



PUC Minas

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AUTOMOTIVA

Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DA RELAÇÃO TORQUE x FORÇA
TENSORA E DO COEFICIENTE DE ATRITO
EM PARAFUSOS REVESTIDOS ISENTOS DE
CROMO HEXAVALENTE**

Hermano Nascimento Jr.

Orientador: **Prof. Dr. Wisley Falco Sales.**

Julho de 2003



PUC Minas

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AUTOMOTIVA

ESTUDO DA RELAÇÃO TORQUE x FORÇA TENSORA E DO COEFICIENTE DE ATRITO EM PARAFUSOS REVESTIDOS ISENTOS DE CROMO HEXAVALENTE

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC Minas pelo aluno **Hermano Nascimento Jr.** como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Banca Examinadora:

Prof. Wisley Falco Sales, Dr. - PUC Minas - Orientador
Prof. Ernani Sales Palma, Dr – Ing. – PUC Minas – Co-Orientador
Prof. Eduardo Carlos Bianchi , Dr. – UNESP/BAURU - Examinador Externo
Prof. Sandro Cardoso Santos, Dr. – PUC Minas - Examinador Interno

Belo Horizonte, 08 de julho de 2003



PUC Minas

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**“ESTUDO DA RELAÇÃO TORQUE X FORÇA
TENSORA E DO COEFICIENTE DO ATRITO EM
PARAFUSOS REVESTIDOS ISENTOS DE
CROMO HEXAVALENTE”**

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Mestrado em Engenharia Mecânica, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 08 de julho de 2003.

Prof. Wisley Falco Sales, Dr.
Presidente, Orientador
PUC Minas

Prof. Eduardo Carlos Bianchi, Dr.
Membro Externo da Banca
UNESP- Bauru

Prof. Emani Sales Palma, Dr.-Ing.
Membro Interno da Banca
PUC Minas

Prof. Sandro Cardoso Santos, Dr.
Membro Interno da Banca
PUC Minas

Aos meus pais, Hermano Nascimento e

Maria Aparecida Pereira,

minha querida esposa Lucieni,

meus filhos Hugo e Clara,

a todos os meus amigos, e ao

Grande Arquiteto do Universo, Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Professores Wisley Falco Sales, Ernani Sales Palma e Sandro Cardoso Santos pelo apoio e orientação neste Trabalho.

À Fiat Automóveis, uma empresa de sucesso, além de uma grande escola que prepara continuamente seus profissionais para pensar, criar e superar desafios.

Ao meu amigo José Guilherme, gerente da unidade Engenharia Veículos da Engenharia de Produto América Latina da Fiat Automóveis, obrigado pela oportunidade.

Aos meus amigos Júlio César, Guilherme Augusto, Leonardo Dutra, Leonardo Silva, Orlando e Edilene da Engenharia de Materiais obrigado pela ajuda na preparação deste trabalho.

A Rubens Cioto, gerente de Tecnologia da Metalac SPS, grande mestre na área de juntas parafusadas, obrigado pelas valiosas orientações.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Histórico	2
1.2. Objetivos gerais do trabalho	3
1.2.1. Objetivos específicos	4
1.3. Organização do trabalho	4
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	6
2.1. Sistemas Mecânicos de Fixação por Aparafusamento	6
2.1.1. Introdução	6
2.1.2. Aperto em Juntas Aparafusadas	11
2.1.3. Solicitação do Parafuso durante a Montagem	15
2.1.4. Dispersão da Força de montagem durante o aperto	18
2.1.5. Comportamento Mecânico da Junta Aparafusada	22
2.1.6. Métodos de Aparafusamento	28
2.2. Avaliação do Sistema Tribológico	40
2.2.1. Introdução	40
2.2.2. As Leis do Atrito	41
2.2.3. Contato entre Superfícies	46
2.2.4. Revestimentos Metálicos Macios	49

4.1.7 – Resultados de Coeficiente de atrito	110
4.1.8 – Análises dos Resultados	113
4.2 – Avaliações das Superfícies após Ensaios de Aparafusamento	128
4.2.1 - Avaliação dos Aspectos Gerais da Superfície do Parafuso Após o Ensaio de Aparafusamento	128
4.2.2 - Avaliação da Resistência à Corrosão	130
4.2.3 - Avaliação da Espessura do Revestimento e Aspectos Tridimensionais das Superfícies	132
4.2.4 - Avaliações das Superfícies Efetivas de Contato Após Ensaios de Aparafusamento	138
4.3 – Avaliação da Reusabilidade dos Parafusos	149
4.4 – Síntese dos Resultados Encontrados	170
4.4.1 – Aspectos Qualitativos das tecnologias A e B	171
4.4.2 – Resultados de Coeficientes de Atrito e Torques	172
4.4.3 – Resultados de Reusabilidade	173
4.4.4 – Resultados de Medições de Espessura e Análise Química	174
5. CONCLUSÕES	175
5.1 – Aspectos do atrito, torque e força tensora	175
5.2 – Aspectos tribológicos de reusabilidade	176
5.3 – Sugestões para trabalhos futuros	177
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	178
7. ANEXO I	180

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS

SÍMBOLOS	-----	UNIDADE
a	Área circular	mm ²
A₀	Área da seção resistente	mm ²
Ag	Prata	*
Al	Alumínio	*
A_{or}	Área real de contato	mm ²
A_s	Área da seção resistente.	mm ²
A_T	Área da seção resistente do corpo de diâmetro rebaixado do parafuso	mm ²
Au	Ouro	*
Cr⁺⁶	Cromo Hexavalente	*
D	Diâmetro nominal do parafuso	mm
d₂	Diâmetro primitivo da rosca do parafuso	mm
d₃	Diâmetro do núcleo da rosca do parafuso	mm
D_B	Diâmetro do furo de passagem do parafuso nas juntas	mm
d_K	Diâmetro externo da superfície de apoio da cabeça do parafuso ou porca	mm
D_{KM}	Diâmetro efetivo de atrito da cabeça do parafuso ou da porca	mm
dM_A/d	Coeficiente diferencial da relação torque de aperto	
φ	MA e do ângulo de rotação φ do parafuso durante o processo de aparafusamento	Nm/°Graus

d_o	Diâmetro da menor área resistiva em parafusos rebaixados	mm
d_s	Diâmetro da área de tensão A _s	mm
d_T	Diâmetro da haste rebaixada em parafusos	mm
E	Módulo de elasticidade	Gpa
E'	Módulo de elasticidade composto	Gpa
F	Força de atrito	N
F_A	Força axial	N
F_A	Força externa aplicada a junta	N
Fe	Ferro	*
F_F	Força de montagem na junta sem carga externa	N
F_M	Força tensora inicial	N
F_M	Força tensora de montagem	N
F_{M max}	Força tensora de montagem para a qual deve ser projetado o parafuso, para que apesar do método de aperto e dos valores de perda de força por assentamento esperado durante serviço, seja mantida ainda uma força de retenção necessária	N
F_{M min}	Força tensora mínima de montagem que se apresenta com F _{M Max} em consequência da imprecisão do método de aperto	N
F_N	Força normal	N
f_{PM}	Deformação elástica na junta devida a F _M (Encurtamento)	mm
F_Q	Força transversal	N
F_s	Força de tensão no parafuso	N
f_{SM}	Alongamento do parafuso devido a F _M	mm
F_{SP}	Força tensora axial do parafuso com utilização de 90% do limite de escoamento, calculado em função de σ _M	N

F_T	Força tangencial	N
F_U	Força de compressão na junta	N
F_V	Força tensora caso geral	N
H	Dureza	N/mm ²
h_c	Espessura crítica	μm
In	Índio	*
K	Coeficiente de torque	*
l_k	Comprimento de carregamento	mm
M_A	Torque de montagem	Nm
M_{Amax}	Máximo torque de aperto possível	Nm
M_{Amin}	Mínimo torque de aperto	Nm
M_G	Proporção do torque agindo sobre a cabeça do parafuso ou porca	Nm
M_{GA}	Proporção do torque total agindo na rosca do parafuso	Nm
M_K	Proporção do torque agindo sobre a cabeça do parafuso ou porca	Nm
N	Fator de encruamento	*
O	Oxigênio	*
P	Pré-carga	N
p	Passo da rosca	mm
Pb	Chumbo	*
P_{média}	Pressão média	N/mm ²
P_Y	Pressão ou Resistência ao escoamento	N/mm ²
r	Raio	mm
r_n	Raio efetivo de contato entre a face da porca e superfície de apoio	mm
R_{p0,2}	Limite de escoamento convencional	N/mm ²
r_t	Raio efetivo de contato da rosca	mm
Si	Silício	*
Sn	Estanho.	*

T	Torque	Nm
Ti	Titânio	*
W	Carga normal	gforça
w	Largura do sulco	mm
W₁₂	Trabalho de adesão dos materiais em contato	Nm
W_p	Momento de resistência da seção transversal do parafuso	Nm
Y	Tensão de escoamento uniaxial	N/mm ²
Zn	Zinco	*

SÍMBOLOS GREGOS

SÍMBOLOS	UNIDADE
π	Constante *
β	Semi ângulo da rosca °Graus
φ	Ângulo de rotação/Ângulo da hélice da rosca °Graus
μ	Coefficiente de atrito geral *
α	Ângulo do flanco da rosca do parafuso °Graus
τ	Tensão de torção na rosca como resultado de M_{GA} N/mm ²
ν	Grau de aproveitamento do limite de escoamento durante o aparafusamento *
θ	Ângulo de inclinação °Graus
ν	Coefficiente de Poisson *
ψ	Índice de plasticidade *
β	Raio de curvatura médio composto das pontas das asperidades mm
θ	Inclinação média das asperidades °Graus
δ	Fator de abertura da trinca crítico *
ν	Ângulo de deslizamento °Graus
ρ'	Ângulo de atrito para μ' °Graus
μ'_G	Coefficiente de atrito nas roscas triangulares, aumentado com relação a μ_G *
$\sigma_{0,2}$	Tensão de escoamento convencional a 0,2% N/mm ²
σ_{12}	Resistência a tração interfacial N/mm ²
α_A	Fator de aperto *
μ_a	Coefficiente de atrito de adesão *
δ_c	Deformação na junta como resultado do assentamento mm
μ_d	Coefficiente de atrito dinâmico *

$\Delta F_{M(\mu)}$	Aumento da força de montagem F_M através do coeficiente de atrito na superfície de apoio da cabeça (μ_{Kmin}) e da rosca (μ_{Gmin}) durante a geração do momento de aperto	N
$\Delta F_{M(\mu G)}$	Aumento da força tensora de montagem F_M através do coeficiente de atrito (μ_{Gmin}) durante a geração do momento de aperto	N
$\Delta F_{M(MA)}$	Aumento da força de montagem F_M devido ao mais alto torque possível M_{Amax}	N
$\Delta F_{M(Rp0,2)}$	Aumento da força tensora de montagem F_M comparada com a força tensora mínima (F_{Mmin}) para aparafusamento por controle do limite de escoamento através do incremento da resistência do parafuso comparado ao limite de escoamento mínimo, conforme normalizado	N
μ_G	Coeficiente de atrito na rosca	*
μ_K	Coeficiente de atrito da superfície de apoio da cabeça do parafuso ou porca	*
σ_M	Tensão de tração devido a F_M	N/mm ²
τ_{max}	Limite de resistência do material ao cisalhamento	N/mm ²
μ_n	Coeficiente de atrito entre a face da porca e superfície de apoio parafuso	*
δ_P	Resiliência das juntas	mm/N
σ_p	Desvio padrão composto das alturas dos picos das asperidades	*
μ_p	Componente sulcamento do atrito	*
σ_R	Tensão de ruptura	N/mm ²
σ_{red}	Tensão reduzida	N/mm ²
δ_s	Alongamento do parafuso em função de F_s	mm
δ_S	Resiliência do parafuso	mm/N
μ_s	Coeficiente de atrito estático	*

μ_s	Coeficiente de atrito estático	*
τ_s	Tensão de cisalhamento na superfície	N/mm ²
τ_s	Tensão de cisalhamento média interfacial	N/mm ²
μ_t	Coeficiente de atrito entre a rosca da porca e do parafuso	*
δ_U	Encurtamento da junta em função de F_U	mm

* Adimensional

ABREVIATURAS

ASTM.....American Society for Testing Materials

CCI.....Câmara do Comércio Internacional

ELV End of Life Vehicle

FARe.....Fiat Auto Recycling

IARC.....International Agency for Research on Cancer

ISO.....International Organization for Standardisaton

VDI.....Systematische Berechnung hochbeanspruchter

Schraubenverbindungen Zilindrische Einschraubenverbindungen

NASCIMENTO Jr., H., 2003, “Estudo da Relação Torque x Força Tensora e do Coeficiente de Atrito em Parafusos Revestidos Isentos de Cromo Hexavalente”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Resumo

O objetivo deste trabalho foi o de avaliar, por meio de ensaios experimentais, o comportamento do coeficiente de atrito na relação Torque x Força Tensora em parafusos com revestimentos a base de lamelas de zinco e alumínio, isentos de cromo hexavalente. Foram estudadas duas tecnologias de dois fornecedores onde foram avaliados os coeficientes de atrito na rosca e na cabeça dos parafusos, a eficiência do revestimento em duas condições de parada para a força tensora, o rendimento da fixação e a reusabilidade dos parafusos para uma mesma força tensora.

NASCIMENTO Jr., H., 2003, “Study of the Torque x Tension Relationship and Friction Coefficient Using Coated Bolts with Zinc and Aluminum Flakes Completely Free of Hexavalent Chromium”, Master Dissertation, Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil.

Abstract

The objective of this work was evaluating through experimental tests the behavior of friction coefficient in the Torque x Tension relationship using coated bolts with zinc and aluminum flakes completely free of hexavalent chromium. Were studied two technologies of two suppliers where were appraised the thread friction and under head friction coefficients of the bolts, the efficiency of the coating in two stop conditions for the tension, the efficiency of the joint and the repeated tightening for the same level of tension.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos aumentaram-se as preocupações em relação à preservação do meio ambiente e à saúde ocupacional dos funcionários das empresas. Promover o desenvolvimento sustentável é vital para garantir a sobrevivência do ser humano. Segundo estudos de Organizações Internacionais do meio ambiente, se o homem não se organizar, com urgência, dentro de no máximo 50 anos a situação da terra estará definitivamente comprometida e conseqüentemente a sua sobrevivência.

Atualmente as preocupações dos projetistas estão direcionadas, entre outras, à seleção de materiais e processos “ecologicamente corretos”, ou seja, devem ser observados diversos critérios, estabelecidos em relação ao meio ambiente e ao ser humano, desde a sua obtenção, passando pelos processos de fabricação até, finalmente à sua reciclagem.

Considerando que a conservação do meio ambiente é essencial para a qualidade de vida e para o desenvolvimento sustentável, a FIAT Automóveis S.A., como signatária da Carta Empresarial da Câmara do Comércio Internacional – CCI e em coerência, onde aplicável, com a política para o ambiente da FIAT AUTO, compromete-se a:

- 1- Manter um Sistema de Gestão Ambiental para assegurar o atendimento aos requisitos legais e outros requisitos em seus processos, produtos e serviços;
- 2- Promover a utilização otimizada de recursos energéticos;
- 3- Gerenciar os resíduos industriais, minimizando a sua geração e otimizando a reciclagem dos mesmos;
- 4- Buscar a melhoria contínua do desempenho ambiental de suas atividades, visando sempre à prevenção da poluição e aplicando tecnologia economicamente viável;

- 5- Produzir veículos condizentes com a legislação ambiental vigente;
- 6- Promover a conscientização e o envolvimento dos seus empregados, contratados e subcontratados que trabalham em suas instalações, para que atuem de forma ambientalmente correta.

1.1. Histórico

A seguir, apresenta-se um breve histórico relacionado a alguns produtos utilizados e a sua relação com o ser humano:

1948 – *American Petroleum Institute* – primeiro caso de leucemia associado ao benzeno;

1977 – PLIOFILM, primeiro trabalho mostrando um significativo aumento de riscos de leucemia com a utilização de benzeno;

1978 – Restrição à utilização do cádmio, classificado como carcinogênico;

1987 – *International Agency for Research on Cancer* – IARC classificou o Cr⁺⁶ como carcinogênico;

30 de junho de 1989 – Programa de eliminação de aromáticos nos produtos FIAT;

1992 – Publicação dos “*Principi di Política Ambientale Fiat*”;

1992 – Criação do sistema FARE – *Fiat Auto Recycling*;

2000 – Diretiva Européia – ELV – *End of life Vehicle* – 18/09/2000

Para novos projetos, a partir de Janeiro de 2006 todos veículos deverão apresentar um percentual de reciclabilidade de 95%, sendo 85% de reutilização e 10% de recuperação de energia.

Substâncias perigosas: Identificação dos diversos componentes e materiais e a localização de todas as substâncias perigosas.

Metais pesados: A partir de 01-07-2007 – proibido o uso de chumbo, mercúrio, cádmio e cromo hexavalente (Cr⁺⁶).

Face a tal diretiva, torna-se necessário, por razões ecológico-ambientais, limitar o emprego em veículos de compostos de cromo hexavalente (Cr^{+6}), entre outras substâncias. Associados a isto, também estão às exigências de reciclagem de veículos em fim de vida, fazendo parte do Projeto FA.Re..

Parafusos são elementos de fixação utilizados em várias partes do veículo. Segundo diversas normas, eles são classificados de acordo com sua classe funcional.

O objetivo principal de um parafuso é a partir de um torque aplicado, gerar uma força suficiente para manter a fixação unida durante o uso.

As principais tecnologias de revestimentos atualmente utilizadas em parafusos são a Dacrometização e a Zincagem que apresentam em seus processos e revestimentos a presença do cromo hexavalente. Portanto, para superar tais exigências, novas tecnologias de revestimentos surgiram, banindo a presença do cromo hexavalente. Eles prometem, por meio de selantes utilizados no processo de deposição, uma uniformidade do coeficiente de atrito gerado quando do aperto do parafuso; bem como uma elevada resistência à corrosão.

Posto isto, se faz necessário o estudo do comportamento mecânico de parafusos com estas novas tecnologias em aplicações importantes no veículo, visando atendimento a requisitos ambientais, melhoria de qualidade, padronização e principalmente o atendimento da força tensora necessária segundo o projeto. Outra justificativa para a realização deste trabalho está relacionada à escassa literatura científica específica, disponibilizada aos ambientes acadêmicos e industriais. As pesquisas desenvolvidas sobre o assunto, normalmente são sigilosas e mantidas nas empresas que as patrocinaram, como segredos industriais.

1.2. Objetivos gerais do trabalho

Avaliar por meio de ensaios experimentais utilizando parafusos revestidos por duas diferentes tecnologias, a relação torque x força tensora a partir dos atritos gerados na rosca e cabeça dos parafusos.

1.2.1. Objetivos específicos

Realizar ensaios comparativos entre as tecnologias de revestimentos disponíveis no mercado mundial visando avaliar:

- Os coeficientes de atrito gerados na rosca e na cabeça dos parafusos;
- A eficiência do revestimento em várias faixas de torque;
- O rendimento da junta aparafusada;
- Comparar as tecnologias de revestimentos propostas por dois fornecedores;
- A reusabilidade dos parafusos para mesma performance de força tensora.

1.3. Organização do trabalho

Na apresentação do texto, este trabalho foi subdividido em capítulos. No presente, faz-se uma introdução ao trabalho, enfocando o estudo e mostrando os principais objetivos.

No Capítulo 2, apresenta-se a “Revisão Bibliográfica” do assunto, na qual foram abordados os temas sobre uniões aparafusadas e os aspectos tribológicos no contato entre superfícies. Esse Capítulo tem como objetivo proporcionar o entendimento básico das teorias relevantes ao trabalho, promover um maior aprofundamento no estudo e entender os comportamentos observados nos ensaios experimentais.

O Capítulo 3 trata dos “Procedimentos Experimentais”, onde são apresentadas as metodologias, os materiais, os equipamentos para a realização dos experimentos e dos instrumentos de medição utilizados neste trabalho.

No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais realizados com as duas tecnologias de revestimentos investigadas, confrontando as possíveis diferenças encontradas nos parâmetros de relação torque x força tensora, corrosão salina, coeficiente de atrito, rendimento e reusabilidade.

As “Conclusões” são apresentadas no Capítulo 5.

No Capítulo 5 em “Sugestões para Futuros Trabalhos”, são apresentadas propostas para novas investigações a serem realizadas, visando complementar o presente trabalho.

As “Referências Bibliográficas” são apresentadas no Capítulo 6.

O Capítulo 7 é reservado para o anexo que compõe este trabalho, como Norma específica tomada como referência.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. SISTEMAS MECÂNICOS DE FIXAÇÃO POR APARAFUSAMENTO

2.1.1. INTRODUÇÃO

Uma junta aparafusada é uma união desmontável de duas ou mais partes por intermédio de parafusos. Os parafusos e suas forças tensoras tem por objetivo manter a junção unida atendendo às funções a ela destinadas, suportando as forças de trabalho que se apresentem. Na Figura 2.1 exemplifica-se alguns tipos de solicitações a que estão sujeitas as juntas aparafusadas.

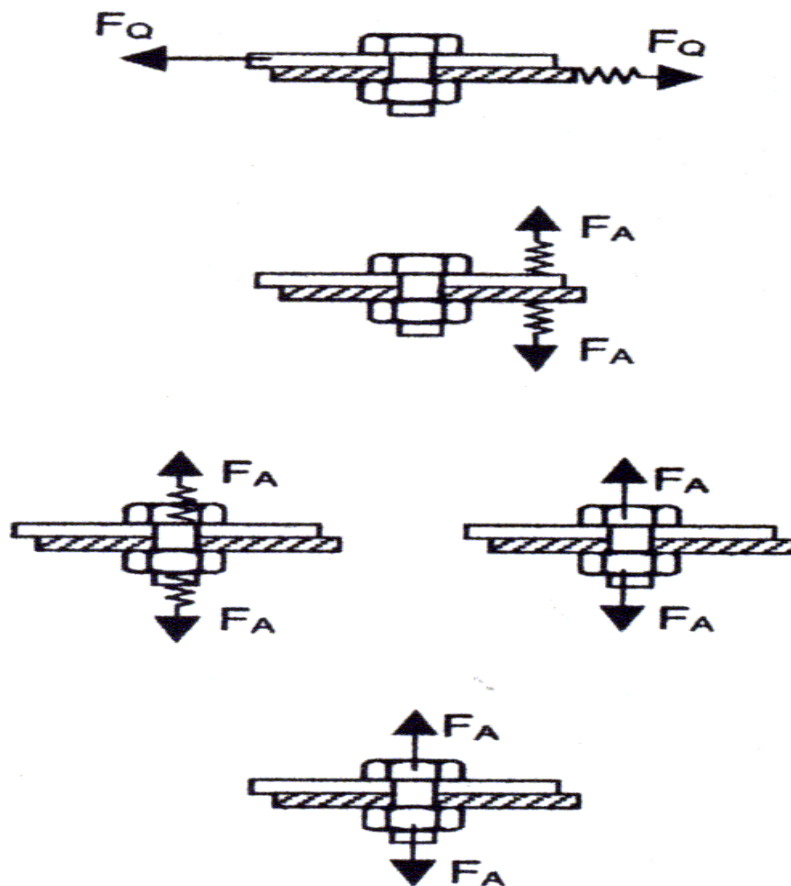


Figura 2.1 - Exemplos de solicitações em juntas aparafusadas (Norma Fiat C2001, 2000).

A confiabilidade numa fixação aparafusada depende intrinsecamente do parafuso e das juntas, além da precisão do cálculo da força tensora necessária e do processo de montagem, que leva a alcançar a força de fixação calculada.

Estruturalmente, o parafuso tem duas finalidades (Bickford, 1990), trabalhar como um pino para manter duas ou mais partes unidas impedindo o movimento relativo entre elas e trabalhar como uma mola para fixar (prender) duas ou mais partes unidas, seu principal propósito.

Quando se aperta um parafuso provocam-se deformações e, conseqüentemente, o alongamento do mesmo. As deformações impostas, no regime elástico são responsáveis por se gerar uma força efetiva de fechamento (pré-carga) da junta. O parafuso fica submetido a tensões de tração.

Em função das forças de atrito entre a rosca da porca e a rosca do parafuso, a ação de aperto também introduz tensão de cisalhamento ao parafuso. Esta tensão de cisalhamento pode ser da ordem de 30 a 50% da tensão de tração durante a operação de aperto, especialmente se o parafuso é torquado na condição seca, ou seja, com pouco ou nenhum lubrificante.

Quando do aperto, os parafusos também estão sujeitos a algum tipo de tensão de flexão em função das faces da porca e da cabeça do parafuso não serem perfeitamente perpendiculares aos eixos das roscas, e/ou as superfícies das partes a serem unidas não serem exatamente paralelas entre si.

Ao término do aperto, algumas tensões introduzidas ao parafuso desaparecem (comportamento elástico global de todos os membros da junta). É sabido também que neste ponto de 10 a 20% da tensão axial inicial pode ser perdida nos primeiros minutos após o aperto em função do relaxamento.

As tensões de tração e torção desaparecem em alguma proporção durante o período de relaxamento. Em geral, tração e torção relaxam em diferentes taxas e por diferentes quantidades; o relaxamento da tensão de cisalhamento é normalmente maior do que o relaxamento da tensão de tração.

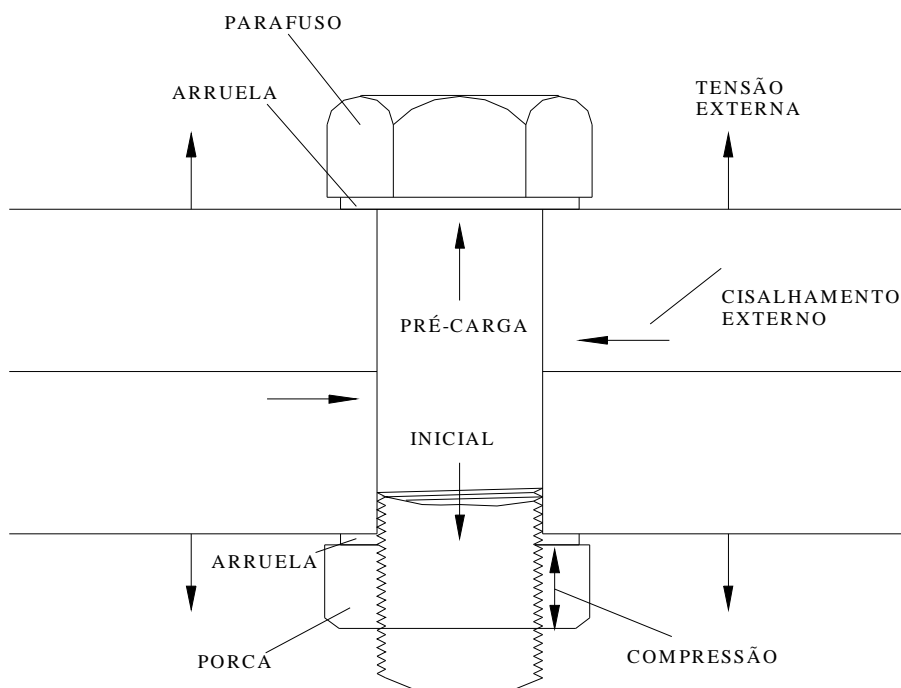
O sistema, composto por todos os elementos integrantes da junta, comporta-se como corpos elásticos (e, localmente, plástico) sob altas cargas.

A tensão de tração introduzida ao parafuso, durante o processo de aperto resulta em uma força de tração, a qual por sua vez cria a força de fechamento da junta. Esta força de fechamento inicial é normalmente chamada pré-carga.

A determinação da correta pré-carga é de fundamental importância no dimensionamento da junta aparafusada. Se for aplicada uma pré-carga em excesso, o parafuso ou os elementos que compõem a junta poderá ser danificado devido a deformações plásticas, ou até se romper, caso as tensões impostas excedam a tensão de ruptura de um ou mais componentes da junta. Ou ainda, a montagem poderá falhar prematuramente em uso, se ocorrer o contrário, em que uma baixa pré-carga for aplicada. Neste caso, outros tipos de falhas poderão ocorrer, como desaparafusamento, fadiga, separação dos membros da junta, etc.

Quando em trabalho, a junta aparafusada estará sujeita a vários tipos de solicitações como tração, flexão, cisalhamento, cargas cíclicas e cargas que são uma combinação destas. Estes tipos de solicitações podem ocorrer devido a diversas causas externas e seus efeitos podem somar-se, ou subtrair-se, às tensões iniciais no parafuso, de modo que freqüentemente se tornam difíceis de serem previstas ou determinadas.

Portanto, uma apropriada pré-carga ao parafuso deve estar entre um valor mínimo e um valor admissível para que possa desempenhar a sua função, conforme esquematizado nas Fig. 2.2 e 2.3



Forças de fixação representadas para uma junta com parafuso, arruelas e porca

Figura 2.2 – Representação esquemática das forças de fixação representadas para uma junta com parafuso, porca e arruela, (Colenci, 1992).

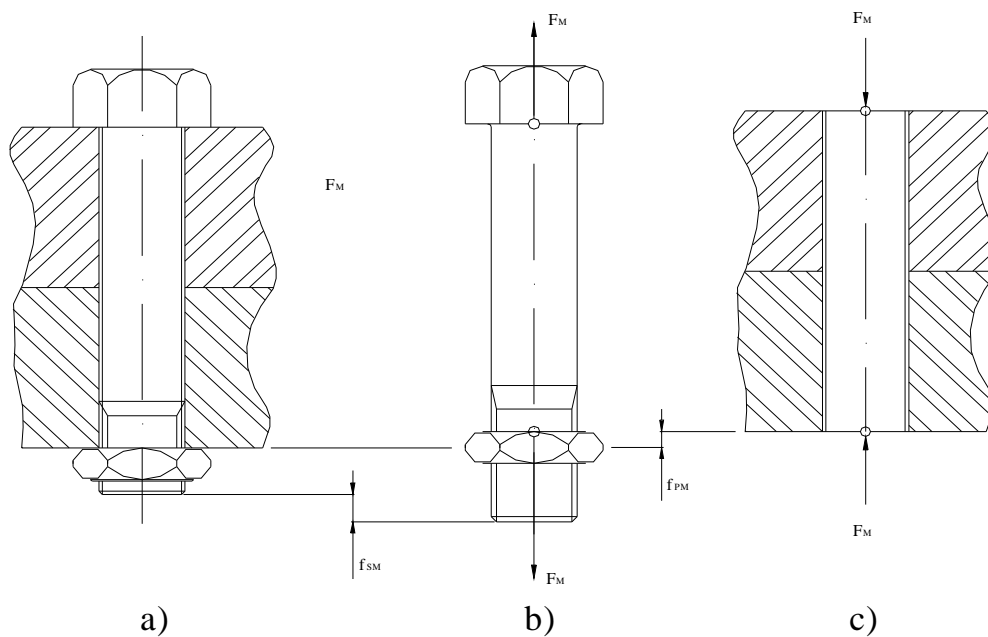


Figura 2.3 - Comportamento de uma junta aparafusada sem aplicação de carga externa, (Colenci,1992).

