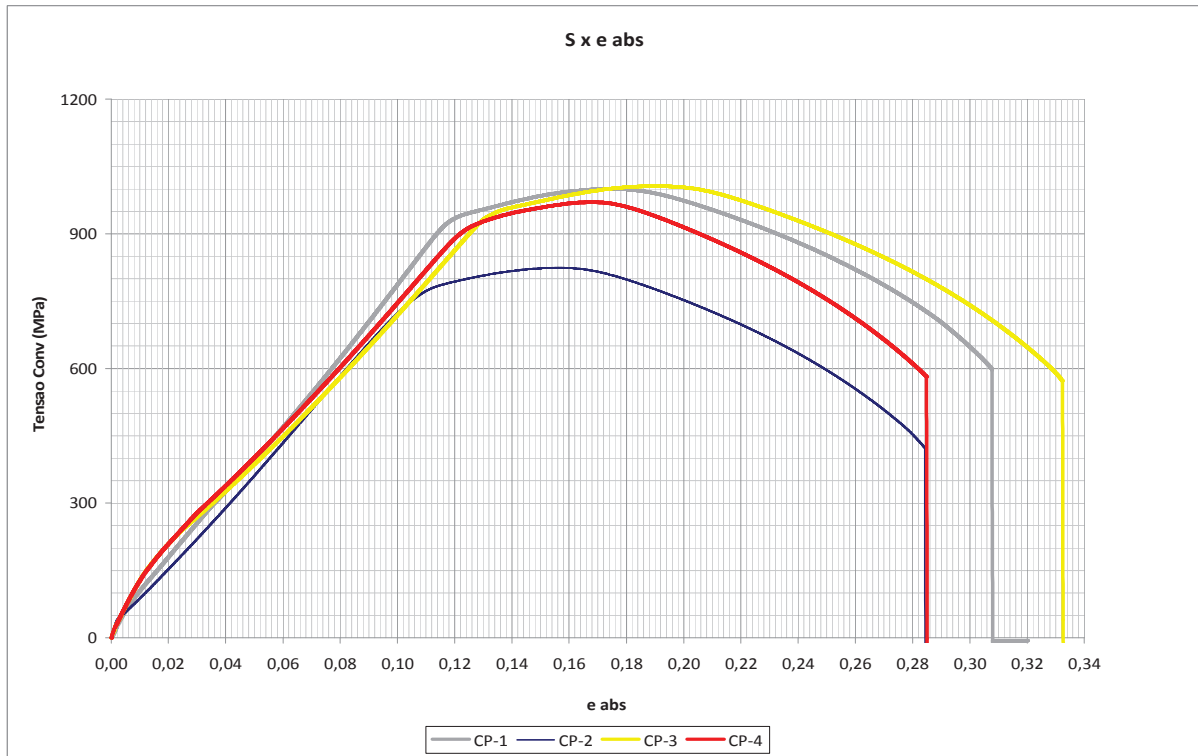


Figura (4.23) – Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Absoluta (CP1, CP2, CP3 e CP4).

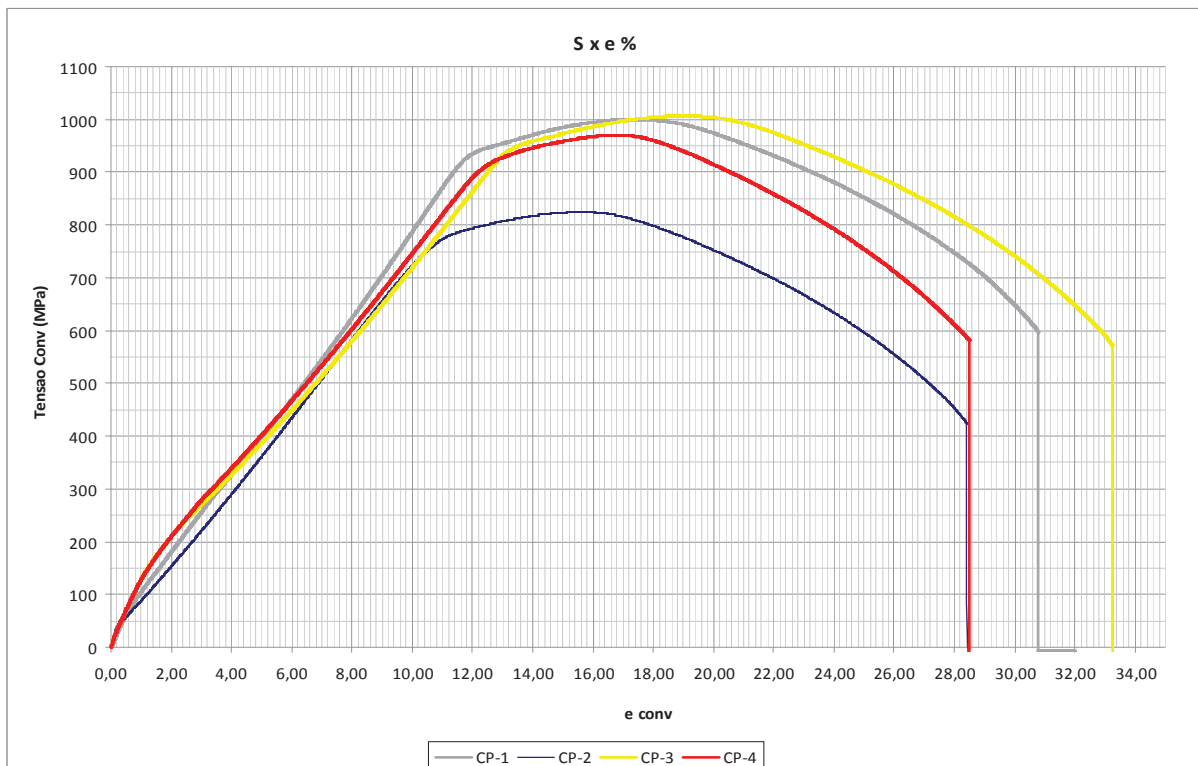


Figura (4.24) – Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Relativa (CP1, CP2, CP3 e CP4).

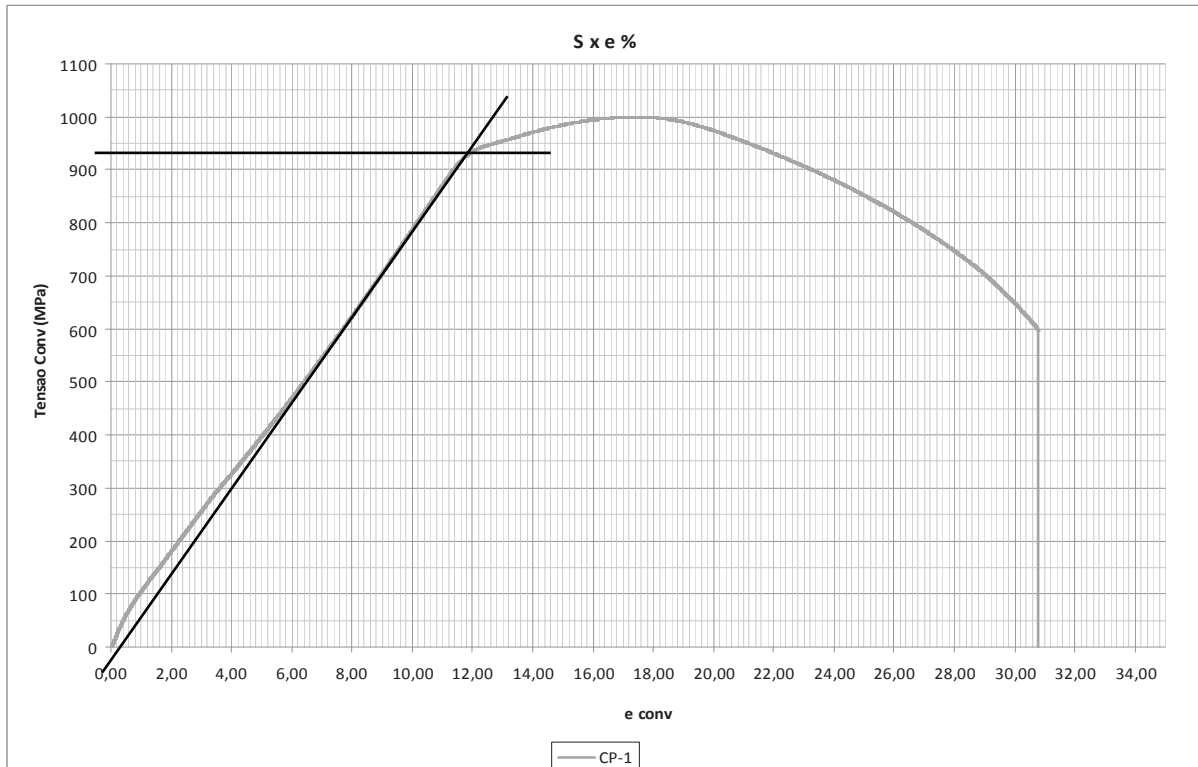


Figura (4.25) – CP-1. Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Relativa. A linha preta no gráfico indica a tensão de escoamento a 0,2% de deformação (tensão de escoamento a 0,2 % de off-set).

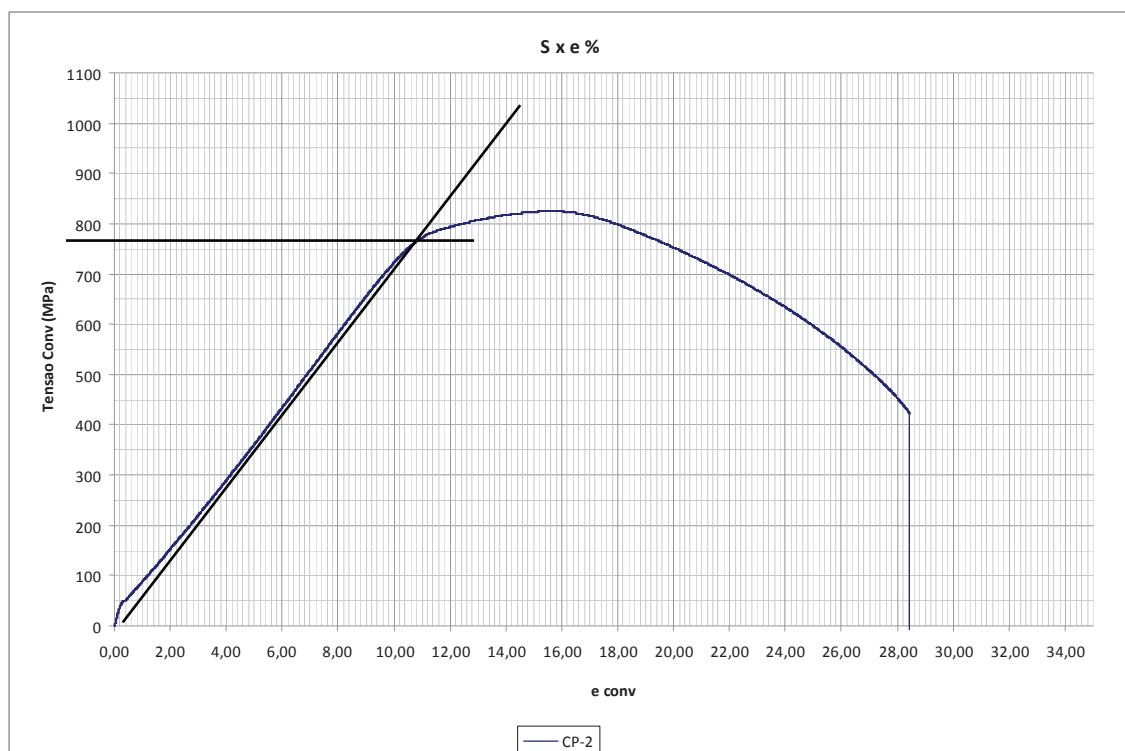


Figura (4.26) – CP-2. Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Relativa.

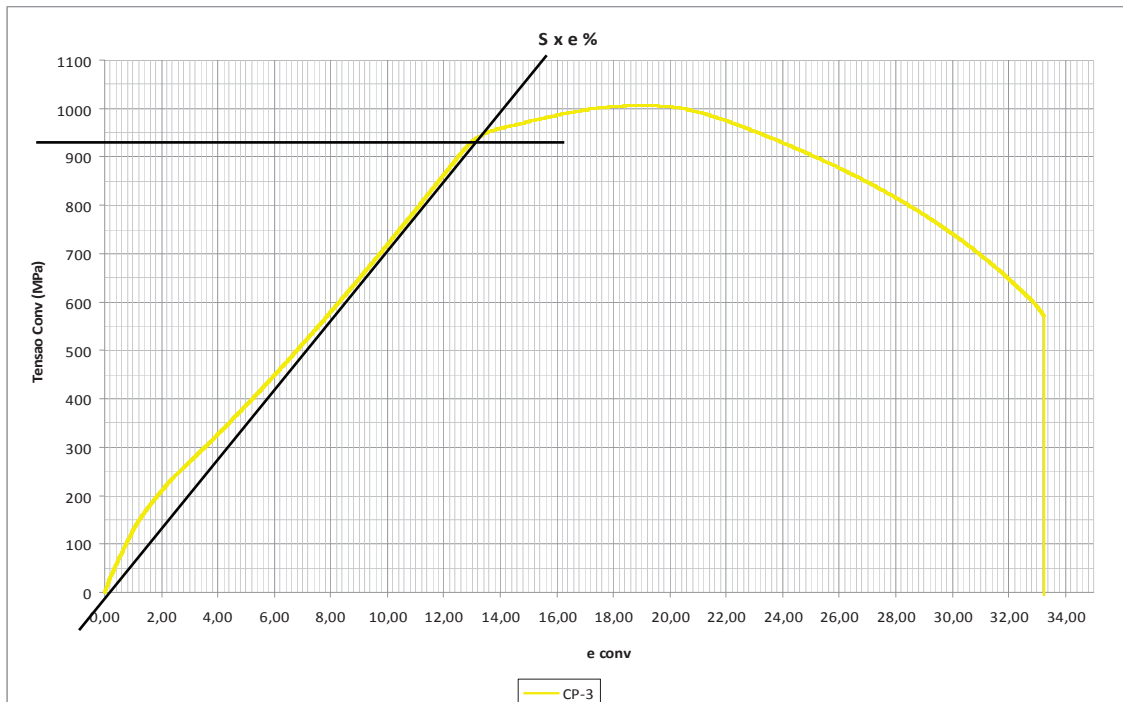


Figura (4.27) – CP-3. Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Relativa. A linha preta no gráfico indica a tensão de escoamento a 0,2% de deformação (tensão de escoamento a 0,2 % off-set).

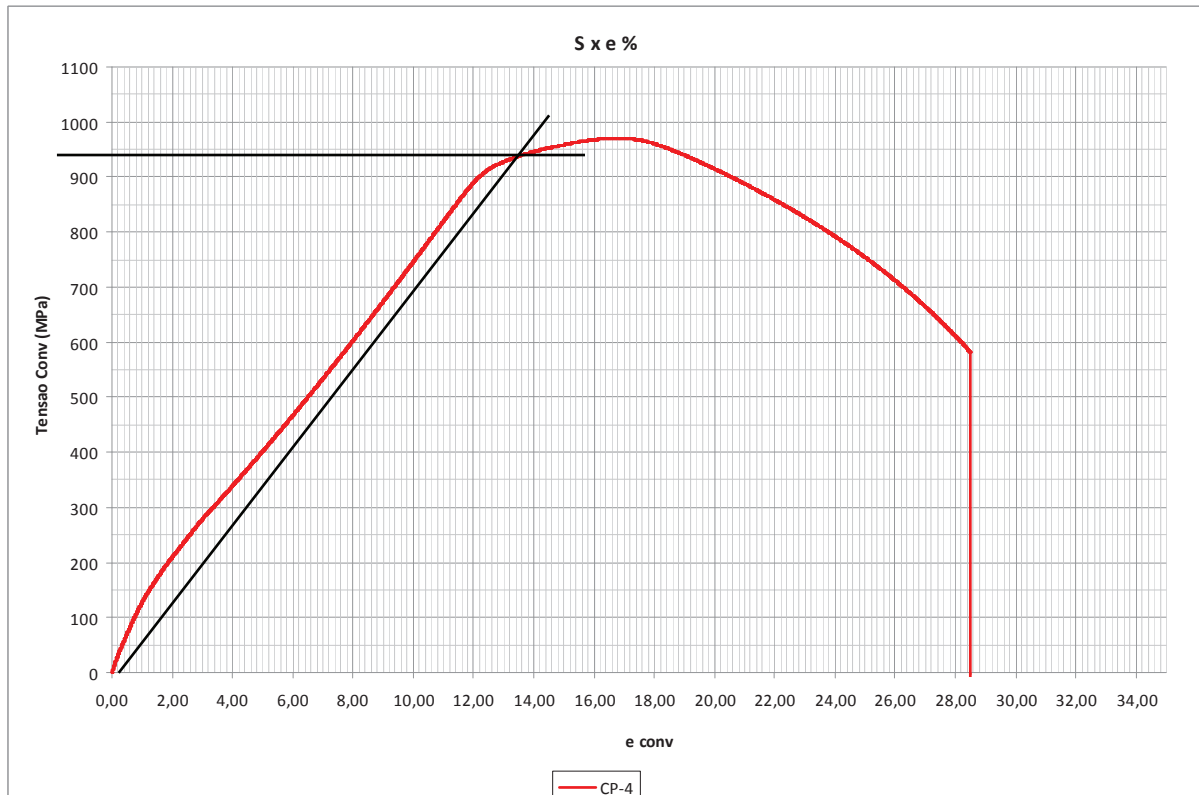


Figura (4.28) – CP-4. Gráfico de tensão de Engenharia x Deformação Relativa.

O ensaio de tração foi realizado conforme a norma ASTM E-8. As propriedades mecânicas foram estabelecidas conforme a norma ASTM F-606. Todos os corpos de prova foram usinados de parafusos em uma região intermediária entre a superfície e o centro, com exceção do corpo de prova 02, que foi retirado exatamente do centro do parafuso. Não houve preocupação em definir o módulo de elasticidade, apenas limite de resistência, tensão de escoamento e alongamento.

Propriedades extraídas dos ensaios, conforme a tabela 4.5.

Tabela (4.5) – Propriedades mecânicas do ensaio de tração.

	Limite de Resistência (Mpa)	Tensão de Escoamento (Mpa)	Alongamento %
CP-1	1000	945	30,8
CP-2	835	760	28,4
CP-3	1015	950	33,2
CP-4	970	940	28,4

Segundo a norma ASTM A-490, o CP-02 não atendeu aos requisitos mínimos em termos de propriedades mecânicas. Este corpo de prova foi extraído da parte central do parafuso, sendo certamente esta a razão para propriedades inferiores.

De acordo com as curvas de Jominy dos aços apresentadas nas figuras 2.7 e 2.8 não existem variações expressivas esperadas nas propriedades de resistência dos materiais em função do tratamento térmico. Desta forma pode-se interpretar o resultado CP-02 como sendo não representativo.

4.5. Ensaio de Dureza

Medições com dureza vickers foram realizadas conforme figura abaixo.

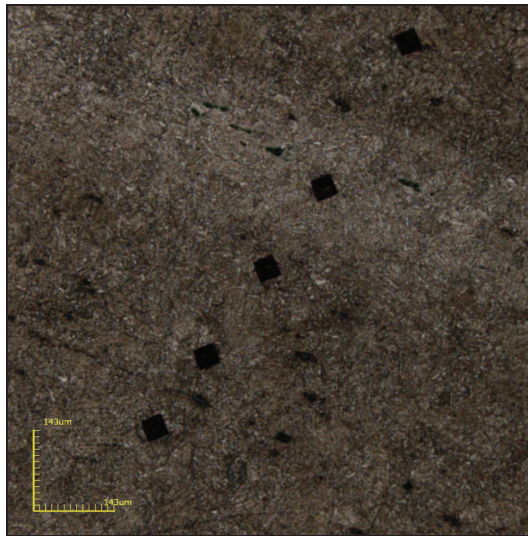


Figura (4.29) – Impressões de dureza Vickers (HV).

Os valores encontrados estão resumidos na tabela 4.6. A distância entre as medições obedeceu os requisitos mínimos da ASTM E-92.

Tabela (4.6) – Medições de dureza no parafuso.

Medida	Dureza HV (medido)	Dureza HRC (convertido)
1	333,9	34
2	368,6	37
3	352,3	36
4	333,2	34
5	344,0	35

As medições de dureza revelaram um valor médio de **35,2 HRc**. Todas as amostras atenderam ao intervalo de dureza definido na norma ASTM A-490 (33 a 38 HRc).

4.6. Ensaios de Torque

Os ensaios de torque foram realizados em bancada construída para esta finalidade (Figura 3.7).

O ensaio de torque à ser realizado na bancada supracitada, foi executado seguindo o arranjo mostrado na figura 4.30.

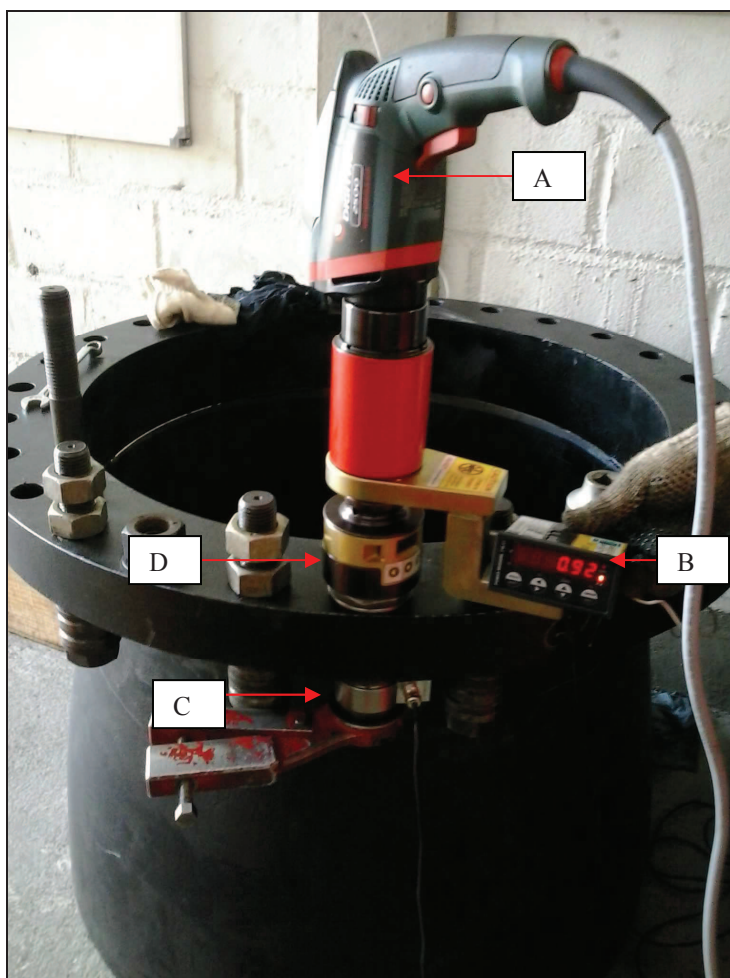


Figura (4.30) – Equipamentos utilizados no experimento: **A** – Torqueadeira eletrônica; **B** - Visor da arruela sensora; **C** – Arruela sensora; **D** – Soquete digital.

O arranjo, assim como a condução do ensaio, foi realizado de acordo com a norma ISO 16047 (antiga DIN 946).

Foram testados **19 parafusos**, sendo que cada um foi torquado 10 (dez) vezes. Os valores de torque aplicados, assim como a condição superficial de montagem, encontram-se na tabela abaixo.

Tabela (4.7) – Matriz de ensaios de torqueamento.

Torque	Condição de Montagem/Quantidade de Parafusos		
	Seco	Lubrificado	Re-Lubrificado
1450 Nm	3	3	0
2034 Nm	0	3	3
2441 Nm	3	4	0

Na tabela 4.7, percebe-se três níveis de aperto, sendo **1450, 2034 e 2441Nm**. Estes valores de torque foram selecionados para uma expectativa de força de pré-tensão de 55, 75 e 85% do limite de escoamento do material do parafuso.

Três condições de montagem: **seco, lubrificado e relubrificado**. Na condição “lubrificado”, com uso de graxa **Lubrax Autolith 2**, o parafuso foi lubrificado apenas uma vez com esta graxa. Já na condição “Re-lubrificado”, a graxa foi re-aplicada a cada torqueamento. Algumas combinações não foram testadas devido a falta de corpos de prova (indicado zero na tabela).

Os resultados foram organizados em tabelas, sendo estas agrupadas por nível de torque e condição de montagem. Logo em seguida, estão apresentados os gráficos plotados e as análises efetuadas.

O torque “T” e a força de aperto “F” foram medidos através de sensores. O fator de torque “K” foi calculado através da equação 1.13. O μ_t , coeficiente de atrito total, foi calculado através da equação da norma ISO 16047. Cada parafuso foi apertado e re-apertado “n” vezes. A primeira coluna, ciclos, trata justamente deste aspecto. Entre cada aperto (n) foi dado um tempo de 5 minutos para resfriamento.

Todos os parafusos foram identificados com letras em baixo relevo na lateral da cabeça sextavada.

4.6.1 Dados coletados no Torque Lubrificado

Tabela (4.8) – Torque de 1450 Nm e Lubrificado.

Ciclo (n)	Parafuso D			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	1450	229226	0,199	0,152
2	1450	248384	0,184	0,139
3	1450	255976	0,178	0,135
4	1450	252181	0,181	0,137
5	1450	269422	0,170	0,127
6	1450	248689	0,184	0,139
7	1450	268782	0,170	0,127
8	1450	258455	0,177	0,133
9	1450	259716	0,176	0,132
10	1450	261565	0,175	0,131

Ciclo (n)	Parafuso E			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	1450	267604	0,171	0,128
2	1450	268041	0,170	0,128
3	1450	279293	0,164	0,122
4	1450	294214	0,155	0,115
5	1450	273049	0,167	0,125
6	1450	269946	0,169	0,127
7	1450	276149	0,165	0,124
8	1450	296591	0,154	0,114
9	1450	270353	0,169	0,127
10	1450	273903	0,167	0,125

Ciclo (n)	Parafuso C			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	1450	231226	0,198	0,151
2	1450	263209	0,174	0,130
3	1450	275772	0,166	0,124
4	1450	259657	0,176	0,132
5	1450	263820	0,173	0,130
6	1450	274353	0,166	0,125
7	1450	259742	0,176	0,132
8	1450	264449	0,173	0,130
9	1450	255695	0,179	0,135
10	1450	255747	0,179	0,135

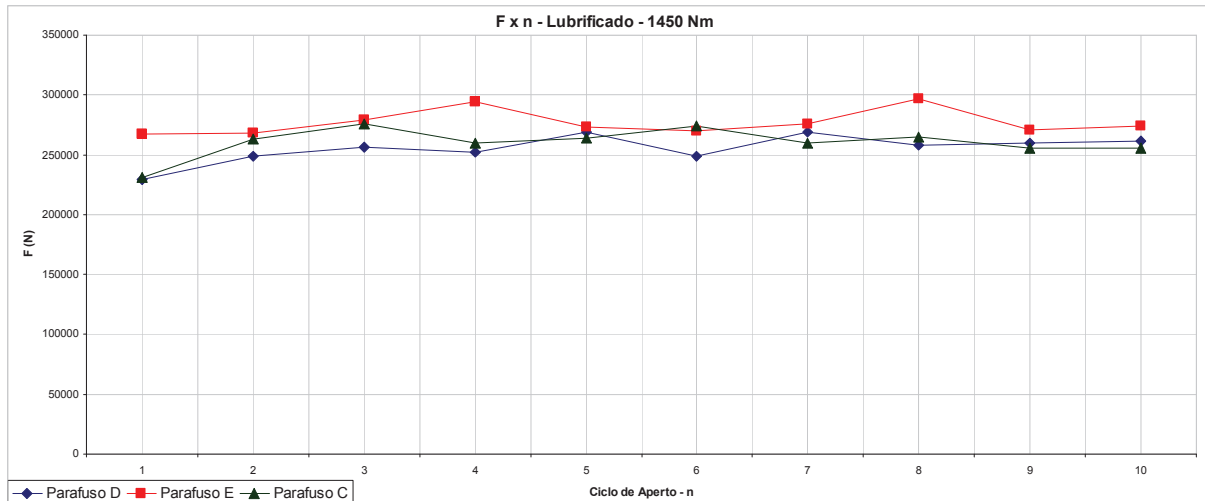


Figura (4.31) – Variação de força versus ciclo com torque de 1450 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da força de aperto em cada ciclo de aperto.

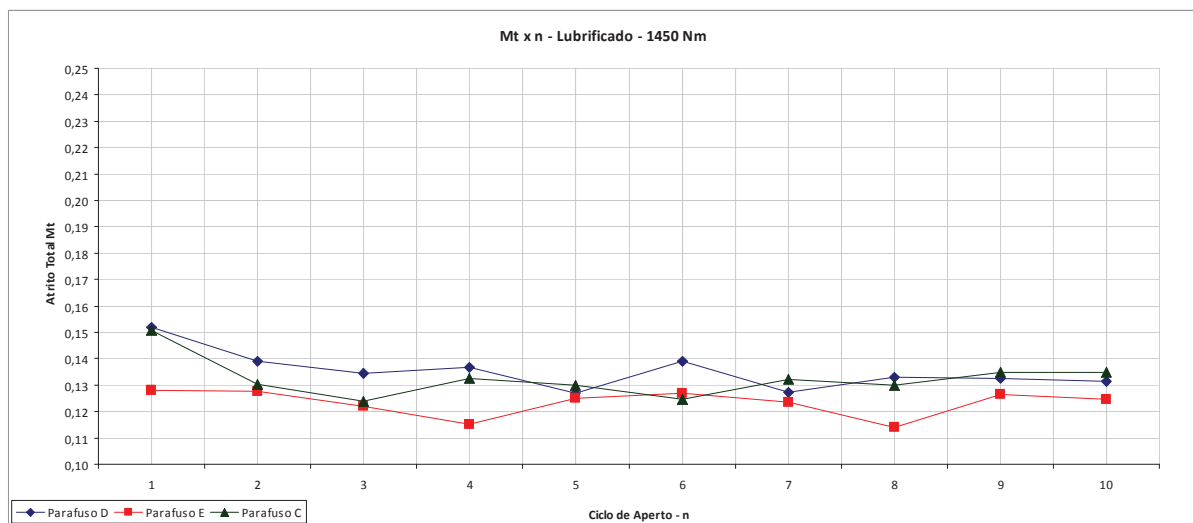


Figura (4.32) – Variação do atrito total versus ciclo com torque de 1450 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do coeficiente de atrito total μ_t em cada ciclo de aperto.

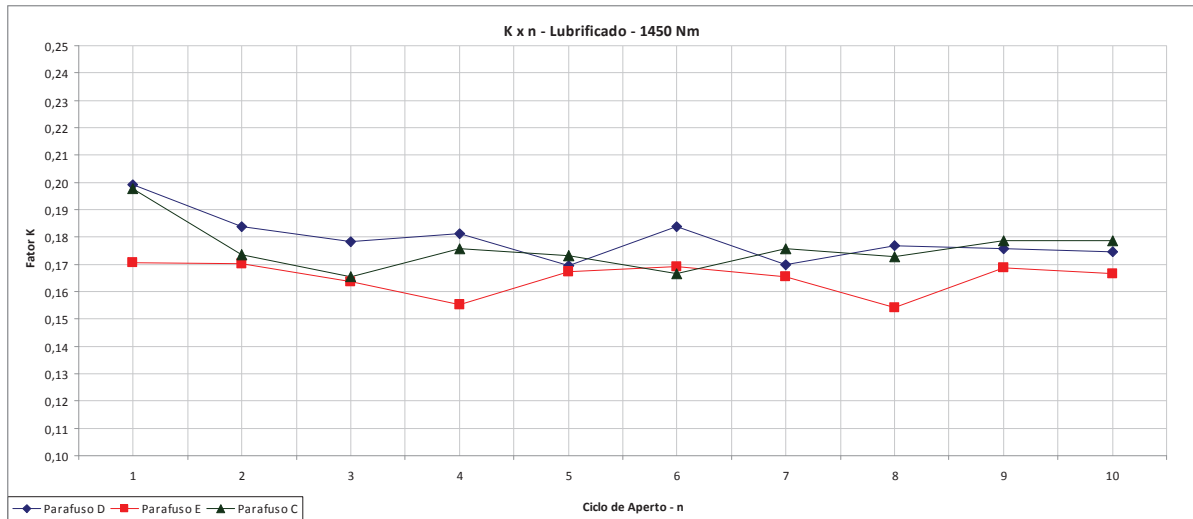


Figura (4.33) – Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 1450 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do fator de torque K em cada ciclo de aperto.

Tabela (4.9) – Torque de 2034 Nm e Lubrificado.

Ciclo (n)	Parafuso I			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2034	441948	0,145	0,106
2	2034	457978	0,140	0,102
3	2034	464006	0,138	0,101
4	2034	486959	0,132	0,095
5	2034	491111	0,130	0,094
6	2034	463287	0,138	0,101
7	2034	463911	0,138	0,101
8	2034	456311	0,140	0,103
9	2034	450297	0,142	0,104
10	2034	452194	0,142	0,104

Ciclo (n)	Parafuso T			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2034	432365	0,148	0,109
2	2034	455518	0,141	0,103
3	2034	544830	0,118	0,083
4	2034	496215	0,129	0,093
5	2034	494344	0,130	0,094
6	2034	549689	0,117	0,083
7	2034	539108	0,119	0,085
8	2034	497835	0,129	0,093
9	2034	528654	0,121	0,086
10	2034	468663	0,137	0,100

Ciclo (n)	Parafuso H			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2034	362244	0,177	0,133
2	2034	371826	0,172	0,129
3	2034	385776	0,166	0,124
4	2034	412520	0,155	0,115
5	2034	429253	0,149	0,110
6	2034	416707	0,154	0,114
7	2034	415321	0,154	0,114

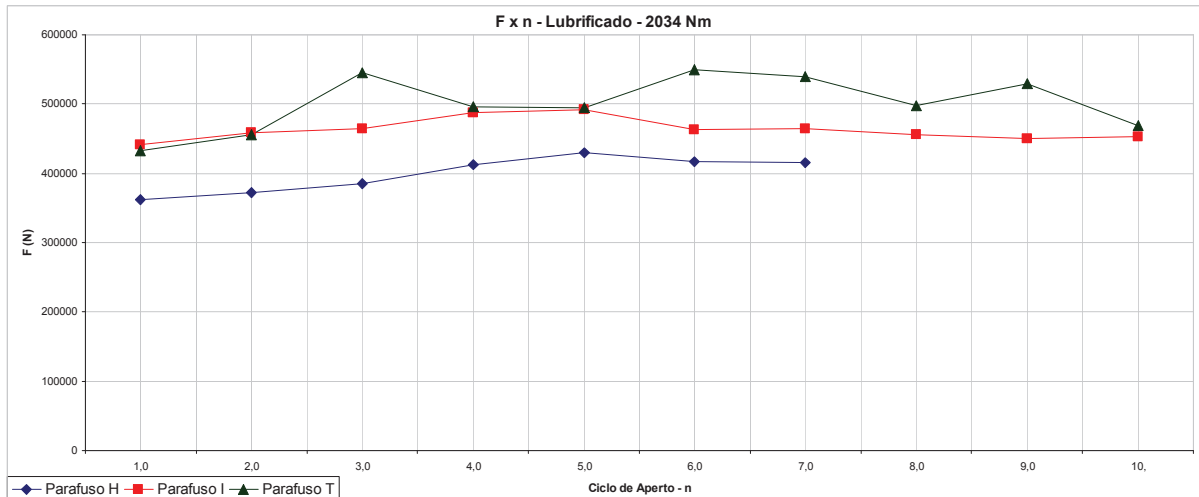


Figura (4.34) – Variação de força versus ciclo com torque de 2034 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da força de aperto em cada ciclo de aperto.