Na Figura 2.3 mostra-se o comportamento de uma junta aparafusada sem aplicação de carga externa onde se tem:

- a) Junta aparafusada submetida à carga estática F_M , que é a força de fixação gerada na montagem, a partir de um torque aplicado;
- b) Carga estática F_M que promove a tração no parafuso e por sua vez, a deformação elástica f_{SM} ;
- c) Carga estática F_M que promove a compressão das partes e por sua vez, a deformação elástica f_{PM}

Visto que é difícil medir e controlar a força de fechamento diretamente na maioria das aplicações de engenharia, o torque aplicado ao parafuso pode geralmente fornecer uma medida de controle indireta. Na maioria dos casos, as juntas aparafusadas são apertadas por meio de um torque externo. Para alcançar a pré-carga desejada, o nível de torque aplicado deve ser conhecido. Na prática é apropriado utilizar a Eq. (2.1) para determinar o torque exigido para alcançar uma certa pré-carga.

$$T = K.D.P \quad (2.1)$$

Onde, T é o torque exigido, D é o diâmetro nominal do parafuso, P é a pré-carga alcançada e K é coeficiente de torque, determinado por fatores tais como tipo de parafuso, lubrificante e etc.

O torque exigido para apertar um parafuso é composto de três partes (Yanyao, 2001): o torque necessário para estirar (deformar) o parafuso; o necessário para vencer o atrito na rosca do parafuso e o para vencer o atrito entre a face da porca e sua superfície de apoio. Isto pode ser matematicamente conforme Eq. (2.2).

$$T = P \left(\frac{P}{2\pi} + \frac{\mu_t r_t}{\cos \beta} + \mu_n r_n \right) \quad (2.2)$$

Nesta equação, T é o torque aplicado ao parafuso; P é a pré-carga criada no parafuso devido ao torque aplicado, p é o passo da rosca, μ_t é o coeficiente de atrito entre as roscas da porca e do parafuso, r_t é o raio de contato efetivo das roscas, β é o semi-ângulo das roscas, μ_n é o coeficiente de atrito entre a face da porca e sua superfície de apoio e r_n é o raio efetivo da área de contato entre a porca e sua e superfície de apoio.

O raio de contato efetivo das roscas, r_t , é obtido supondo uma distribuição de pressão uniforme sobre a área de contato. Essa suposição é também usada para determinar r_n .

Da Equação 2.2 o primeiro termo ($Pp / 2\pi$) representa o torque necessário para estirar o parafuso. O segundo termo ($P\mu_t r_t / \cos\beta$) é o torque dissipado para vencer o atrito entre as roscas do parafuso e a porca e o último termo ($P\mu_n r_n$) é o torque necessário para vencer o atrito entre a face da porca e a superfície de apoio.

Existem inúmeros parâmetros que podem alterar os coeficientes de atrito de uma junta aparafusada e, por sua vez, a pré-carga, tais como: acabamento de superfícies, dureza, lubrificantes, entre outros.

2.1.2. APERTO EM JUNTAS APARAFUSADAS

O cálculo de uma junta aparafusada visa determinar as dimensões do parafuso, o material e o torque de fechamento, considerando os tipos de solicitações externas e os tipos de materiais que compõe a junta.

Para que esses objetivos sejam atingidos, deve-se considerar os seguintes aspectos:

1. Definir as cargas externas máximas que poderão sofrer a junta aparafusada. Geralmente se considera a carga radial com relação ao eixo do parafuso;

2. Estimar a força tensora necessária ao parafuso, para que seja capaz de suportar as cargas externas sem proporcionar o deslizamento relativo entre as partes que compõem a junta;
3. Como referência a força tensora, para orientação no dimensionamento da junta aparafusada;

Considerados estes fatores, pode-se definir os seguintes parâmetros:

- A força tensora máxima permitida de modo a não haver uma pressão específica excessiva;
- A força tensora mínima que garanta que não ocorra deslizamento por atrito em função das cargas externas.

Desta forma, verifica se a escolha feita com relação ao parafuso e porca em termos de tensões, torques e forças tensoras.

Entre as solicitações máximas nas quais o veículo e a fixação podem estar sujeitas, escolhe-se a mais crítica. A título de exemplo, na suspensão de um veículo, as solicitações sobre uma fixação são: do tipo longitudinal (aceleração e desaceleração em frenagem e arrancada), do tipo lateral (em curvas) e do tipo vertical (suspensão em compressão ou tração).

Segundo Cioto (2001), o método de aperto influencia o dimensionamento necessário do parafuso porque, adicionalmente à força axial, o parafuso absorve torque (momento torçor). A maior influência, no entanto é aquela que provém da variação da pré-tensão (pré-carga), no caso de diferentes métodos de aparafusamento.

Além do método de aperto, com relação à importância da pré-carga, Bickford (1990), estabelece as seguintes definições:

- Pré-carga inicial: é a tensão criada no parafuso quando é apertado;
- Pré-carga residual: é a tensão remanescente no parafuso no fim do processo de montagem, após todos os parafusos terem sido apertados;
- Tensão no parafuso: é a tensão no parafuso em serviço.

Durante a montagem, de um parafuso individual, existe uma relação direta entre a tensão no parafuso e sua pré-carga. Contudo, a carga de tração no parafuso se modifica a medida que se apertam outros parafusos e/ou submete-se a junta ao serviço, de modo que a pré-carga inicial é essencial para o bom desempenho da fixação.

Vários são os problemas criados por uma pré-carga incorreta. Entre eles destacam-se os seguintes:

- Ruptura do parafuso por esforços estáticos - ao aplicar uma excessiva pré-carga provoca-se a ruptura do parafuso (sobrecarga) ou “espanamento” das roscas;
- Ruptura dos membros da junta por esforços estáticos - pré-carga excessiva pode deformar plasticamente, promover desgaste, ou até fraturar os membros da junta;
- Perda da porca por vibração - nenhuma pré-carga é suficiente para resistir a solicitações de vibração transversal extremas, mas em muitas aplicações a correta pré-carga pode eliminar o desaperto da porca;
- Ruptura do parafuso por fadiga - a maioria das rupturas de parafusos em campo são por fadiga. Pré-cargas muito altas aumentam as tensões médias nos parafusos e, portanto, tendem a reduzir a resistência à fadiga. Por outro lado, altas pré-cargas também reduzem os efeitos das variações dos esforços solicitantes no parafuso. Como resultado altas pré-cargas quase sempre melhoram a resistência à fadiga do parafuso;
- Separação da junta - a pré-carga correta previne a separação da junta; isso significa que ela reduz ou previne efeitos indesejáveis de separação das partes, como exemplos têm vazamentos de líquidos ou gases, perda de pressão, etc;
- Deslizamento da junta - muitas juntas são submetidas a carregamentos transversais em planos perpendiculares ao eixo do parafuso. A resistência dessas juntas depende das forças de atrito desenvolvidas entre os seus membros, forças essas criadas pela pré-carga exercida pelo parafuso na junta.

Novamente, portanto é a pré-carga que determina a integridade da junta. Se for inadequada, a junta se deslizará transversalmente, promovendo desalinhamentos. Os movimentos relativos promoverão desgaste por adesão nas áreas de contato, ou mesmo romper o parafuso por cisalhamento.

- Fator peso - utilizando a correta pré-carga, pode-se utilizar os parafusos dimensionados adequadamente, ou seja, menor número de parafusos, ou menor dimensão e em consequência membros da junta menores. Isto trará efeitos significativos no peso dos produtos.

- Fator custo - o custo de muitos produtos é proporcional ao número de operações de montagem. Uma correta pré-carga significa um menor número de parafusos e custos de fabricação, bem como uma redução na probabilidade de falha.

Para todos os itens mencionados, referiu-se à correta pré-carga e não a uma pré-carga qualquer. Uma pré-carga não uniforme significará que somente alguns dos parafusos montados resistirão aos carregamentos externos e por consequência levarão a junta à falha.

Tem-se também, alguns fatores que influenciam na precisão da aplicação da pré-carga e são eles:

– Precisão da ferramenta;

– Precisão do operador - mesmo que se tenha uma ferramenta perfeita, um operador pode não produzir resultados perfeitos pois, há a ocorrência do erro humano;

– Precisão do controle - a precisão na qual são selecionadas as variáveis para se estabelecer o controle do torque aplicado, cria o efeito desejado, no caso a pré-carga. Isso é freqüentemente descrito na literatura, como o único problema que afeta a precisão da pré-carga, quando na verdade, ele é apenas um entre vários e geralmente não é o maior problema;

- Relaxamento da junta de curto prazo - mesmo que o pré-carregamento seja estabelecido com precisão, ele não retém a pré-carga inicialmente gerada. A maioria das juntas, em especial as novas e/ou aquelas que se compõem com elementos de vedação, relaxam após o aperto por uma série de razões e elas podem danificar-se, caso não seja aplicada a correta pré-carga na primeira montagem. O que se pretende obter é a correta e uniforme pré-carga em todos os parafusos sempre e não quando apenas cessa o aparafusamento;
- Cargas externas - cargas externas são adicionadas ou subtraídas dos valores da tensão no parafuso e, portanto, da força de fechamento da junta. Tais cargas devem ser previstas e consideradas quando do projeto quando a correta pré-carga for determinada;
- Efeitos térmicos - expansão diferencial ou contração nos parafusos ou nos membros da junta podem adicionar-se ou subtrair-se da tensão no parafuso e por conseqüência a força de fechamento da junta;
- Relaxamento em longo prazo - relaxamentos em longo prazo devem ser considerados, tais como: relaxamento causado por corrosão, ou relaxamento de tensões, alta temperatura e pela vibração;
- A qualidade das partes - não será alcançada a pré-carga correta, ou o desempenho satisfatório da junta se as partes não estiverem de acordo com as especificações de projeto.

2.1.3 Solicitação do parafuso durante a montagem

Segundo Cioto (2001) e VDI 2230 (1986), na maioria dos casos, a pré-carga é gerada pela rotação da porca ou da cabeça do parafuso. Devido a isso, o parafuso estará sujeito à tensão de cisalhamento, devido a torção, combinada à tensão normal, no sentido axial.

Segundo Cioto (2001), a relação entre a força de montagem F_M e o momento torçor M_{GA} na rosca pode ser derivada da mecânica dos planos inclinados (oblíquos) e matematicamente representada pela Eq. (2.3).

$$M_{GA} = F_M \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\varphi + \rho') \quad (2.3)$$

$$\text{Onde: } \tan(\varphi) = \frac{P}{\pi d_2} \quad \text{e} \quad \tan(\rho') = \mu_{G'} = \frac{\mu_G}{\cos \frac{\alpha}{2}}$$

Para o caso de uma rosca com ângulo de flanco $\alpha = 60^\circ$, $\mu_{G'} = 1,155 \cdot \mu_G$.

Em casos de ângulos φ e ρ' normalmente pequenos, como normalmente ocorre, a Eq. (2.3) pode ser re-escrita, conforme Eq. (2.4).

$$M_{GA} = F_M \cdot \frac{d_2}{2} \left(\frac{P}{\pi d_2} + 1,155 \cdot \mu_G \right) \quad (2.4)$$

Quando d_0 for o diâmetro da menor seção transversal do parafuso e W_p seu momento de resistência, a relação de resistência é representada pela Eq. (2.5).

$$\frac{\tau}{\sigma_M} = \frac{M_{GA} \cdot A_0}{W_p \cdot F_M} = \frac{2 \cdot d_2}{d_0} \left(\frac{P}{\pi d_2} + 1,155 \cdot \mu_G \right) \quad (2.5)$$

Durante o aparafusamento, o início do escoamento e a máxima força de tração do parafuso são influenciados pela tensão de tração σ_M e pela tensão de torção τ , agindo simultaneamente. A tensão resultante é determinada pela hipótese da energia de deformação a um estado uniaxial de tensões (σ_{red}) e representada pela Eq. (2.6).

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau^2} \quad (2.6)$$

Assumindo-se que para esta tensão resultante σ_{red} são admitidos 90% do limite mínimo de escoamento do parafuso ($\sigma_{0,2}$), obtém-se as Equações (2.7) e (2.8).

$$\frac{\sigma_{red}}{\sigma_M} = \sqrt{1 + 3 \cdot \left(\frac{\tau}{\sigma_M} \right)^2} = v \cdot \frac{R_{p0,2}}{\sigma_M} \quad (2.7)$$

e

$$\sigma_M = \frac{vR_{p0,2}}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left[\frac{2 \cdot d_2}{d_0} \left(\frac{p}{\pi d_2} + 1,155\mu_G \right) \right]^2}} \quad (2.8)$$

Para parafusos com diâmetro da haste reduzido, d_T , para uma dimensão menor que o diâmetro, $d_s = (d_2 + d_3)/2$, a menor área de seção transversal é localizada na região rebaixada. Dessa maneira, a tensão de tração σ_M deve ser calculada em função desta nova área e representada por $d_0 = d_T$.

Quando o diâmetro da haste d_T , for maior que a área de tensão calculada por d_s , o ponto de menor resistência do parafuso passa a ser a região de entalhes (rosca) e o escoamento do parafuso inicia-se nesta região. Para o cálculo de W_p e de σ_{red} , utiliza-se um diâmetro fictício da seção resistente d_s como referência.

Assim, para parafusos com haste e para parafusos com haste reduzida em diâmetro até o diâmetro primitivo $d > d_s$, tem-se a Eq. (2.9).

$$\sigma_M = \frac{vR_{p0,2}}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left[\frac{4}{1 + (d_3/d_2)} \left(\frac{p}{\pi d_2} + 1,155\mu_G \right) \right]^2}} \quad (2.9)$$

A força tensora de fechamento das placas é calculada por analogia e representada pela Eq. (2.10).

$$F_{SP} = \sigma_M \cdot A_S \quad (2.10)$$

Ou, representada de outra forma por meio da Eq. (2.11).

$$F_{SP} = \sigma_M \cdot A_T = \sigma_M \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_r^2 \quad (2.11)$$

2.1.4 Dispersão da força de montagem durante o aperto

A força de montagem em juntas aparafusadas é influenciada por inúmeros fatores. Entre outros, pode se relacionar os seguintes:

- A ferramenta de aparafusamento;
- A forma geométrica da junta;
- O método de aparafusamento;
- As condições de atrito nas superfícies em contato.

Os erros na avaliação dos coeficientes de atrito, bem como suas dispersões dentro de um mesmo lote de parafusos, métodos de precisão variável, além de erros de uso de instrumentos, propiciam dispersões em vários níveis e especialmente, se a força de montagem for aplicada indiretamente, como, por exemplo, pelo aperto por controle de torque. Estes fatores resultam em dispersões da força de montagem desejada. Assim, o parafuso deverá ser superdimensionado, pelo incremento do fator de aperto α_A .

O fator de aperto, ou fator de dispersão, α_A , que considera a dispersão da força de montagem entre F_{Min} e $F_{Mmáx}$ (Figura 2.4), como resultado da dispersão do coeficiente de atrito (μ_{min} , μ_{max}) e dos torques de aperto são introduzidos na Eq. (2.12).

$$\alpha_A = \frac{F_{M \max}}{F_{M \min}} \tag{2.12}$$

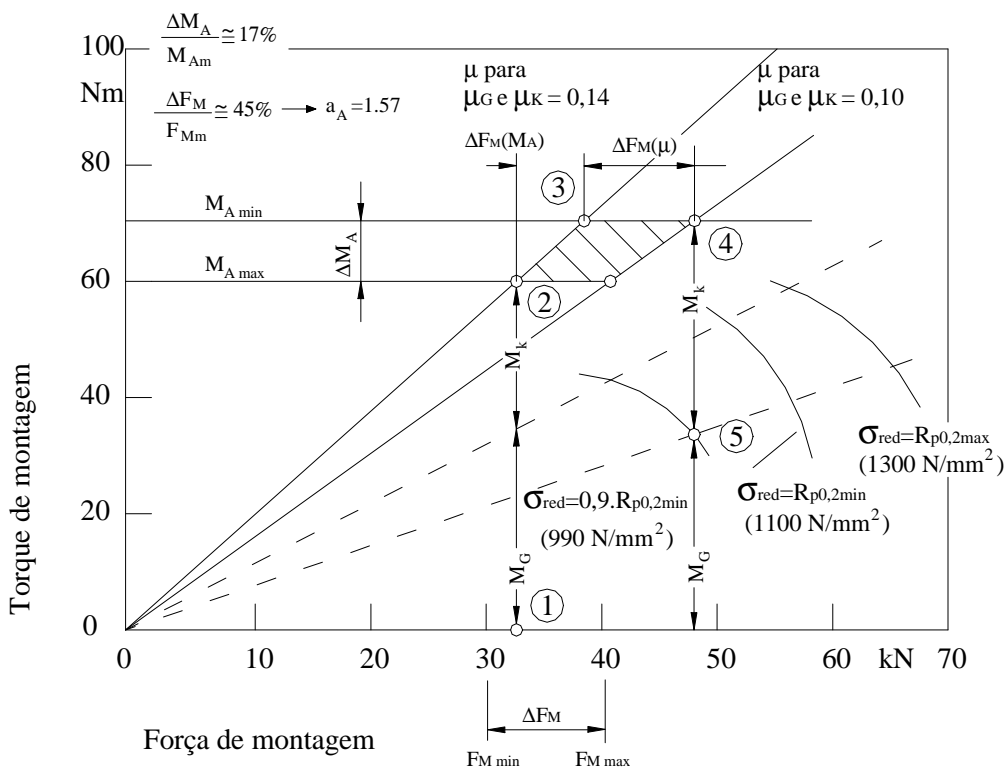


Figura 2.4 - Dispersão da força tensora de montagem ΔF_M para processos por controle de torque. Parafuso M10-Classe de resistência 12.9 (Cioto,2001).

Para uma força tensora mínima exigida pelos procedimentos de cálculo, a introdução do fator de aperto α_A significa que o parafuso deve ser projetado para a máxima força de montagem $F_{M\max}$ em resultado da dispersão. Isto pode ser demonstrado pelo exemplo da proporcionalidade, conforme Eq. (2.13).

$$\frac{\alpha_{AI}}{\alpha_{AII}} = \frac{F_{M\max I}}{F_{M \min}} \cdot \frac{F_{M \min}}{F_{M\max II}} = \frac{F_{M\max I}}{F_{M\max II}} \tag{2.13}$$

Com $F_{M\max} = \sigma_{red} \cdot A$, encontra-se para $\sigma_{red} = \text{constante}$, as Equações (2.14) e (2.15).

$$\frac{\alpha_{AI}}{\alpha_{AII}} = \frac{A_I}{A_{II}} = \frac{\pi d_I^2 / 4}{\pi d_{II}^2 / 4} \quad (2.14)$$

$$\frac{d_I}{d_{II}} = \sqrt{\frac{\alpha_{AI}}{\alpha_{AII}}} \quad (2.15)$$

Por exemplo, tomando-se $\alpha_{AI} = 2,5$ e $\alpha_{AII} = 1$, tem-se:

$$\frac{d_I}{d_{II}} = \sqrt{\frac{2,5}{1}} = 1,6$$

Isto demonstra que pelo uso das técnicas de montagem com $\alpha_A = 2,5$ em oposição à $\alpha_A = 1,0$, um parafuso necessitará de 60% a mais de área, sendo necessário uma bitola M12 no lugar de uma bitola M8, para uma mesma classe de resistência, numa dada aplicação, conforme representado na Fig. 2.5. Analisando-se essa figura observa-se que:

$$F_{Mm\acute{a}x} - F_{Mm\acute{i}n} = \Delta.F_M \quad (2.16)$$

$$F_{Mm\acute{a}x} = F_{Mm\acute{i}n} + \frac{\Delta.F_M}{2} \quad (2.17)$$

$$F_{Mm\acute{i}n} = F_{Mm\acute{a}x} - \frac{\Delta.F_M}{2} \quad (2.18)$$

Obtém para α_A a Eq. (2.19).

$$\alpha_A = \frac{1 + \frac{\Delta.F_M}{2.F_{Mm}}}{1 - \frac{\Delta.F_M}{2.F_{Mm}}} \quad (2.19)$$

Daí, a dispersão $\Delta F_M / 2$ da pré-carga relativa à média da pré-carga F_{Mm} pode ser reescrita, conforme Eq. (2.20).

$$\frac{\Delta F_M}{2} = \pm \frac{\alpha_A - 1}{\alpha_A + 1} \cdot F_{Mm} \quad (2.20)$$

ΔF_M consiste de erros individuais para os diversos métodos de aperto.

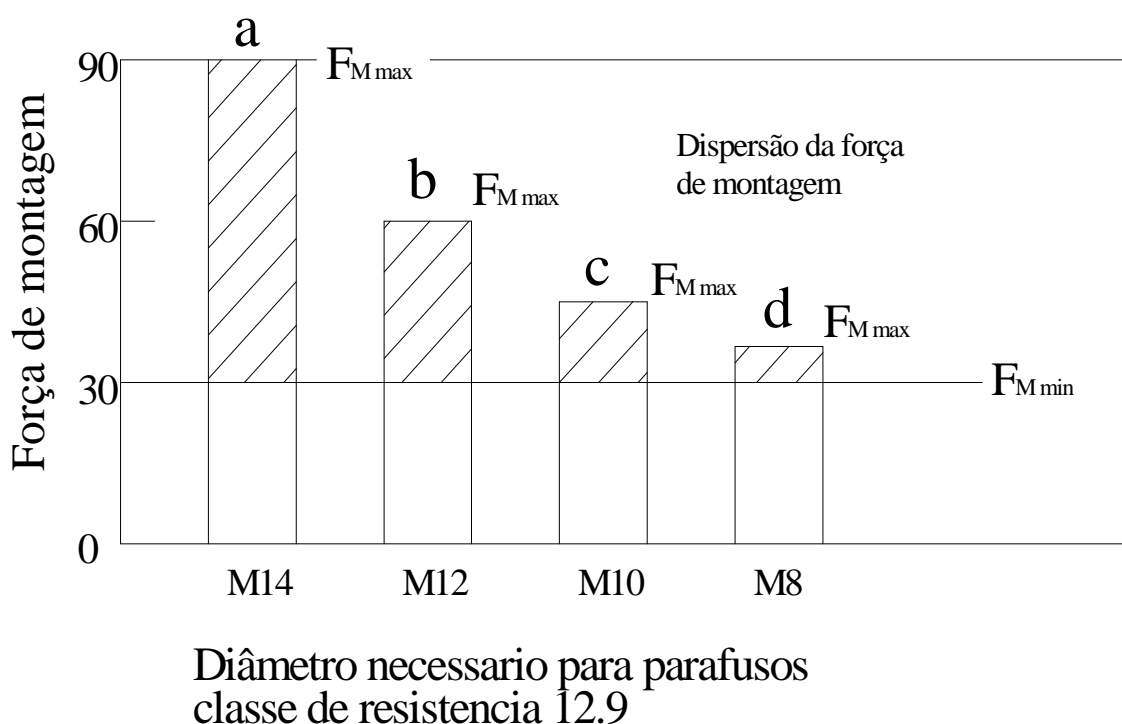


Figura 2.5 – Influência do método de aperto sobre a dispersão da força de montagem e portanto, sobre o diâmetro do parafuso (Norma 01374, 1989 – Origem VDI 2230, 1983).

Na Figura 2.5 os métodos de controle são: a - Chave de impulso, b - Apertadeira, c - Chave dinamométrica de precisão e d - Chave dinamométrica com controle pelo limite de escoamento.

Na Figura 2.6 mostra-se a correlação entre a dispersão da força de montagem e o coeficiente de aperto α_A

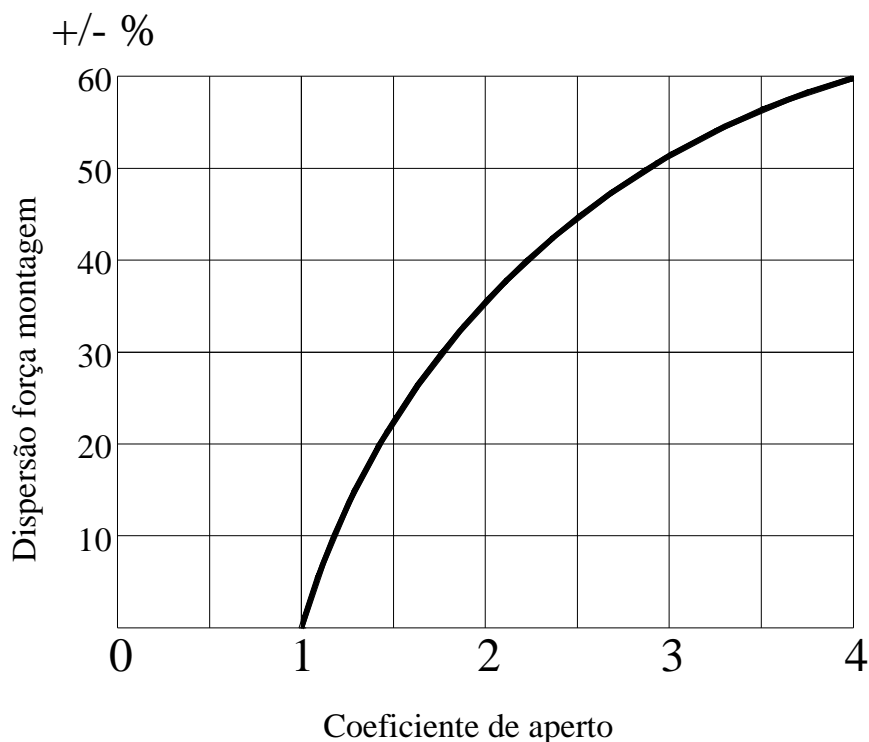


Figura 2.6 – Correlação entre a dispersão da força de montagem e o coeficiente de aperto α_A (Norma Fiat 01374, 1989 – Origem VDI 2230, 1983).

2.1.5 Comportamento mecânico da junta aparafusada

Segundo Guia Atlas Copco, quando a junta é apertada o giro do parafuso ou da porca cria uma tensão no parafuso F_S e uma força de união F_U nas peças unidas, conforme se mostra na Fig. 2.7.

Devido às forças, o parafuso é alongado (δ_S) e as partes da junta são comprimidas (δ_U).

Na Figura 2.7 mostra-se como a compressão δ_U (negativa) pode ser conectada com o alongamento δ_S para uma forma triangular, a qual é muito útil na discussão do mecanismo da junta.

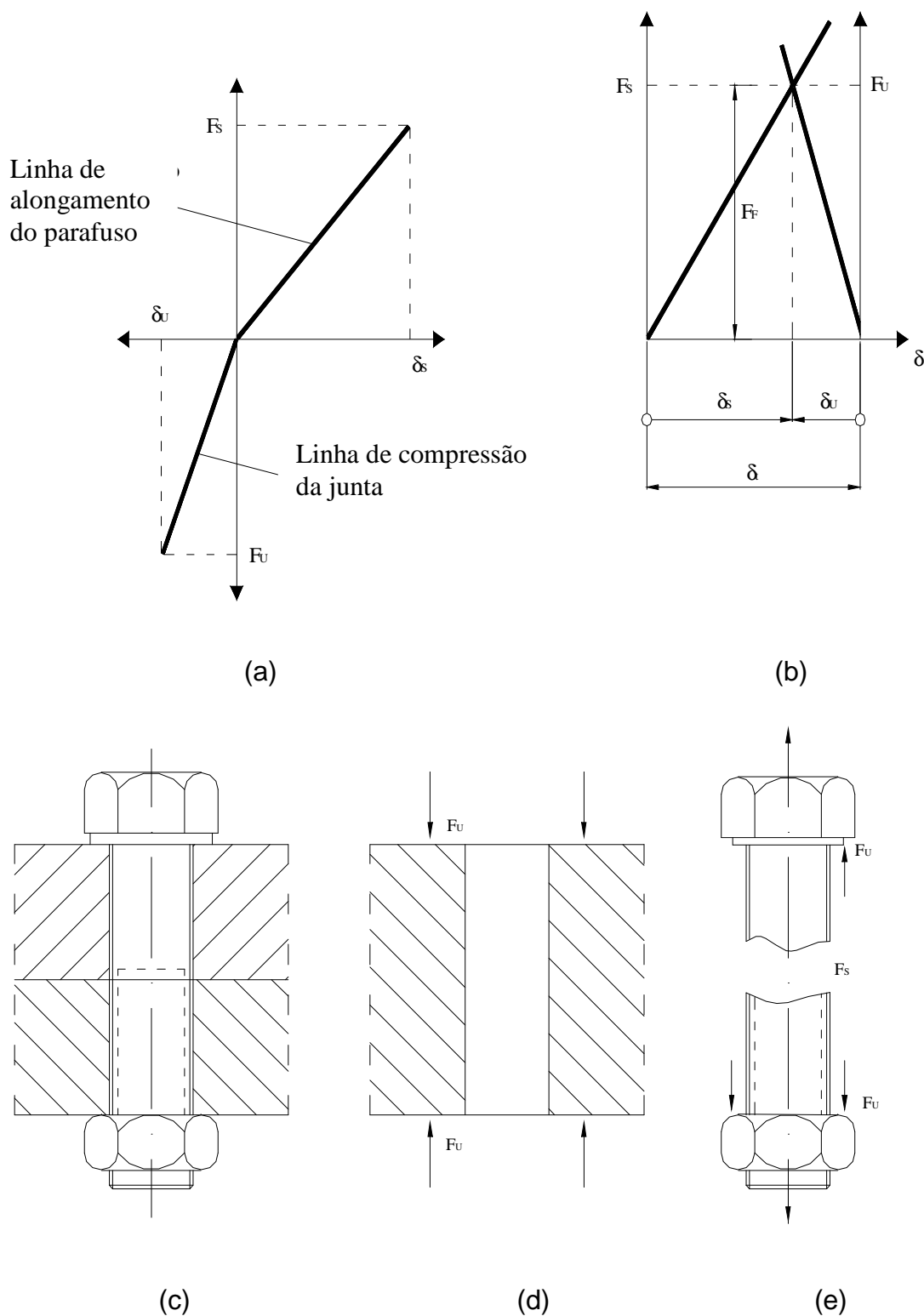


Figura 2.7 – O diagrama Força (F) – Deformação (δ) é juntado pelas linhas de compressão da junta e pelas linhas de tensão do parafuso para uma força triangular (Catálogo Técnico Atlascopco, 1998).