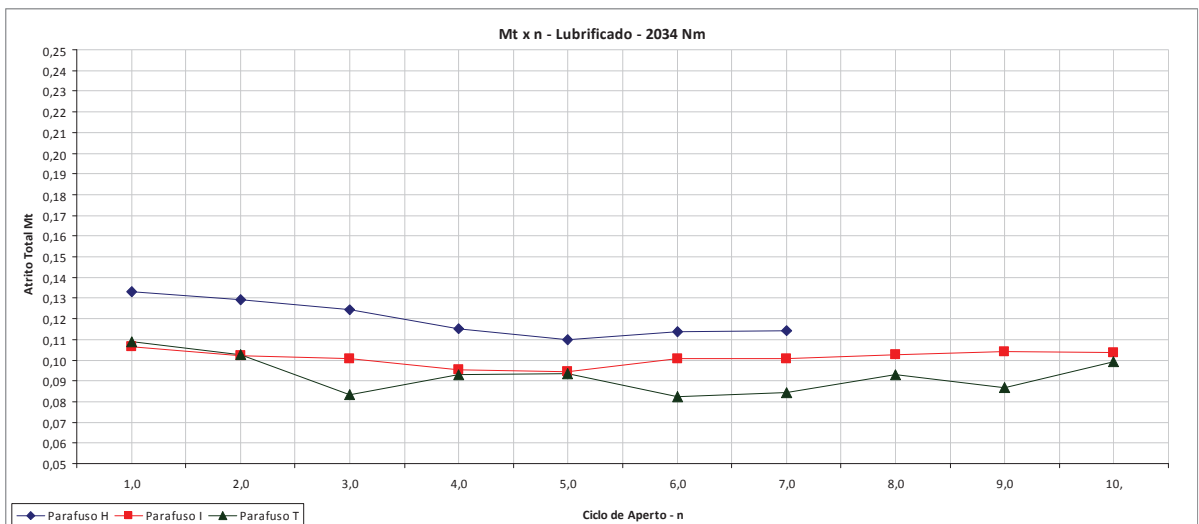


Figura (4.35) – Variação do atrito total versus ciclo com torque de 2034 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do coeficiente de atrito total μ_t em cada ciclo de aperto.

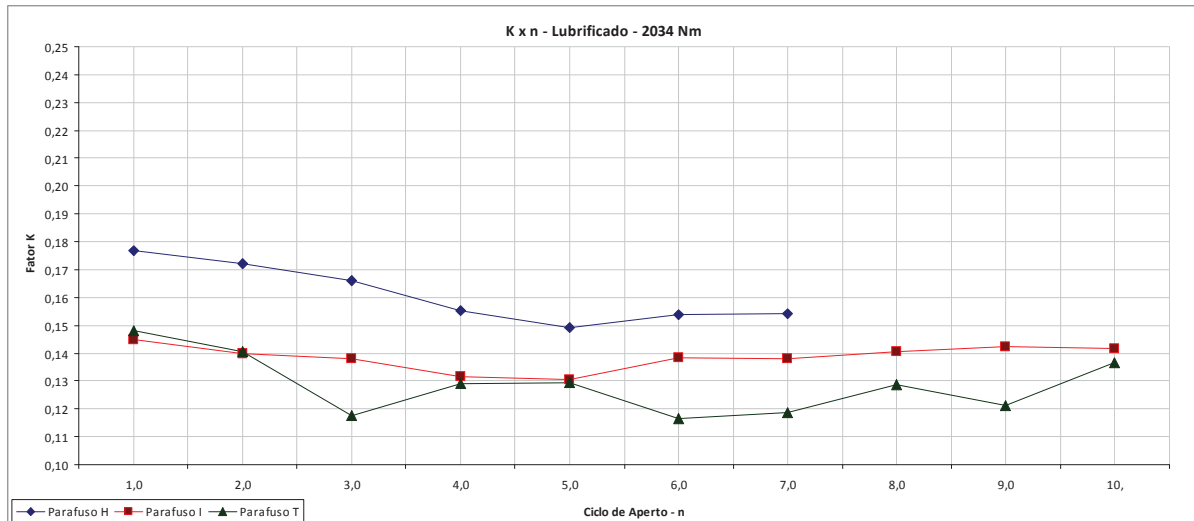


Figura (4.36) – Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 2034 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do fator de torque K em cada ciclo de aperto.

Tabela (4.10) – Torque de 2441 Nm e Lubrificado.

Ciclo (n)	Parafuso G			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2441	474690	0,162	0,121
2	2441	499000	0,154	0,114
3	2441	501079	0,153	0,114
4	2441	525452	0,146	0,108
5	2441	500301	0,154	0,114
6	2441	522809	0,147	0,108
7	2441	513973	0,150	0,110
8	2441	500627	0,154	0,114
9	2441	492421	0,156	0,116
10	2441	507882	0,151	0,112

Ciclo (n)	Parafuso R			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2441	576400	0,133	0,097
2	2441	612273	0,126	0,090
3	2441	637278	0,121	0,086
4	2441	627595	0,123	0,088
5	2441	642636	0,120	0,085
6	2441	637282	0,121	0,086
7	2441	611441	0,126	0,090
8	2441	659193	0,117	0,083
9	2441	661307	0,116	0,082
10	2441	632738	0,122	0,087

Ciclo (n)	Parafuso P			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2441	580112	0,133	0,096
2	2441	573632	0,134	0,097
3	2441	599371	0,128	0,092
4	2441	592880	0,130	0,094
5	2441	554497	0,139	0,101
6	2441	566062	0,136	0,099
7	2441	564021	0,136	0,099
8	2441	575740	0,134	0,097
9	2441	590067	0,130	0,094
10	2441	573070	0,134	0,097

Ciclo (n)	Parafuso S			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2441	553349	0,139	0,101
2	2441	564151	0,136	0,099
3	2441	624005	0,123	0,088
4	2441	626424	0,123	0,088
5	2441	678160	0,113	0,080
6	2441	691779	0,111	0,078
7	2441	679749	0,113	0,080

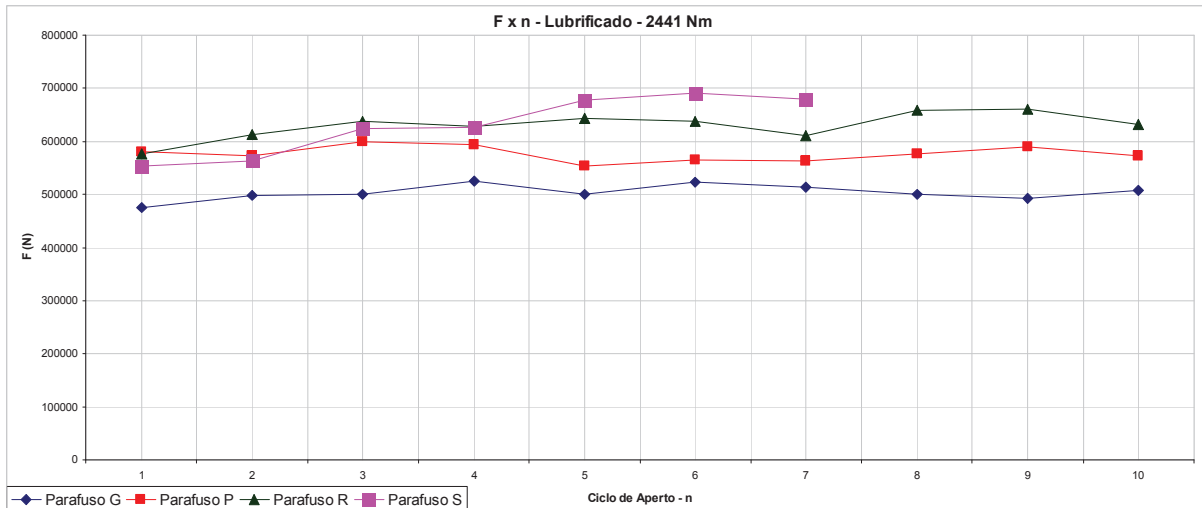


Figura (4.37) – Variação de força versus ciclo com torque de 2441 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da força de aperto em cada ciclo de aperto.

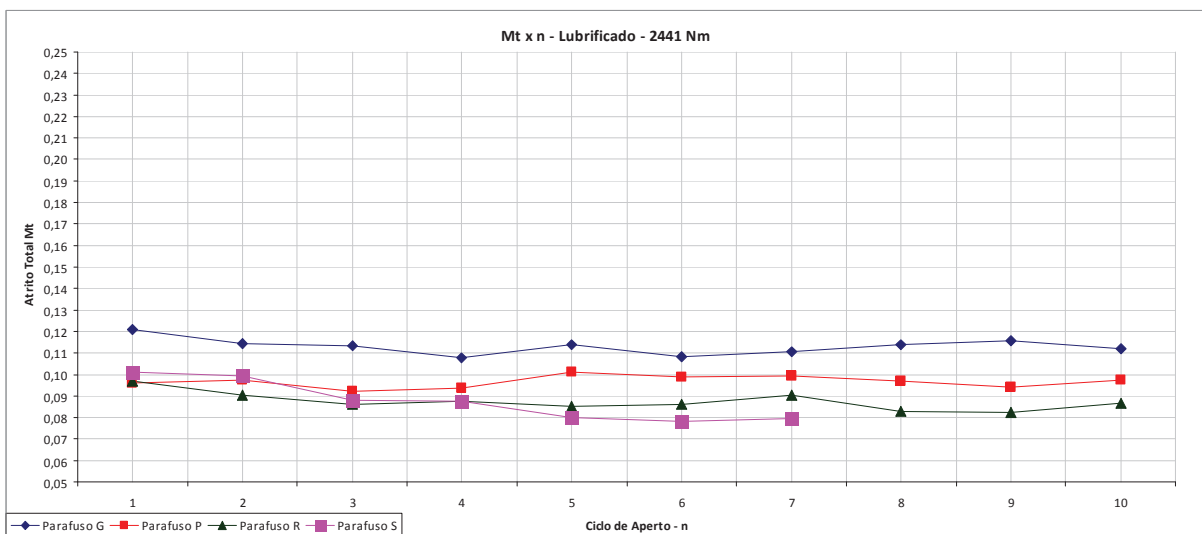


Figura (4.38) – Variação do atrito total versus ciclo com torque de 2441 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do coeficiente de atrito total μ_t em cada ciclo de aperto.

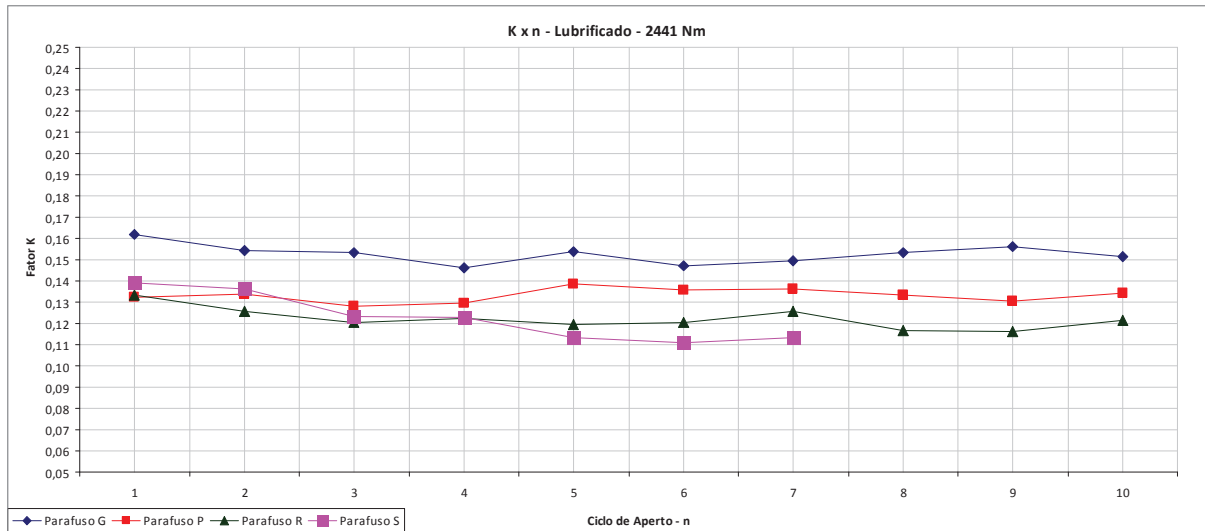


Figura (4.39) – Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 2441 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do fator de torque K em cada ciclo de aperto.

4.6.2 Dados coletados no Torque Seco

Tabela (4.11) – Torque de 1450 Nm e Seco.

Ciclo (n)	Parafuso A			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	1450	273248	0,167	0,125
2	1450	208254	0,219	0,169
3	1450	168808	0,271	0,212
4	1450	154535	0,296	0,233
5	1450	147226	0,310	0,245
6	1450	165150	0,277	0,217
7	1450	168256	0,271	0,213
8	1450	180393	0,253	0,197
9	1450	193823	0,236	0,183
10	1450	159278	0,287	0,226

Ciclo (n)	Parafuso B			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	1450	228853	0,200	0,152
2	1450	196820	0,232	0,180
3	1450	163189	0,280	0,220
4	1450	147513	0,310	0,245
5	1450	132605	0,344	0,274
6	1450	125947	0,363	0,289
7	1450	132502	0,345	0,274
8	1450	138631	0,329	0,261
9	1450	117959	0,387	0,310
10	1450	130364	0,350	0,279

Ciclo (n)	Parafuso F			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	1450	217625	0,210	0,161
2	1450	169807	0,269	0,211
3	1450	150894	0,303	0,239
4	1450	130890	0,349	0,278
5	1450	111069	0,411	0,330
6	1450	108740	0,420	0,337
7	1450	104910	0,435	0,350
8	1450	90729	0,503	0,407

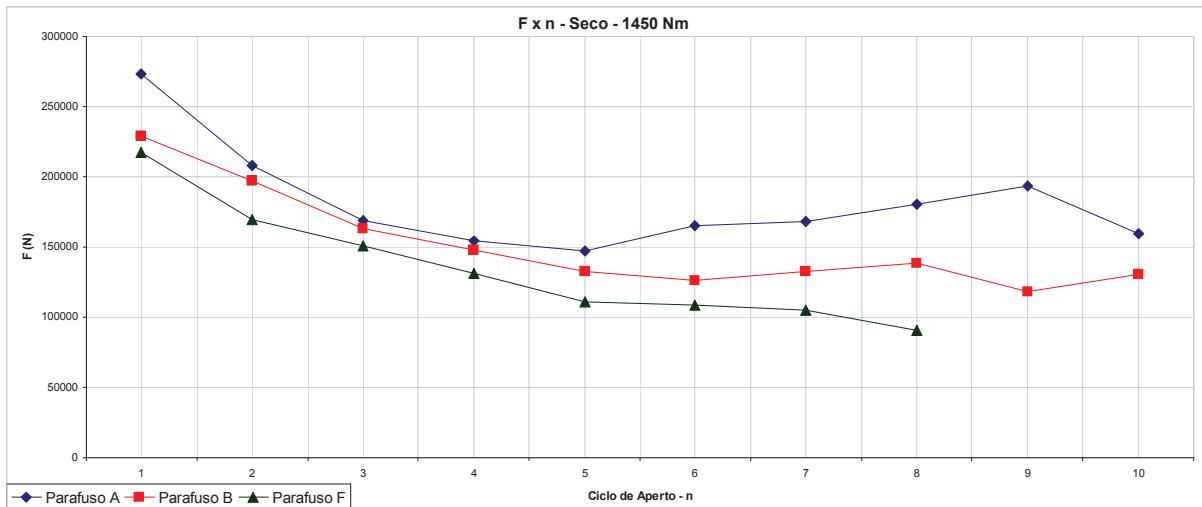


Figura (4.40) – Variação de força versus ciclo com torque de 1450 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da força de aperto em cada ciclo de aperto.

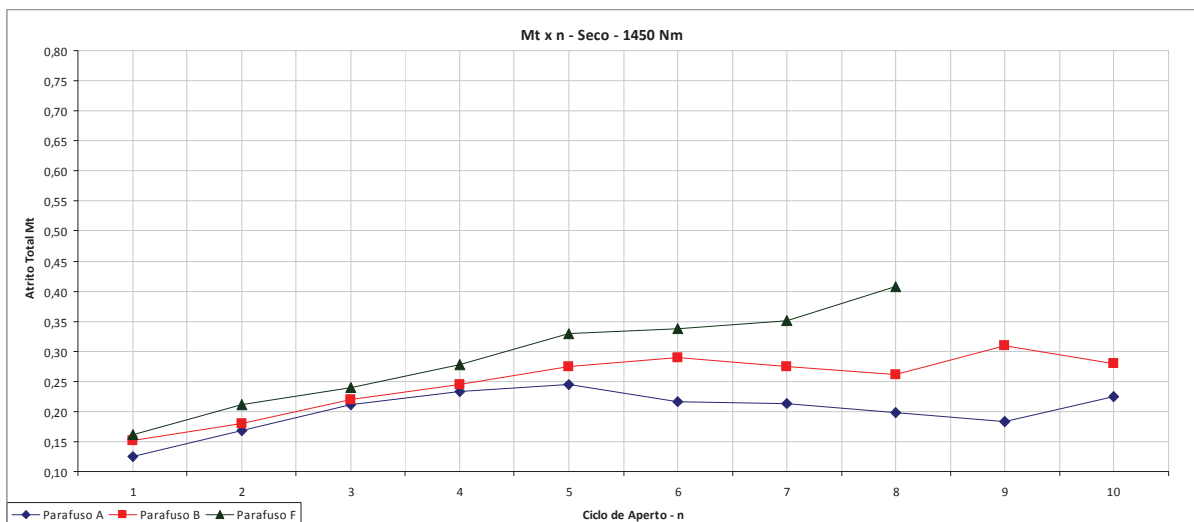


Figura (4.41) – Variação do atrito total versus ciclo com torque de 1450 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do coeficiente de atrito total μ_t em cada ciclo de aperto.

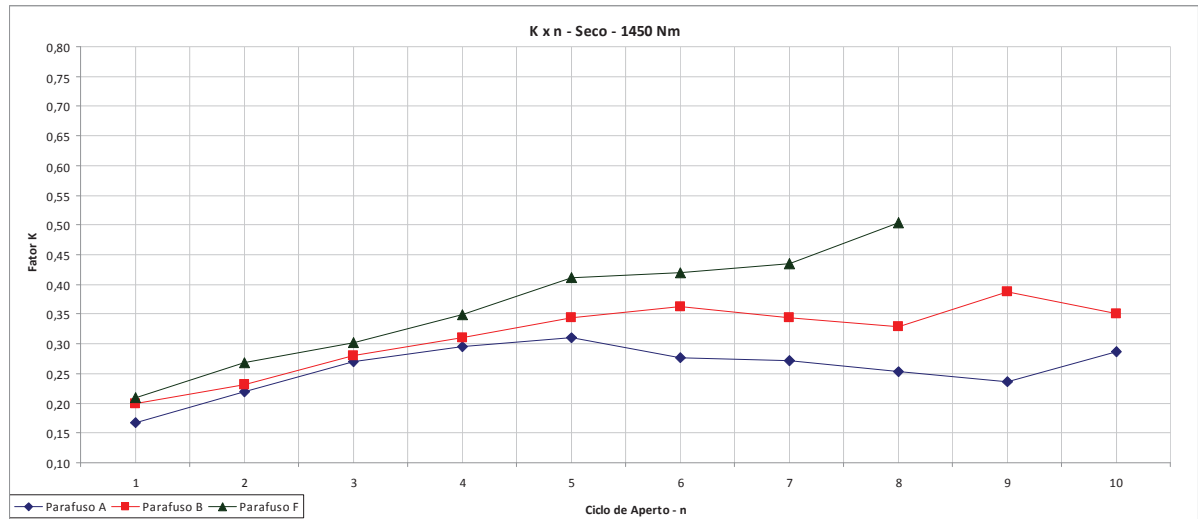


Figura (4.42) – Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 1450 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do fator de torque K em cada ciclo de aperto.

Tabela (4.12) – Torque de 2441 Nm e Seco.

Ciclo (n)	Parafuso J			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2441	411789	0,187	0,142
2	2441	354396	0,217	0,167
3	2441	358767	0,214	0,165
4	2441	343644	0,224	0,173
5	2441	313964	0,245	0,190
6	2441	300725	0,256	0,199
7	2441	276353	0,278	0,218
8	2441	251321	0,306	0,242
9	2441	235213	0,327	0,259
10	2441	262232	0,293	0,231

Ciclo (n)	Parafuso L			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2441	391507	0,196	0,150
2	2441	370108	0,208	0,159
3	2441	340177	0,226	0,175
4	2441	304146	0,253	0,197
5	2441	288611	0,266	0,208
6	2441	290618	0,265	0,207
7	2441	277859	0,277	0,217
8	2441	283782	0,271	0,212
9	2441	278780	0,276	0,216
10	2441	272402	0,282	0,222

Ciclo (n)	Parafuso M			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2441	350238	0,220	0,169
2	2441	286780	0,268	0,210
3	2441	247841	0,310	0,245
4	2441	231907	0,332	0,263
5	2441	227583	0,338	0,268
6	2441	232847	0,330	0,262
7	2441	221824	0,347	0,276
8	2441	237192	0,324	0,257
9	2441	229849	0,334	0,266
10	2441	229347	0,335	0,266

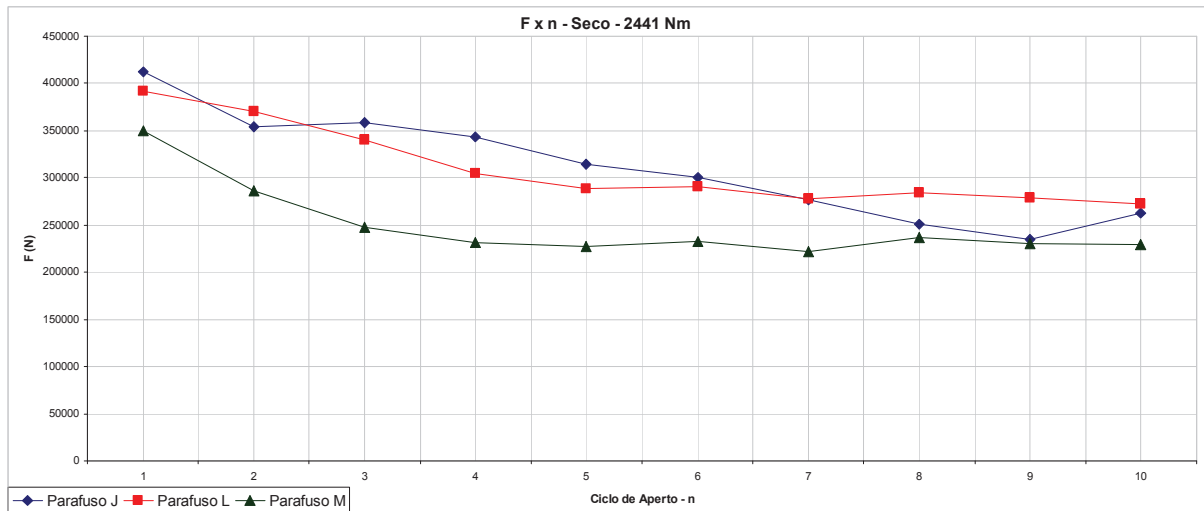


Figura (4.43) – Variação de força versus ciclo com torque de 2441 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da força de aperto em cada ciclo de aperto.

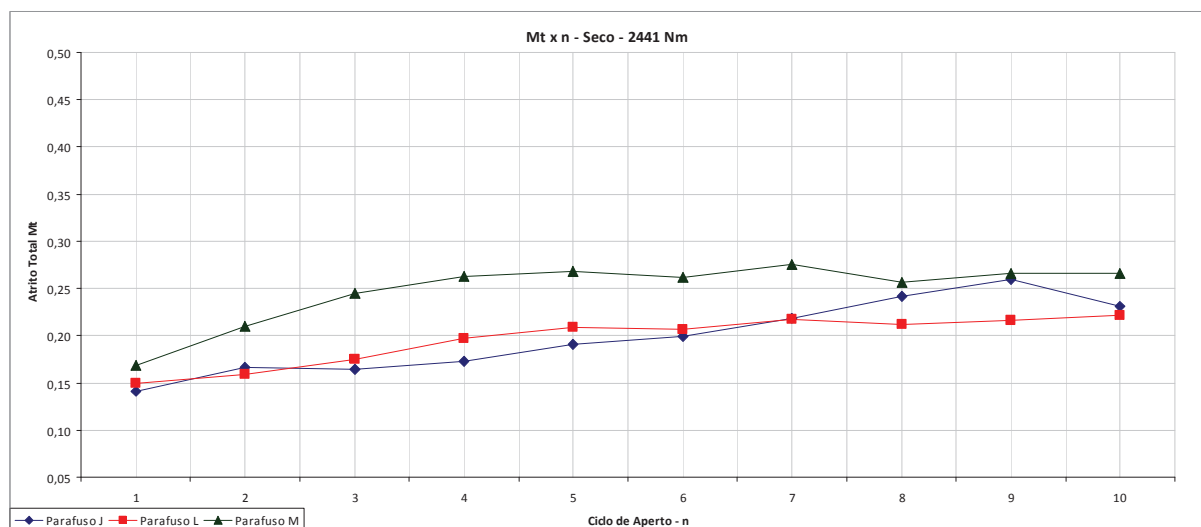


Figura (4.44) – Variação do atrito total versus ciclo com torque de 2441 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do coeficiente de atrito total μ_t em cada ciclo de aperto.

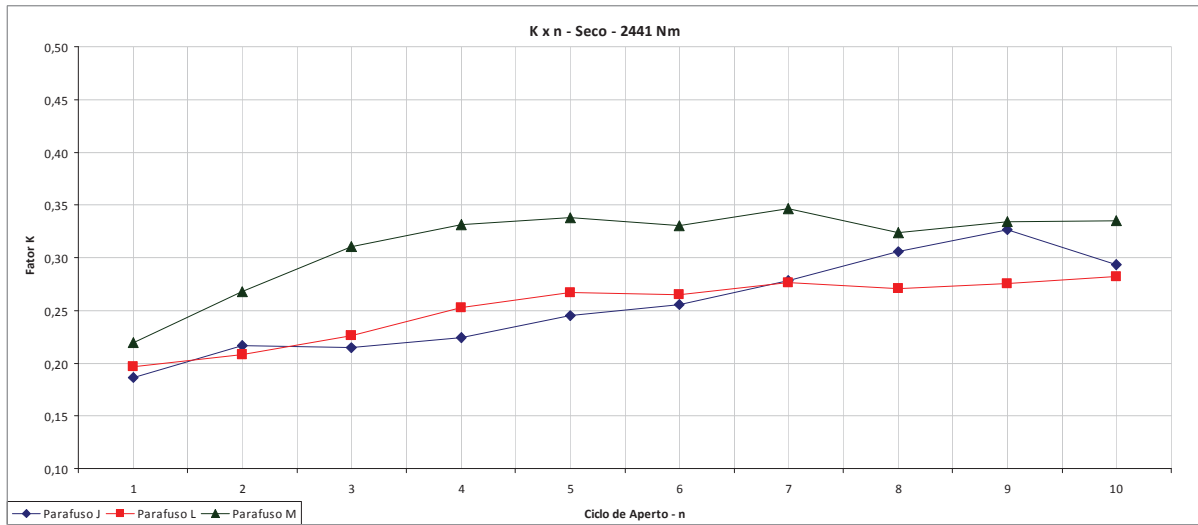


Figura (4.45) – Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 2441 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do fator de torque K em cada ciclo de aperto.

4.6.3 Dados coletados no parafuso Re-Lubrificado

Tabela (4.13) – Torque de 2034 Nm e RE-Lubrificado.

Ciclo (n)	Parafuso N			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2034	379954	0,169	0,126
2	2034	375449	0,171	0,128
3	2034	372362	0,172	0,129
4	2034	389106	0,165	0,123
5	2034	396978	0,161	0,120
6	2034	405441	0,158	0,117
7	2034	418184	0,153	0,113
8	2034	430667	0,149	0,110
9	2034	447775	0,143	0,105
10	2034	450072	0,142	0,104
11	2034	457838	0,140	0,102
12	2034	452796	0,141	0,104
13	2034	480574	0,133	0,097
14	2034	488030	0,131	0,095
15	2034	479751	0,134	0,097

Ciclo (n)	Parafuso U			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2034	448379	0,143	0,105
2	2034	512568	0,125	0,090
3	2034	511688	0,125	0,090
4	2034	513319	0,125	0,090
5	2034	537344	0,119	0,085
6	2034	496651	0,129	0,093
7	2034	490004	0,131	0,095
8	2034	488251	0,131	0,095
9	2034	485454	0,132	0,096
10	2034	476047	0,135	0,098
11	2034	457538	0,140	0,102
12	2034	475280	0,135	0,098
13	2034	453068	0,141	0,103
14	2034	481025	0,133	0,097
15	2034	473536	0,135	0,098

Ciclo (n)	Parafuso O			
	T (Nm)	F (N)	K (adm)	Mt (adm)
1	2034	438908	0,146	0,107
2	2034	472450	0,136	0,099
3	2034	518906	0,123	0,088
4	2034	525033	0,122	0,087
5	2034	489311	0,131	0,095
6	2034	497819	0,129	0,093
7	2034	472668	0,136	0,099
8	2034	486198	0,132	0,095
9	2034	453832	0,141	0,103
10	2034	489358	0,131	0,095
11	2034	496344	0,129	0,093
12	2034	480684	0,133	0,097
13	2034	490657	0,131	0,094
14	2034	481397	0,133	0,096
15	2034	480972	0,133	0,097

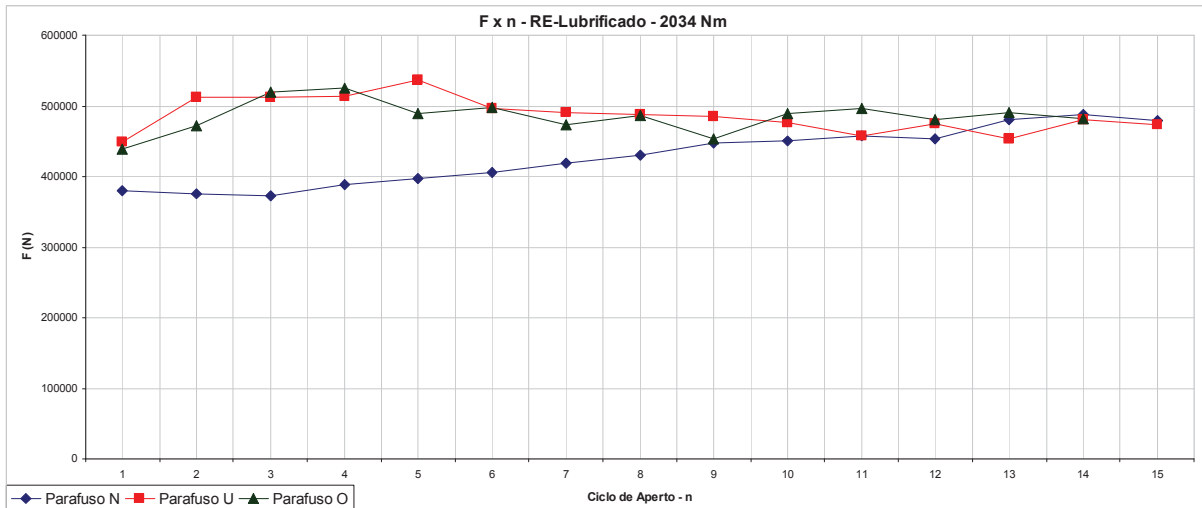


Figura (4.46) – Variação de força versus ciclo com torque de 2034 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da força de aperto em cada ciclo de aperto.

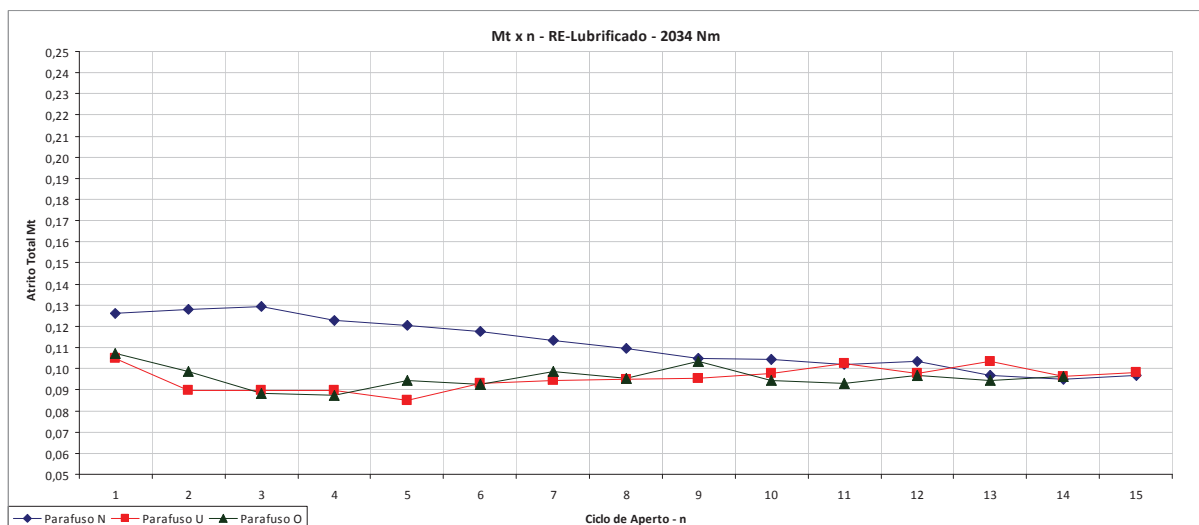


Figura (4.47) – Variação do atrito total versus ciclo com torque de 2034 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do coeficiente de atrito total μ_t em cada ciclo de aperto.

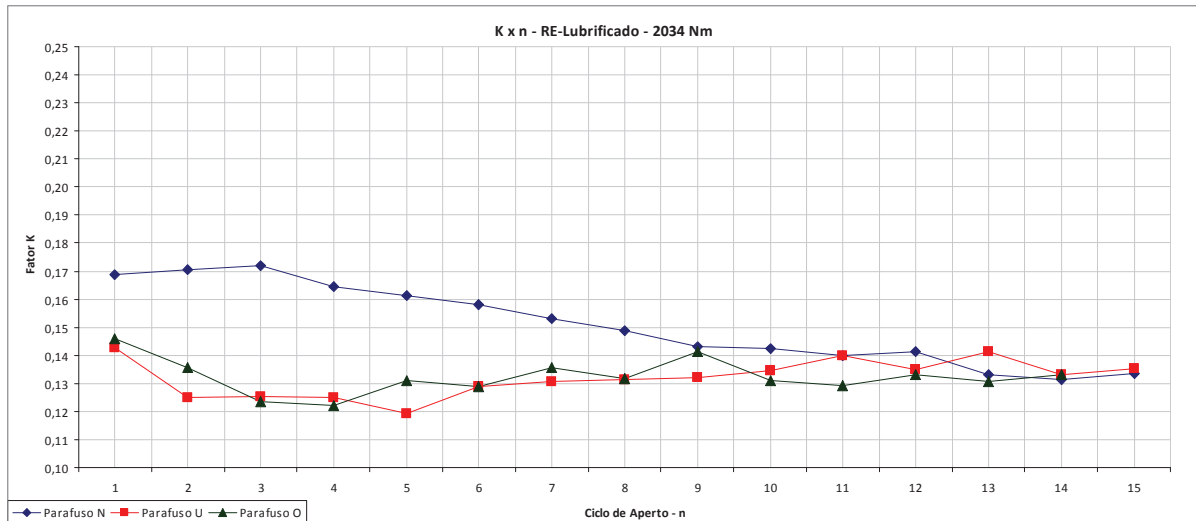


Figura (4.48) – Variação do fator de torque versus ciclo com torque de 2034 Nm.

Este gráfico apresenta a variação do fator de torque K em cada ciclo de aperto.

4.6.4 Análise Estatística de Dados

A análise de dados tratou a média móvel do fator de torque K com base nas medições de cada ciclo de aperto de cada parafuso. O esquema abaixo mostra mais facilmente como os dados foram tratados:

Tabela (4.14) – Esquema mostrando o tratamento de dados.

	Parafuso 1	Parafuso 2	Parafuso 3	Média Móvel	Média Geral
Ciclo de Medição 1	$K_{1,1}$	$K_{2,1}$	$K_{3,1}$	Média-1	G1
Ciclo de Medição 2	$K_{1,2}$	$K_{2,2}$	$K_{3,2}$	Média-2	G1
.
.
Ciclo de Medição 10	$K_{1,10}$	$K_{2,10}$	$K_{3,10}$	Média-10	G1

A média móvel 1(um) foi o resultado de $((k_{1,1}+k_{2,1}+k_{3,1})/3)$ e assim por diante até a décima média. Onde o primeiro índice indica o parafuso e o segundo indica o ciclo de medição, então, $k_{1,1}$ significa o valor de k (fator de torque) do parafuso 1(um) no primeiro ciclo (1) de medição.