Quando a junta aparafusada não está sujeita a uma carga externa, a força de tensão F_S no parafuso é obviamente igual à força de união nas peças unidas F_U . Na situação sem carga, a força de compressão F_F instalada (a força que mantém as peças unidas) é igual a F_U e F_S .

Quando uma carga externa é aplicada a uma junta apertada, as forças atuantes no parafuso e nas peças unidas mudam os seus valores. Isto é ilustrado com a ajuda do diagrama triangular de força e deformação, mostrado na Fig. 2.8.

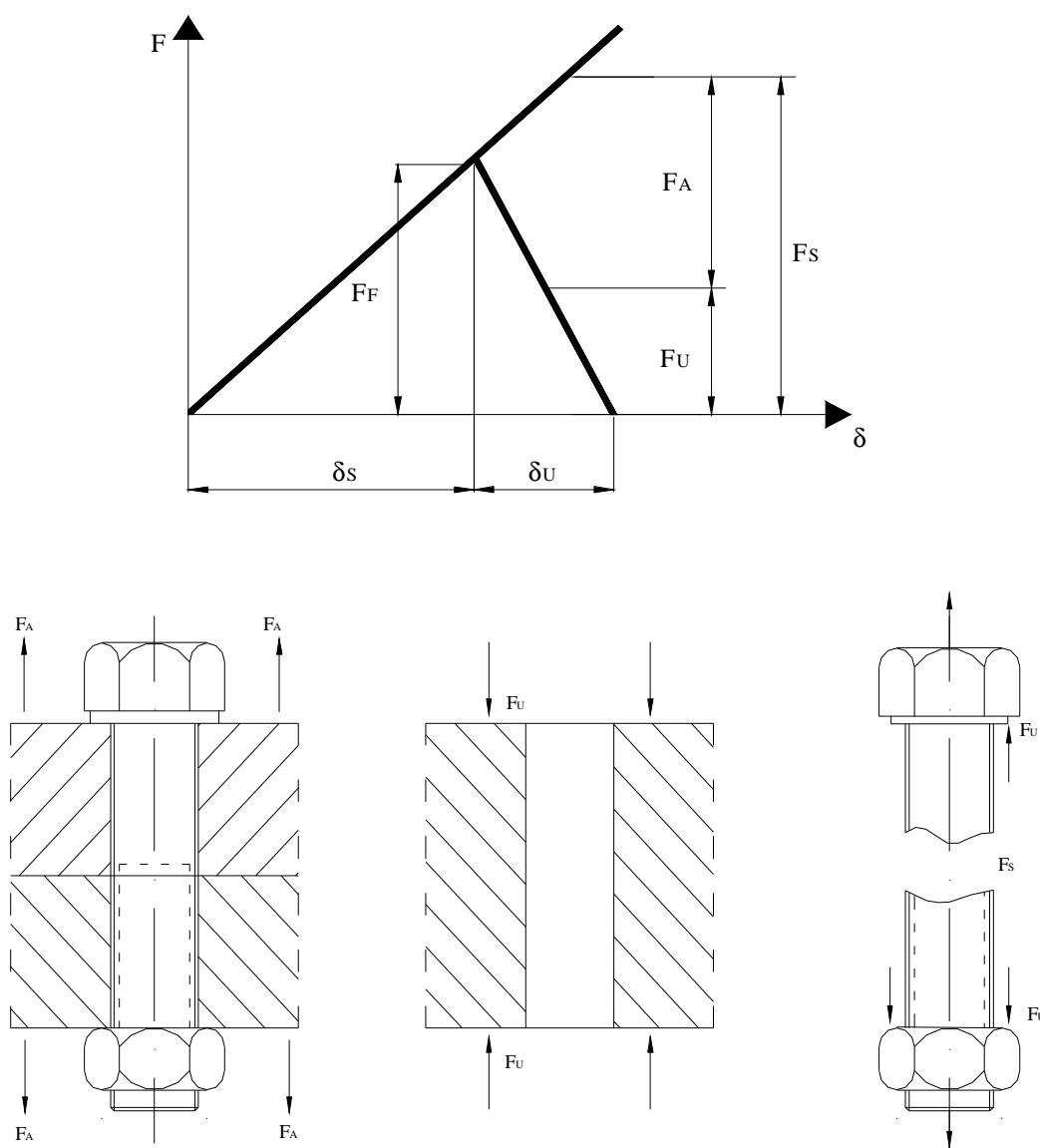


Figura 2.8 – Carga externa F_A aplicada a junta aparafusada (Catálogo Técnico Atlascopco, 1998)

Na Figura 2.8 está ilustrado o que ocorre na junta quando é aplicada uma carga externa F_A paralela ao eixo do parafuso. A força de tração no parafuso aumenta de F_F (a compressão instalada) para F_S e a força de união é diminuída de F_F para F_U . F_U é agora a força de união remanescente na junta. Na Figura 2.8 mostra-se que o aumento da carga externa F_A , F_U finalmente diminui para zero.

Quando um projetista calcula uma junta sujeita a uma carga externa, ele pode escolher um parafuso de baixa resistência com uma determinada dimensão ou um parafuso de menor diâmetro, mas de alta resistência. Os efeitos diversos da escolha também podem ser ilustrados com o diagrama triangular. Na Figura 2.9, a parte esquerda representa a junta com um parafuso de menor diâmetro, mas de alta resistência. A junta da direita tem diâmetro maior com parafuso de baixa resistência. O grau de inclinação da linha F - δ define a rigidez do parafuso. A rigidez das peças unidas é a mesma em ambos os casos.

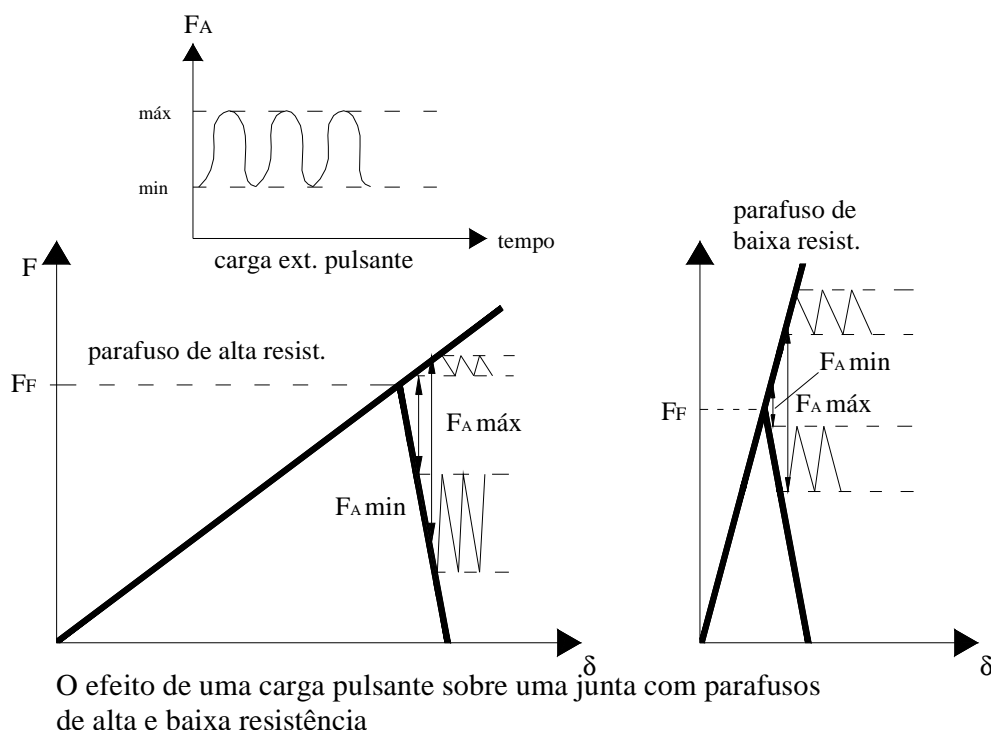


Figura 2.9 – Efeito de uma carga pulsante sobre uma junta com parafusos de alta e baixa resistência (Catálogo Técnico AtlasCopco, 1998).

Ambas as juntas são apertadas para se obter a mesma força de compressão F_F instalada. Se as juntas estão sujeitas a uma carga cíclica F_A entre $F_{A\text{máx}}$ e $F_{A\text{mín}}$, observa-se uma diferença entre as variações de carga no parafuso de resistência alta e baixa. Com a primeira, a tensão no parafuso torna-se menor. Além disso, as amplitudes de tensões são menores, o que significa maior vida sob a fadiga.

Uma junta apertada está sempre sujeita ao fenômeno de assentamento das superfícies durante a operação e uma deformação pode ocorrer na junta. Os efeitos disto estão ilustrados na Fig. 2.10. A deformação δ_c é a mesma nos dois casos. Na Figura 2.10 observa-se que, após o assentamento, a força de união residual é mais alta com o parafuso de alta resistência do que com o de baixa.

O mesmo efeito é obtido se um parafuso longo em vez de um curto for utilizado. Um comprimento maior significa uma junta mais flexível, comparando-se a parte direita com a parte esquerda da Figura 2.10. Para reduzir o assentamento, deve ser utilizado um número mínimo de superfícies na junta.

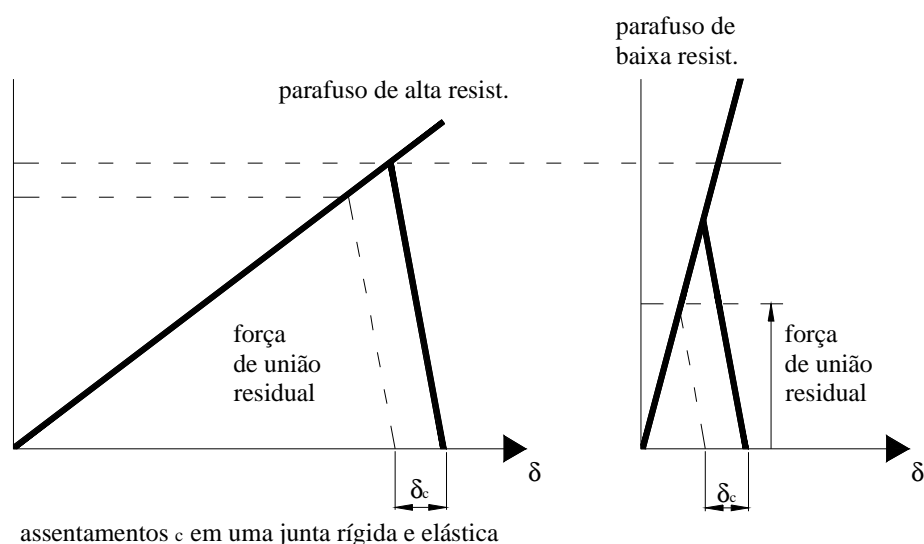


Figura 2.10 – Diagrama de uma junta aparafusada sujeita a assentamento, ϕ_c (Catálogo Técnico Atlascopco, 1998).

Nas Figuras 2.8 a 2.10 a deformação do parafuso é mantida dentro da região elástica. Entretanto, a utilização máxima do parafuso é obtida quando o mesmo é apertado dentro da região plástica, conforme mostrado na Fig. 2.11. Analisando ainda esta figura, após o aperto inicial, a força de união F_S e o alongamento permanente δ_S são obtidos. Agora, se realizar o carregamento desta junta com uma carga F_A , o sistema se comportará conforme a linha reta paralela, relativa ao regime de deformações elásticas iniciais. Isso é devido ao fato que as tensões de cisalhamento, originadas pela torção, obtidas no parafuso durante o aperto, estão relaxadas, pelo menos após algumas cargas e descargas. Este relaxamento é muito positivo para as juntas, nas quais o parafuso é apertado ao limite de elasticidade. Uma junta destas pode suportar cargas de trabalho extra sem alongamento adicional.

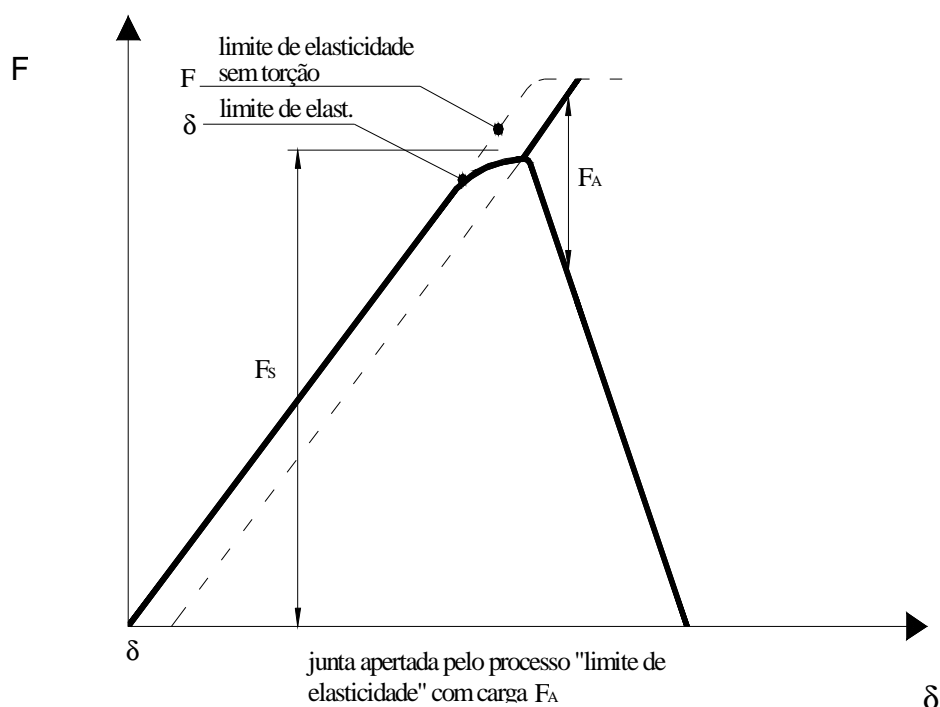


Figura 2.11 – Junta apertada pelo processo de limite de elasticidade com uma carga F_A (Catálogo Técnico Atlascopco, 1998)

2.1.6 Métodos de Aparafusamento

Segundo Cioto (2001), a obtenção da força de projeto calculada é obtida por meio do aperto do parafuso com um grau de incerteza em função do fator de dispersão α_A .

Este fator influencia de maneira decisiva a variação da força de montagem, numa relação de 1 a 4. O valor do fator de dispersão α_A , usado na equação de projeto, depende do método de aparafusamento utilizado. Com o aumento da qualidade e confiabilidade do processo tem-se uma redução do valor do fator de aperto. Assim sendo, a escolha do método de aparafusamento tem que ser feita com cuidado, para obter a máxima eficiência do projeto.

As principais técnicas de aparafusamento são: Aperto por controle de torque, Aperto por controle de torque-ângulo e Aperto controlado até o limite de escoamento.

Aperto por controle de torque

Segundo Cioto (2001), o aperto por controle de torque é realizado geralmente por torquímetros indicadores ou sinalizadores. O torque total de aperto consiste no torque de aperto na rosca e dos momentos de atrito na cabeça do parafuso e na rosca, representados pelas Equações (2.21) e (2.22).

$$M_A = M_{GA} + M_K \quad (2.21)$$

$$M_A = F_M \cdot \left[\frac{d_2}{2} \tan(\phi + \rho') + \frac{D_{KM}}{2} \cdot \mu_k \right] \quad (2.22)$$

Sob a condição de $\alpha = 60^\circ$, estas equações podem ser simplificadas para as formas representadas nas Equações (2.23) e (2.24).

$$M_A = F_M \cdot \left[0,16p + \mu_s \cdot 0,58d_2 + \frac{D_{KM}}{2} \cdot \mu_k \right] \quad (2.23)$$

$$D_{KM} = \frac{2(d_k^3 - D_B^3)}{3(d_k^2 - D_B^2)} \quad (2.24)$$

Admitindo-se pequenos erros de arredondamentos a Eq. (2.24) pode ser substituída pela Eq. (2.25).

$$D_{KM} = \frac{d_k + D_B}{2} \quad (2.25)$$

A partir das equações apresentadas pode-se determinar os torques em função da força de montagem. Esta força de montagem deve ser escolhida considerando-se a capacidade de geração de força do fixador, que é determinado pela expressão $F_{SP} = \sigma_M \cdot A_S$. A força F_{SP} , igual a 90% do limite de escoamento do parafuso, quando submetido a um estado de tensões combinado de tração e torção.

Da Eq. (2.8) obtém-se o valor de σ_M

$$\sigma_M = \frac{\nu R_{p0,2}}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left[\frac{2 \cdot d_2}{d_0} \left(\frac{p}{\pi d_2} + 1,155 \mu_G \right) \right]^2}} \quad (2.26)$$

A força F_{SP} possível de ser obtida numa montagem, por meio da geração de um momento torçor é bastante variada, dependendo da classe de resistência do fixador, além da variação do coeficiente de atrito na rosca.

A relação M_A/F_M está relacionada a livres combinações de todos os coeficientes de atrito no filete de rosca μ_G e com todos os coeficientes de atrito na cabeça do parafuso μ_K , possíveis. Isso resulta para um determinado lote de parafusos com resistência à tração constante, em uma grande variação da força tensora F_M , para um torque pré-fixado.

A construção de tabelas de torque em função da força tensora, apesar de aparente simplicidade com o uso da Eq. (2.23) torna-se, devido às combinações dos coeficientes de atrito μ_G e μ_K , uma tarefa difícil devido à imensa variação destes fatores.

Uma alternativa de se construir tabelas em número reduzido é introduzir algumas simplificações. Basicamente, fixa-se um valor médio e constante para o coeficiente de atrito μ_G . Dessa forma a força tensora, para uma dada classe de resistência, permanece constante, por meio de um μ_G médio. Assim, a variação do torque ocorre apenas pela variação de μ_K . As tabelas apresentadas pela Norma VDI 2230 (1983), utilizam este critério.

A utilização de ábacos, como o apresentado na Figura 2.12 é uma solução para evitar cálculos trabalhosos de determinação do torque para cada caso particular. Porém, será necessário um ábaco para cada bitola de parafuso e para cada classe de resistência. Exige-se ainda que o raio de atrito definido por $D_{KM}/2$ esteja dentro da faixa de parafusos normalizados com a norma ISO 4014 (1999), com os furos de passagem dos parafusos pela norma DIN/ISO 273 (1979).

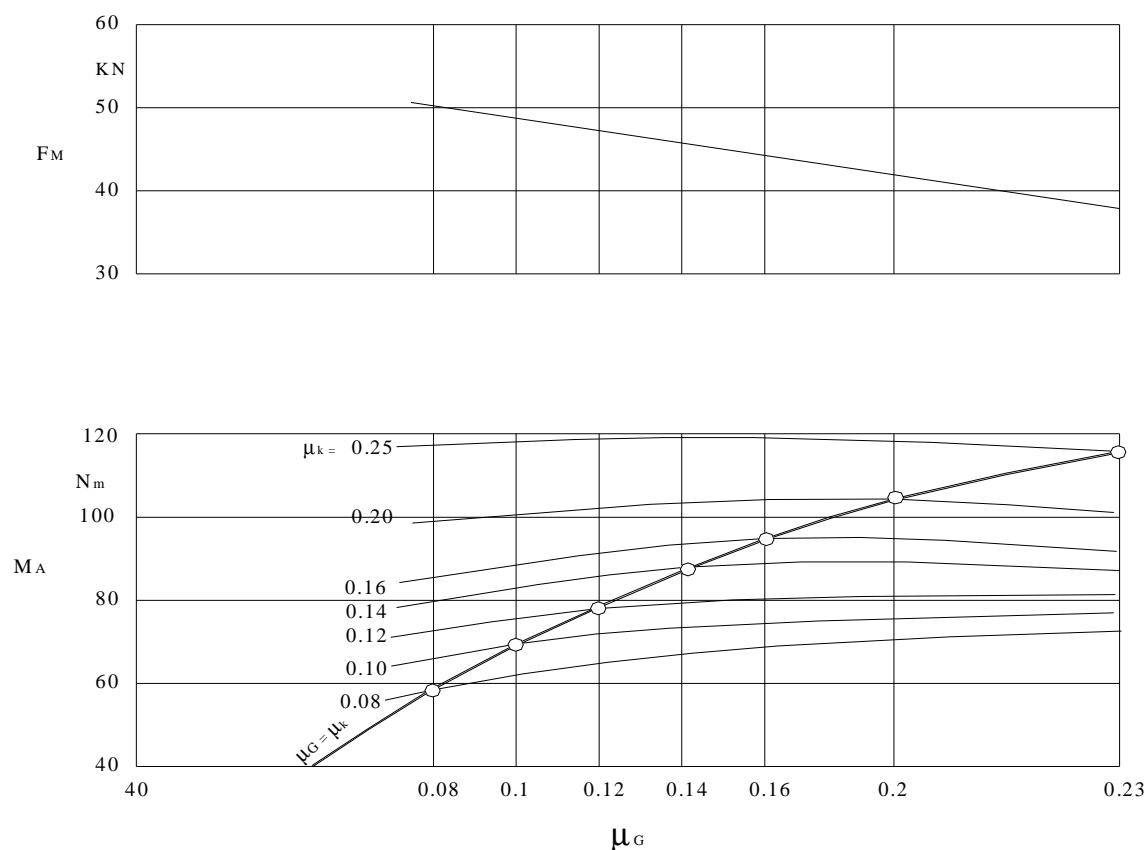


Figura 2.12 – Torque de montagem M_{SP} e força tensora F_{SP} em função dos coeficientes de atrito μ_G e μ_K . Parafuso M10 – Classe de resistência 12.9.

Na Figura 2.12 mostram-se as condições, durante o aparafusamento até a pré-carga F_M , considerando a dispersão do coeficiente de atrito μ_G e a dispersão do torque de aperto M_A .

A análise desta figura permite a interpretação do sistema de aperto por controle de torque, da seguinte forma:

- A força tensora de montagem é aplicada indiretamente por meio de um torque de aperto M_A e por específicos coeficientes de atrito μ_G e μ_K ;
- Por segurança de funcionamento da junta aparafusada, uma força de montagem mínima $F_{Mmin}①$ é necessária;
- Considerando o máximo de coeficiente de atrito na rosca $\mu_G = 0,14$ e sob a cabeça $\mu_K = 0,14$, F_{Mmin} é dado pelo momento $M_{Amin}②$;

- d) Como resultado da variação nas ferramentas de aparafusamento, operação e erro de leitura, a carga de montagem pode alcançar valores superiores a $F_{M\text{mín}}$ por $\Delta F_M (M_A)$ até o máximo torque possível $M_{A\text{máx}}$ ③;
- e) Se a dispersão do coeficiente de atrito na rosca e sob a cabeça for entre $\mu_{G\text{mín}}$ e $\mu_{K\text{mín}} = 0,10$ e $\mu_{G\text{máx}}$ e $\mu_{K\text{máx}} = 0,14$, então o maior torque e o menor coeficiente de atrito geram a máxima força de montagem possível $F_{M\text{máx}}$ ④, conforme apresentado na Eq. (2.27).

$$F_{M\text{máx}} = F_{M\text{mín}} + \Delta F_M (M_A) + \Delta F_M (\mu) \quad (2.27)$$

- f) Portanto, para uma dada e requerida pré-carga $F_{M\text{mín}}$, o parafuso deve ser projetado, para que o limite de tensão (tensão combinada de tração e de cisalhamento) não seja excedido, mesmo se a possível força tensora máxima $F_{M\text{máx}}$ seja alcançada. No exemplo ilustrado, este limite é equivalente a 90% do limite de escoamento 0,2% mínimo⑤;
- g) De forma a alcançar os requisitos do item “f”, uma sobre dimensão do diâmetro do parafuso por $F_{M\text{máx}}/F_{M\text{mín}} = \alpha_A$ será necessária devido à dispersão nos coeficientes de atrito. Neste caso, α_A foi calculado em 1,57. Por este meio, está assumido que mesmo para altos coeficientes de atrito e baixos valores de torque, a força tensora requerida foi alcançada e ao mesmo tempo a sobredimensão do parafuso está prevenindo o caso do coeficiente de atrito alcançar valores mínimos e os torques alcançarem valores máximos.

No aparafusamento por controle de torque, usando um torquímetro, o erro total acumulado é dado pelos seguintes erros parciais:

- Erros na estimativa do coeficiente de atrito: o máximo torque M_{SP} é determinado com estimativa do coeficiente de atrito usando a Eq. (2.23) ou extraindo valores de tabelas; dispersão no coeficiente de atrito incluindo desvios dimensionais os quais influenciam o raio de atrito; imprecisão das ferramentas de aperto, incluindo erros de operação e leitura. O erro na

estimativa dos coeficientes de atrito pode ser limitado pela determinação do torque requerido pela medida do alongamento do parafuso na junta original.

Todos os tipos de aparafusadeiras deveriam somente ser ajustadas com o parafuso na junta original, onde os ajustes devem ser feitos de acordo com a aparafusadeira com parada e com a aparafusadeira com embreagem automática, por meio do momento de reaperto ou pela medição exata do alongamento do parafuso.

O momento de reaperto é aquele torque que é necessário para continuar a rotação da cabeça do parafuso, depois do término do processo de aparafusamento. Ele se distingue do momento teórico para o aperto por torque pelo fator de reaperto, que dependendo do tipo de aparafusadeira e das condições de atrito e elasticidade pode variar entre 0,85 a 1,32.

Erros parciais encontrados no ajuste por meio do momento de reaperto:

- Erro na avaliação do coeficiente de atrito para a definição do momento teórico para aperto por torque;
- Erro na avaliação do fator de reaperto pelo qual o momento de reaperto difere do momento teórico de aperto;
- Erro do instrumento de leitura quando da medição do momento de reaperto;
- Erro proveniente da precisão insuficiente de se centrar o valor médio em ensaios de ajuste que será tanto menor quanto maior for o número de ensaios.

Erros parciais encontrados no ajuste por meio da medição de alongamento:

- Erro proveniente da medição de alongamento (erro de instrumento ou de leitura, variações da dimensão e do módulo de elasticidade do parafuso);
- Dispersão da força de aparafusamento na ocasião do ajuste da aparafusadeira;

A aparafusadeira de precisão com medição de torque dinâmico deve ser ajustada na junta original, com um número suficiente de ensaios de aparafusamento, com medição do torque no próprio equipamento ou por meio de sensores adaptados, com um número elevado de ensaios e realização de análises estatísticas para melhor conhecimento dos resultados fornecidos.

Também neste caso, o modo mais exato é a determinação do momento de aperto pretendido através do alongamento do parafuso. Menos exata é a determinação do torque através do uso de uma célula de carga, onde não se reproduzem as condições originais. Em escala decrescente na exatidão seria o uso de tabelas de coeficiente de atrito para a determinação pela Eq. (2.23) do torque desejado.

Os mesmos procedimentos aplicados para os torquímetros são também utilizados para a determinação parcial dos erros nas aparafusadeiras automáticas.

Os valores práticos disponíveis permitem a recomendação de valores de referência (α_A) para aperto mediante o uso de aparafusadeiras.

Aperto por controle de ângulo (torque-ângulo)

O aperto por controle do ângulo de giro é um método de medida do alongamento indireto. Não somente as placas sob compressão são medidas ao mesmo tempo em que o parafuso sob tração, mas também as deformações plásticas e elásticas que ocorrem antes do completo fechamento das interfaces, as quais são irregulares e por isso não permitindo uma pré-determinação das grandezas.

Na realização prática deste método, a junta é pré-carregada por meio de um momento de ligação até que as interfaces estejam completamente fechadas. O ângulo de rotação é somente medido a partir deste ponto, conforme apresentado na Fig. 2.13.

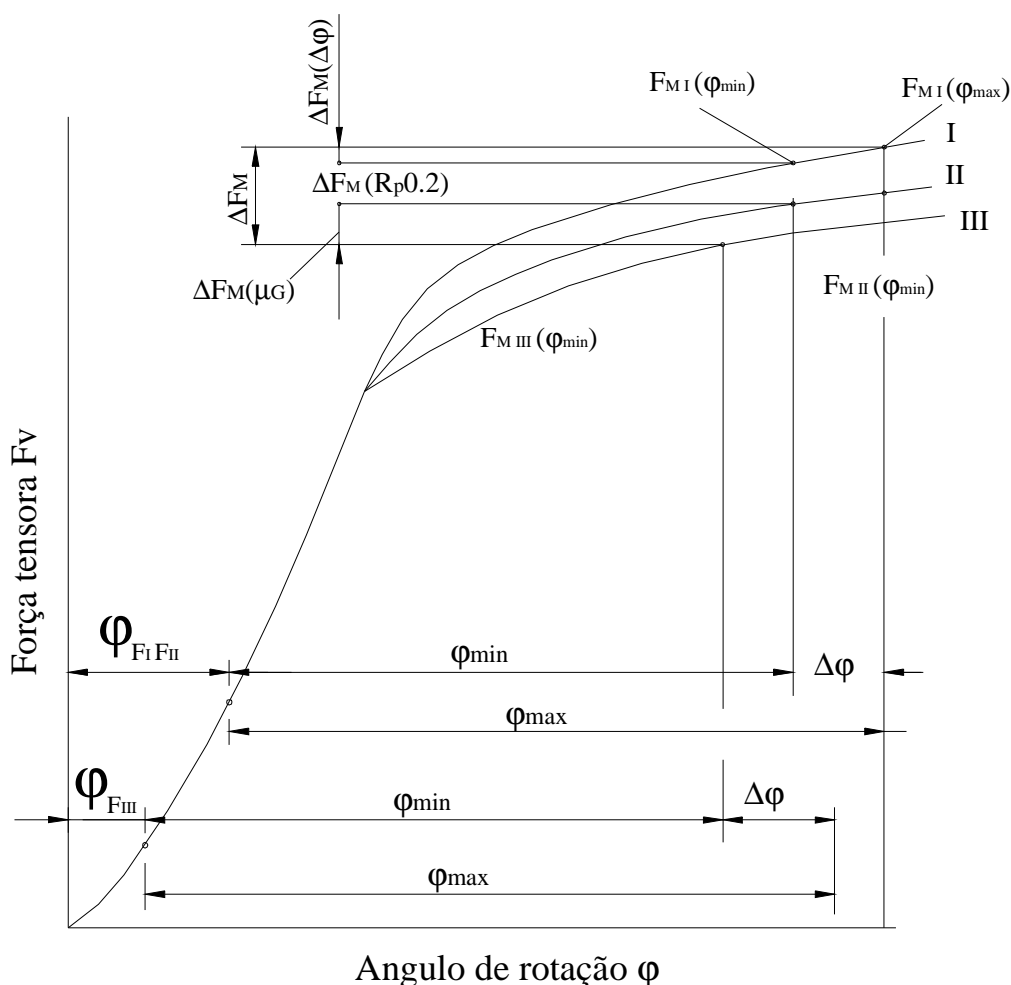


Figura. 2.13 – Aperto por controle de ângulo.