Já a média geral somou todas as médias móveis e dividiu pela quantidade total. Logo, todas estas são de mesmo valor.

Esta mesma abordagem foi aplicada em todas as outras medições, obedecendo ao valor de torque e a condição de montagem (seco, lubrificado e relubrificado).

4.6.4.1 Parafuso Lubrificado

Torque de 1450 Nm Lubrificado

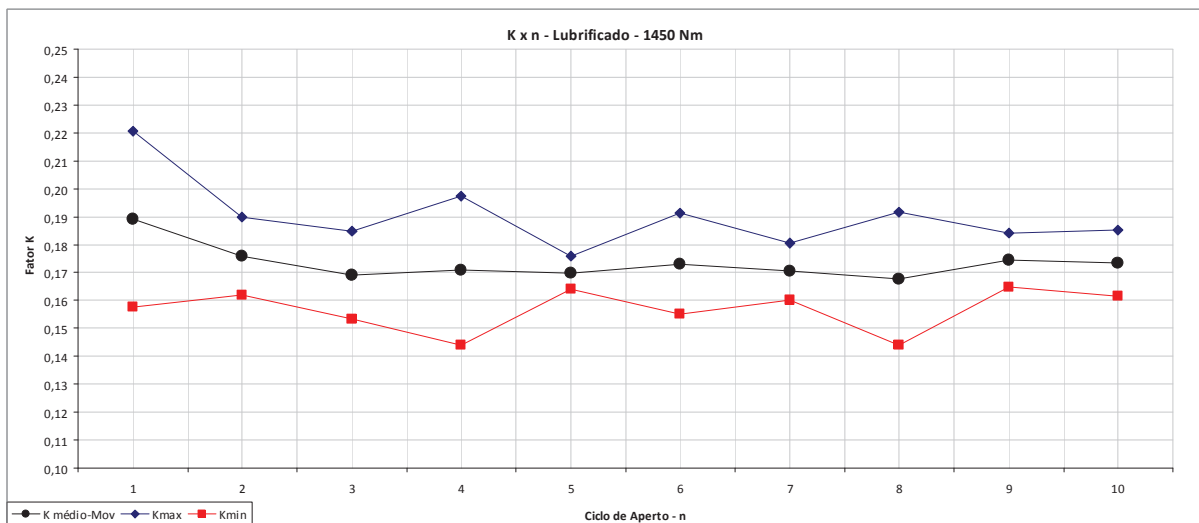


Figura (4.49) – Valores médios (móvel) de K com torque de 1450 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da média móvel do fator de torque K em cada ciclo de aperto (linha preta). O valor médio no ciclo 1 foi de **0,189**. Este valor aproximadamente estabilizou a partir do ciclo 3, variando de **0,169 a 0,173**.

Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

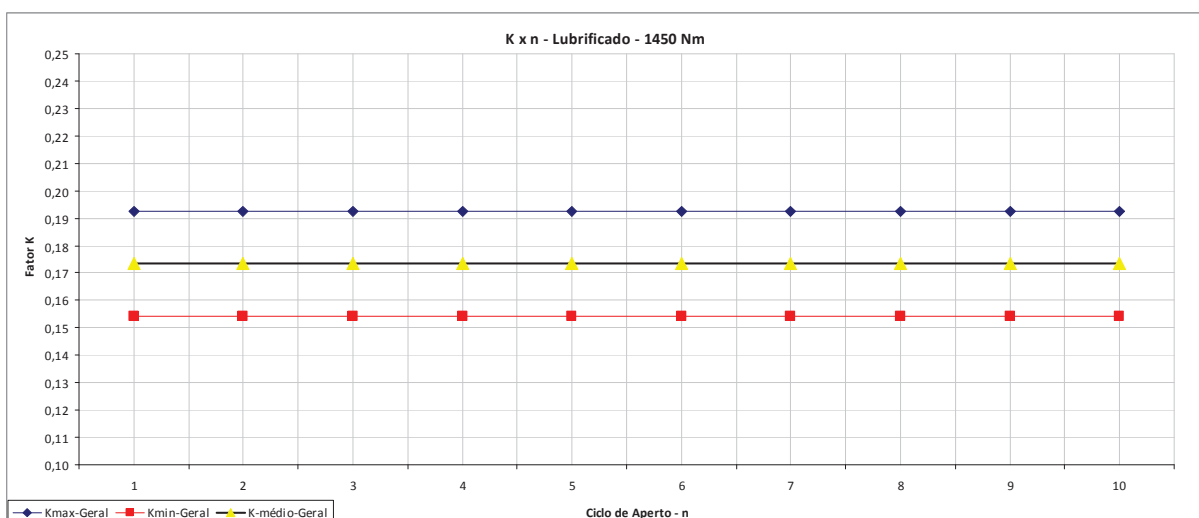


Figura (4.50) – Valores médios (fixo) de K com torque de 1450 Nm.

Este gráfico apresenta agora a variação da média geral do fator de torque K (linha preta), resultando num valor constante igual a **0,173**, com máximo de **0,193** (linha azul) e mínimo de **0,154** (linha vermelha).

Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

Os dados destes dois últimos gráficos estão na tabela abaixo.

Tabela (4.15) – Tratamento estatístico de K (1450Nm lubrificado).

n	Kd	Ke	Kc	K médioMov	K Médio G	Desvio/ciclo	Desvio Geral	1,96D/ciclo	1,96D Geral	Kmax/ciclo	Kmax-G	Kmin/ciclo	Kmin-Geral
1	0,199	0,171	0,198	0,189	0,173	0,016	0,010	0,031	0,019	0,221	0,193	0,158	0,154
2	0,184	0,170	0,174	0,176	0,173	0,007	0,010	0,014	0,019	0,190	0,193	0,162	0,154
3	0,178	0,164	0,166	0,169	0,173	0,008	0,010	0,016	0,019	0,185	0,193	0,153	0,154
4	0,181	0,155	0,176	0,171	0,173	0,014	0,010	0,027	0,019	0,198	0,193	0,144	0,154
5	0,170	0,167	0,173	0,170	0,173	0,003	0,010	0,006	0,019	0,176	0,193	0,164	0,154
6	0,184	0,169	0,166	0,173	0,173	0,009	0,010	0,018	0,019	0,191	0,193	0,155	0,154
7	0,170	0,165	0,176	0,170	0,173	0,005	0,010	0,010	0,019	0,181	0,193	0,160	0,154
8	0,177	0,154	0,173	0,168	0,173	0,012	0,010	0,024	0,019	0,192	0,193	0,144	0,154
9	0,176	0,169	0,179	0,174	0,173	0,005	0,010	0,010	0,019	0,184	0,193	0,165	0,154
10	0,175	0,167	0,179	0,173	0,173	0,006	0,010	0,012	0,019	0,185	0,193	0,161	0,154

Kd – fator de torque do parafuso identificado por “d”;

Ke – fator de torque do parafuso identificado por “e”;

Kc – fator de torque do parafuso identificado por “c”;

K médioMov – Fator de torque médio/ciclo “n”;

K Médio G – Média de geral de todos os valores de K;

Desvio/ciclo – Desvio padrão em cada ciclo “n” de aperto;

Desvio Geral – Desvio padrão geral de todos os valores de K;

3D/ciclo – Três desvios padrão por cada ciclo “n” de aperto;

3D Geral – Três desvios padrão geral de todos os valores de K;

Kmax/ciclo – Valor máximo de K. Média mais 3D/ciclo;

Kmax-G – Valor máximo de K. Média mais 3D Geral.

Torque de 2034 Nm **Lubrificado**

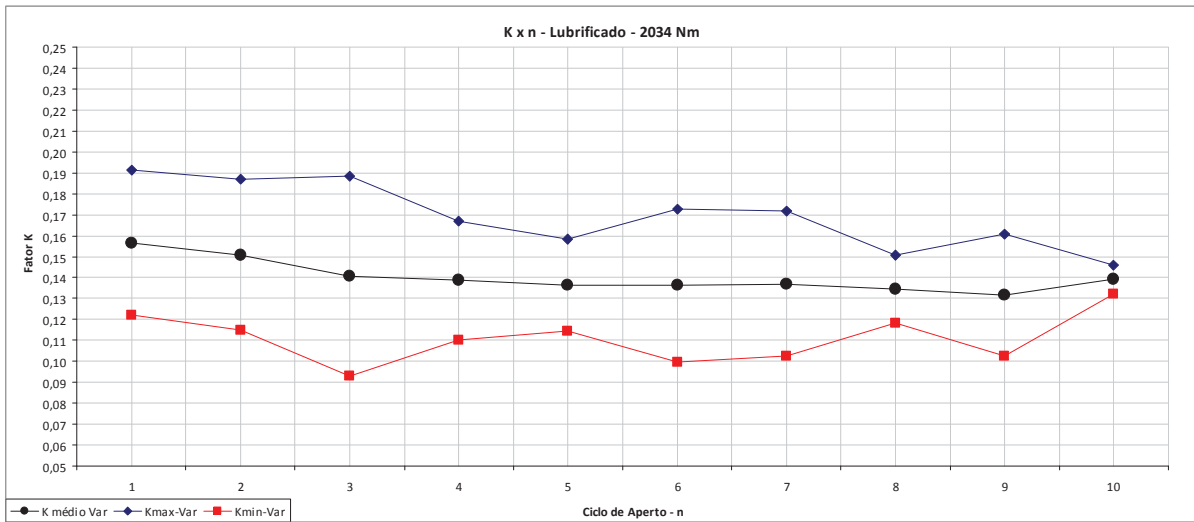


Figura (4.51) – Valores médios (móvel) de K com torque de 2034 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da média móvel do fator de torque K em cada ciclo de aperto (linha preta). O valor médio no ciclo 1 foi de **0,157**. Este valor aproximadamente estabilizou a partir do ciclo 3, variando de **0,141 a 0,139**.

Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

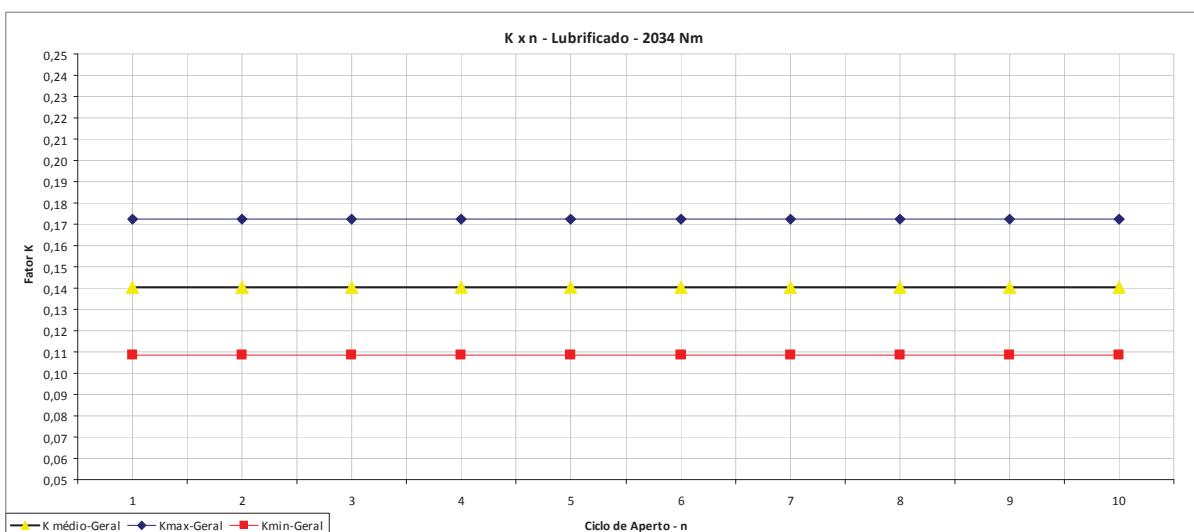


Figura (4.52) – Valores médios (fixo) de K com torque de 2034 Nm.

Este gráfico apresenta agora a variação da média geral do fator de torque K (linha preta), resultando num valor constante igual a **0,140**, com máximo de **0,172** e mínimo de **0,108**.

Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

Tabela (4.16) – Tratamento estatístico de K (2034 Nm lubrificado).

n	Kh	Ki	Kt	K médioMov	Médio G	Desvio/ciclo	Desvio Geral	1,96D/ciclo	1,96D Geral	Kmax/ciclo	Kmax-G	Kmin/ciclo	Kmin-Geral
1	0,177	0,145	0,148	0,157	0,140	0,018	0,016	0,034	0,032	0,191	0,172	0,122	0,108
2	0,172	0,140	0,141	0,151	0,140	0,018	0,016	0,036	0,032	0,187	0,172	0,115	0,108
3	0,166	0,138	0,118	0,141	0,140	0,024	0,016	0,048	0,032	0,188	0,172	0,093	0,108
4	0,155	0,132	0,129	0,139	0,140	0,014	0,016	0,028	0,032	0,167	0,172	0,110	0,108
5	0,149	0,130	0,130	0,136	0,140	0,011	0,016	0,022	0,032	0,158	0,172	0,115	0,108
6	0,154	0,138	0,117	0,136	0,140	0,019	0,016	0,037	0,032	0,173	0,172	0,100	0,108
7	0,154	0,138	0,119	0,137	0,140	0,018	0,016	0,035	0,032	0,172	0,172	0,102	0,108
8	-	0,140	0,129	0,135	0,140	0,008	0,016	0,016	0,032	0,151	0,172	0,118	0,108
9	-	0,142	0,121	0,132	0,140	0,015	0,016	0,029	0,032	0,161	0,172	0,102	0,108
10	-	0,142	0,137	0,139	0,140	0,004	0,016	0,007	0,032	0,146	0,172	0,132	0,108

Kd – fator de torque do parafuso identificado por “d”;

Ke – fator de torque do parafuso identificado por “e”;

Kc – fator de torque do parafuso identificado por “c”;

K médioMov – Fator de torque médio/ciclo “n”;

K Médio G – Média de geral de todos os valores de K;

Desvio/ciclo – Desvio padrão em cada ciclo “n” de aperto;

Desvio Geral – Desvio padrão geral de todos os valores de K;

3D/ciclo – Três desvios padrão por cada ciclo “n” de aperto;

3D Geral – Três desvios padrão geral de todos os valores de K;

Kmax/ciclo – Valor máximo de K. Média mais 3D/ciclo;

Kmax-G – Valor máximo de K. Média mais 3D Geral.

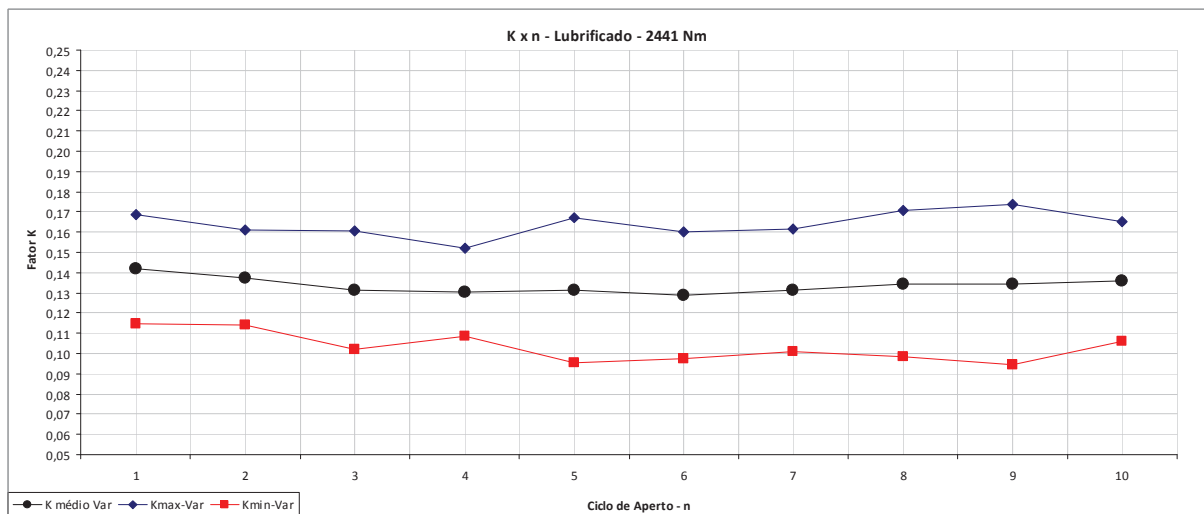
Torque de 2441 Nm **Lubrificado**

Figura (4.53) – Valores médios (móvel) de K com torque de 2441 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da média móvel do fator de torque K em cada ciclo de aperto (linha preta). O valor médio no ciclo 1 foi de **0,142**. Este valor aproximadamente estabilizou a partir do ciclo 3, variando de **0,131 a 0,136**.

Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

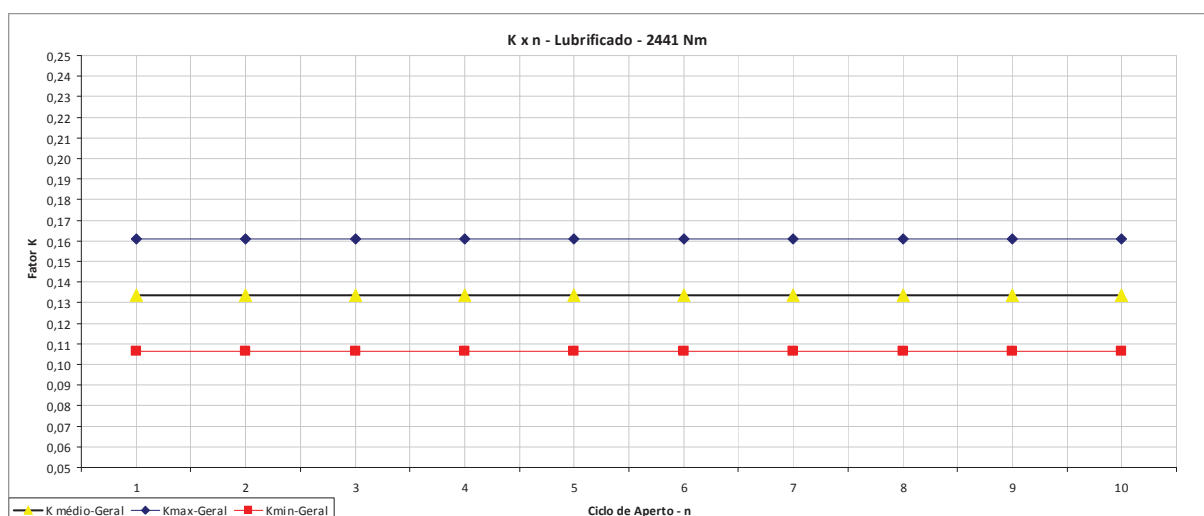


Figura (4.54) – Valores médios (fixo) de K com torque de 2034 Nm.