A prática tem mostrado que esta técnica de aparafusamento só alcança alta precisão quando o parafuso é apertado até a zona plástica devido à linha de deformação tornar-se horizontal e os erros de ângulo dessa forma terem pouca influência. Em contraste, na faixa de deformação elástica, erros de ângulo causam erros de pré-carga de ordem de magnitude similar ao do sistema controlado por torque.

Para aperto na faixa de deformação plástica, o ângulo de rotação, de preferência, deve ser determinado na junta original.

Para aperto até o limite de escoamento, tem-se por um efeito de coeficiente de atrito μ_G , uma pequena dispersão da força tensora, menor que no processo de aparafusamento por controle de torque.

Desde que a força tensora de montagem atinja o limite de escoamento, o fator de aperto α_A passa a ser considerado como 1, para efeito de cálculo do parafuso.

Ao exceder o limite de escoamento do parafuso durante a montagem, a sua reutilização torna-se limitada e o método somente poderá ser utilizado para parafusos fabricados com ductilidade suficiente e que tenham uma grande capacidade de deformação plástica. Para aumentar a capacidade de deformação plástica, normalmente utiliza-se o recurso de se aumentar o comprimento da rosca do fixador, ultrapassando assim o comprimento delimitado pelas normas.

Como, durante o processo de aparafusamento, gera-se uma curva torque-ângulo, é possível por meio dela determinar um coeficiente angular da reta gerada, em qualquer ponto da mesma entre a região delimitada pelo momento de ligação e do limite de escoamento. Da análise dos coeficientes angulares pode-se fazer uma série de controles indiretos dos parafusos e da junta, como qualidade do tratamento superficial, planicidade das placas e do parafuso, raio de atrito do parafuso, etc. Na zona plástica, a aprovação do aperto estará condicionada a uma “janela de aparafusamento” delimitada por um ângulo mínimo e um ângulo máximo, um torque mínimo e um torque máximo.

Pela janela de aparafusamento será possível outro controle indireto como limite de escoamento do parafuso em peças sem tratamento térmico, ou sem revenimento.

Em suma, a relação ângulo de giro x força tensora é dada pela Eq. (2.28).

$$\varphi = \frac{360}{p} \cdot F_M \cdot (\delta_s + \delta_\phi) \quad (2.28)$$

Aperto por controle de escoamento

Para aparafusamento por controle do limite de escoamento do parafuso, em um sistema eletrônico, o ponto de escoamento é automaticamente identificado. Isso é realizado pela medição do torque e do ângulo de rotação durante o

aparafusamento, pela determinação da razão diferencial $d_{MA} / d \varphi$, a qual é equivalente à inclinação da tangente da curva torque-ângulo. No ponto onde o limite de escoamento é alcançado o gradiente cai rapidamente (Figura 2.14). Ele cai até uma determinada fração do valor máximo armazenado na memória do computador do sistema que, ao ser atingida, ativa o sinal de desligamento.

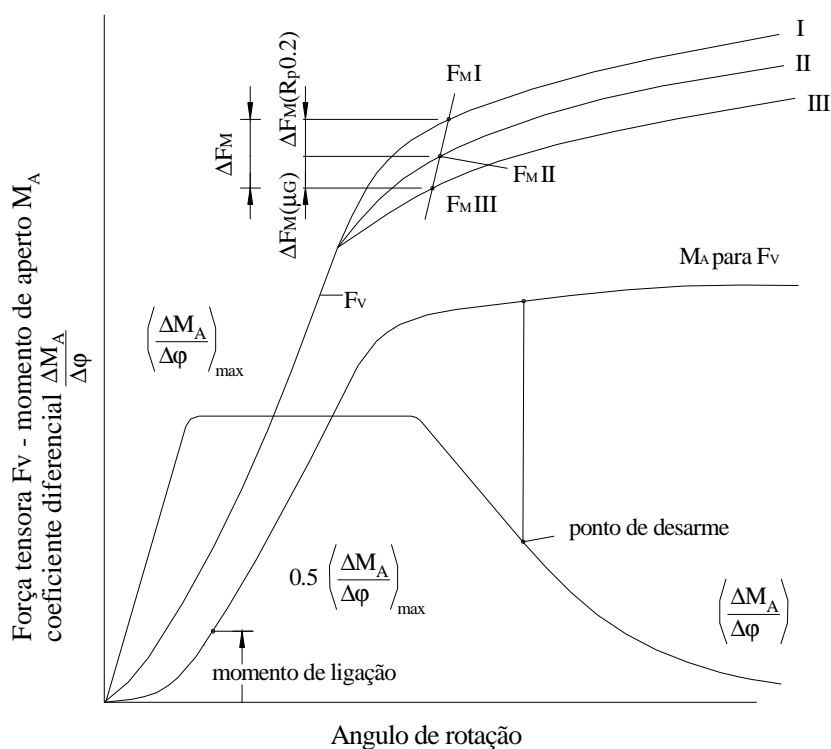


Figura 2.14 – Aperto por controle do limite de escoamento.

Devido a não linearidade da curva M_A/φ , resultante das deformações elasto-plásticas das interfaces, que levaria o sistema a desligar prematuramente, torna-se necessário programar o equipamento de aparafusamento com um adequado momento de ligação. Desta forma, a comparação dos valores de gradiente e o máximo gradiente armazenado somente iniciam-se depois que o torque de ligação for excedido.

A força de pré-tensão, obtida na montagem de um lote de parafusos, torna-se amplamente independente das influências de atrito, sendo influenciadas somente pela dispersão do limite de escoamento do material do parafuso. O

fator de aperto α_A é desnecessário para este método de aparafusamento, pois estes parafusos são dimensionados conforme F_{Mmin} . Para este processo de aparafusamento $\alpha_A = 1$.

Na Figura 2.15 ilustra-se o processo de aparafusamento por controle de escoamento.

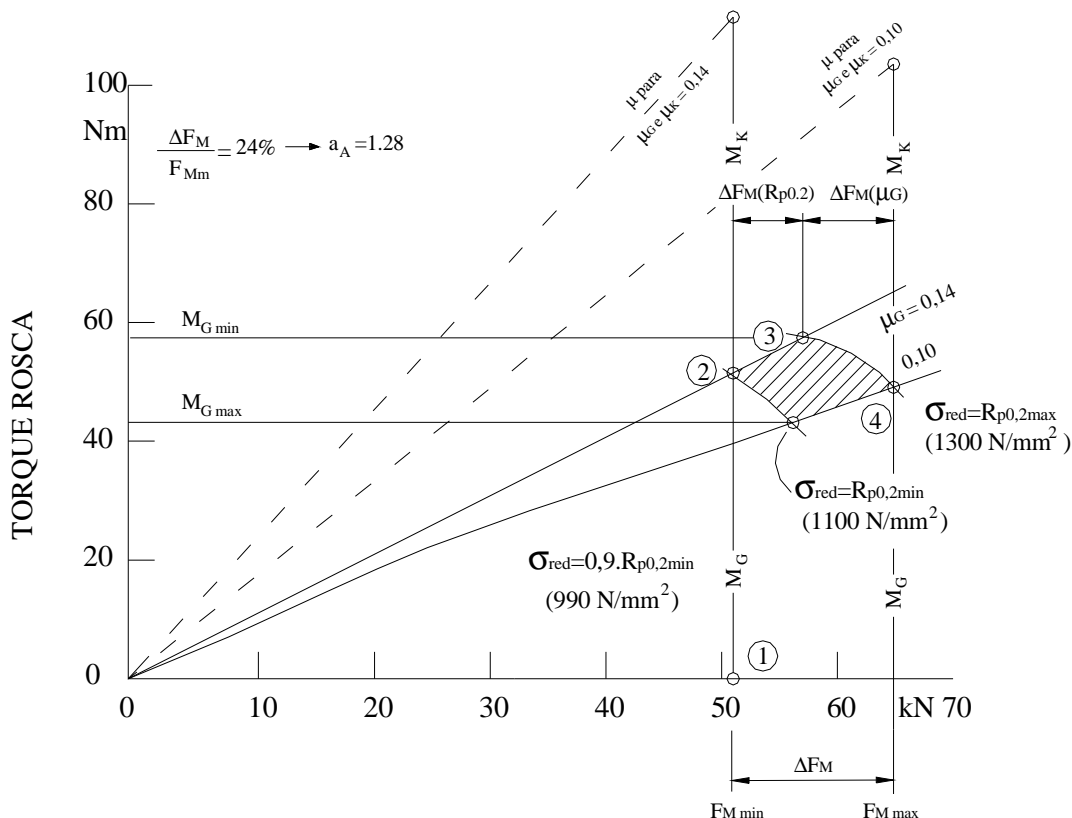


Figura 2.15 – Dispersão da força de montagem ΔF_M para aperto por controle de escoamento. Parafuso M10 – Classe de resistência 12.9.

Considerações sobre método por controle de escoamento (Fig. 2.15).

- No aperto por controle de escoamento, o limite de escoamento do parafuso serve para determinar o valor da força de montagem. Independentemente do torque de aperto M_A e do coeficiente de atrito da cabeça, o parafuso é continuamente apertado até que o limite de escoamento seja alcançado, como resultado das tensões de tração e de torção.

As deformações plásticas experimentadas pelos parafusos são da ordem 0,2% de seu comprimento carregado. Assim, a reusabilidade dos

parafusos é prejudicada e da mesma forma que os parafusos apertados por torque-ângulo, estes deverão ter construção modificada para permitir com segurança várias reutilizações;

- Para segurança de operação da junta aparafusada, uma força de montagem $F_{M\min}$ ^① é exigida;
- Por $M_{G\max} = 0,14$, a tensão de montagem mínima pode alcançar o valor de $R_{p0,2} = 1100 \text{ N/mm}^2$ ^②;
- Por conseqüência das dispersões nas faixas de resistência dos parafusos, a força de montagem F_M pode alcançar valores na qual $F_M (R_{p0,2})$ seja mais alto de $F_{M\min}$ ^③. Desta forma, desde que a maior força de montagem resulta de um maior limite de escoamento do parafuso, isto não causará excesso de tensão específica no parafuso. A pré-carga alcançada corresponderá, em qualquer caso, no maior limite de escoamento de cada parafuso.
- Se a dispersão do coeficiente de atrito na rosca estiver entre $\mu_{G\min} = 0,10$ e $\mu_{G\max} = 0,14$, assumindo o maior valor do limite de escoamento $R_{p0,2} = 1300 \text{ N/mm}^2$ e o menor valor do coeficiente de atrito $\mu_G = 0,10$, a máxima força de montagem $F_{M\max}$ ^④ é calculada pela Eq. (2.29).

$$F_{M\max} = [F_{M\min} + \Delta F_M(R_{p0,2}) + \Delta F_M(\mu_G)] \quad (2.29)$$

- Em contraste com o sistema de aparafusamento por controle de torque, não é necessário sobre-dimensionar o parafuso em função da máxima força de montagem $F_{M\max}$, que ocorre devido à dispersão de coeficiente μ_G e da dispersão das propriedades mecânicas oriundas das variações de dureza obtida no tratamento térmico do parafuso.

Com relação ao fator de aperto $\alpha_A = 1,28$ que resultou da dispersão da força de montagem, um sobre-dimensionamento por α_A não é necessário. Desta forma $\alpha_A = 1$ pode ser substituído por questões de dimensionamento.

- Uma comparação entre as Figuras 2.4 e 2.15 mostra que, devido a uma tensão substitutiva constante σ_{red} para o limite de escoamento, a dispersão

da força de montagem causada pela variação do coeficiente de atrito $\mu_G = 0,10$ e $\mu_G = 0,14$ é menor para esta técnica que para o sistema de controle de aperto por torque. O nível de pré-carga para o sistema de aperto por controle do limite de escoamento é geralmente maior que para o controle de aperto por torque.

2.2. AVALIAÇÃO DO SISTEMA TRIBOLÓGICO

2.2.1. Introdução

Tribologia é definida como “a ciência e tecnologia de superfícies que se interagem em um movimento relativo”, e abrange o estudo do atrito, desgaste e lubrificação (Jost, **1970** e Hutchings, **1992**).

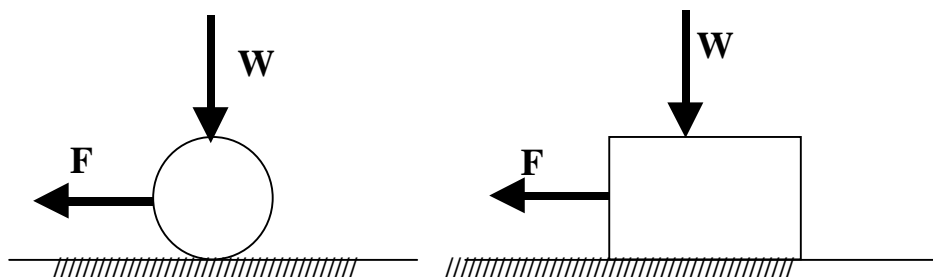
Todas as superfícies sólidas apresentam irregularidades, podendo chegar a ordem de átomos ou moléculas.

O contato entre duas superfícies planas e paralelas, inicialmente ocorrerá somente em poucos pontos. À medida que a carga normal é aumentada, as superfícies se aproximam e um grande número de asperidades das duas superfícies participarão do contato. Visto que o contato ocorre somente em alguns pontos de áreas mais protuberantes chamadas de asperidades. Quando as superfícies se tocam, tais asperidades são responsáveis por suportar a carga normal na superfície e gerar alguma força de atrito entre elas. O estudo da forma na qual ocorre a interação das asperidades de duas superfícies, sob cargas variáveis é, portanto, essencial para qualquer estudo de atrito e desgaste.

Definição de atrito

A força conhecida como atrito pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo em movimento sobre outro. Essa definição abrange duas classes importantes de atrito: Atrito de rolamento e atrito de deslizamento.

Os dois tipos de atrito são ilustrados na Figura 2.16, onde uma força tangencial F é necessária para mover o corpo superior sobre a superfície estacionária.



a) contato por rolamento

b) contato por deslizamento.

Figura 2.16 - Uma força de atrito F , é necessária para proporcionar o movimento por rolamento em A, e deslizamento em B (Hutchings, 1995).

A razão entre esta força de atrito F e a carga normal W é conhecida como coeficiente de atrito, normalmente denotada pelo símbolo μ e matematicamente apresentada na Equação 2.30.

$$\mu = F / W \quad (2.30)$$

A intensidade da força de atrito é convenientemente descrita pelo valor do coeficiente de atrito que pode variar sobre uma ampla faixa: de cerca de 0,001 em um mancal de rolamento levemente carregado até valores superiores a 10 para deslizamento entre dois metais limpos no vácuo. Para a maioria dos materiais comuns sofrendo deslizamento no ar, contudo, o valor de μ encontra-se numa faixa bem estreita entre 0,1 a 1 (Hutchings, 1995).

2.2.2 As leis do atrito

Sob algumas condições de deslizamento, o coeficiente de atrito μ , para um dado par de materiais em condições fixas de lubrificação ou não, pode ser

quase constante. Essa observação levou a formulação das duas leis empíricas do atrito por deslizamento, assim chamadas após terem sido redescobertas por Amontons em 1699. Hutchings (1995), sintetizou da seguinte forma:

Primeira Lei de Atrito - A força de atrito é proporcional à carga normal;

Segunda Lei de Atrito - A força de atrito é independente da área aparente de contato;

A estas duas, acrescenta-se uma Terceira Lei, normalmente atribuída a Coulomb (1785).

Terceira Lei de Atrito - A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

As três Leis do Atrito são de confiabilidade variável, mas exceto em alguns casos importantes, as mesmas fornecem informações úteis de observações empíricas. A Primeira Lei, que pode ser expressa por: $F = \mu \cdot W$ e diz que o coeficiente de atrito, μ , é independente da carga normal.

Para muitos materiais sob condições de deslizamento com e sem lubrificação, esta lei é verdadeira. Amontons, em seus experimentos por meio dos quais suas leis foram deduzidas, utilizou muitos metais e madeiras, todos lubrificados com gordura de porco. A Primeira Lei, contudo, na maioria das vezes também é aplicada para condição de deslizamento não lubrificada. Na Figura 2.17 são apresentados os resultados típicos de deslizamento não lubrificado do aço sobre alumínio polido, no ar. O coeficiente de atrito permanece constante embora a carga tenha variado por um fator próximo de 10^6 .

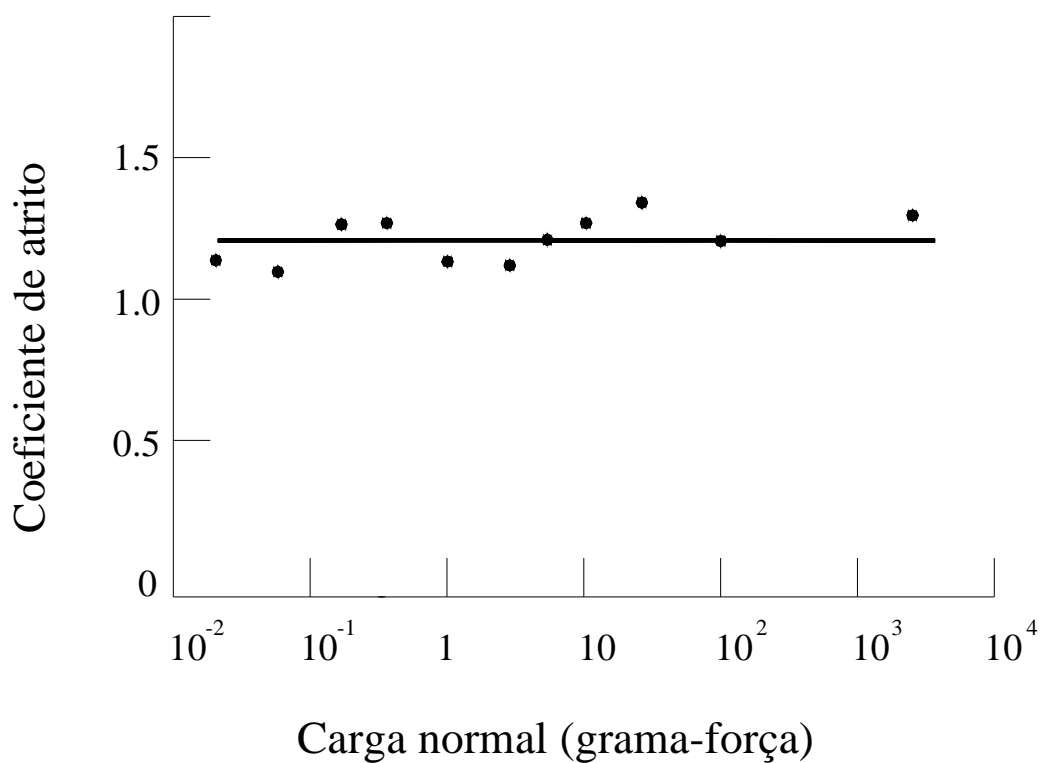


Figura 2.17 – Apresenta a variação do coeficiente de atrito, μ , com uma carga normal, W , para condição de deslizamento não lubrificada do aço sobre o alumínio polido no ar (Hutchings, 1995).

Para uma situação na qual um corpo desliza sobre uma superfície inclinada com um ângulo de inclinação de θ (Fig. 2.18), a primeira lei pode ser escrita em termos de ângulo constante de repouso ou ângulo de atrito θ e representada pela Equação (2.31).

$$\text{tang } \theta = \mu \quad (2.31)$$

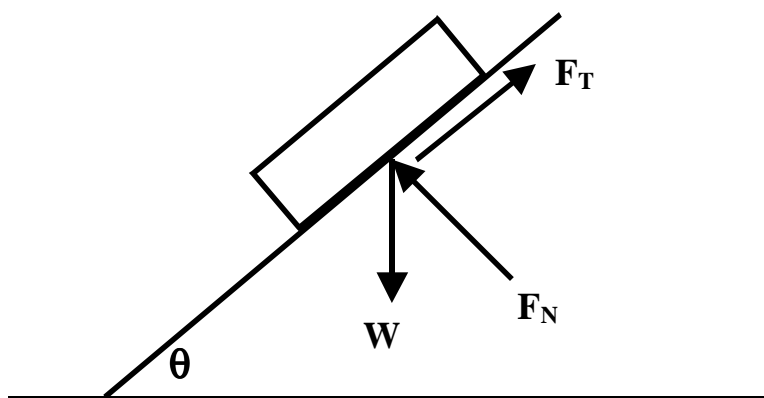


Figura 2.18 - Diagrama de equilíbrio de forças para um corpo deslizando sobre um plano.(Handbook of Tribology, 1991).

Da Figura 2.18, por relações trigonométricas, determina-se a componente tangencial, normal e o coeficiente de atrito, conforme apresentado nas Equações (2.32) a (2.34).

$$F_T = w \sin \theta \quad (2.32)$$

$$F_N = w \cos \theta \quad (2.33)$$

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} = \text{tang. } \theta \quad (2.34)$$

A Segunda Lei do Atrito não tem sido amplamente explorada como a primeira, mas, contudo é confirmada para a maioria dos materiais, com a exceção dos polímeros. Na Figura 2.19 mostra-se o coeficiente de atrito da madeira em deslizamento sobre uma superfície de aço não lubrificada. A carga normal foi mantida constante, enquanto a área aparente de contato sofreu uma variação por um fator próximo de 250; o valor de μ demonstrou ser efetivamente constante.

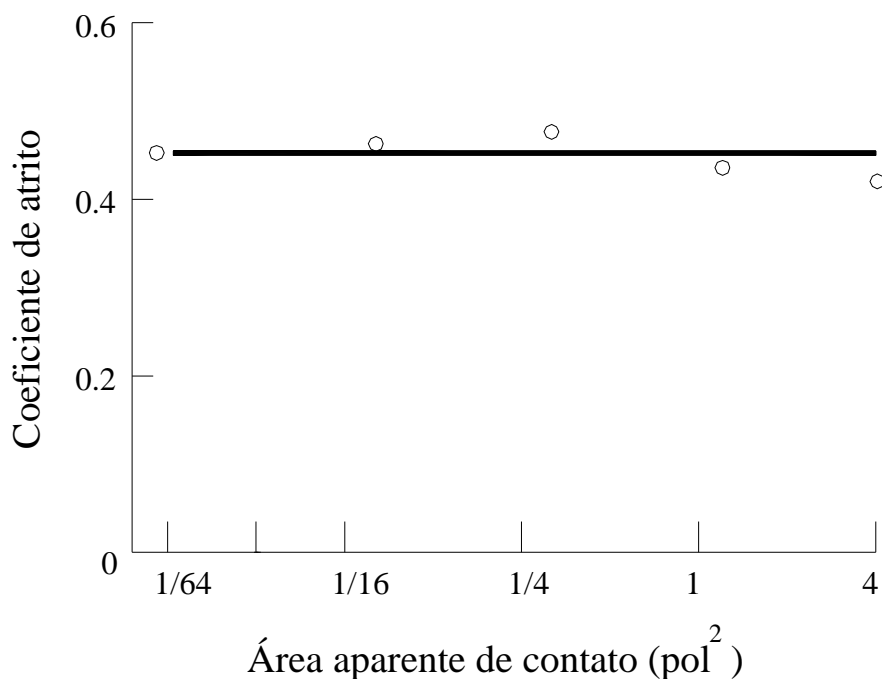


Figura 2.19 Variação do coeficiente de atrito, μ , com a área aparente de contato para madeira em condição de deslizamento sobre uma superfície de aço não lubrificada (Hutchings, 1995).

A Terceira Lei do Atrito, ao contrário é menos fundamentada do que as duas primeiras. Ela é fruto de uma observação comum de que a força de atrito necessária para iniciar o deslizamento é normalmente maior do que a força necessária para mantê-lo em movimento e, portanto, o coeficiente de atrito estático (μ_s) é maior do que o coeficiente de atrito dinâmico (μ_d). Uma vez que o regime de deslizamento é alcançado, μ_d é verificado para muitos sistemas ser quase independente da velocidade de deslizamento para uma ampla faixa. Contudo, em altas velocidades de deslizamento, da ordem de dezenas ou centenas de metros por segundo em metais, μ_d diminui com o aumento da velocidade.

Nas Figuras 2.7 e 2.19 mostram-se exemplos do comportamento do coeficiente de atrito em situações tribológicas distintas.

2.2.3 Contato entre superfícies

No contato entre duas superfícies podem ocorrer dois tipos de deformação: elástica e plástica. Para seu entendimento são estudados modelos idealizados de uma asperidade simples carregada contra uma superfície plana rígida.

Deformação elástica

Quando uma esfera de uma material é pressionada contra um plano (Fig. 2.20), sob uma carga normal W , o contato ocorrerá sobre uma área circular de raio a , dada pela Equação (2.35) descrito por Hertz em 1881.

$$a = \left(\frac{3Wr}{4E} \right)^{1/3} \quad (2.35)$$

Onde r é o raio da esfera e E o módulo de elasticidade equivalente, que depende dos módulos de Young E_1 e E_2 , e do coeficiente de Poisson, ν_1 e ν_2 , para os materiais da esfera e do plano, conforme Equação (2.36).

$$\frac{1}{E} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \quad (2.36)$$

A área de contato entre a esfera e o plano, πa^2 , é dada pela Equação (2.37) e esquematizada na Fig. 2.20.

$$\pi a^2 \approx 0,83\pi \left(\frac{Wr}{E} \right)^{2/3} \quad (2.37)$$

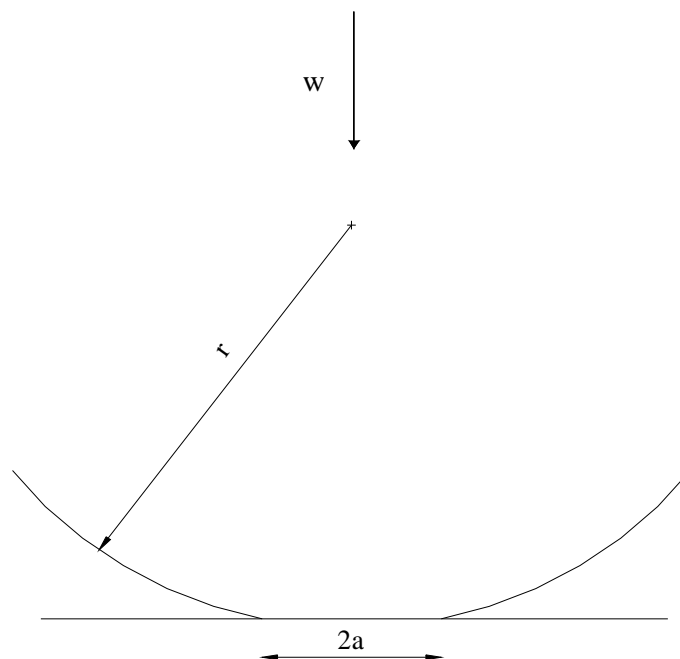


Figura 2.20 – Deformação elástica de uma esfera de raio r , pressionada sobre a superfície de um plano com uma carga W . O raio do círculo de contato é “ a ” (Hutchings, 1995).

Neste caso, no qual a deformação é puramente elástica, a área de contato é, portanto, proporcional a $w^{2/3}$. A pressão média (tensão normal) $P_{\text{média}}$ na área de contato é $w/\pi a^2$, e, portanto, varia com $w^{1/3}$. A tensão não é uniforme sobre a área circular de contato, apresentando um valor máximo no centro e decresce a zero na extremidade. Na Figura 2.21 ilustra-se a distribuição de tensão normal e nesse caso, a tensão máxima, no centro do círculo de contato, é 3/2 vezes a pressão média.

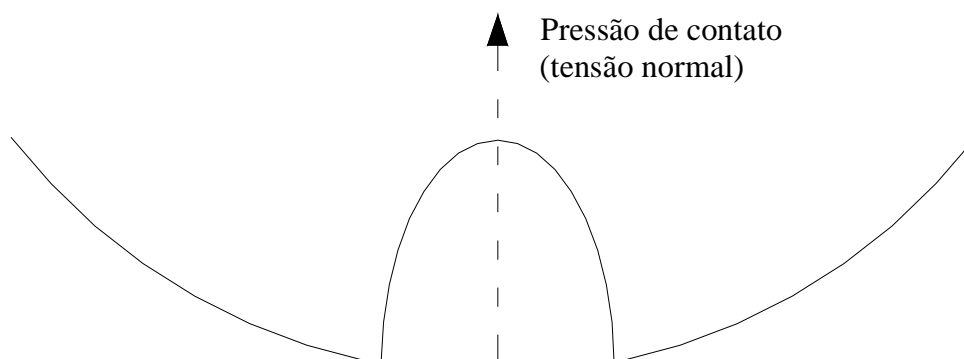


Figura 2.21 – Distribuição de tensão normal (pressão de contato) sobre uma esfera carregada elasticamente contra um plano (Hutchings,1995).

Deformação plástica

À medida que a carga normal entre a esfera e o plano é aumentada, um ou outro componente pode começar a se deformar plasticamente. Exemplifica-se a situação considerando dois casos: o primeiro, no qual a esfera é assumida como rígida e o fluxo plástico é confinado ao plano e o segundo, no qual o plano não se deforma e o fluxo plástico ocorre somente na esfera.