Este gráfico apresenta agora a variação da média geral do fator de torque K (linha preta), resultando num valor constante igual a **0,134**, com máximo de **0,161** e mínimo de **0,106**. Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

Tabela (4.17) – Tratamento estatístico de K (2441 Nm lubrificado).

n	Kg	Kp	Kr	Ks	K médioMov	Médio G	Desvio/ciclo	Desvio Geral	1,96D/ciclo	1,96D Geral	Kmax/ciclo	Kmax-G	Kmin/ciclo	Kmin-Geral
1	0,162	0,133	0,133	0,139	0,142	0,134	0,014	0,014	0,027	0,027	0,169	0,161	0,115	0,106
2	0,154	0,134	0,126	0,136	0,137	0,134	0,012	0,014	0,023	0,027	0,161	0,161	0,114	0,106
3	0,153	0,128	0,121	0,123	0,131	0,134	0,015	0,014	0,029	0,027	0,161	0,161	0,102	0,106
4	0,146	0,130	0,123	0,123	0,130	0,134	0,011	0,014	0,022	0,027	0,152	0,161	0,108	0,106
5	0,154	0,139	0,120	0,113	0,131	0,134	0,018	0,014	0,036	0,027	0,167	0,161	0,095	0,106
6	0,147	0,136	0,121	0,111	0,129	0,134	0,016	0,014	0,031	0,027	0,160	0,161	0,097	0,106
7	0,150	0,136	0,126	0,113	0,131	0,134	0,016	0,014	0,030	0,027	0,162	0,161	0,101	0,106
8	0,154	0,134	0,117	-	0,135	0,134	0,018	0,014	0,036	0,027	0,171	0,161	0,098	0,106
9	0,156	0,130	0,116	-	0,134	0,134	0,020	0,014	0,040	0,027	0,174	0,161	0,095	0,106
10	0,151	0,134	0,122	-	0,136	0,134	0,015	0,014	0,029	0,027	0,165	0,161	0,106	0,106

Kd – fator de torque do parafuso identificado por “d”;

Ke – fator de torque do parafuso identificado por “e”;

Kc – fator de torque do parafuso identificado por “c”;

K médioMov – Fator de torque médio/ciclo “n”;

K Médio G – Média de geral de todos os valores de K;

Desvio/ciclo – Desvio padrão em cada ciclo “n” de aperto;

Desvio Geral – Desvio padrão geral de todos os valores de K;

3D/ciclo – Três desvios padrão por cada ciclo “n” de aperto;

3D Geral – Três desvios padrão geral de todos os valores de K;

Kmax/ciclo – Valor máximo de K. Média mais 3D/ciclo;

Kmax-G – Valor máximo de K. Média mais 3D Geral.

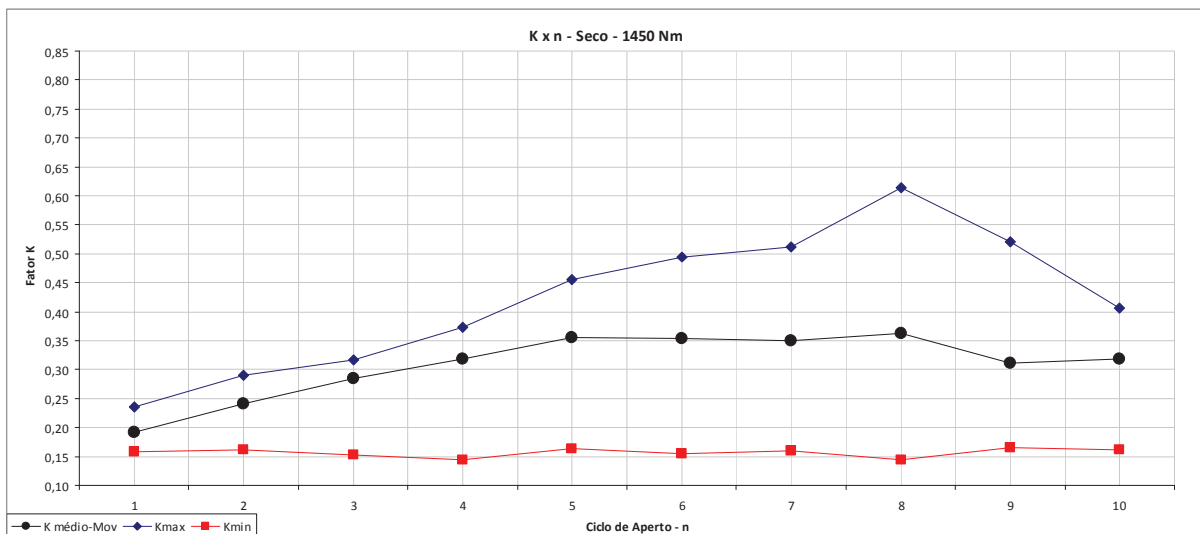
4.2.6.4.2 Parafuso **Seco**Torque de 1450 Nm **Seco**

Figura (4.55) – Valores médios (móvel) de K com torque de 1450 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da média móvel do fator de torque K em cada ciclo de aperto (linha preta). O valor médio no ciclo 1 foi de **0,192**. Este valor estabilizou a partir do ciclo 5, variando de **0,355 a 0,319**.

Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

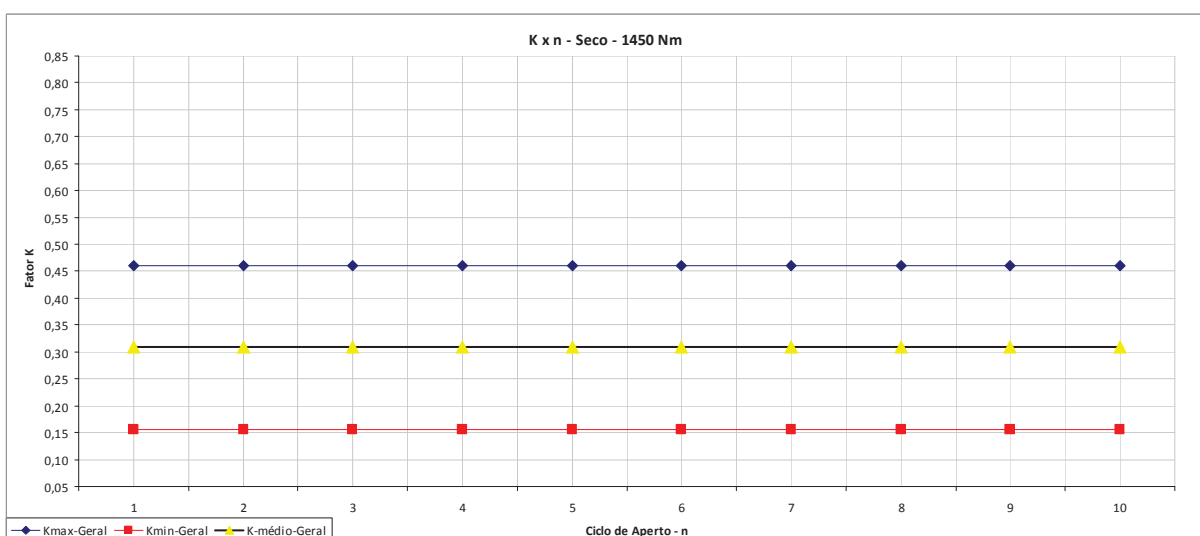


Figura (4.56) – Valores médios (fixo) de K com torque de 1450 Nm.

Este gráfico apresenta agora a variação da média geral do fator de torque K (linha preta), resultando num valor constante igual a **0,309**, com máximo de **0,461** e mínimo de **0,156**.

Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

Os dados destes dois últimos gráficos estão na tabela abaixo.

Tabela (4.18) – Tratamento estatístico de K (1450 Nm seco).

n	Ka	Kb	Kf	K médiaMov	Média G	Desvio/ ciclo	Desvio Geral	1,96D/ ciclo	1,96D Geral	Kmax/ ciclo	Kmax- G	Kmin/ ciclo	Kmin- Geral
1	0,167	0,200	0,210	0,192	0,309	0,022	0,078	0,044	0,152	0,236	0,461	0,148	0,156
2	0,219	0,232	0,269	0,240	0,309	0,026	0,078	0,051	0,152	0,291	0,461	0,190	0,156
3	0,271	0,280	0,303	0,284	0,309	0,017	0,078	0,032	0,152	0,317	0,461	0,252	0,156
4	0,296	0,310	0,349	0,318	0,309	0,028	0,078	0,054	0,152	0,372	0,461	0,264	0,156
5	0,310	0,344	0,411	0,355	0,309	0,051	0,078	0,101	0,152	0,456	0,461	0,255	0,156
6	0,277	0,363	0,420	0,353	0,309	0,072	0,078	0,142	0,152	0,495	0,461	0,212	0,156
7	0,271	0,345	0,435	0,350	0,309	0,082	0,078	0,161	0,152	0,511	0,461	0,190	0,156
8	0,253	0,329	0,503	0,362	0,309	0,128	0,078	0,251	0,152	0,613	0,461	0,111	0,156
9	0,236	0,387	-	0,311	0,309	0,107	0,078	0,210	0,152	0,521	0,461	0,101	0,156
10	0,287	0,350	-	0,319	0,309	0,045	0,078	0,088	0,152	0,407	0,461	0,230	0,156

Kd – fator de torque do parafuso identificado por “d”;

Ke – fator de torque do parafuso identificado por “e”;

Kc – fator de torque do parafuso identificado por “c”;

K médioMov – Fator de torque médio/ciclo “n”;

K Médio G – Média de geral de todos os valores de K;

Desvio/ciclo – Desvio padrão em cada ciclo “n” de aperto;

Desvio Geral – Desvio padrão geral de todos os valores de K;

3D/ciclo – Três desvios padrão por cada ciclo “n” de aperto;

3D Geral – Três desvios padrão geral de todos os valores de K;

Kmax/ciclo – Valor máximo de K. Média mais 3D/ciclo;

Kmax-G – Valor máximo de K. Média mais 3D Geral.

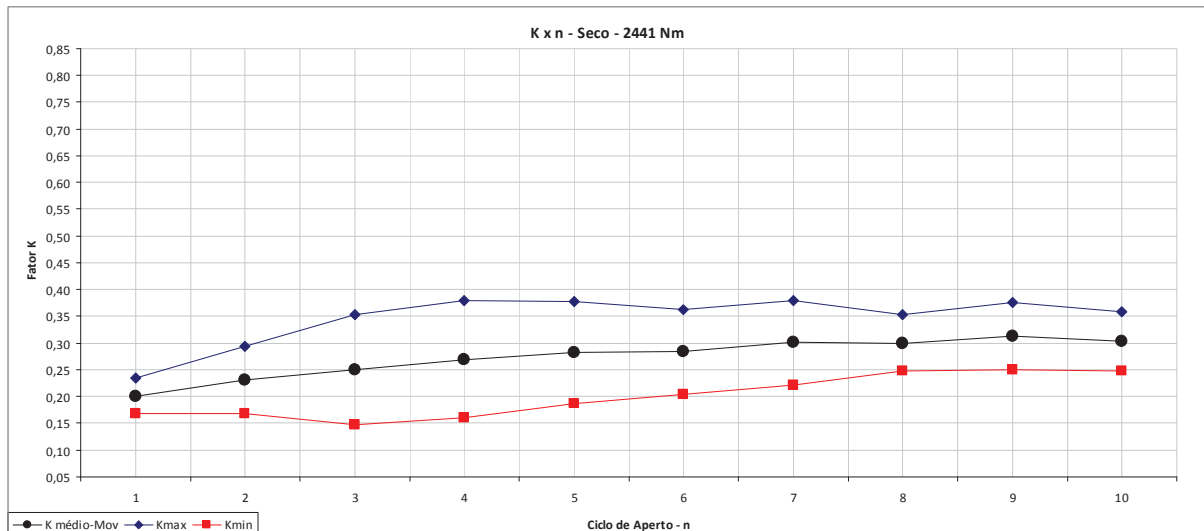
Torque de 2441 Nm **Seco**

Figura (4.57) – Valores médios (móvel) de K com torque de 2441 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da média móvel do fator de torque K em cada ciclo de aperto (linha preta). O valor médio no ciclo 1 foi de **0,201**. Este valor estabilizou a partir do ciclo 6, variando de **0,283 a 0,304**.

Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

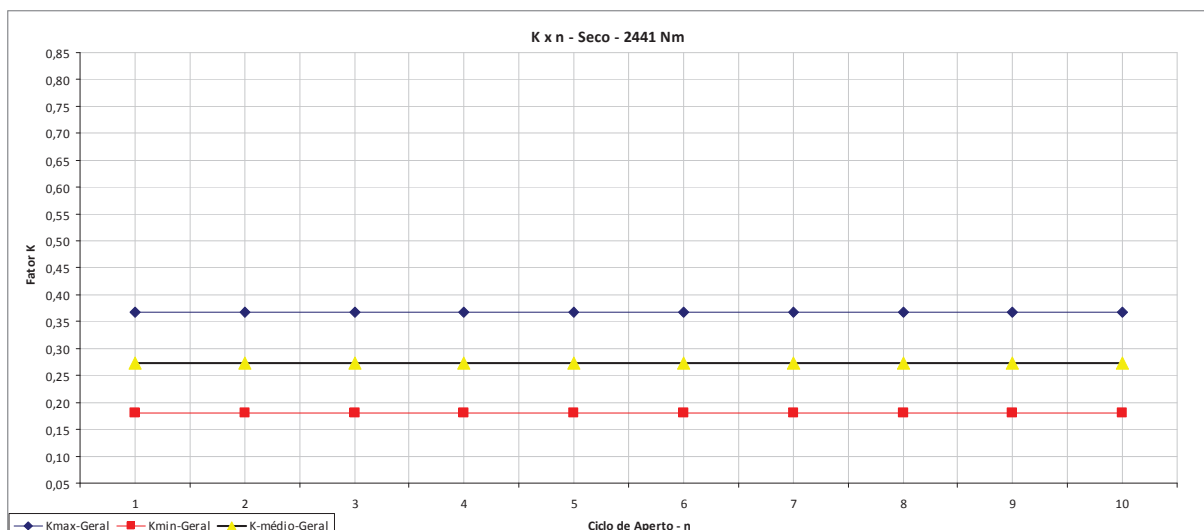


Figura (4.58) – Valores médios (fixo) de K com torque de 2441 Nm.

Este gráfico apresenta agora a variação da média geral do fator de torque K (linha preta), resultando num valor constante igual a **0,273**, com máximo de **0,367** e mínimo de **0,180**.

Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

Tabela (4.19) – Tratamento estatístico de K (2441 Nm seco).

n	Kj	KL	Km	K médioMov	Médio G	Desvio/ciclo	Desvio Geral	1,96D/ciclo	1,96D Geral	Kmax/ciclo	Kmax-G	Kmin/ciclo	Kmin-Geral
1	0,187	0,196	0,220	0,201	0,273	0,017	0,048	0,033	0,093	0,234	0,367	0,168	0,180
2	0,217	0,208	0,268	0,231	0,273	0,033	0,048	0,064	0,093	0,295	0,367	0,167	0,180
3	0,214	0,226	0,310	0,250	0,273	0,052	0,048	0,103	0,093	0,353	0,367	0,148	0,180
4	0,224	0,253	0,332	0,269	0,273	0,056	0,048	0,109	0,093	0,379	0,367	0,160	0,180
5	0,245	0,266	0,338	0,283	0,273	0,049	0,048	0,095	0,093	0,378	0,367	0,188	0,180
6	0,256	0,265	0,330	0,283	0,273	0,041	0,048	0,080	0,093	0,363	0,367	0,204	0,180
7	0,278	0,277	0,347	0,300	0,273	0,040	0,048	0,078	0,093	0,379	0,367	0,222	0,180
8	0,306	0,271	0,324	0,300	0,273	0,027	0,048	0,053	0,093	0,353	0,367	0,247	0,180
9	0,327	0,276	0,334	0,312	0,273	0,032	0,048	0,063	0,093	0,375	0,367	0,250	0,180
10	0,293	0,282	0,335	0,304	0,273	0,028	0,048	0,055	0,093	0,358	0,367	0,249	0,180

Kd – fator de torque do parafuso identificado por “d”;

Ke – fator de torque do parafuso identificado por “e”;

Kc – fator de torque do parafuso identificado por “c”;

K médioMov – Fator de torque médio/ciclo “n”;

K Médio G – Média de geral de todos os valores de K;

Desvio/ciclo – Desvio padrão em cada ciclo “n” de aperto;

Desvio Geral – Desvio padrão geral de todos os valores de K;

3D/ciclo – Três desvios padrão por cada ciclo “n” de aperto;

3D Geral – Três desvios padrão geral de todos os valores de K;

Kmax/ciclo – Valor máximo de K. Média mais 3D/ciclo;

Kmax-G – Valor máximo de K. Média mais 3D Geral.