Tomando-se como fundamento a análise de Hertz, no campo das tensões elásticas, devido a um indentador esférico sobre uma superfície plana, mostra-se que a tensão de cisalhamento máxima abaixo do indentador ocorre em uma profundidade de cerca de $0,47a$ (onde a é o raio do círculo de contato). O fluxo plástico ocorre primeiro neste ponto quando o critério de escoamento é satisfeito. Se o critério de Tresca é aplicável, a tensão de cisalhamento máxima será de $Y/2$ onde Y é a tensão de escoamento uniaxial do material. Para um material no qual a razão de Poisson tem um valor de cerca de 0,3 (como o caso dos aços), a tensão de cisalhamento na profundidade de $0,47a$, abaixo da esfera, é de 0,47 vezes a pressão de contato média. A deformação plástica, portanto inicia-se numa pressão média de contato de $1.1Y$.

2.2.4 Revestimentos metálicos macios

Revestimentos metálicos macios como Au, Ag, Cu, Pb, Sn, e Al e suas ligas são caracterizados pela baixa resistência ao cisalhamento. Eles tem recebido grande atenção, quando aplicados como um filme de lubrificante sólido fino a baixas cargas em várias condições ambientais, incluindo vácuo e temperaturas elevadas. (Handbook of Tribology: Materials, 1991). Metais macios, quando presentes como uma fina camada entre superfícies deslizantes duras, podem funcionar como uma camada de lubrificante sólida em função de sua marcada ductilidade associada à baixa tensão de cisalhamento. Essa extrema ductilidade permite que as camadas cisalhem plasticamente entre as superfícies de deslizamento e por sua vez promovam a função lubrificante. Contudo, se tais camadas são muito espessas, elas deformarão excessivamente sob a carga normal resultando em uma grande força de atrito. Alguns fatores que influenciam o atrito e as características de desgaste são a espessura da camada, rugosidade da superfície do substrato, velocidade de deslizamento e a carga.

A espessura da camada tem um efeito pronunciado sobre o coeficiente de atrito. É demonstrado por Bowden e Tabor (1950 e 1964) e Sherbinney e Halling (1977) que camadas metálicas macias com espessuras na faixa de 0,1 a 1,0 μm exibem um coeficiente de atrito mínimo. Na Figura 2.22 ilustra-se a influência da espessura do revestimento sobre o atrito de uma camada eletrodepositada (Spalvins e Buzek, 1981). Em regiões ultrafinas o alto coeficiente de atrito é devido a um rompimento na camada devido à união das asperidades. Na região de espessuras maiores, a capacidade de suportar carga do substrato decresce e um aumento na área real de contato leva a um coeficiente de atrito maior.

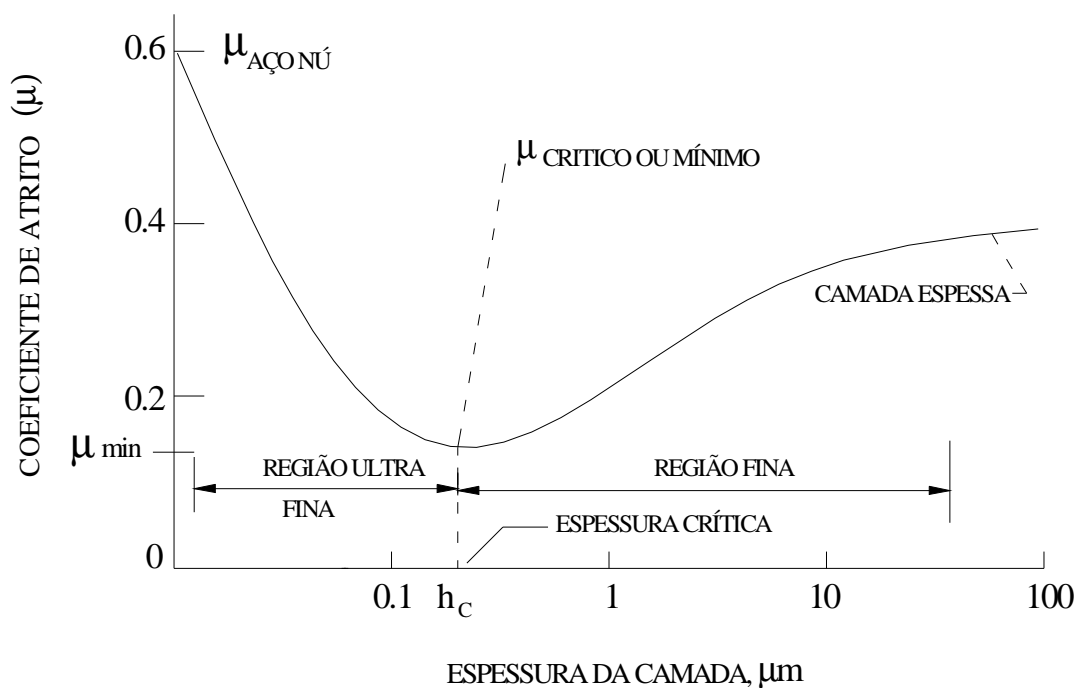


Figura 2.22 – Relação de dependência entre o coeficiente de atrito e a espessura de camadas eletro-depositadas (Spalvins e Buzek,1981).

A dependência do coeficiente de atrito sobre a espessura da camada é afetada pela rugosidade da superfície do substrato e pela técnica de deposição. Normalmente, com superfícies ásperas, o coeficiente de atrito aumenta com o aumento da espessura sem qualquer declividade na curva de atrito *versus* espessura da camada, como mostrado na Figura 2.23 (Arnell e Soliman,1978 e Sherbiney e Halling, 1977).

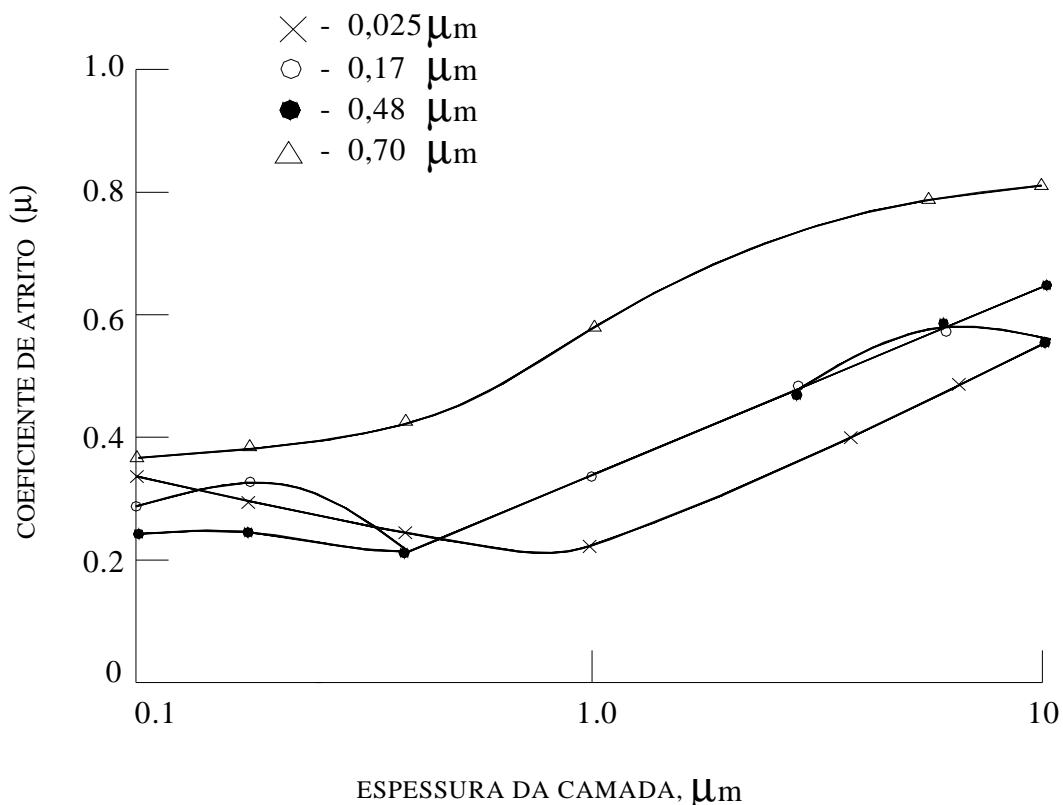


Figura 2.23 – Efeito da rugosidade da superfície do substrato sobre o coeficiente de atrito de camadas de chumbo eletrodepositadas sobre um aço 52100 – teste: pino sobre disco de aço 52100 revestido (Arnell e Soliman 1978).

Em quase todas as camadas, o coeficiente de atrito decresce com o aumento da velocidade de deslizamento. Esta alteração é atribuída ao amolecimento térmico do material da camada na região de contato. O amolecimento térmico resulta na redução da tensão cisalhante no contato com uma significativa redução na capacidade de suportar carga e, portanto reduzindo o coeficiente de atrito. Na Figura 2.24 mostra-se a influência da velocidade de deslizamento sobre o coeficiente de atrito e vida ao desgaste de camadas eletro-depositadas de Ag, In e Pb com diferentes espessuras.

Velocidade de Deslizamento

○ - 950; ● - 740; × - 450; △ - 300; □ - 150 mms^{-1}

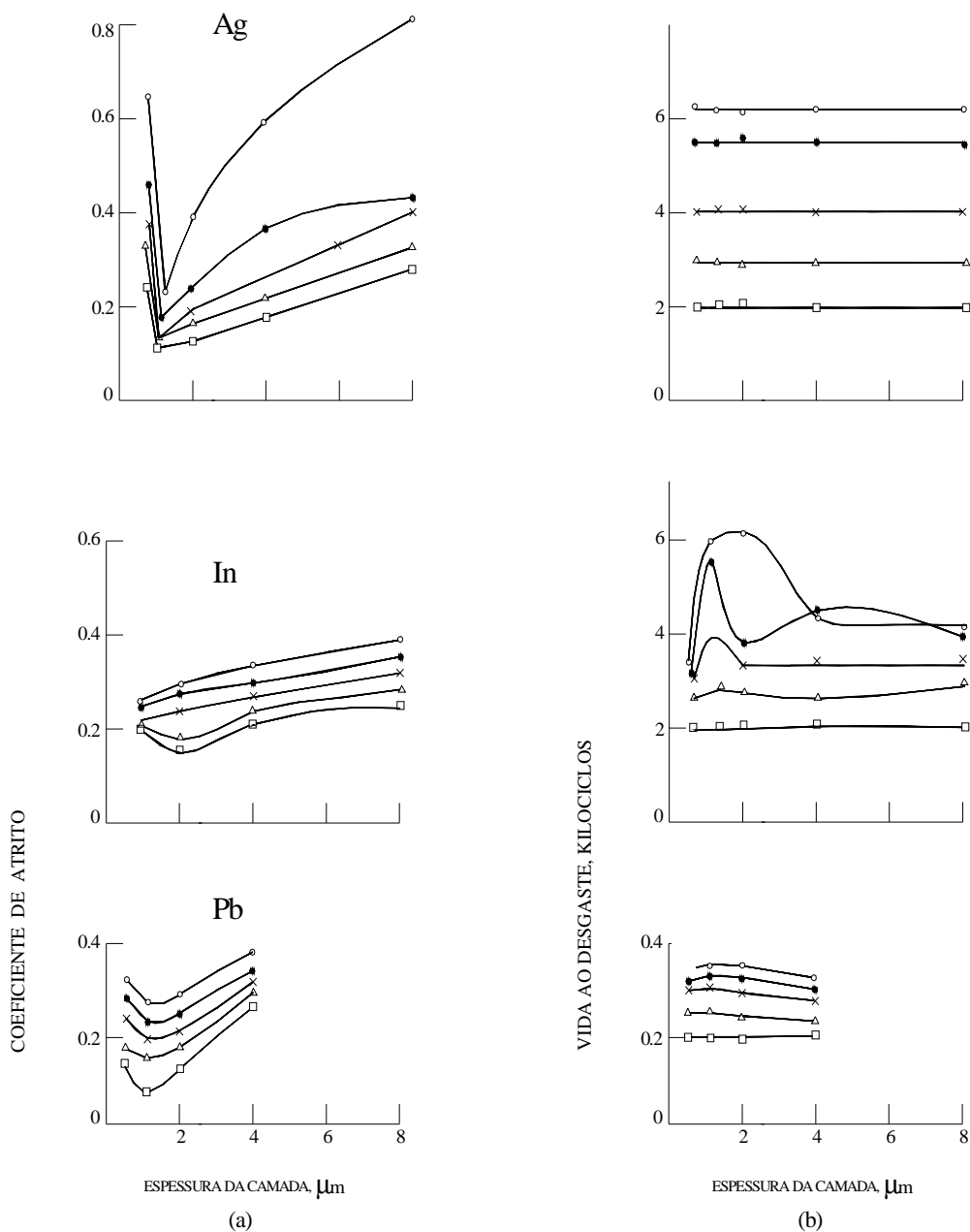


Figura 2.24 – Efeito da velocidade de deslizamento sobre: (a) Coeficiente de atrito, (b) Vida ao desgaste de camadas eletrodepositadas de Ag, In, e Pb com diferentes espessuras (Sherbiney e Halling, 1977).

Os experimentos de Bowden e Tabor (1964) demonstraram que os coeficientes de atrito de camadas macias finas não obedecem à lei de atrito de Amonton.

Uma análise elástica do contato pela teoria de Hertz de filmes finos tem mostrado que a relação entre a carga e a área de contato é marcadamente não linear (El-Sherbiny e Halling, 1976). Na Figura 2.25 mostra-se a dependência do coeficiente do atrito e vida ao desgaste com relação à carga para camadas eletro-depositadas de Ag, Pb, e In. A vida ao desgaste é inversamente proporcional à carga.

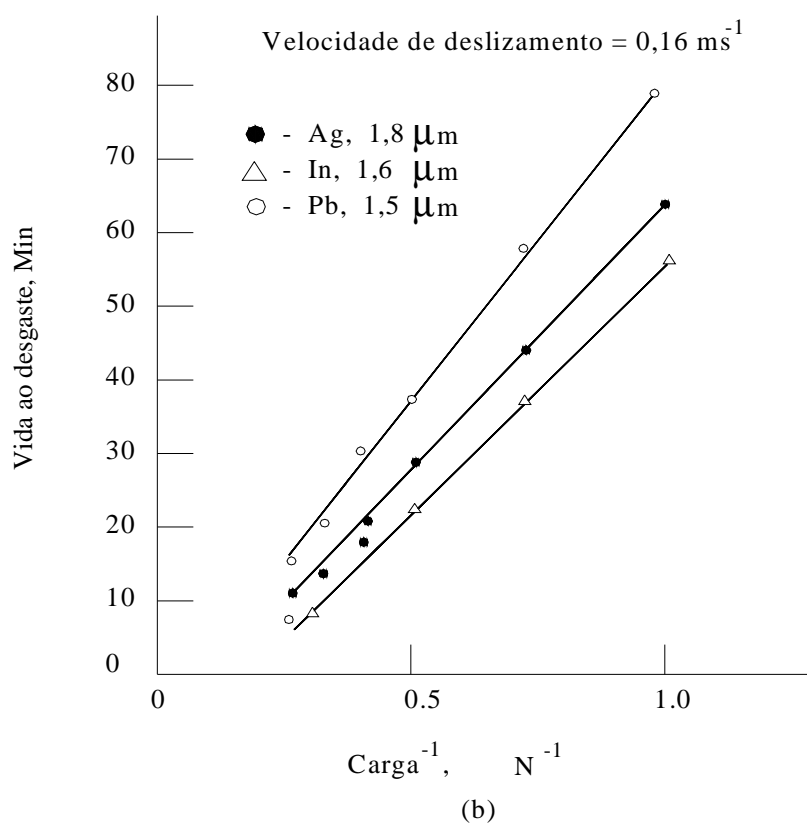
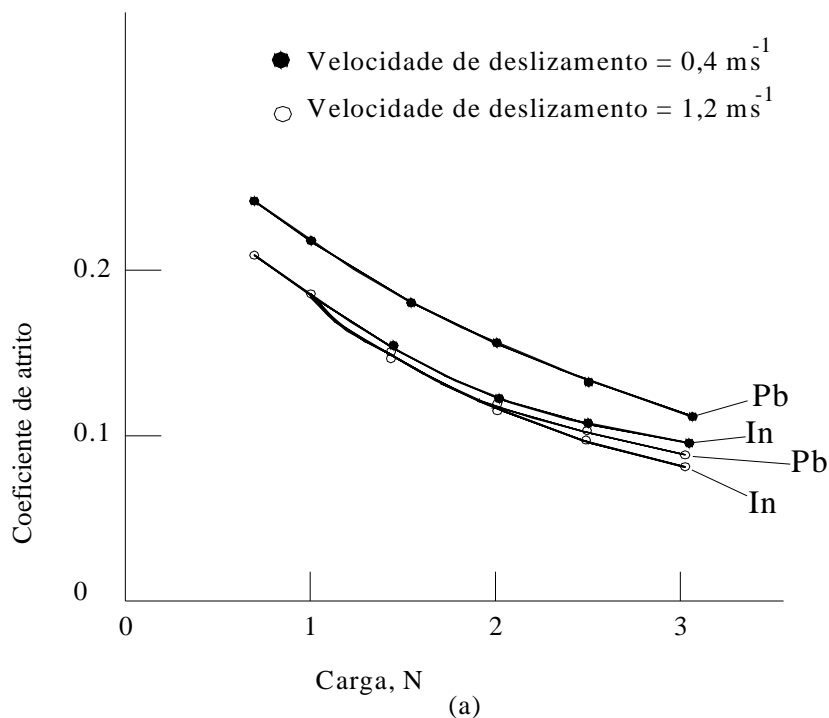


Figura 2.25 - Efeito da carga sobre: (a) coeficiente de atrito, (b) vida ao desgaste de camadas eletrodepositadas de Ag, In, and Pb (Sherbiney e Halling, 1977).

2.2.5 Atrito de deslizamento

O atrito entre as superfícies é devido aos vários efeitos combinados de adesão entre as superfícies planas, sulcamento por partículas abrasivas e asperidades duras de superfície e deformação de asperidades. As contribuições relativas destes componentes dependem do material utilizado, da topografia da superfície, das condições de deslizamento da interface e do meio ambiente (Handbook of Tribology, 1991).

O componente de adesão é devido à formação e ruptura de ligações interfaciais (Bowden e Tabor, 1950 e 1964 e Hutchings, 1995). Essas ligações são o resultado de forças interatômicas interfaciais que dependem do grau de interpenetração das asperidades e a composição da superfície. Quando o deslizamento ocorre, a força de atrito é necessária para cisalhar os planos tangenciais mais fracos nas áreas reais de contato. As superfícies apresentam-se com asperidades de uma certa distribuição de altura que deformam elasticamente ou plasticamente sob uma dada carga durante uma interação. O somatório dos pontos individuais de contato fornecem a área real de contato. Existem duas classes de propriedades importantes que são:

Propriedades mecânicas (Módulo de elasticidade, E' , Pressão ou Resistência ao escoamento, P_Y e dureza, H) e propriedades da topografia de superfície (distribuição da asperidade (raio de curvatura, β , da ponta da asperidade e desvio padrão da altura da asperidade σ_p)), que são relevantes para a área real de contato.

O surgimento da deformação plástica ou elástica depende do valor do índice de plasticidade (Greenwood e Williamson, 1966). Na Figura 2.26, parte a, mostra-se o regime de contato. O índice de plasticidade é uma fator determinado empiricamente e escrito matematicamente, conforme a Eq. (2.38).

$$\psi = \frac{E'}{H} \left(\frac{\sigma_p}{\beta} \right)^{1/2} \quad (2.38)$$

Onde:

$\psi < 0,6$ para contato elástico;

$\psi > 1,0$ para contato plástico;

E' = módulo de elasticidade composto = $1/[(1-\nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2]$;

H = dureza do metal mais macio;

σ_p = desvio padrão composto das alturas dos picos das asperidades

$$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$$

β = raio de curvatura médio composto das pontas das asperidades

$$\beta = 1/(1/\beta_1 + 1/\beta_2)$$

ν = coeficiente de Poisson

Os índices 1 e 2 referem-se aos valores das duas superfícies em contato.

A área real de contato (Bhusham, 1984, 1985 e 1990) é dada pelas seguintes equações:

Para contato elástico, tem-se:

$$A_{or} = \frac{3,2F_N}{E' \left(\frac{\sigma_p}{\beta} \right)^{1/2}} \quad (2.39)$$

Para contato plástico tem-se:

$$A_{or} = C \frac{F_N}{P_Y} \approx \frac{F_N}{H} \quad (2.40)$$

Na Equação 2.40, o termo C é uma constante que depende do comportamento plástico dos materiais. Se além da carga normal uma força tangencial é também introduzida, o crescimento de junção das asperidades pode ocorrer,

levando a uma considerável maior área de contato (McFarlane e Tabor, 1950), e representada pela Eq. (2.41).

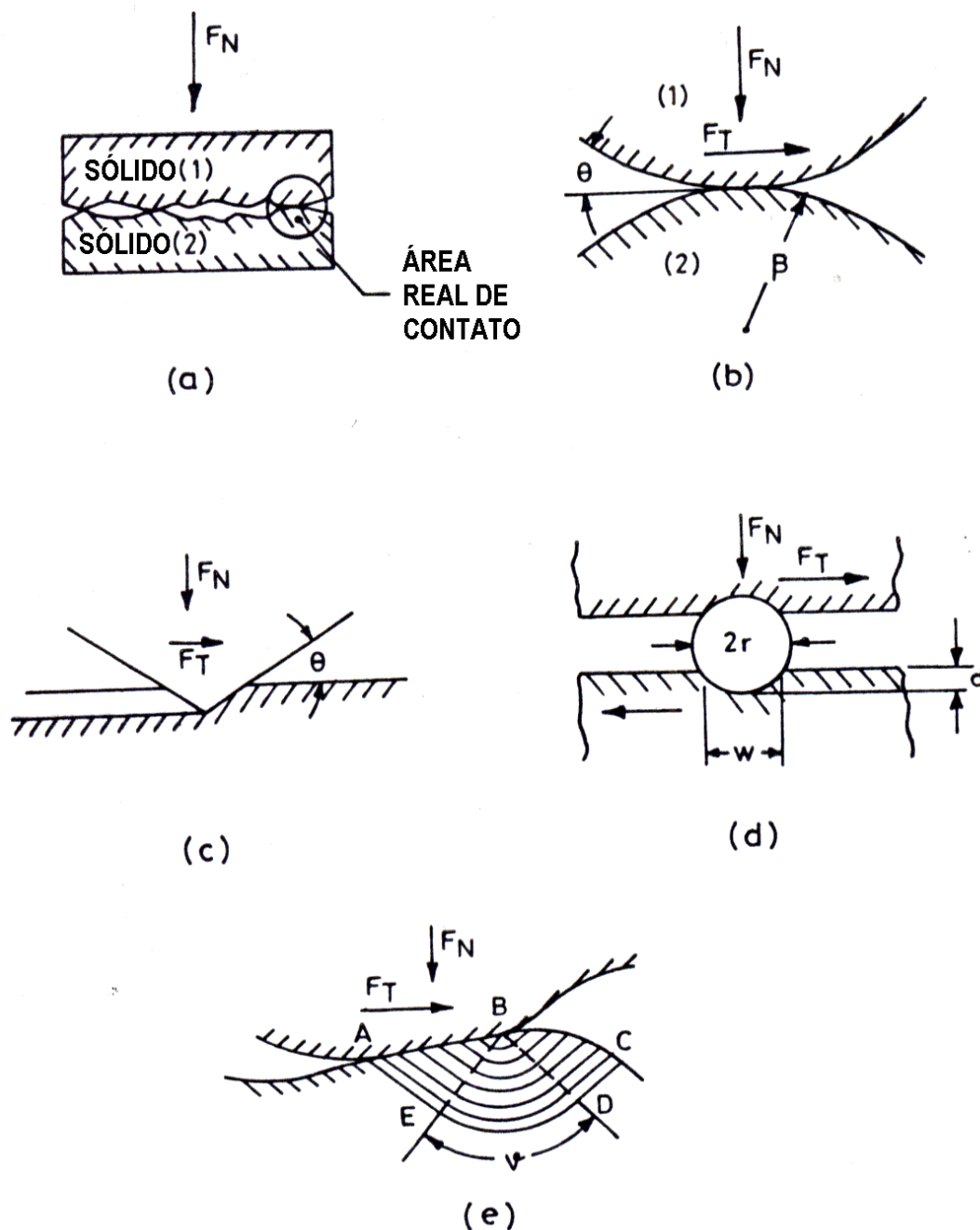


Figura 2.26 - (a) contato entre duas superfícies, (b) Adesão entre as asperidades em contato, (c) Sulcamento da superfície macia por uma asperidade de superfície mais dura, (d) Sulcamento por uma partícula estranha entre duas superfícies em movimento, e (e) Linha de deformação por deslizamento do modelo de atrito (Handbook of Tribology, 1991).

$$A_r = A_{or} \left[1 + \alpha \left(\frac{F_T}{F_N} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.41)$$

Onde $\alpha = \text{constante}$

Se a tensão de cisalhamento na superfície é τ_s , a força necessária para romper a junção é dada por $\tau_s \cdot A_r$, que é, F_T , o componente do atrito na adesão é dado pela Equação (2.42) e mostrado na Fig. 2.26b.

$$\mu_a = \frac{F_T}{F_N} = \frac{\tau_s}{H} \quad (2.42)$$

Esta equação satisfaz a lei de Amonton e sugere que contaminantes intencionais ou não intencionais que alteram a tensão cisalhante efetiva τ_s na interface, afetam o coeficiente de atrito.

Rabinowicz (1965), estendeu o modelo de Bowden e Tabor (1950), levando em consideração a energia de superfície dos corpos em contato, e representado pela Eq. (2.43).

$$\mu_a = \frac{\tau_s}{H} \left[1 - 2 \left(\frac{w_{12} \cot \theta}{\beta H} \right) \right]^{-1} \quad (2.43)$$

Onde:

$W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$ e $\theta = \text{inclinação média das asperidades.}$

Na Equação (2.43), o termo W_{12} representa a energia que deve ser aplicada para separar a unidade de área da interface entre os corpos 1 e 2, envolvendo

a necessidade de criar duas superfícies de energia γ_1 e γ_2 , mas destruindo a interface que tinha uma energia interfacial de quantidade γ_{12} . W_{12} , este termo é geralmente conhecido como trabalho de adesão dos materiais em contato.

Marx e Feller (1978 e 1979), calcularam o componente do atrito devido à adesão, tomando-se como base o modelo de mecanismo de fratura, que considera a fratura de uma junção adesiva e introduz como parâmetro de influência o fator de abertura da trinca crítico e o fator de encruamento. O componente do atrito devido à adesão, neste caso é determinado pela Eq. (2.44).

$$\mu_a = c \frac{\sigma_{12} \delta_c}{N^2 (F_N H)^{1/2}} \quad (2.44)$$

Onde:

σ_{12} = Resistência à tração interfacial;

δ = fator de abertura da trinca crítico;

N = Fator de encruamento;

C = constante.

É obvio a partir das fórmulas precedentes que o componente do atrito devido à adesão depende da resistência ao cisalhamento interfacial e das características de energia do par de materiais em contato, mais do que das propriedades individuais dos materiais envolvidos.

Se uma das superfícies de deslizamento é mais dura que a outra, as asperidades da superfície mais dura podem penetrar e promover sulcos na superfície mais macia. O sulcamento na superfície mais macia também pode ocorrer como resultado de impacto de partículas abrasivas. Em movimento tangencial, a resistência ao sulcamento é uma força adicional ao atrito.

Rabinowicz (1965), demonstrou que para uma superfície dura com uma asperidade cônica deslizando sobre uma superfície macia (Fig. 2.26c), a

componente sulcamento do atrito está relacionada à tangente da inclinação da asperidade, determinado pela Eq. (2.45).

$$\mu_P = \frac{\tan \theta}{\pi} \quad (2.45)$$

Asperidades de superfície típicas raramente tem uma inclinação efetiva que exceda de 5° a 6°. Segue-se, portanto que a contribuição para o coeficiente de atrito neste caso é da ordem de 0,05. Este valor pode ser considerado, contudo, somente como uma pequena parcela do atrito. Experimentalmente, observa-se que o acúmulo de material a frente dos sulcos ocorre na maioria dos casos de sulcamento durante o deslizamento e que, normalmente, não tem sido levado em consideração.

Sin et al (1979), calcularam o componente devido ao sulcamento no atrito, considerando o sulcamento devido a penetração de partículas abrasivas, representado pela Equação (2.46) e mostrado na Fig. 2.26d.

$$\mu_P = \frac{2}{\pi} \left\{ \left(\frac{2r}{w} \right)^2 \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{w}{2r} \right) - \left[\left(\frac{2r}{w} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (2.46)$$

onde:

r = raio da partícula abrasiva e w = largura do sulco.

Esta equação indica que além das propriedades do material, as propriedades geométricas das asperidades das partículas abrasivas penetradas podem influenciar significativamente o componente de sulcamento no atrito.

Quando as asperidades de duas superfícies deslizantes entram em contato uma com as outras, elas se deformam de tal modo que o campo de deslocamento resultante seja compatível com a direção de deslizamento.

Ainda ocorre que a soma dos componentes verticais da superfície em tração no contato das asperezas são iguais à F_N , a carga normal. A deformação plástica é sempre acompanhada por uma perda de energia. Essa dissipação de energia é justificada para a grande parte do atrito sob metais. Embora energia seja exigida para deformar um metal elasticamente, a maioria desta energia é recuperada, e as perdas de energia elástica são, portanto negligenciadas comparadas com as perdas associadas com a deformação plástica.

Drescher (1959), estudou o modelo de deformação dos planos de deslizamento do atrito (Fig.2.26e).

A componente de deformação no atrito é determinada pelas seguintes equações:

Para deformação plástica

$$\mu_d = \frac{F_T}{F_N} = \lambda \tan \arcsin \left\{ \frac{\sqrt{2} (2 + \nu)}{4 (1 + \nu)} \right\} \quad (2.47)$$

Para deformação elástica

$$\mu_d = 0 \quad (2.48)$$

onde:

$\lambda = \lambda(E', H)$, que define a proporção da carga suportada plasticamente, e ν é o ângulo de deslizamento mostrado na Fig. 2.26e.