4.6.4.3 Parafuso RE-Lubrificado

Torque de 2034 Nm RE-Lubrificado

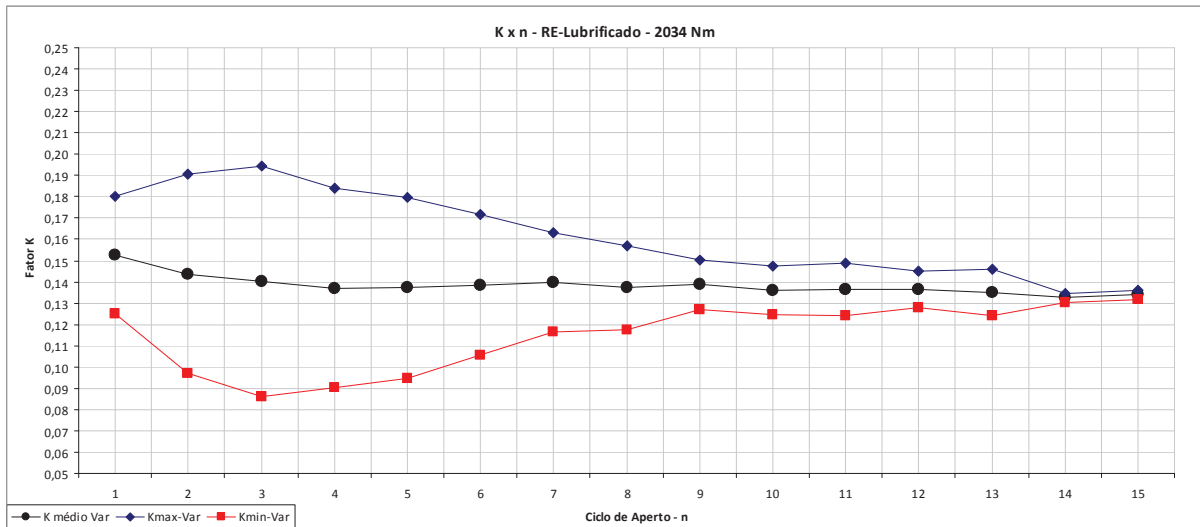


Figura (4.59) – Valores médios (móvel) de K com torque de 2034 Nm.

Este gráfico apresenta a variação da média móvel do fator de torque K em cada ciclo de aperto (linha preta). O valor médio no ciclo 1 foi de **0,152**. Este valor estabilizou a partir do ciclo 3 aproximadamente, variando de **0,140 a 0,134**.

Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

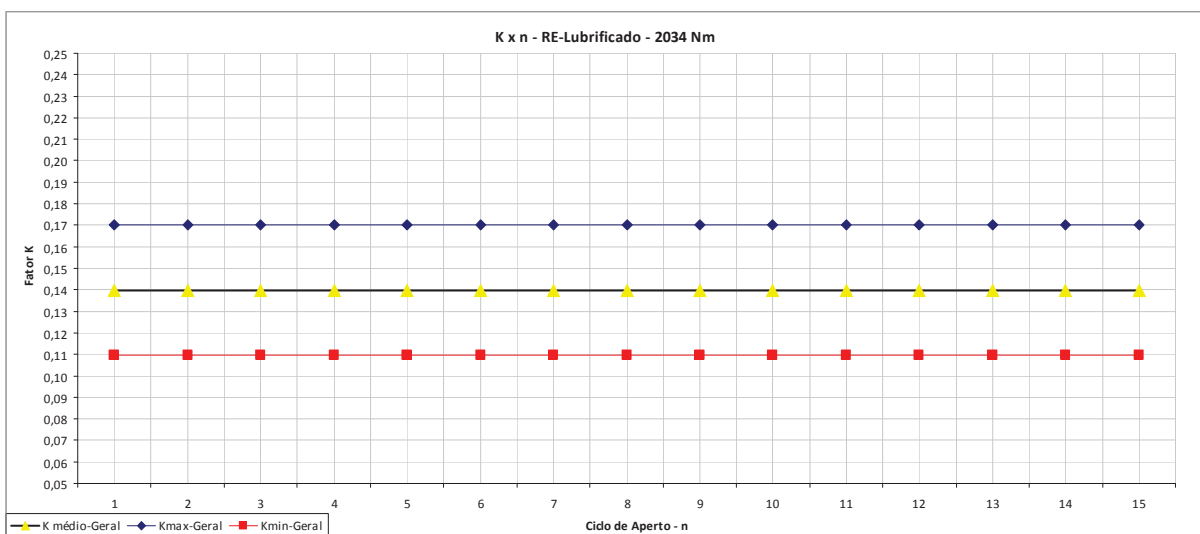


Figura (4.60) – Valores médios (fixo) de K com torque de 2034 Nm.

Este gráfico apresenta agora a variação da média geral do fator de torque K (linha preta), resultando num valor constante igual a **0,140**, com máximo de **0,170** e mínimo de **0,109**.

Os limites representados pelas linhas azul e vermelha representam **1,96** vezes o desvio padrão, ou seja, significa que a chance de se encontrar valores de K neste intervalo é de **95%**.

Tabela (4.20) – Tratamento estatístico de K (2034 Nm lubrificado).

n	Kn	Ku	Ko	K médioMov	Médio G	Desvio/ciclo	Desvio Geral	1,96D/ciclo	1,96D Geral	Kmax/ciclo	Kmax-G	Kmin/ciclo	Kmin-Geral
1	0,169	0,143	0,146	0,152	0,140	0,014	0,015	0,028	0,030	0,180	0,170	0,125	0,109
2	0,171	0,125	0,136	0,144	0,140	0,024	0,015	0,047	0,030	0,191	0,170	0,097	0,109
3	0,172	0,125	0,123	0,140	0,140	0,028	0,015	0,054	0,030	0,194	0,170	0,086	0,109
4	0,165	0,125	0,122	0,137	0,140	0,024	0,015	0,047	0,030	0,184	0,170	0,090	0,109
5	0,161	0,119	0,131	0,137	0,140	0,022	0,015	0,043	0,030	0,180	0,170	0,095	0,109
6	0,158	0,129	0,129	0,139	0,140	0,017	0,015	0,033	0,030	0,172	0,170	0,106	0,109
7	0,153	0,131	0,136	0,140	0,140	0,012	0,015	0,023	0,030	0,163	0,170	0,117	0,109
8	0,149	0,131	0,132	0,137	0,140	0,010	0,015	0,020	0,030	0,157	0,170	0,118	0,109
9	0,143	0,132	0,141	0,139	0,140	0,006	0,015	0,012	0,030	0,150	0,170	0,127	0,109
10	0,142	0,135	0,131	0,136	0,140	0,006	0,015	0,011	0,030	0,147	0,170	0,125	0,109
11	0,140	0,140	0,129	0,136	0,140	0,006	0,015	0,012	0,030	0,149	0,170	0,124	0,109
12	0,141	0,135	0,133	0,137	0,140	0,004	0,015	0,009	0,030	0,145	0,170	0,128	0,109
13	0,133	0,141	0,131	0,135	0,140	0,006	0,015	0,011	0,030	0,146	0,170	0,124	0,109
14	0,131	0,133	0,133	0,133	0,140	0,001	0,015	0,002	0,030	0,135	0,170	0,130	0,109
15	0,134	0,135	0,133	0,134	0,140	0,001	0,015	0,002	0,030	0,136	0,170	0,132	0,109

Kd – fator de torque do parafuso identificado por “d”;

Ke – fator de torque do parafuso identificado por “e”;

Kc – fator de torque do parafuso identificado por “c”;

K médioMov – Fator de torque médio/ciclo “n”;

K Médio G – Média de geral de todos os valores de K;

Desvio/ciclo – Desvio padrão em cada ciclo “n” de aperto;

Desvio Geral – Desvio padrão geral de todos os valores de K;

3D/ciclo – Três desvios padrão por cada ciclo “n” de aperto;

3D Geral – Três desvios padrão geral de todos os valores de K;

Kmax/ciclo – Valor máximo de K. Média mais 3D/ciclo;

Kmax-G – Valor máximo de K. Média mais 3D Geral.

4.6.5 Análise Global e Comparação de Resultados

Inicialmente comparamos o fator de torque K em cada ciclo de aperto para os vários torques plotados num mesmo gráfico. Posteriormente avaliamos K x n para cada torque de aperto.

4.6.5.1 Condições de Montagem

Parafuso Lubrificado

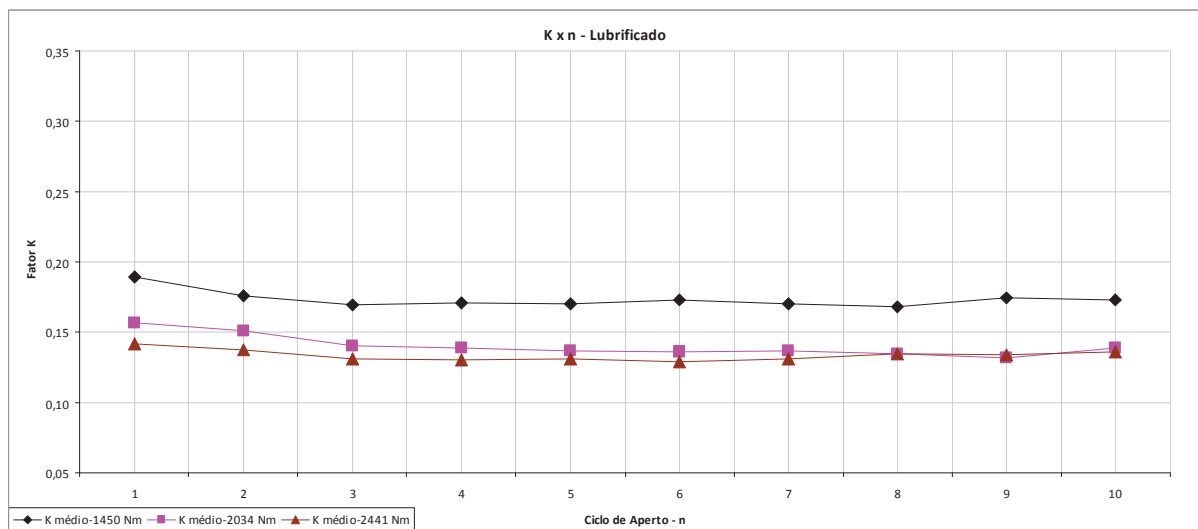


Figura (4.61) – Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 1450, 2034 e 2441 Nm – Parafuso lubrificado.

Este gráfico apresenta as médias móveis do fator de torque K em cada ciclo de aperto. Houve um decréscimo de K na medida em que a força de aperto (ou torque) foi sendo elevada.

Parafuso Seco

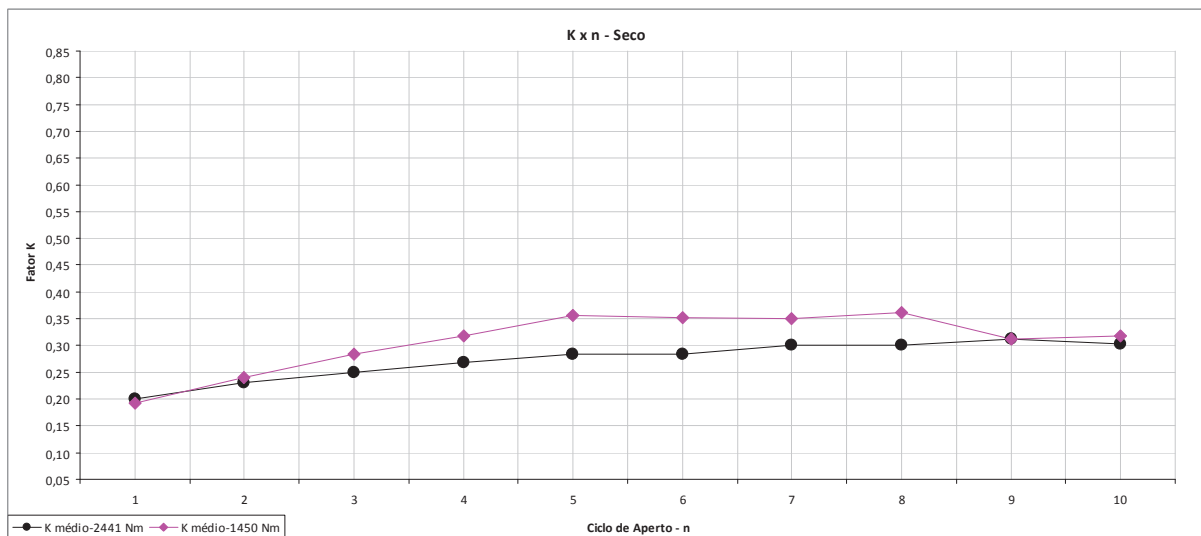


Figura (4.62) – Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 1450 e 2441 Nm – Parafuso seco.

Os dois primeiros ciclos de aperto, assim como os dois últimos, resultaram num fator de torque praticamente **igual**.

Parafuso Lubrificado e Re-lubrificado

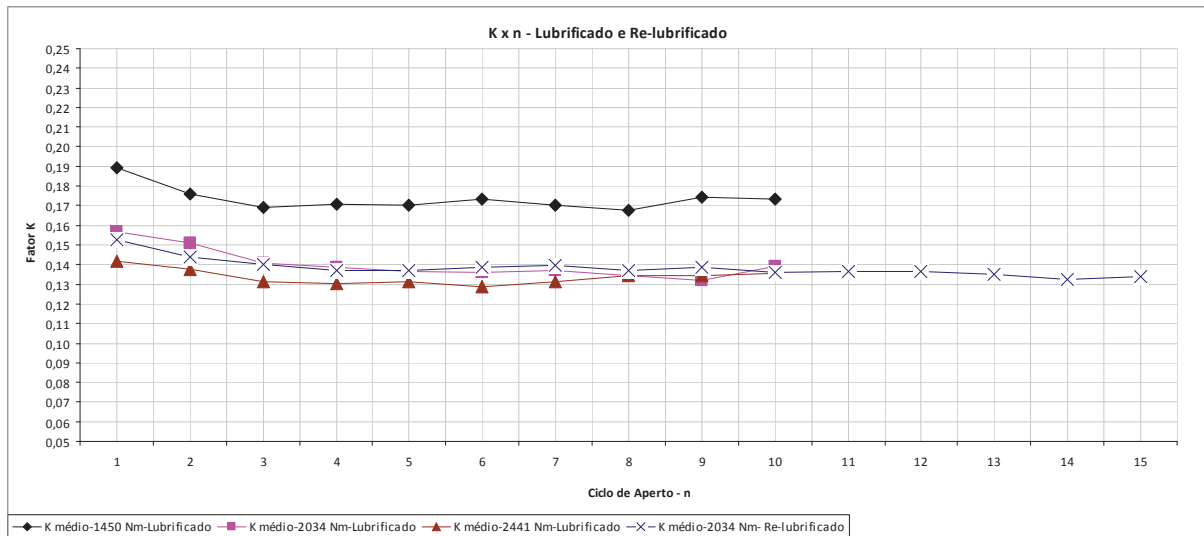


Figura (4.63) – Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 1450, 2034 e 2441 Nm – Parafuso lubrificado e re-lubrificado.

Neste gráfico fica confirmado que **não há diferença significativa** no torque “lubrificado” e “relubrificado”, conforme foi realizado neste trabalho, no mesmo torque aplicado.

4.6.5.2 Níveis de Torque

Torque de 1450 Nm

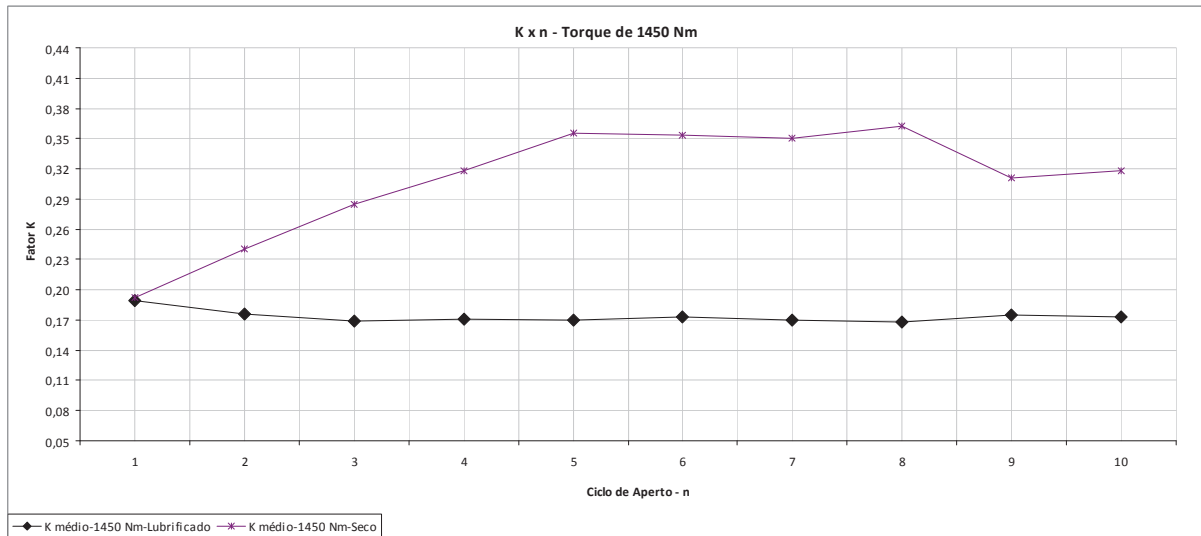


Figura (4.64) – Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 1450 Nm lubrificado e seco.

No primeiro aperto os valores de K são praticamente os mesmos. A partir daí os novos valores são bem diferentes mostrando a importância do lubrificante.

Torque de 2034 Nm

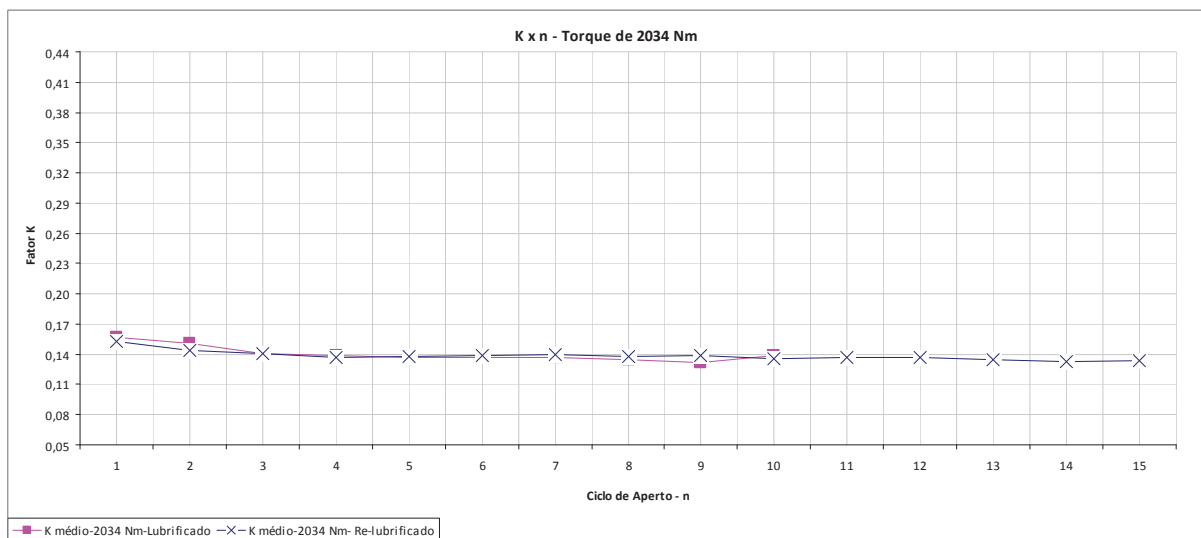


Figura (4.65) – Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 2034 Nm lubrificados e Re-lubrificados.