Neste modelo é assumido que sob o contato da asperidade (AB na Fig.2.26e), três regiões de material deformado plasticamente podem desenvolver-se pelas regiões ABE , BED , e BDC . A tensão de cisalhamento máxima nestas áreas é igual à tensão de cisalhamento do material pertinente. O parâmetro importante aqui é λ , que define a proporção da carga suportada plasticamente e está relacionado com a proporção entre a dureza e o módulo de elasticidade. Se o contato da asperidade é completamente plástico e a sua inclinação é de 45° o

coeficiente de atrito resulta em 1. Este valor cai até 0,55 se a inclinação da asperidade se aproxima de zero.

Heilmann e Rigney (1981) sugeriram um outro modelo para o componente de deformação no atrito, que relaciona o atrito com a deformação plástica. A principal suposição é que o trabalho realizado pelo atrito é igual ao trabalho da deformação plástica durante o estado constante de deslizamento. O componente de deformação no atrito é dado por:

$$\mu_d = \frac{A_r}{F_N} \tau_{\max} F\left(\frac{\tau_s}{\tau_{\max}}\right) \quad (2.49)$$

$$\text{onde, } F\left(\frac{\tau_s}{\tau_{\max}}\right) = 1 - 2 \frac{\ln\left[1 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_{\max}}\right)\right] - \left(\frac{\tau_s}{\tau_{\max}}\right)}{\ln\left[1 - \left(\frac{\tau_s}{\tau_{\max}}\right)^2\right]} \quad (2.50)$$

τ_s = Tensão de cisalhamento média interfacial

τ_{\max} = Limite de resistência do material ao cisalhamento

O valor da resistência ao cisalhamento dos materiais na interface pode depender das condições experimentais, tais como carga, velocidade de deslizamento, temperatura e de propriedades do material como estrutura cristalina, microestrutura, taxa de endurecimento, e taxa de recuperação.

2.2.6 Revestimentos

O revestimento superficial de um fixador é uma parte integral e importante em um projeto de uma junta aparafusada. Assim como a classe de resistência, forma, rugosidade, diâmetro e passo da rosca, etc, tem um grande efeito na qualidade da fixação; a espessura do revestimento, tipo, lubricidade e resistência à corrosão, entre outros, tem também um grande efeito na

qualidade final da junta aparafusada. O revestimento é uma das últimas etapas na fabricação de um parafuso ou porca.

Os revestimentos para proteção contra a corrosão podem ser divididos em dois grupos: metálicos e não metálicos (orgânicos e inorgânicos).

O objetivo, independente de qual seja o tipo de revestimento, é sempre o mesmo: isolar o metal do meio corrosivo.

Revestimentos metálicos

O conceito de aplicação de um revestimento de um metal mais nobre sobre um metal ativo tem a vantagem de uma maior resistência à corrosão do metal mais nobre. Um exemplo dessa aplicação é o aço revestido com estanho. Alternativamente, um metal mais ativo pode ser aplicado, e nesse caso o revestimento corrói, preferencialmente ao substrato.

Um exemplo desse sistema é o aço galvanizado, onde o zinco (revestimento de sacrifício) corrói, preferencialmente e protege o aço. Outros exemplos desse sistema são os revestimentos chamados organometálicos onde destacam os processos Dacromet[®] e Geomet[®] por sua altíssima resistência a corrosão (Metal Coatings Brasil, 2000).

Revestimentos não metálicos

Revestimentos orgânicos: a principal função desses revestimentos na proteção contra a corrosão é isolar o metal do meio corrosivo. Complementarmente, o revestimento orgânico pode conter inibidores que formam uma barreira (camada protetiva) à corrosão. Existem muitas formulações de revestimentos orgânicos, assim como uma variedade de processos de aplicação.

Revestimentos inorgânicos: Os revestimentos inorgânicos incluem esmaltes de porcelanas, revestimento de sílica polimerizado quimicamente, revestimentos de vidro e outras cerâmicas resistentes à corrosão. Assim como os revestimentos orgânicos, os inorgânicos atuam na proteção contra a corrosão como uma barreira. Alguns revestimentos cerâmicos, como carbonetos e silicetos, são empregados em aplicações onde se requer resistência ao desgaste e resistência ao calor, respectivamente.

Assim como algumas espécies químicas (como por exemplo, o sal) favorecem a corrosão, outras espécies químicas inibem a corrosão. Cromatos, silicatos e aminas orgânicas são inibidores comuns. Os mecanismos da inibição podem ser bastante complexos. No caso das aminas orgânicas, o inibidor é adsorvido nas áreas anódica e catódica evitando a corrente (elétrica) de corrosão. Outros inibidores afetam especificamente os processos anódico e catódico. Outros ainda promovem a formação de filmes protetores na superfície do metal.

O uso de inibidores é favorecido em sistemas fechados quando a concentração do inibidor é mais facilmente controlada (trocadores de calor). Os inibidores podem ser incorporados em um revestimento protetor ou em um “*primer*” anterior ao revestimento.

Revestimento Químico anticorrosivo a base de Zinco e Alumínio

Consiste de uma dispersão aquosa de zinco e alumínio e outros agentes químicos específicos. Basicamente é constituído de duas camadas bem distintas, conforme mostrado na Fig. 2.27 e detalhadas a seguir:

- Uma denominada *Base Coat* que são revestimentos inorgânicos em base aquosa aplicados diretamente aos substratos metálicos que necessitem de alto grau de proteção, com espessura mínima de camada.
- A outra denominada *Top Coat* que são selantes em base aquosa aplicados em peças já revestidas com *Base Coat*, proporcionando um

altíssimo grau de proteção, além de contribuir para as características de lubricidade do revestimento de modo a atender às faixas de coeficiente de atrito especificadas.

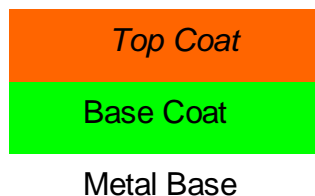


Figura 2.27 - Representação esquemática do revestimento.

Normalmente a deposição do revestimento segue três estágios básicos (Boletim Técnico Dacromet[®], 1996):

1 - Limpeza das peças: A superfície das peças deve estar isenta de óleos, graxas e outras substâncias estranhas a fim de possibilitar uma perfeita aderência do revestimento sobre o substrato metálico. Esta etapa é realizada em duas operações:

a – Desengraxe Alcalino ou por solventes clorados para remoção de óleos e graxas.

b – Limpeza abrasiva para remoção de resíduos de usinagem e tratamento térmico, óxidos, carepas, por meio de jateamento com micro esferas de aço carbono, aço inox ou vidro.

2 – Revestimento: Processo de imersão e centrifugação que é utilizado para:

- peças que possam ser manipuladas a granel, tais como: parafusos;

- porcas, arruelas, pinos, etc.

3 – Cura: Na etapa de cura pode ser utilizado qualquer método de corrente de ar aquecido que permita ao substrato metálico atingir temperaturas da ordem de 300 a 320°C.

Durante este processo, os flocos de zinco e alumínio alinham-se em camadas múltiplas, formando um revestimento de cor cinza pratedo.

Aplicado sobre a forma líquida transforma-se em um filme metálico aderente após o processo de cura.

Na Figura 2.28 mostra-se o diagrama esquemático dos processos de deposição utilizados nesse trabalho

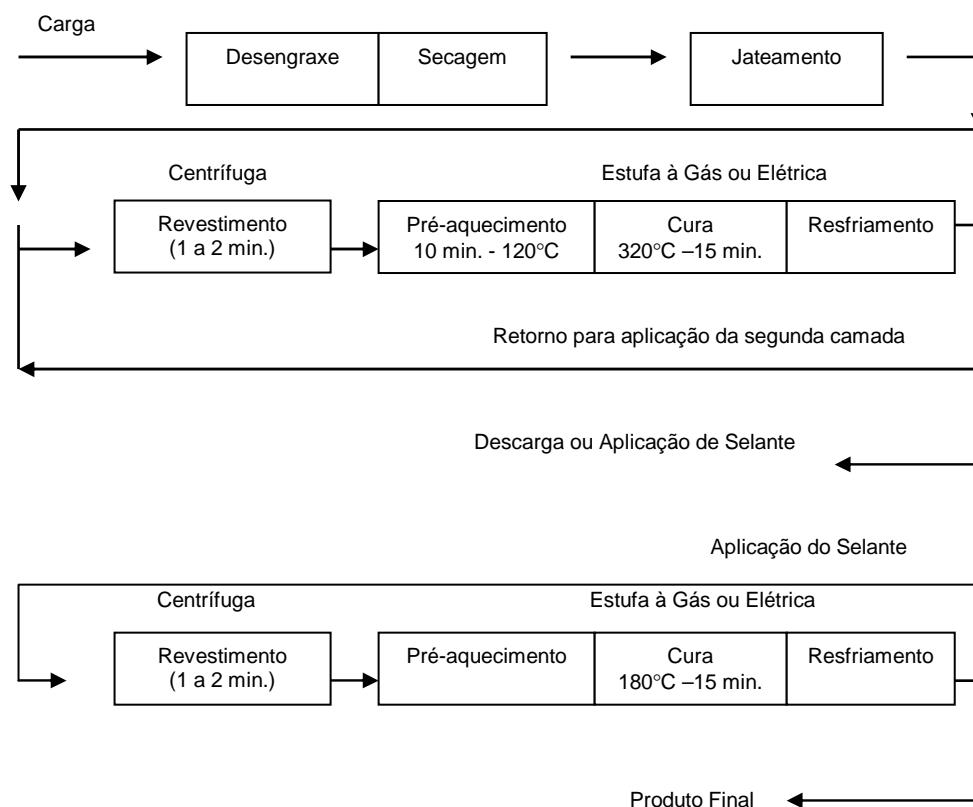


Figura 2.28 - Seqüência do processo Imersão e Centrifugação (Boletim Técnico Dacromet[®], 1996)

2.2.7 Coeficiente de Atrito

Na indústria automobilística mundial ainda não existe uma faixa de coeficiente de atrito única, o que se nota é uma tendência entre 0,08 a 0,16. Cada empresa trabalha com uma determinada faixa de acordo com a experiência adquirida ao longo dos anos e novos projetos.

No caso da Fiat tem-se:

Para o produto em exercício, salvo de outra forma especificado a desenho, o valor do coeficiente de atrito global deve atender a faixa de 0,12 a 0,30, à

exceção de partes fosfatizadas ao manganês para as quais se exige a faixa de 0,10 a 0,16.

Para novos projetos (como orientação, a partir dos modelos 2003 e sucessivos) o valor do coeficiente de atrito global deverá estar entre 0,10 a 0,16.

A Fiat em sua Norma 957513 - "Revestimento anti-corrosivo a base de lamelas de zinco e alumínio para material ferroso" de 31/01/2003, contempla revestimentos isentos de cromo hexavalente bem como faixas de coeficiente de atrito. No anexo 1 tem-se a tradução desta norma.

Capítulo 3

Procedimentos Experimentais

3.1 – METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Foram utilizados dois tipos de tecnologia de revestimentos isentos de cromo hexavalente para os ensaios experimentais.

Optou-se por não mencionar os fabricantes e as marcas comerciais dos revestimentos. Portanto, a primeira tecnologia foi denominada neste trabalho como tipo “A” e a segunda denominada como tipo “B”. A seguir serão descritas as principais características de cada um deles.

3.1.1. Tecnologia Tipo "A"

Esta tecnologia é uma dispersão aquosa de flocos de zinco e alumínio e outros agentes químicos específicos, especialmente formulados para proteção de substratos de ferro (aço), alumínio, zinco e outros.

Ela é completamente livre de cromo hexavalente, trivalente ou metálico, de quaisquer metais pesados, e de substâncias e solventes orgânicos nocivos ou de mau odor.

É aplicada por simples imersão e cura, formando um revestimento metálico aderente (livre de resinas orgânicas) de cor cinza prateado. Constitui pela aplicação de duas ou mais camadas do banho e uma ou mais camadas do selante.

Propriedades Físico-Químicas

Viscosidade: 60 a 80 segundos, copo Zahn nº 2 à 22°C;

Densidade: $1,35 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ à 22°C;

Flash Point: > 67 °C copo fechado;

Poder de cobertura: 17 m²/Kg de banho;

Consumo do banho: 60 g/m²;

Peso da camada: mínimo 20 g/m² base coat;
mínimo 4 g/m² top coat.

Método de Aplicação do Revestimento

Preparação da Superfície

A resistência à corrosão promovida pelo revestimento depende da limpeza e da natureza da superfície a ser revestida. Sujeiras normais e óleos podem ser removidos com desengraxantes alcalinos ou a vapor. Crostas, cracas e outros materiais sólidos deverão ser removidos por meios mecânicos, como por exemplo, a limpeza abrasiva. A decapagem ácida deve ser evitada a fim de se prevenir a fragilização por hidrogênio.

Revestimento

O banho é aplicado em pequenas peças em duas ou mais camadas utilizando-se o processo de imersão/centrifugação. Peças maiores são tratadas pelo processo de imersão/escorrimento ou Spray.

Cura

O filme desta tecnologia é curado utilizando-se qualquer método corrente de ar aquecido que permita atingir uma temperatura do substrato metálico de 300 °C. Quando aplicado em duas ou mais camadas efetua-se a cura de cada camada depositada. O tempo de permanência na estufa para atingir o pico de temperatura no substrato irá variar com a massa da peça, carga e eficiência da estufa. O tempo de permanência na temperatura de cura varia de 30 a 35 minutos.

Vantagens do processo

- Totalmente isento de cromo hexavalente, trivalente ou metálico e de outros metais nocivos ao meio ambiente;
- Base aquosa, livre de substâncias e solventes orgânicos nocivos ou de mau odor;
- Coeficiente de atrito adequado às exigências das montadoras;
- Baixa espessura da camada. Não causa interferência em roscas;
- Resistência à corrosão superior à 1000 horas de *Salt Spray*;
- Ausência completa de fragilização por hidrogênio;
- Revestimento completamente metálico livre de resinas orgânicas;
- Excelente aderência do base coat ao substrato metálico.
- Ação galvânica controlada resultando em menor quantidade de produtos de corrosão branca do que os zincados convencionais;
- Resistência a solventes, gasolina e fluido de freio;
- Condutividade elétrica;

3.1.2. Tecnologia Tipo "B"

Esta tecnologia é um banho inorgânico anticorrosivo baseado em partículas de zinco e alumínio e contém lubrificante interno livre de PTFE (teflon).

O metal contido no filme seco é de aproximadamente 80% de zinco e alumínio. É baseado em uma nova geração de *thinner* com baixa taxa de VOC (Compostos Orgânicos Voláteis).

É um material de banho de zinco inorgânico para imersão/centrifugação, imersão/escorrimento e aplicação em Spray.

Atinge proteção à corrosão de mais de 1000 horas em *Salt Spray* segundo padrões DIN 50021 e ASTM B117.

Não produz fragilização por hidrogênio.

É usado em banhos com camadas entre 8 – 20 μm .

Tem temperatura de cura entre 180 °C - 200 °C.

Apresenta um tempo de cura entre 15 – 30 minutos.

Coeficiente de atrito entre 0,08 – 0,14.

Dados Técnicos

Cor: Prata.

Viscosidade: 300 – 900 cps a 20 °C.

Densidade: aprox. 1,39 g/cm³.

Conteúdo de sólido: aprox. 60%.

Cobrimento teórico a 10 µm de filme seco: aprox. 18 m²/Kg.

Pré-tratamento: Desengraxe, limpeza abrasiva, etc.

Método de aplicação: Imersão/centrifugação, imersão/escorrimento, *Spray*.

Parâmetro de imersão: de 300 a 500 rpm; mínimo de 5 até 50" de centrifugação.

Viscosidade de aplicação: min. 30 s até máx. 60 s (3 mm copo Ford 20 °C, segundo aplicação.

Temperatura de aplicação: min. 15°C até máx. 28°C.

Temperatura ambiente: min. 15°C até máx. 35°C.

Vantagens do processo

- Alta resistência à corrosão (estabilidade no teste de *Salt Spray*, Kesternich, assim como no teste ciclo);
- Não poluente - não contém nenhum metal pesado, cromo ou cádmio e *thinner* de alta taxa de VOC;
- Fácil de aplicar;
- Atende aos requisitos de coeficiente de atrito;
- Não produzem fragilização por hidrogênio (usando politratamento e desengraxe e jateamento), permite evitar a fragilização por hidrogênio;
- Resistente aos produtos químicos automotivos (combustível, fluido hidráulico, agente resfriador, fluido de freio, etc);

3.2 Metodologia Empregada nos Ensaios Experimentais

Os ensaios experimentais foram realizados nas seguintes condições para as duas tecnologias:

Rotação: 5 rpm;

Número de ensaios por tecnologia/condição: 15;

Número de filetes engastados na contra peça: 11 filetes;

As características geométricas e propriedades mecânicas do parafuso M12 x 1,25 são apresentadas na Tab. 3.1;

Tab. 3.1 – Características do parafuso.

Classe de resistência		10.9
Tolerância de acabamento		6g
Diâmetro nominal (mm)	D	12
Diâmetro primitivo da rosca do parafuso (mm)	$D_{2\text{médio}}$	11,094
Diâmetro do núcleo da rosca do parafuso (mm)	$D_{3\text{médio}}$	10,327
Passo (mm)	P	1,25
Diâmetro externo da superfície de apoio da cabeça do parafuso (mm)	D_k	16,8
Diâmetro furo passagem (mm)	D_b	13
Comprimento de carregamento (mm)	L_k	52 mm
Tensão de escoamento teórica (N/mm^2)	$\sigma_{0,2\%}$	940
Tensão de ruptura (N/mm^2)	σ_r	1040 - 1200
Área (mm^2)		92,1

As condições de parada dos ensaios são dadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Condição de parada

Tecnologia	Condição de Parada
Tipo A e Tipo B	49 kN
	63 kN

Essas forças representam respectivamente 70% e 90% da força tensora de escoamento no estado combinado de tensões obtidas a partir de ensaios realizados.

Etapas dos ensaios e avaliações experimentais realizadas para as duas tecnologias

Etapa 1 - Condição de recebimento

- a) Exame visual;
- b) Ensaio de resistência à corrosão;
- c) Ensaio de tração;
- d) Ensaio de torque x ângulo;
- e) Análise química do revestimento;
- f) Medição da espessura do revestimento sobre o flanco do filete;
- g) Medição da espessura do revestimento sobre a face de apoio da cabeça;
- h) Medição da espessura do revestimento sobre a face sextavada;
- i) Levantamento topográfico do revestimento a partir das medições de espessura realizadas utilizando software específico;
- j) Fotografias e análises microscópicas e ao microscópio eletrônico de varredura;
- k) Ensaio de coeficiente de atrito realizados no Determinador Torque Tensão obedecendo às condições de parada estabelecida;

Etapa 2 - Após ensaios

- a) Exame visual;
- b) Ensaio de resistência à corrosão em névoa salina;
- c) Medição da espessura do revestimento sobre o flanco do filete;
- d) Medição da espessura do revestimento sobre a face de apoio da cabeça;
- e) Levantamento topográfico do revestimento a partir das medições de espessura realizadas utilizando software específico;
- f) Fotografias e análises microscópicas e ao microscópio eletrônico de varredura;

Etapa 3 - Reusabilidade

- a) Ensaios de coeficiente de atrito realizados no Determinador Torque Tensão obedecendo à condição de parada de 49 kN;
- b) Exame visual;
- c) Medição da espessura do revestimento sobre o flanco do filete;
- d) Medição da espessura do revestimento sobre a face de apoio da cabeça;
- e) Levantamento topográfico do revestimento a partir das medições de espessura realizadas utilizando software específico;
- f) Fotografias e análises microscópicas e ao microscópio eletrônico de varredura;
- g) Análise química do revestimento;

Detalhamento das Etapas Experimentais

3.2.1 Etapa 1 - Condição de recebimento

a) Exame Visual

O exame visual buscou verificar o estado de recebimento dos parafusos com relação ao aspecto de cor, resíduos de trabalho mecânico, deformações nos filetes caracterizadas como batidas de rosca, sujeiras, excesso de revestimento, produtos de corrosão, ou qualquer outra característica que pudesse vir a influenciar de maneira atípica a medição do coeficiente de atrito.

b) Ensaio de resistência à corrosão

Com intuito de avaliar a resistência à corrosão dos parafusos na condição de recebimento os mesmos foram submetidos ao ensaio de corrosão em névoa salina conforme Norma Fiat 50180 método A1 (Figuras 3.1 e 3.2).

O ensaio consiste em se avaliar a resistência à corrosão do revestimento em um breve espaço de tempo dado em horas, em um ambiente agressivo

(ambiente marinho) em uma câmara de névoa salina com uma concentração de NaCl a 5% e temperatura interna da câmara de $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

A avaliação do revestimento em câmara de névoa salina esta relacionada ao processo de aplicação do mesmo. Não existem ainda estudos demonstrando a correlação deste ensaio, realizado em laboratório, com o desempenho do revestimento em campo.

O critério de aprovação ou rejeição é baseado no aparecimento de focos de corrosão ferrosa.



Figura 3.1 – Vista do Equipamento de Névoa Salina

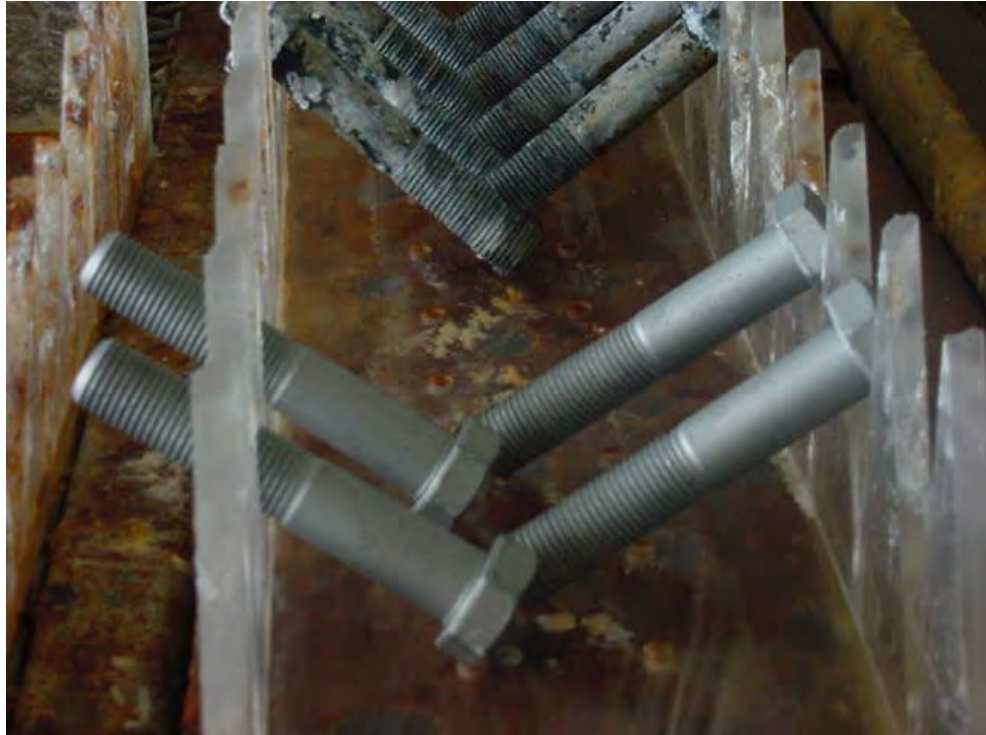


Figura 3.2 – Em primeiro plano verifica-se a disposição dos parafusos novos colocados na câmara de Névoa Salina.

c) Ensaio de tração

Os parafusos foram submetidos a ensaios de tração em uma máquina universal de ensaios Wolpert com capacidade para 30.000 N, a partir da qual se obteve o limite de resistência ao escoamento e o limite de resistência à tração dos mesmos (Figuras 3.3 e 3.4).

Procedimentos

Os parafusos foram montados em dispositivos apropriados, um para a fixação da rosca, deixando livre um comprimento carregamento de 52 mm e um outro para o apoio da cabeça do parafuso.

Os parafusos foram submetidos ao carregamento de modo contínuo até sua estricção e posterior ruptura. Os gráficos foram plotados em um registrador X-Y.

Ao término dos ensaios foram anotadas as cargas de escoamento e ruptura.



Figura 3.3 - Vista da Máquina de Tração Wolpert com parafuso montado.



Figura 3.4 - Detalhe do parafuso montado nos dispositivos para ensaio de tração.

d) Ensaio de Torque x Ângulo

Visto que durante o aparafusamento (estado duplo de tensões) o limite de escoamento convencional (estado simples de tensões) é influenciado pela componente torcional, realizou-se o ensaio de torque x ângulo até o colapso dos parafusos de modo a se obter as forças de escoamento no estado duplo de tensões.

Os ensaios foram realizados utilizando o Determinador Torque – Tensão, fabricado pela Metalac, que é um equipamento destinado a ensaios em juntas rigidamente fixadas por meio de célula de carga, sensorizada por extensômetros com conexão a sistema de aquisição de sinais. Nas Figuras 3.5 a 3.7 mostram-se as fotografias do equipamento.

Neste ensaio são combinadas as grandezas Torque Total (lido por meio da célula de carga) e Ângulo (lido por meio do *encoder*, que é um dispositivo para medição de ângulo de giro do parafuso) mostrados na tela do microcomputador em tempo real. Este equipamento possui as seguintes funções:

Medição de força tensora, torque total, torque na rosca, torque na cabeça, alongamento e ângulo, medição de ângulo por meio de dispositivo externo, cálculo dos coeficientes de atrito na rosca, atrito na cabeça, torque e rendimento.

Este traça, em tempo real, as seguintes curvas: Força x Torque total, Força x Torque na cabeça, Força x Torque na rosca, Força x Alongamento, Força x Ângulo, Torque x Ângulo e Força-Torque x Ângulo.

As características técnicas deste equipamento estão mostradas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características Técnicas - Modelo DTT 100-300

Medição de força	0 a 100 kN - Resolução 0,1 kN
Medição de Torque	10 a 300 Nm - Resolução 0,1 Nm
Erro de exatidão	< 1% em toda escala
Linearidade	< 1% em toda escala
Repetibilidade	< 0,5%

Procedimento de realização dos ensaios

- a) Realização de exame visual nos parafusos;
- b) Identificação dos parafusos de 1 a 15;
- b) Selecionar o Software;
- c) Inserir os dados:
 - d – diâmetro;
 - p – passo;
 - d_2 – diâmetro primitivo;
 - d_3 – diâmetro do núcleo da rosca;
 - d_k – diâmetro de assentamento da cabeça do parafuso;
 - d_b – diâmetro de passagem do furo do espaçador;
 - l_k – comprimento de engastamento;
 - $\sigma_{0,2}$ – tensão de escoamento do parafuso (Estado simples de tensão).
- d) Escolher o tipo de ensaio a realizar - Ensaio Torque x Ângulo;
- e) Velocidade de ensaio 5 rpm;
- f) Estabelecer a condição de parada;
- g) Montar o parafuso, espaçador e dispositivo tipo cunha sobre a parte frontal da célula de carga. Na parte traseira insira a pinça com a contra peça roscada e finalmente faça o aparafusamento manual até que a cabeça do parafuso encoste sobre a superfície de apoio do espaçador;
- h) Acoplar o dispositivo de transmissão do torque, não permitindo que o mesmo encoste-se à superfície do espaçador;
- i) Iniciar o aperto com plotagem da curva em tempo real. O parafuso é apertado por meio de um momento torcional contínuo, com uma força pré-fixada, atuando dentro da zona elástica do parafuso. Ao atingir esta força o ensaio é interrompido;
- j) Após ensaio, retirar o parafuso.

Características do espaçador

Dureza: 50 –55 HRc;

Rugosidade: Ra = 0,2 – 0,4 μm ; ($R_t \leq 5 \mu\text{m}$);

Sem revestimento.

Características da contra peça roscada

Dureza: 50 – 55 HRc;

Classe de Tolerância: 6g;

Sem revestimento.

Após cada ensaio, os dispositivos (contra peça roscada e espaçador) foram limpos com ar comprimido e macho limpador de roscas.

Ao sinal de qualquer dano em quaisquer dos dispositivos, eles eram substituídos por novos com as mesmas características.

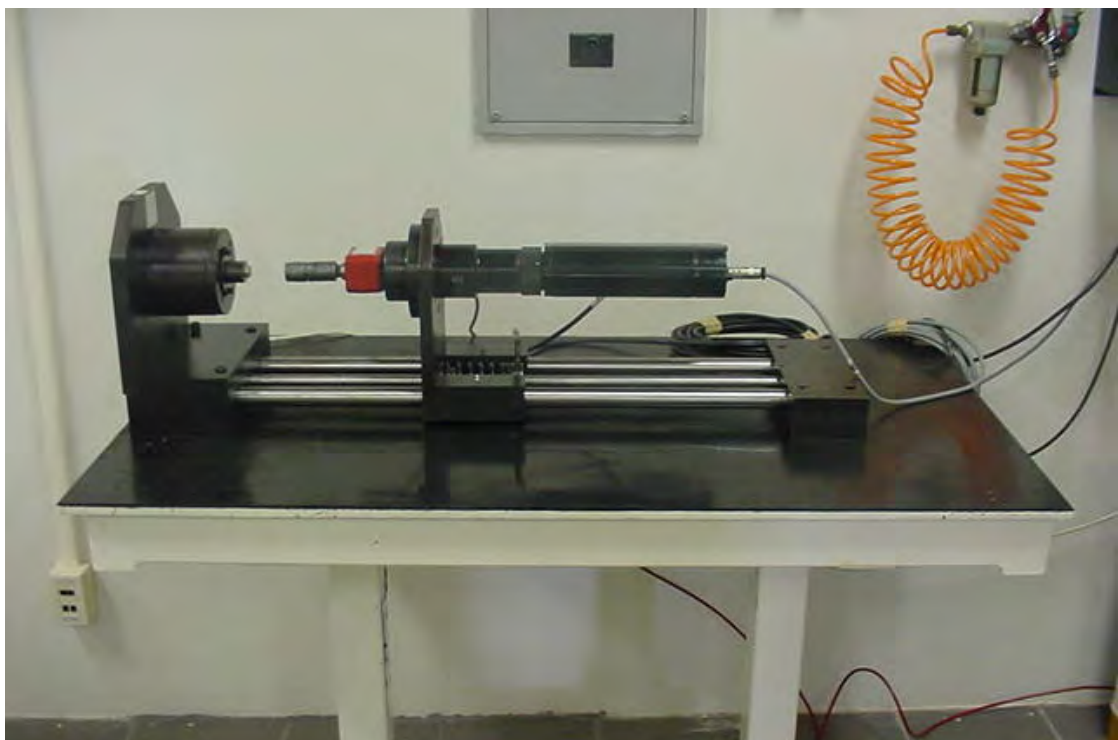


Figura 3.5 - Panorâmica do Determinador Torque x Tensão Metalac utilizado nos ensaios.

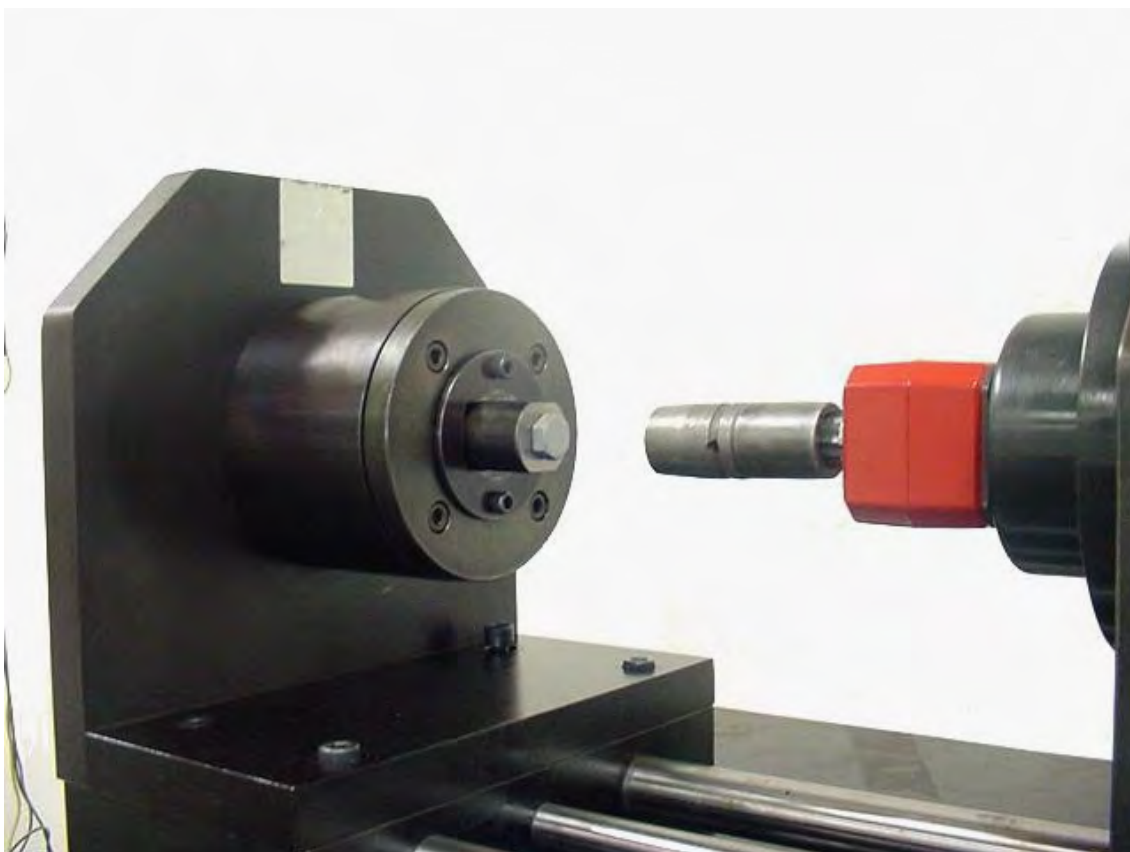


Figura 3.6 - Vista do parafuso com o espaçador montado na célula de carga



Figura 3.7 - Detalhe da seqüência de montagem: 1 - Parafuso, 2 - espaçador, 3 - arruela cônica própria do equipamento, 4 - inserto roscado montado na pinça na parte traseira do dispositivo.

e) Análise química do revestimento:

Utilizando software específico EDAX do microscópio eletrônico de varredura de marca Philips XL 30, realizou-se análise química dos revestimentos da tecnologia tipo A e tipo B.

f) Medição da espessura dos revestimentos (flanco do filete, face de apoio da cabeça e face sextavada)

As medições foram realizadas utilizando o equipamento CMI Serie 900 que é um instrumento dedicado à realização de medidas de espessura de camadas pelo sistema de fluorescência de raios X. O instrumento contém uma baixa energia laser para focalizar a lente de raios X por meio da amostra. O laser é em arsenato de gálio classe II, capacidade menor que 1 μ W e operações em modo contínuo. O equipamento é próprio para medições de espessuras de camada pelo método não destrutivo. É capaz de medir espessura de qualquer camada, simples, múltiplas, ou ligas, sobre quase qualquer substrato. O instrumento também é capaz de determinar a concentração da solução, composição da liga, e análises de materiais. A medição das espessuras é realizada mediante calibração prévia do instrumento com o padrão do material a ser medido. Na Figura 3.8 mostra-se a fotografia do instrumento.

Para o flanco do filete as medidas foram tomadas de modo manual devido limitação do equipamento com relação ao ângulo de incidência do raio X e sua reflexão, na região específica a ser medida (flanco de pressão)

Para a face de apoio da cabeça e face sextavada as medidas foram tomadas de modo automático através de um sistema de gradeamento de medidas. Não foram verificadas limitações de medição em virtude de ser uma área plana e normal a incidência do laser.



Figura 3.8 – Equipamento CMI Série 900 utilizado para medições de espessura.

g) Levantamento topográfico do revestimento

O equipamento de fluorescência de raios X, CMI Serie 900, possui um software específico chamado Surfer[®] que é um programa gráfico baseado em um sistema de gradeamento que permite visualizar a distribuição das espessuras ao longo de uma seção medida, o que por sua vez nos dá informações sobre a topografia da superfície.

h) Fotografias e análises microscópicas e ao microscópio eletrônico de varredura

Buscando avaliar e conhecer os revestimentos no que diz respeito à sua tipologia, forma, distribuição, estrutura, espessuras e mecanismos de desgaste, foram realizadas fotografias e análises dos mesmos para uma melhor compreensão dos resultados. Foram utilizados os microscópios

eletrônico de varredura, fabricado pela empresa Philips, modelo XL30 e o ótico fabricado pela Zeiss, modelo Neophot 32, mostrados nas Fig. 3.9 e 3.10.



Figura 3.9 - Microscópio eletrônico de varredura Philips XL 30.



Figura 3.10 - Microscópio ótico Neophot 32.

i) Ensaio de coeficiente de atrito

Os ensaios foram realizados utilizando o Determinador Torque – Tensão, fabricado pela Metalac, que é um equipamento destinado a ensaios em juntas rigidamente fixadas através de célula de carga sensorizada por extensômetros com conexão a sistema de aquisição de sinais.

Neste ensaio são combinadas as grandezas Força (lida através da célula de carga) e Torque Total, Torque na rosca e Torque na cabeça (lidos também através da célula de carga mas através de outra ponte resistiva na mesma célula). Os resultados desse ensaio são apresentados na forma de tabela de dados e não Curvas X-Y como nos demais ensaios.

Os resultados principais deste ensaio são o cálculo dos coeficientes:

Coeficiente de Torque (K)

Coeficiente de atrito na rosca (μ_g)

Coeficiente de atrito na cabeça (μ_K)

Rendimento (η)

Estes coeficientes são obtidos pelas seguintes equações:

$$K = \frac{M_A}{F_M \cdot d} \quad (3.1)$$

$$\mu_g = \frac{M_{GA} - F_M \cdot 0,16 \cdot p}{F_M \cdot d_2 \cdot 0,58} \quad (3.2)$$

$$\mu_K = \frac{2 \cdot M_{GK}}{F_M \cdot D_{KM}}, e, D_{KM} = \frac{D_B + d_k}{2} \quad (3.3)$$

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left[\frac{4}{1 + \left(\frac{d_3}{d_2} \right)} \cdot \left[\frac{p}{\pi d_2} + 1,155 \mu g \right] \right]^2}} \quad (3.4)$$

onde : M_{GA} é o Torque na rosca;

M_{GK} é o Torque na cabeça;

M_A é o Torque total;

F_M é a força de montagem;

d_2 é o diâmetro primitivo da rosca;

d é o diâmetro nominal do parafuso;

D_B é o diâmetro de passagem do parafuso nas juntas;

d_k é o diâmetro externo da superfície de apoio da cabeça do parafuso ou porca;

p é o passo da rosca;

d_3 é o diâmetro do núcleo da rosca do parafuso.

Os procedimentos de realização dos ensaios foram os mesmos do item (d), a exceção do tipo de ensaio que neste caso foi o de coeficiente de atrito.

3.2.2 Etapa 2 - Após ensaios

i. Exame visual

O buscou exame visual verificar após ensaios o estado das superfícies em contato, da rosca do parafuso com a contra peça roscada e da face de apoio da cabeça do parafuso com o espaçador.

ii. Ensaio de resistência à corrosão em névoa salina

Com intuito de avaliar a resistência à corrosão após os ensaios no Determinador Torque – Tensão nas condições de parada de 49 kN e 63 kN os parafusos foram submetidos ao ensaio de corrosão em névoa salina conforme Norma Fiat 50180 método A1.

iii. Medição da espessura do revestimento sobre a face de apoio da cabeça

As medições foram realizadas utilizando o equipamento CMI Serie 900 que é um instrumento dedicado a realização de medidas de espessura de camadas pelo sistema de fluorescência de raios X.

Para a face de apoio da cabeça as medidas foram tomadas de modo automático através de um sistema de gradeamento de medidas.

O objetivo aqui foi verificar o valor da espessura remanescente após ensaios.

iv. Levantamento topográfico do revestimento a partir das medições de espessura realizadas utilizando software específico

Utilizou-se um equipamento de fluorescência de raios X, CMI Serie 900, Ele possui um software específico chamado Surfer[®] que é um programa gráfico baseado em um sistema de gradeamento que permite visualizar a distribuição das espessuras ao longo de uma seção medida, o que por sua vez fornece informações sobre a topografia da superfície.

v. Fotografias e análises microscópicas e ao microscópio eletrônico de varredura

Utilizando os mesmos equipamentos listados em (h) condição de recebimento, buscou-se avaliar o grau de dano promovido aos revestimentos após aplicação das cargas.

3.2.3 Etapa 3 - Reusabilidade

i. Ensaio no Determinador Torque Tensão na condição de parada de 49 kN

Buscando avaliar o desempenho dos revestimentos com relação a consistência dos valores de atrito, bem como, o grau de deterioração dos mesmos procedeu-se uma série de apertos e desapertos por um número determinado de vezes em uma mesma peça.

O procedimento para avaliação da reusabilidade constou de:

1. Realização do ensaio conforme previsto na etapa 1 - Condição de Recebimento.
2. Limpeza dos dispositivos com ar comprimido e macho limpador de roscas para eliminação dos resíduos de revestimento livres.
O parafuso testado pela primeira vez sofreu também uma limpeza somente com ar comprimido de modo a eliminar os resíduos de revestimentos livres entre a região filetada e sobre o apoio da cabeça.
3. Para o mesmo parafuso repetiu-se os passos 1 e 2. Para um número máximo de 4 apertos.

As demais avaliações de medições de espessura, levantamento topográfico, fotografias, análises microscópicas e análise química foram também realizadas seguindo os procedimentos anteriormente listados.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, segundo a metodologia experimental descrita detalhadamente no Capítulo 3.

4.1 – Caracterização do Sistema Tribológico

Neste tópico do capítulo serão avaliados diversos parâmetros, com o objetivo de caracterizar os dois sistemas tribológicos em estudo e também de verificar os seus desempenhos nas situações de ensaio.

4.1.1 – Avaliação dos Aspectos Gerais da Superfície do Parafuso

Os parafusos apresentaram-se com diversas particularidades com relação aos aspectos de cor, resíduos de trabalho mecânico, deformações nos filetes, excesso de revestimento, e outras. Na Figura 4.1 mostra-se a condição normal de recebimento dos parafusos das tecnologias “A” e “B”. Verificam-se as irregularidades superficiais na rosca, comuns ao processo de fabricação, manuseio e entrega; caracterizadas como aceitáveis.

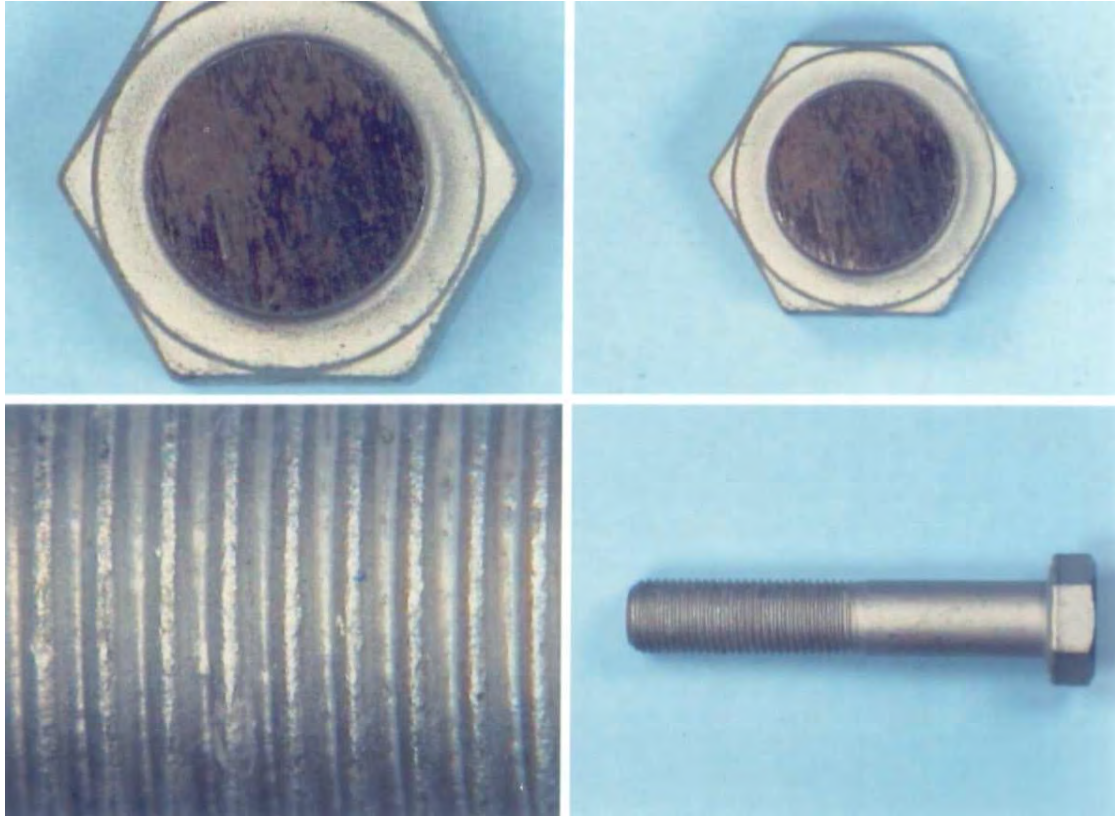


Figura 4.1 – Condição de recebimento dos parafusos.

4.1.2 – Resistência à Corrosão.

Os parafusos suportaram com êxito 480 horas em ensaios de corrosão em névoa salina não sendo detectados focos de corrosão

4.1.3 – Ensaio de Tração e Torque x Ângulo

As características mecânicas verificadas no ensaio de tração foram: limite de resistência ao escoamento médio de 97,5 kN contra 86,5 kN prescrito e limite de resistência à tração médio de 106,9 kN contra 95,8 kN prescrito. Os resultados encontrados no ensaio de tração são apresentados nas Fig. 4.2 e 4.3.

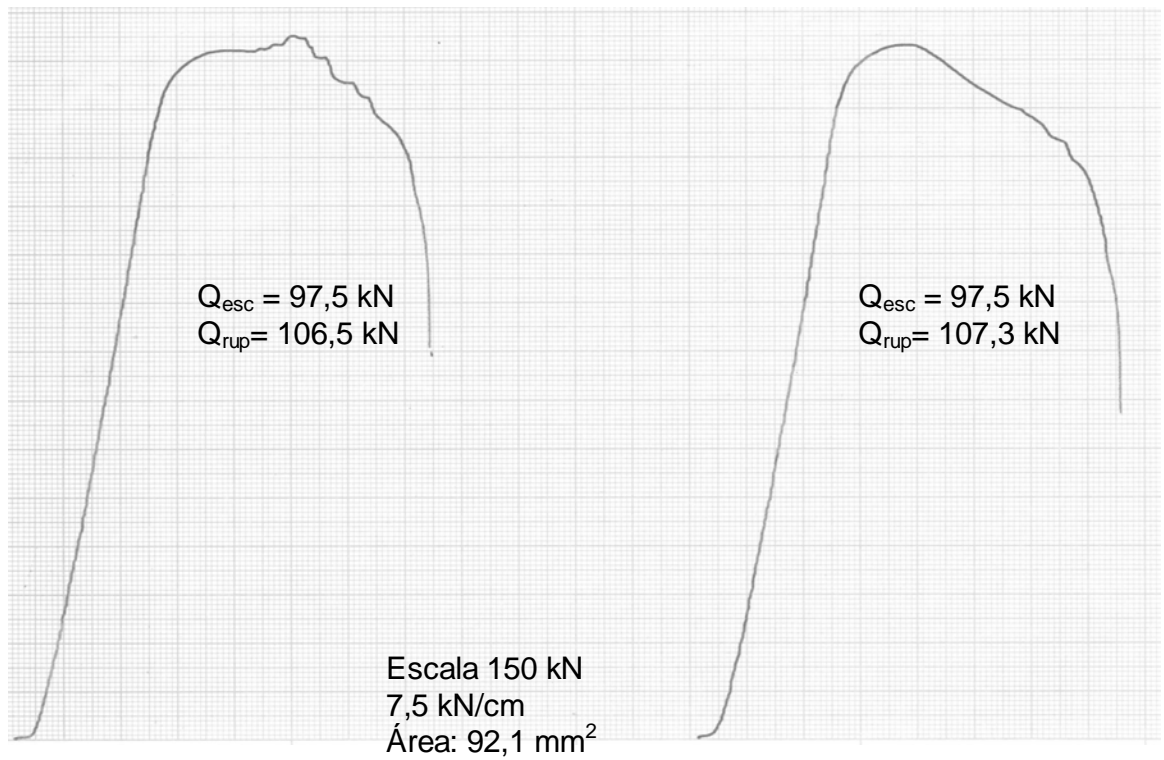


Figura 4.2 – Ensaio de tração Tecnologia "A".

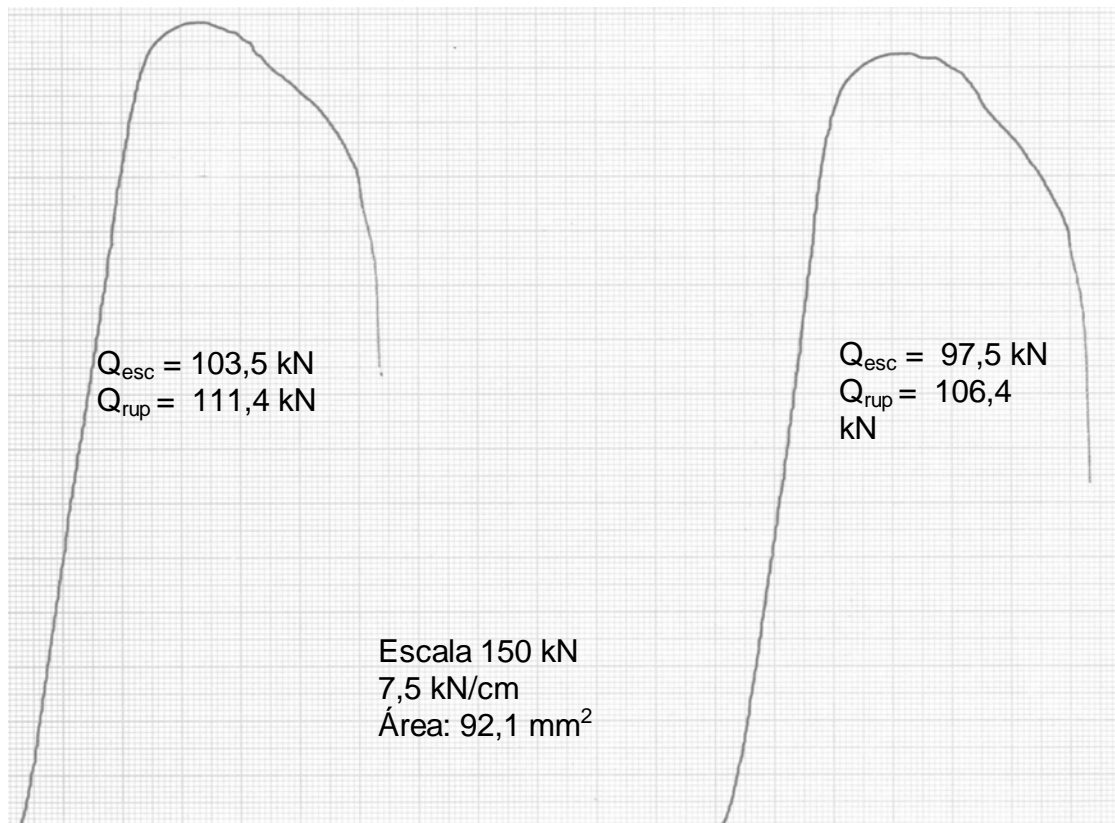


Figura 4.3 – Ensaio de tração Tecnologia "B".

A força tensora de escoamento obtida do ensaio de Força -Torque x Ângulo foi de 74,2 kN, aonde optou-se para os ensaios uma força de escoamento de 70 kN, dentro da zona elástica do parafuso. Nas Figuras 4.4 e 4.5 apresentam-se as curvas Força -Torque x Ângulo para as tecnologias “A” e “B”. Nessas figuras observa-se que a força tensora foi praticamente a mesma para as duas tecnologias, enquanto os valores de torque para a tecnologia A foram em torno de 20% superiores.

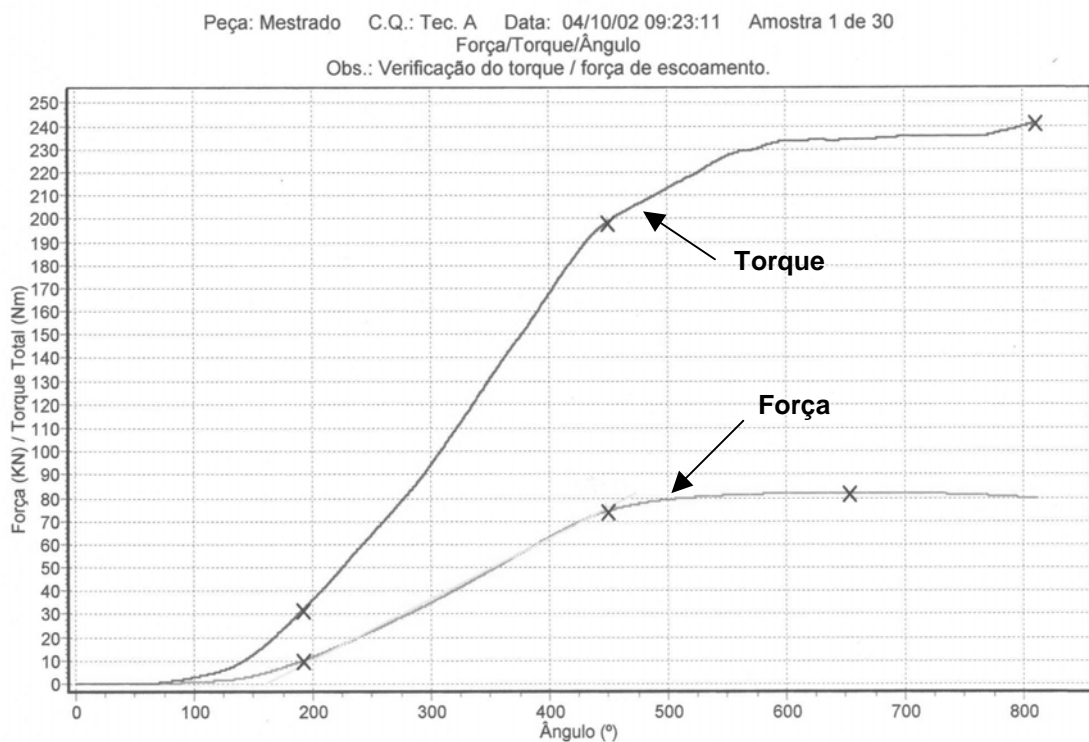


Figura 4.4 – Curva Força -Torque x Ângulo Tecnologias “A”.

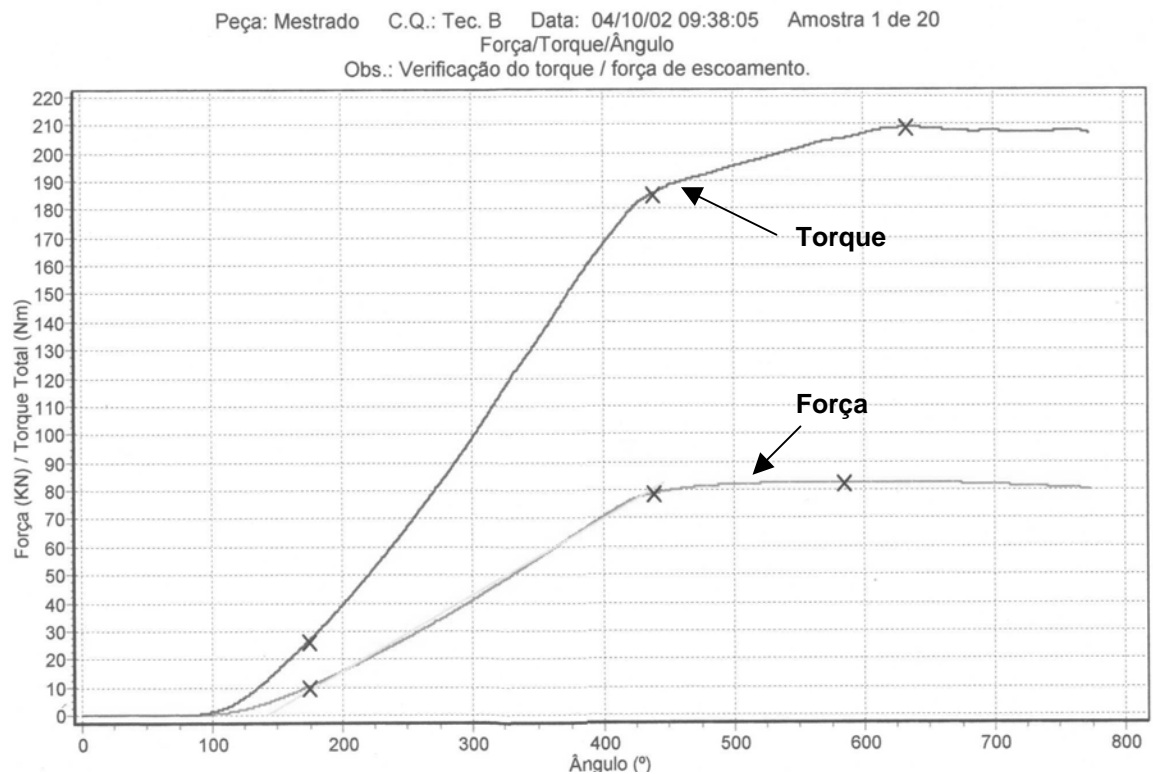


Figura 4.5 – Curva Força -Torque x Ângulo Tecnologia “B”.

4.1.4 – Resultados de Análise Química

A análise química do revestimento revelou os seguintes elementos principais para a Tecnologia “A” conforme Tab. 4.1 e Fig. 4.6.

Tabela 4.1 – Resultados da análise química – Tecnologia “A”.

Elemento Químico	Percentual em peso (%)
Alumínio	12,6
Silício	21,6
Ferro	3,2
Zinco	51,9
Oxigênio	10,54

**EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized**

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	10.54	23.96	0.0319	1.1146	0.2712	1.0016
AlK	12.61	16.99	0.0458	1.0367	0.3490	1.0039
SiK	21.66	28.05	0.0951	1.0666	0.4116	1.0000
FeK	3.28	2.14	0.0338	0.9515	0.9872	1.0969
ZnK	51.91	28.87	0.4786	0.9229	0.9990	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
O K	91.94	16.85	1.13	5.46
FeL	54.73	17.37	1.55	3.15
ZnL	648.57	22.98	0.40	28.22
AlK	189.13	28.04	0.78	6.75
SiK	366.39	32.08	0.54	11.42
FeK	37.30	16.34	1.96	2.28
ZnK	253.55	14.95	0.65	16.96

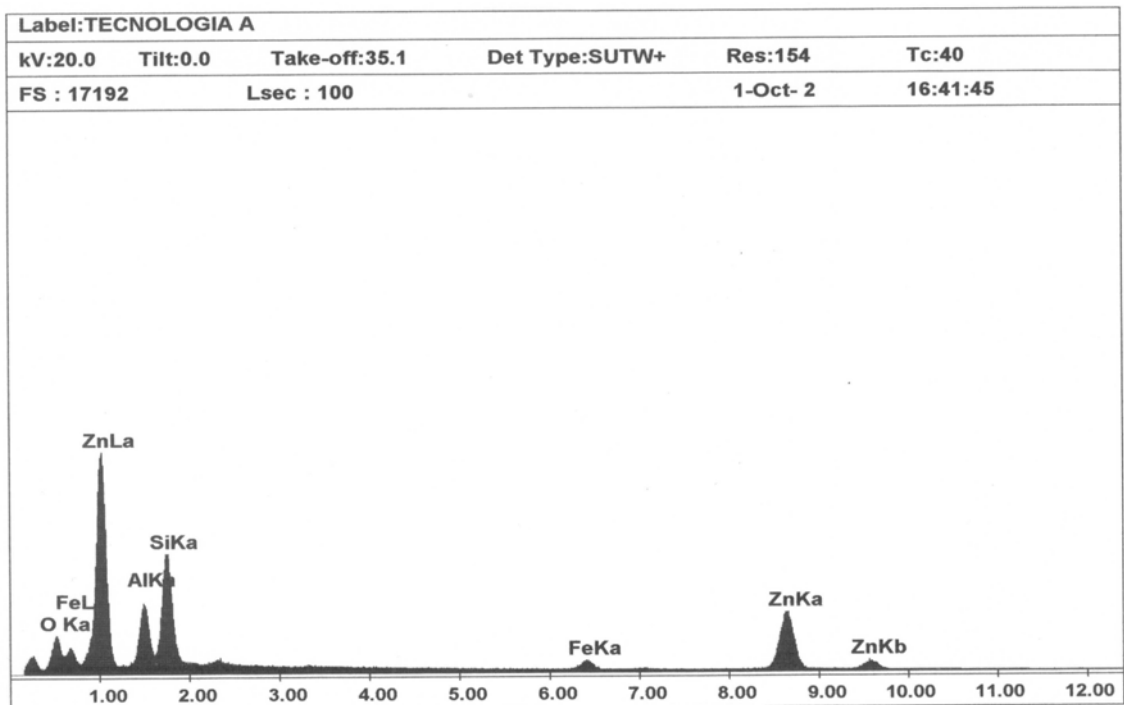


Figura 4.6 – Resultados da análise química para a Tecnologia “A”.