Este gráfico mostra claramente que **não há diferença significativa** entre a condição lubrificada ou re-lubrificada.

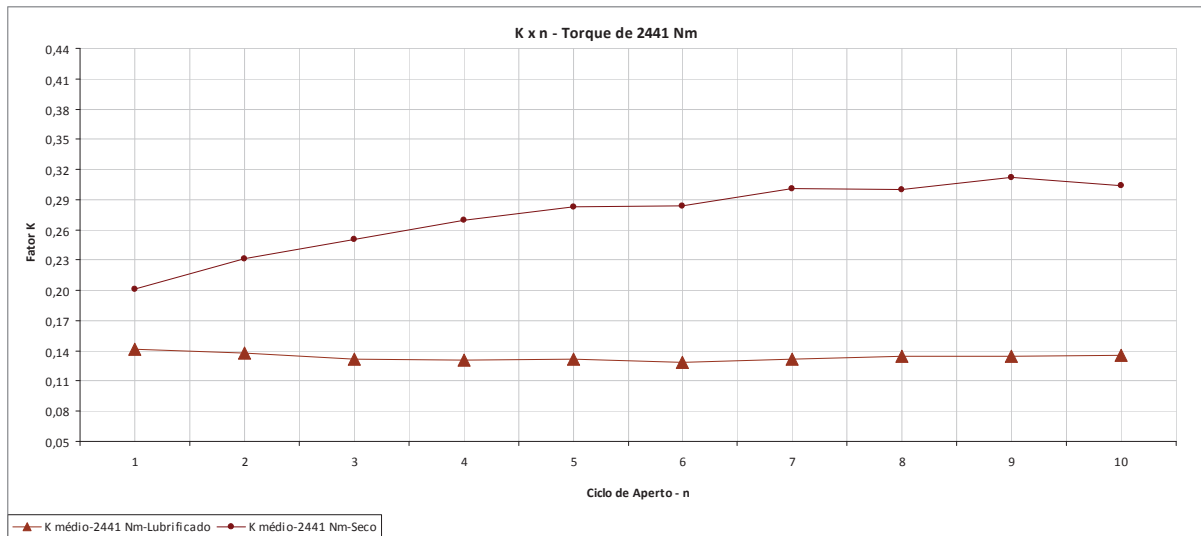
Torque de 2441 Nm

Figura (4.66) – Fatores de torque K versus ciclo de aperto n. Torques de 2441 Nm lubrificado e Seco.

Neste gráfico o valor de K (fator de torque) no primeiro aperto **já difere bastante** entre as duas condições de montagem (seco e lubrificado).

4.7. Incerteza do Método de Ensaio

A incerteza combinada foi calculada de acordo com a equação 1.16 (já derivada), rerepresentada abaixo.

$$U_c(K) = \sqrt{\left(\frac{1}{Fd} \cdot u(T)\right)^2 + \left(-\frac{T}{F^2d} \cdot u(F)\right)^2 + \left(-\frac{T}{Fd^2} \cdot u(d)\right)^2}$$

Substituindo os valores e resolvendo:

$$U_c(K) = \sqrt{\left(\frac{1}{300000(31,75 \cdot 10^{-3})} \cdot u(0,355)\right)^2 + \left(-\frac{1600}{300000^2 \cdot (31,75 \cdot 10^{-3})} \cdot u(0,634 \cdot 10^3)\right)^2 + \left(-\frac{1600}{300000(31,75 \cdot 10^{-3})^2} \cdot u(0,01 \cdot 10^{-3})\right)^2}$$

$$U_c(K) = 3,608 \cdot 10^{-4},$$

Para uma confiança de medição de 95%, multiplica-se este valor por 1,96, então:

$$U_{95}(K) = 7,07 \cdot 10^{-4}.$$

Significa dizer que os valores medidos com a instrumentação indicada possuem uma precisão bem interessante para os valores calculados do fator de torque K.

Quando afirmamos, por exemplo, que o valor médio de K para parafusos torquados com 1450 Nm lubrificadas foi de 0,189, significa que pode ser 0,189707168 ou 0,188292832. Ou seja:

$$K_m = 0,189^{+0,00070716}_{-0,00070716}$$

4.8. Avaliação Final com MEV

As avaliações qualitativas finais com MEV (microscópio eletrônico de varredura) estão apresentadas abaixo.

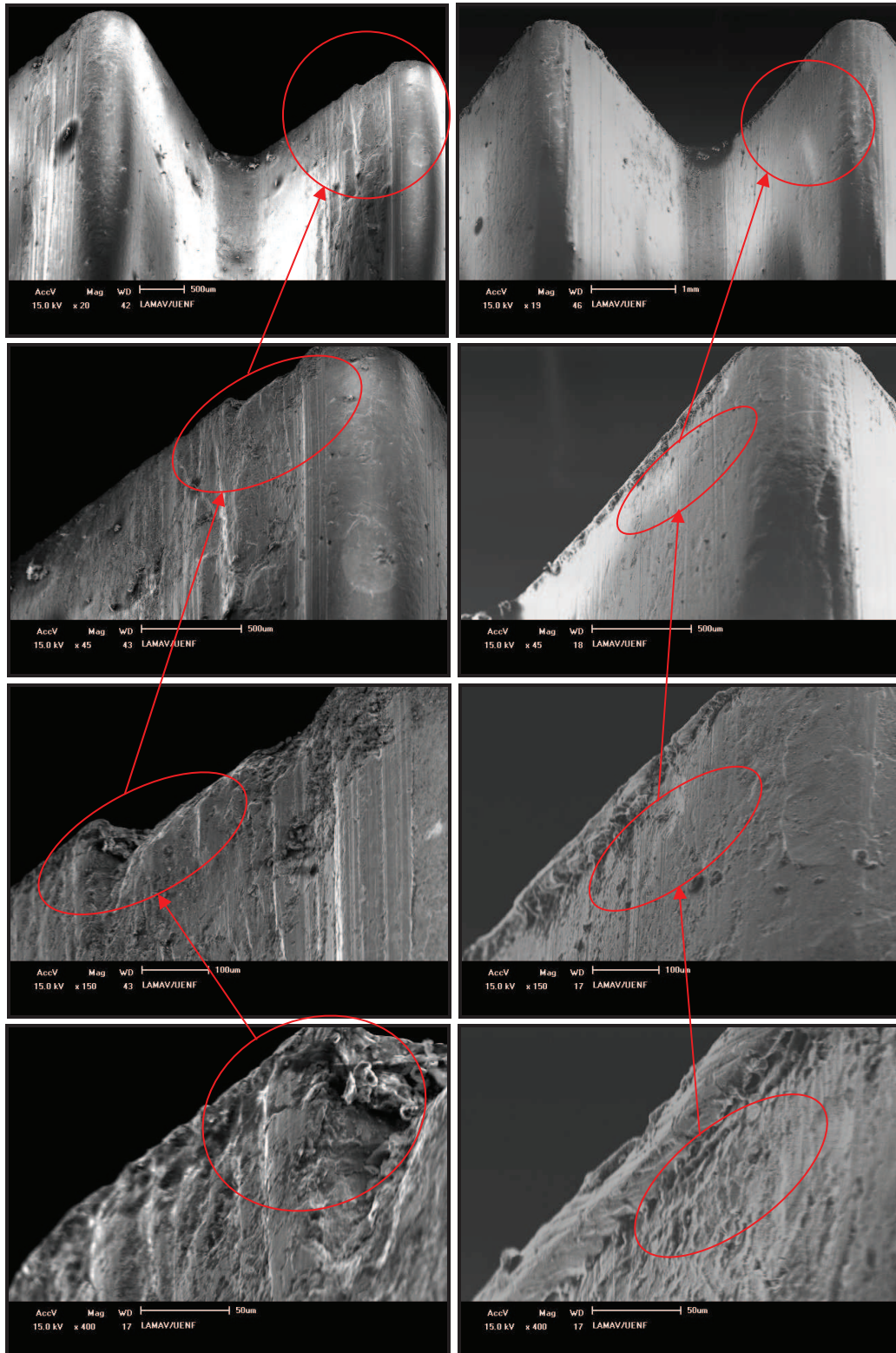


Figura (4.67) – Imagem do MEV geradas após dez torqueamentos.

A avaliação qualitativa com microscópio eletrônico de varredura foi efetuada após 10 (dez) aplicações de torqueamento. Nas imagens 4.67, os parafusos foram montados seco (à esquerda) e lubrificados (à direita).

Os resultados apresentam claramente que os parafusos montados com **lubrificante (à direita)** têm um desgaste menor, o que aumenta a sua durabilidade.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

5.1 Análise Micro-Estrutural

A avaliação metalográfica no parafuso revelou uma estrutura martensítica, típica de aços baixa liga, temperados e revenidos.

A avaliação com espectrômetro de emissão ótica e micro-análise com MEV indicaram uma composição química característica do aço de baixa liga conforme a norma SAE-5140 (UNS-51400).

5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) – Como Recebido.

O relevo da superfície se mostrou uniforme, conforme se espera de uma rosca rolada. Observou-se uma camada superficial, certamente oriunda do processo de tratamento térmico. Esta camada escura é chamada de Enegrecimento por Têmpera, oleado ou carepa.

5.3 Medição de Rugosidade

Utilizando-se o microscópio “ComFocal”, identificamos que:

A - Rugosidade média igual a **1,482** micrômetros (Ra) para uma rosca nova, ou “como recebida”;

B - Rugosidade média igual a **2,354** micrômetros (Ra) para uma rosca lubrificada, após dez torqueamentos;

C - Rugosidade média igual a **9,589** micrômetros (Ra) para uma rosca seca, após dez torqueamentos.

5.4 – Ensaio de Tração

O ensaio de tração revelou propriedades mecânicas compatíveis com os requisitos da norma ASTM A-490 desde que os corpos de prova sejam retirados de uma região intermediária entre a superfície e o centro do mesmo. Considerando os três corpos de prova válidos, os valores médios de limite de resistência, tensão de escoamento e alongamento foram 945 MPa e 30,8%, respectivamente.

5.5 – Ensaio de Dureza

As medições de dureza revelaram um valor médio de **35,2 HRc**. Todas as amostras atenderam ao intervalo de dureza definido na norma ASTM A-490 (33 a 38 HRc).

5.6 – Ensaio de Torque

Os parafusos lubrificados com graxa Lubrax Autolith 2, torquados com 1450Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,189, no primeiro aperto**. Este valor aproximadamente estabilizou a partir do ciclo 3, variando de **0,169 a 0,173**;

Os parafusos lubrificados com graxa Lubrax Autolith 2, torquados com 1450Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,173 (média de 10 apertos)**; Para um intervalo de confiança de 95%, considerando uma distribuição normal, o valor mínimo seria **0,154** e máximo de **0,193**.

Os parafusos lubrificados com graxa Lubrax Autolith 2, torquados com 2034Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,157, no primeiro aperto**. Este valor aproximadamente estabilizou a partir do ciclo 3, variando de **0,141 a 0,139**;

Os parafusos lubrificados com graxa Lubrax Autolith 2, torquados com 2034Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,140 (média de 10 apertos)**; Para um intervalo de confiança de 95%, considerando uma distribuição normal, o valor mínimo seria **0,108** e máximo de **0,172**.

Os parafusos lubrificados com graxa Lubrax Autolith 2, torquados com 2441Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,142, no primeiro aperto**. Este valor aproximadamente estabilizou a partir do ciclo 3, variando de **0,131 a 0,136**;

Os parafusos lubrificados com graxa Lubrax Autolith 2, torquados com 2441Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,134 (média de 10 apertos)**; Para um intervalo de confiança de 95%, considerando uma distribuição normal, o valor mínimo seria **0,106** e máximo de **0,161**.

Os parafusos montados a seco, torqueados com 1450 Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,192, no primeiro aperto**. Este valor estabilizou a partir do ciclo 5, variando de **0,355 a 0,319**;

Os parafusos montados a seco, torqueados com 1450 Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,309 (média de 10 apertos)**; Para um intervalo de confiança de 95%, considerando uma distribuição normal, o valor mínimo seria **0,156** e máximo de **0,461**.

Os parafusos montados a seco, torqueados com 2441 Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,201, no primeiro aperto**. Este valor estabilizou a partir do ciclo 3, variando de **0,283 a 0,304**.

Os parafusos montados a seco, torqueados com 2441 Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,273 (média de 10 apertos)**; Para um intervalo de confiança de 95%, considerando uma distribuição normal, o valor mínimo seria **0,180** e máximo de **0,367**.

Os parafusos RE-lubrificadas com graxa Lubrax Autolith 2, torqueados com 2034 Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,152, no primeiro aperto**. Este valor aproximadamente estabilizou a partir do ciclo 3, variando de **0,140 a 0,134**;

Os parafusos RE-lubrificadas com graxa Lubrax Autolith 2, torqueados com 2034 Nm apresentaram um fator de torque “K” médio igual a **0,140 (média de 10 apertos)**; Para um intervalo de confiança de 95%, considerando uma distribuição normal, o valor mínimo seria **0,109** e máximo de **0,170**.

Nos parafusos lubrificadas houve um decréscimo de K na medida em que a força de aperto (ou torque) foi sendo elevada.

Em parafusos montados a seco com torque de 1450 e 2441 Nm, praticamente não houve variação no fator de torque K nos dois primeiros apertos.

O fator de torque K não foi afetado significativamente entre as condições de montagem lubrificada e RE-lubrificada.

Com torque de 1450 Nm, no primeiro aperto, os valores de K são praticamente os mesmos. A partir daí os novos valores são bem diferentes mostrando a importância do lubrificante.

Com torque de 2441 Nm, o valor de K (fator de torque) no primeiro aperto já difere bastante entre as duas condições de montagem (seco e lubrificado).

5.7 – Incerteza do Método de Medição

Os valores medidos com a instrumentação indicada possuem uma precisão adequada para os valores calculados do fator de torque K. A incerteza combinada foi de $U_{95}(K) = 7,07 \cdot 10^{-4}$ para um intervalo de confiança de 95%.

5.8 Avaliação Final com MEV

Os resultados da avaliação superficial após dez torqueamentos, utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV), mostram claramente que os parafusos montados com lubrificante têm um desgaste muito menor, o que aumenta a sua durabilidade.

CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Bray; R. Levi., “Factors Affecting the Tightening Characteristics of Bolts” – Experimental Mechanics, Washington, 409-419 September 1965.

Albertazzi, Armando; Sousa, André R. Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial. Ed Manole, 2008.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. (2001) Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints (2001). 2ª ed. USA: AISC.

API 2C – Specification for Offshore Pedestal Mounted Cranes. American Petroleum Institute. EUA, sixth edition, 2004.

Archer, D., “Dissecting the nut factor” – Machine Design, Orion, 40-43 August 2009.

ASME PCC-1-2010 - Guidelines for pressure boundary bolted flange joint assembly.

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

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

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

Bhadeshia, H.K.D.H., 2002. Material factors. In: Totten, G., Howes, M., Inoue, T. (Eds.), Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, Ohio, pp. 03–10.

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

BS EN ISO 16047. Fasteners - Torque/clamp force testing.: BRITISH STANDARD; 2005.

CALLISTER, W.D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ed. LTC, São Paulo, 2002.

Chiaverini, Vicente. Tecnologia Mecânica. Vol. I, II e III. Ed. McGraw-Hill. 1986.

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

Dubois G., Piraprez E., “High Strength Friction Grip Bolts – Optimal Parameters for the Combined Method of Tightening” – Belgium – 1992.

DUFOUR, J.D., An Introduction to Metallurgy. 4 ed. Houston-TX, Cooper Cameron Corporation, 2002.

Eccles, W., Frictional changes during repeated tightening of zinc plated threaded fasteners, Article Info – Tribology Journal, 2010.

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

Engineering Handbook. (2005) Tribology: Friction, Wear, and Lubrication. vol., 2ª edição. Ohio, USA.

Engineering Handbook. (2005) Tribology: Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques. vol., 2ª edição. Ohio, USA.

ERICSSON, T. “Principles of Heat Treating of Steels”. In: ASM Handbook, v. 4, Heat Treating, ASM International, pp. 3-19, 1991.

Franco, Samuel Mendes., 2008. Apostila de Incerteza de Medição.

Gallas, Márcia Rusman., 1998. WWW.if.ufrgs.br/~marcia

Garcia, R., Conceitos gerais sobre torque e processos de torque, Revista do Parafuso, 2007.

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

Kyung-Young Jhang, Hai-Hua Quan, Job Há, Noh-Yu Kim., “Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement”. School of Mechanical Engineering, Hanyang University, South Korea – 2006.

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

Marcelo, A. L., Propriedades de Fadiga de Parafusos de Alta Resistência Mecânica - , Tese de Mestrado, 2008, Universidade Estadual de Campinas.

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

NORTON, ROBERTO L, Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. Tradução João Batista de Aguiar. 2 ed. Porto Alegre : Bookman, 2004.

Pedersen, N. L., “Optimization of bolt thread stress concentrations” - Department of Mechanical Engineering, Solid Mechanics, 2012 - Technical University of Denmark.

PHILIP T. V., MCCAFFREY, T. J. “Ultrahigh-Strength Steels”. In: Metals Handbook, v. 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International, pp. 430-448, 1990.

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

Projeto de Engenharia Mecânica / Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke, Richard G. Budynas ; Tradução João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar. – 7. ed – Porto Alegre : Bookman, 2005.

Ralph S. Shoberg, P.E., Engineering Fundamentals of Threaded Fastener Design and Analysis, PCB LOAD E TORQUE.

Souza, S. Augusto. Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos. Editora Edgard Blucher, 1982.

Stoeterau, R. L., “Tribologia.” Departamento de engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina Centro Tecnológico, 2004.

Jacobs, J. A., Engineering Materials Technology. 5ed. Prentice Hall. 2004.