Para a Tecnologia “B” os resultados da análise química são apresentados na Tab. 4.2 e na Fig. 4.7.

Tabela 4.2 – Resultados da análise química – Tecnologia “B”.

Elemento Químico	Percentual em peso (%)
Alumínio	6,45
Silício	24,26
Ferro	1,57
Zinco	46,16
Titânio	9,32
Oxigênio	12,23

EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	12.23	27.34	0.0294	1.1130	0.2155	1.0012
AlK	6.45	8.55	0.0243	1.0352	0.3625	1.0050
SiK	24.26	30.89	0.1168	1.0651	0.4516	1.0004
TiK	9.32	6.96	0.0842	0.9506	0.9363	1.0150
FeK	1.57	1.01	0.0157	0.9497	0.9766	1.0739
ZnK	46.16	25.25	0.4235	0.9210	0.9961	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
O K	65.82	10.36	1.51	6.35
FeL	33.05	17.25	2.44	1.92
ZnL	227.63	20.52	0.79	11.09
AlK	78.18	23.11	1.47	3.38
SiK	349.87	25.29	0.63	13.83
TiK	126.08	17.91	1.08	7.04
FeK	13.45	14.15	4.45	0.95
ZnK	174.51	9.57	0.89	18.23

Label:TECNOLOGIA B

kV:20.0	Tilt:0.0	Take-off:35.1	Det Type:SUTW+	Res:154	Tc:40
FS : 7451	Lsec : 77			1-Oct-2	17:02:05

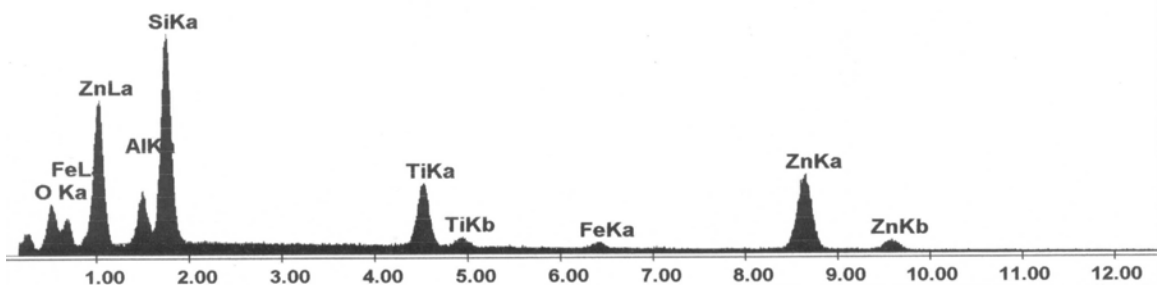


Figura 4.7 – Resultados da análise química para a Tecnologia “B”.

Os resultados de composição química para as duas tecnologias, mostram as presenças de elementos químicos como Al, Zn, Fe, Si, Ti e O. A presença do oxigênio, nas quantidades medidas (acima de 10% em peso) sugere a formação de filmes óxidos superficiais. O comportamento de cada óxido predominante é que irá determinar o desempenho do sistema tribológico. Isso se torna relevante com a variação da carga, ou seja, em baixas cargas o filme interfacial pode ser um, mas a sua elevação pode destruir essa camada e expor outra, de maior ou menor resistência ao cisalhamento (Hutchings, 1995 e Zum Gahr, 1992). Outro ponto que deve ser destacado é a presença do titânio na tecnologia B. Esse metal tem baixa afinidade química com o Fe e quando interposto na interface, em contato com aços, ele tende a oferecer baixa resistência ao cisalhamento.

4.1.5 – Avaliação da Espessura dos Revestimentos a Aspectos tridimensionais das Superfícies

Baseado no fato de que as regiões em contato do revestimento do parafuso no experimento são em seus filetes e sobre a face de apoio da cabeça do parafuso, as medições de espessura foram realizadas nestes pontos. Além dos filetes, outra região significativa que foi em uma das faces sextavadas da cabeça do parafuso, também foi avaliada.

As medições de espessura apresentaram os seguintes resultados conforme Tabelas 4.3 e 4.4 tecnologias “A” e “B” respectivamente.

Tabela 4.3 – Resultados de medição de espessura – Tecnologia “A”.

-	Flanco da rosca μm	Face de apoio da cabeça - μm	Face sextavada μm
Nº de pontos	34	61	73
Média	5,41	4,24	3,58
Desvio	0,85	0,75	0,68
Maior valor	6,71	5,96	5,70
Menor valor	4,03	3,06	2,12

Tabela 4.4 – Resultados de medição de espessura – Tecnologia “B”.

-	Flanco da rosca μm	Face de apoio da cabeça - μm	Face sextavada μm
Nº de pontos	38	61	75
Média	14,96	16,54	21,34
Desvio	2,88	3,62	6,77
Maior valor	22,92	23,59	39,86
Menor valor	11,56	10,47	10,38

Verificaram-se variações de espessuras entre os locais de medição e elas são devidas às formas da peça, ao tipo de deposição do revestimento e parâmetros de processo. Normalmente a especificação de espessura para revestimentos é dada sobre uma faixa. Os resultados de espessura da tecnologia “B” foram bastante superiores aos da tecnologia “A”.

Para uma melhor compreensão da distribuição das espessuras sobre as superfícies revestidas foi realizado um levantamento topográfico por meio do *software* específico do equipamento CMI Série 900 onde se verificou que a superfície é composta de irregularidades, picos e vales de espessuras. Nas Figuras 4.8 e 4.9 mostram-se as topografias dos revestimentos para uma das faces sextavadas das tecnologias “A” e “B”.

Nessas figuras observam-se as diferentes topografias das superfícies revestidas e inclusive a diferença nas dimensões do recobrimento, que são muito superiores para a tecnologia B.

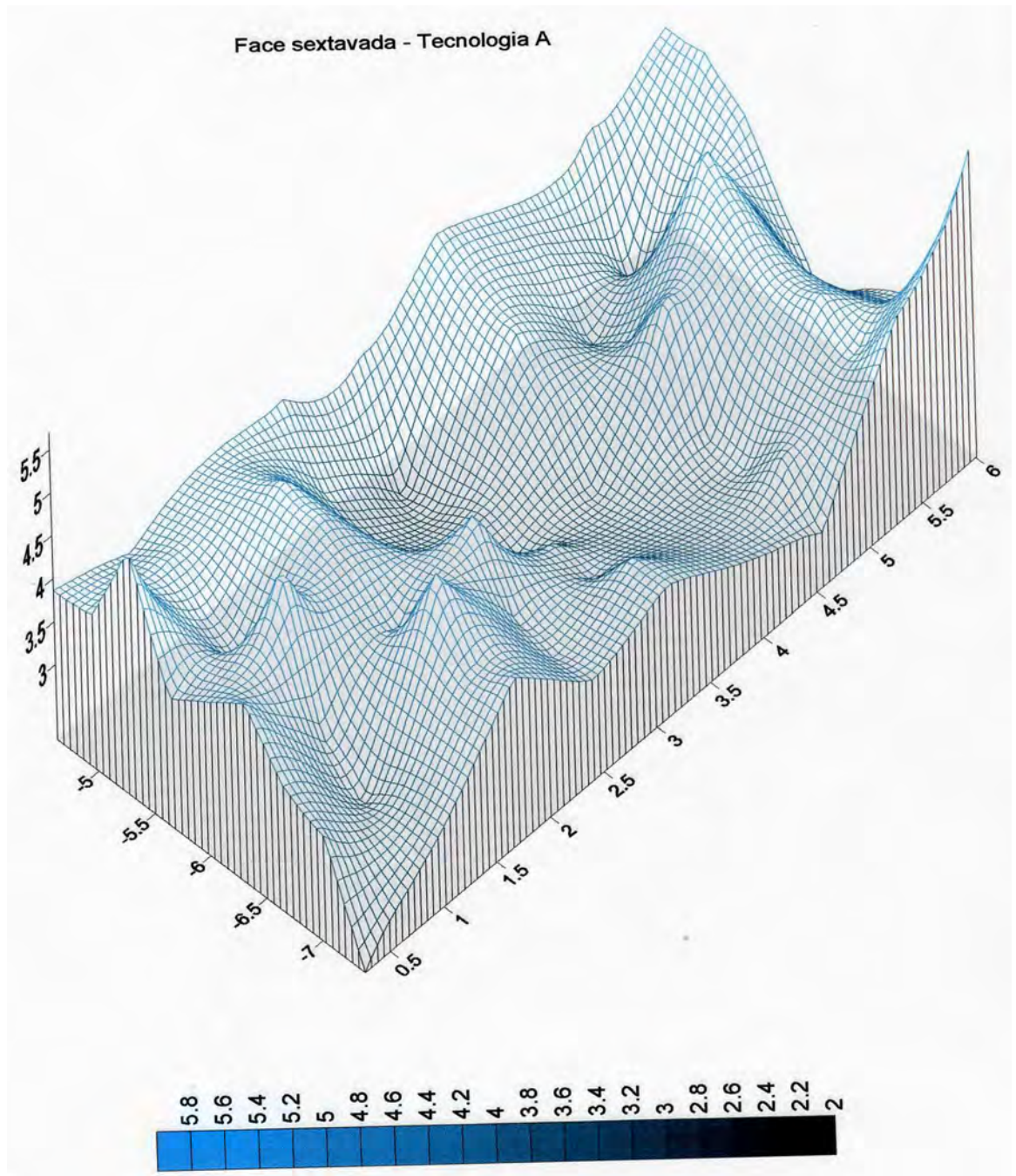


Figura 4.8 – Levantamento topográfico face sextavada – Tecnologia “A”.

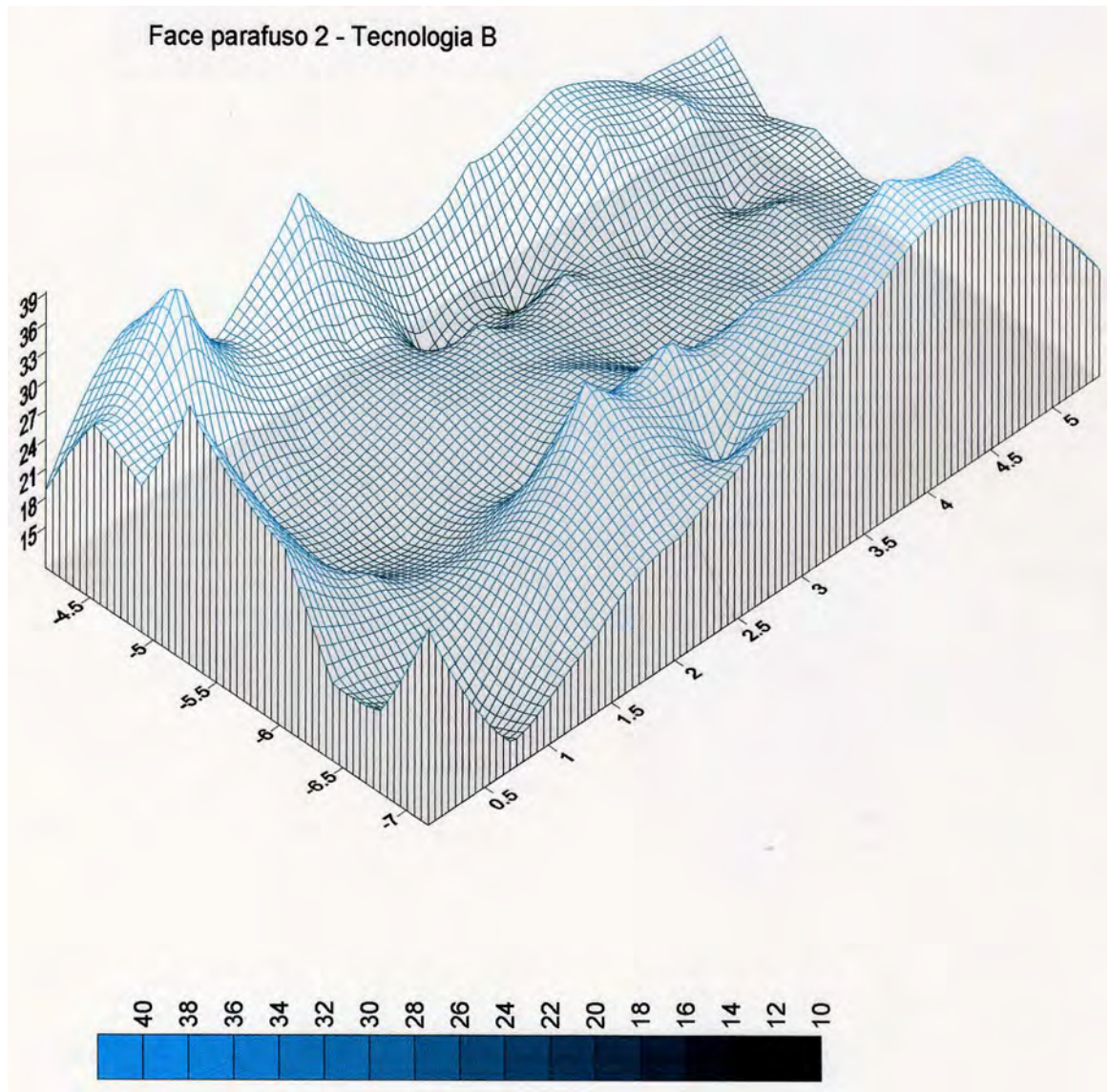


Figura 4.9 – Levantamento topográfico face sextavada – Tecnologia “B”.

4.1.6 – Avaliações das Superfícies em Contato

Buscando verificar se existiam diferenças significativas quanto à tipologia e aspecto de superfície dos revestimentos depositados, foram realizadas várias análises ao microscópio eletrônico de varredura comparando as duas tecnologias. Não foram verificadas diferenças significativas quanto à tipologia e aspecto superficial. Na condição de recebimento, verificou-se que a superfície do revestimento depositado é bastante irregular com aparência de flocos depositados sobre a superfície e uma deposição lamelar quando observado em corte ao microscópio eletrônico de varredura.

Na Figura 4.10 evidencia-se a face de apoio da cabeça do parafuso na condição de recebimento. Para maiores aumentos pode-se verificar a aparência dos flocos de revestimento nas Fig. 4.11 e 4.12.

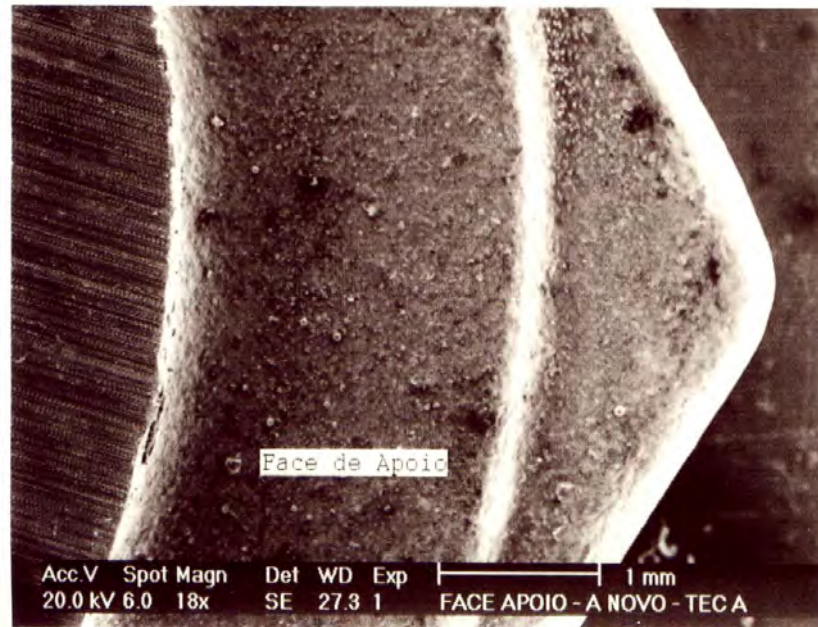


Figura 4.10 – Face de apoio da cabeça do parafuso na condição de recebimento.



Figura 4.11 – Maior ampliação (500x) da face de apoio da cabeça, os resíduos esféricos tratam-se de elementos estranhos à superfície (sujeiras na amostra).

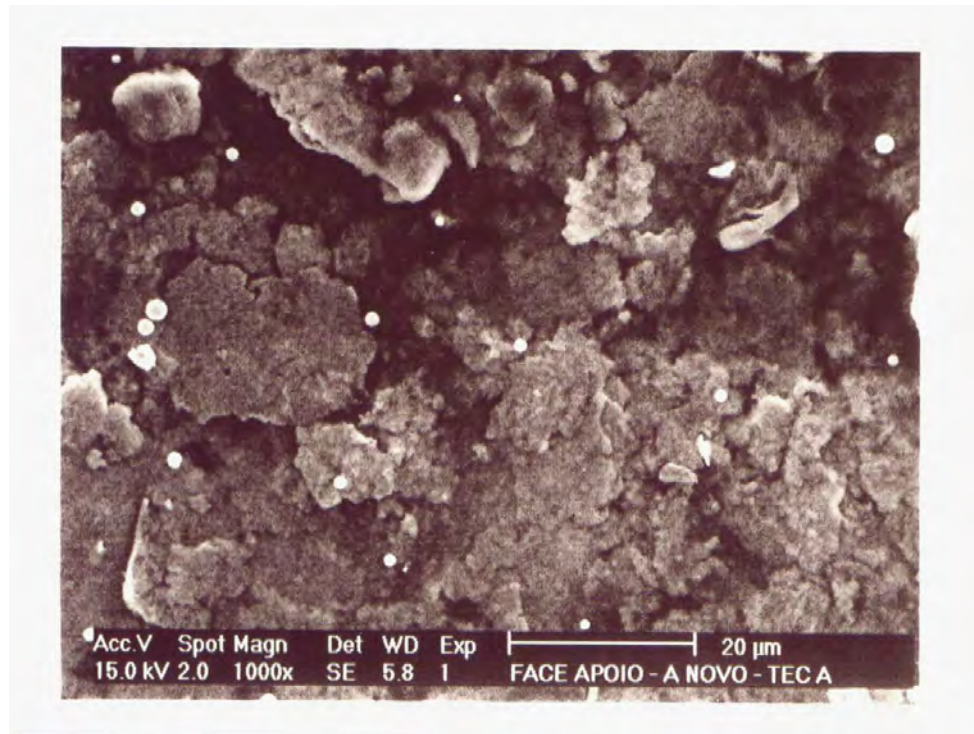


Figura 4.12 – Maior ampliação (1000x) da face de apoio da cabeça, verifica-se o revestimento depositado com aspecto de flocos.

Na Figura 4.13 mostra-se o revestimento depositado sobre a rosca do parafuso e na seqüência, nas Fig. 4.14 e 4.15 mostram-se os flancos de pressão em detalhe.

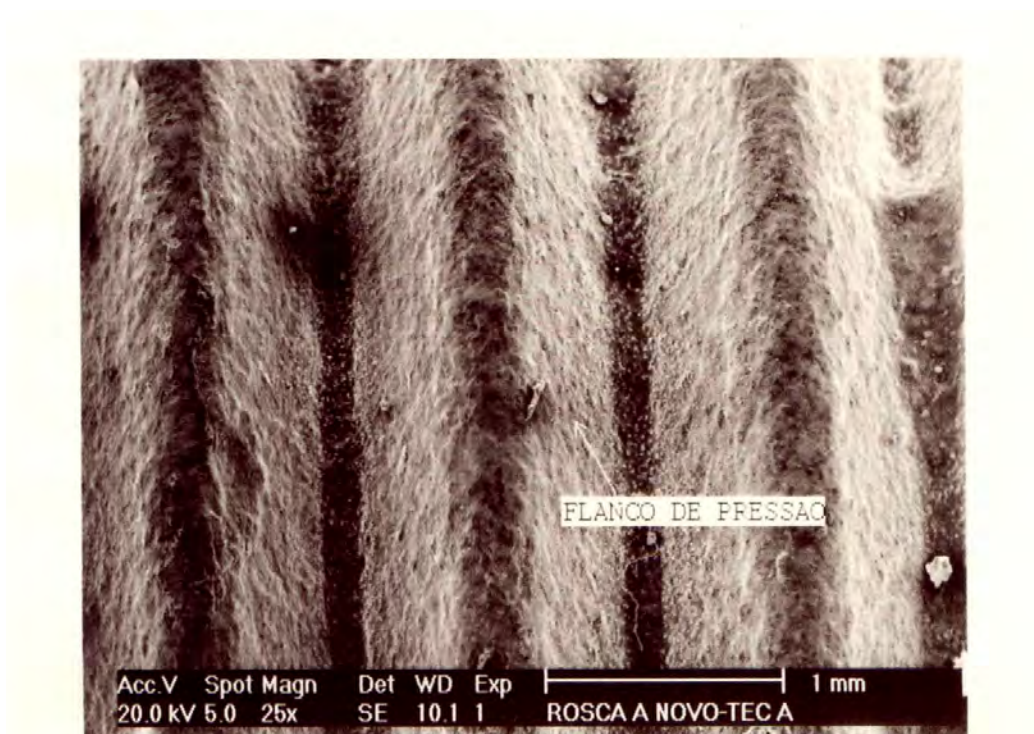


Figura 4.13 – Aspecto da rosca do parafuso na condição de recebimento.

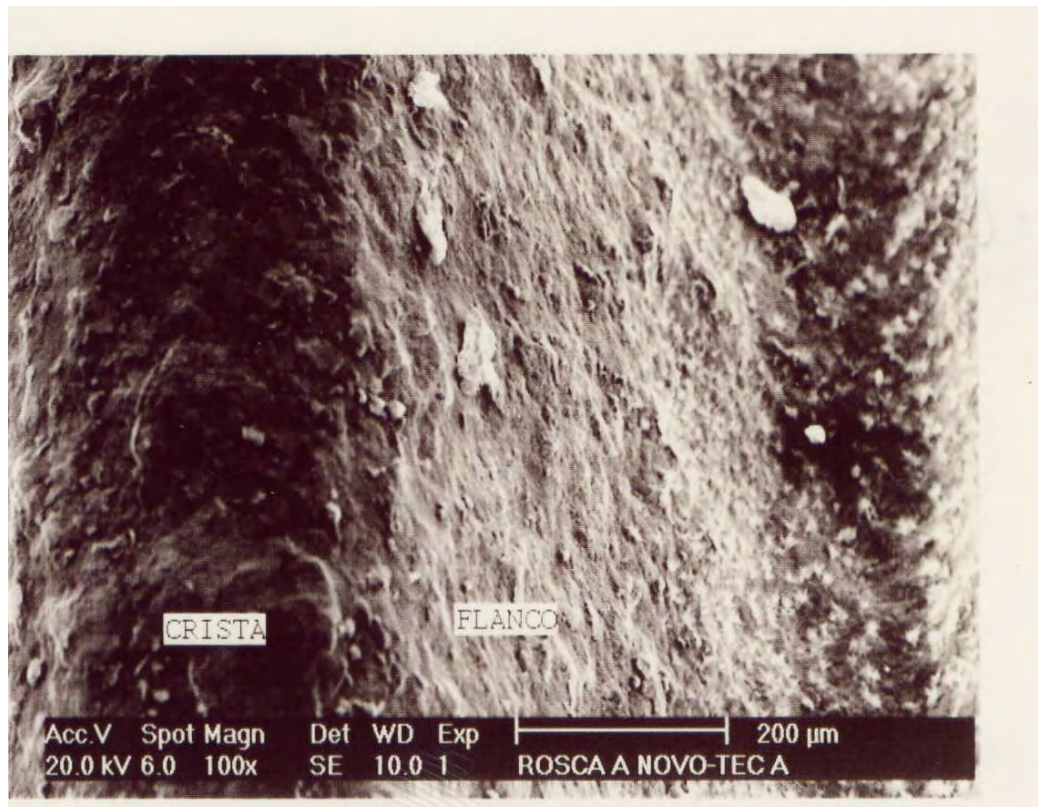


Figura 4.14 – Detalhe do flanco de pressão.

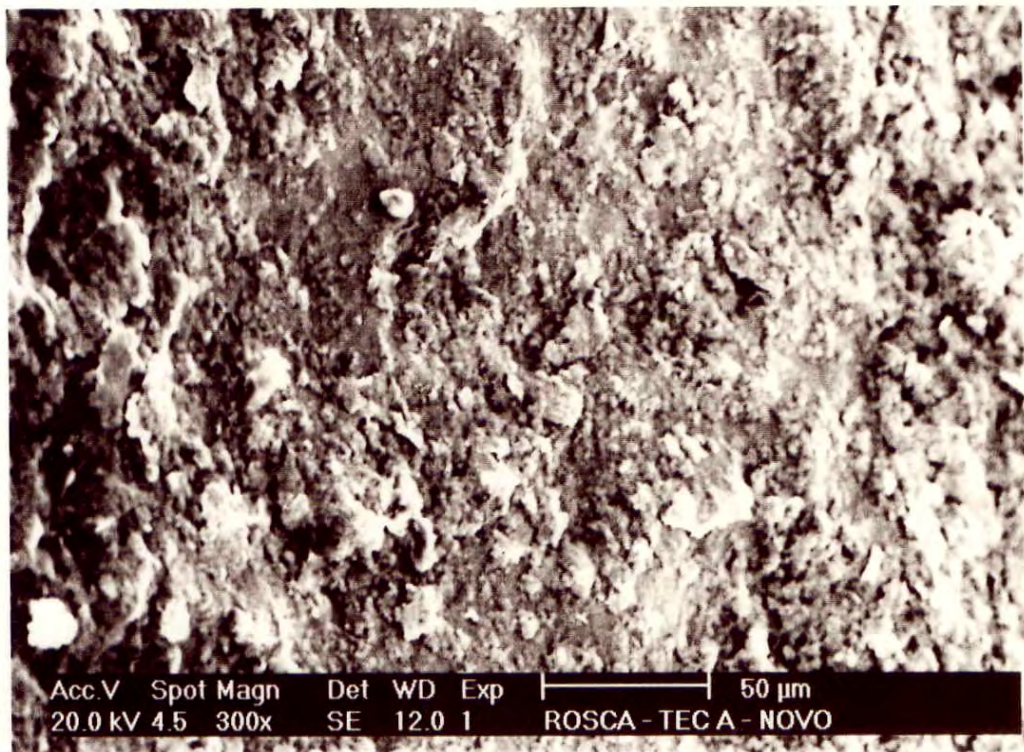


Figura 4.15 – Detalhe do flanco de pressão com uma maior ampliação (300x).

De maneira análoga, buscando avaliar os revestimentos depositados sobre o substrato, sua forma de deposição e espessuras nas regiões de interesse, foram realizadas micrografias dos parafusos das tecnologias “A” e “B” e observadas no microscópio eletrônico de varredura.

Os resultados mostraram que os revestimentos apresentam uma forma de deposição lamelar, que no fundo dos filetes é uma região de acúmulo de revestimento e as medições de espessura confirmaram as maiores espessuras verificadas para a tecnologia “B”. Nas Figuras 4.16 e 4.17 mostram-se filetes em detalhes, evidenciando a camada revestida.

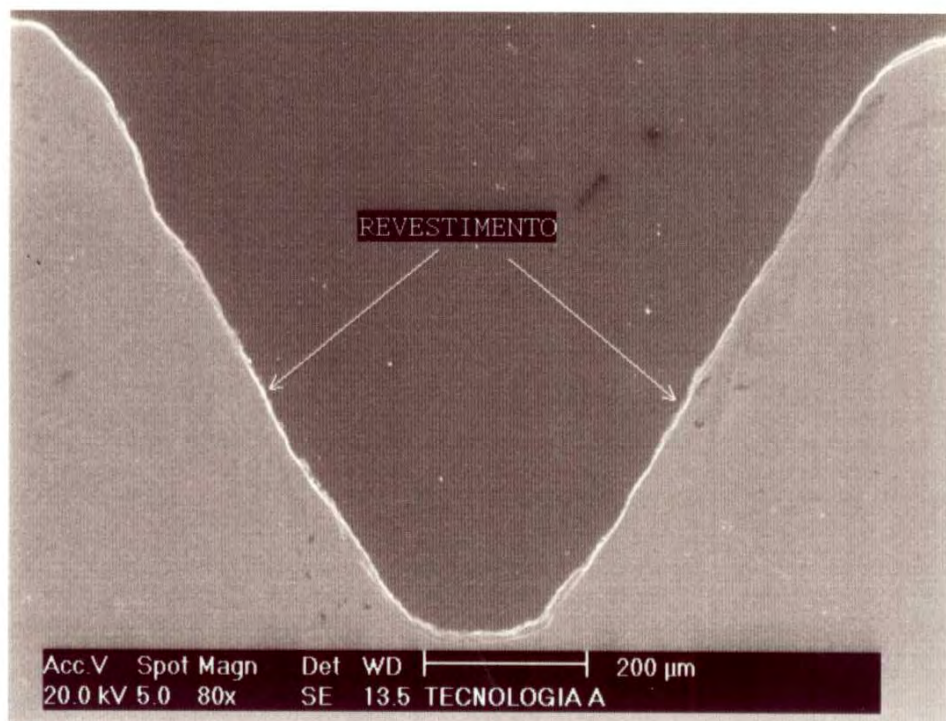


Figura 4.16 – Aspecto do revestimento depositado de coloração branca delineando o flanco e o fundo do filete da rosca - Tecnologia “A”.

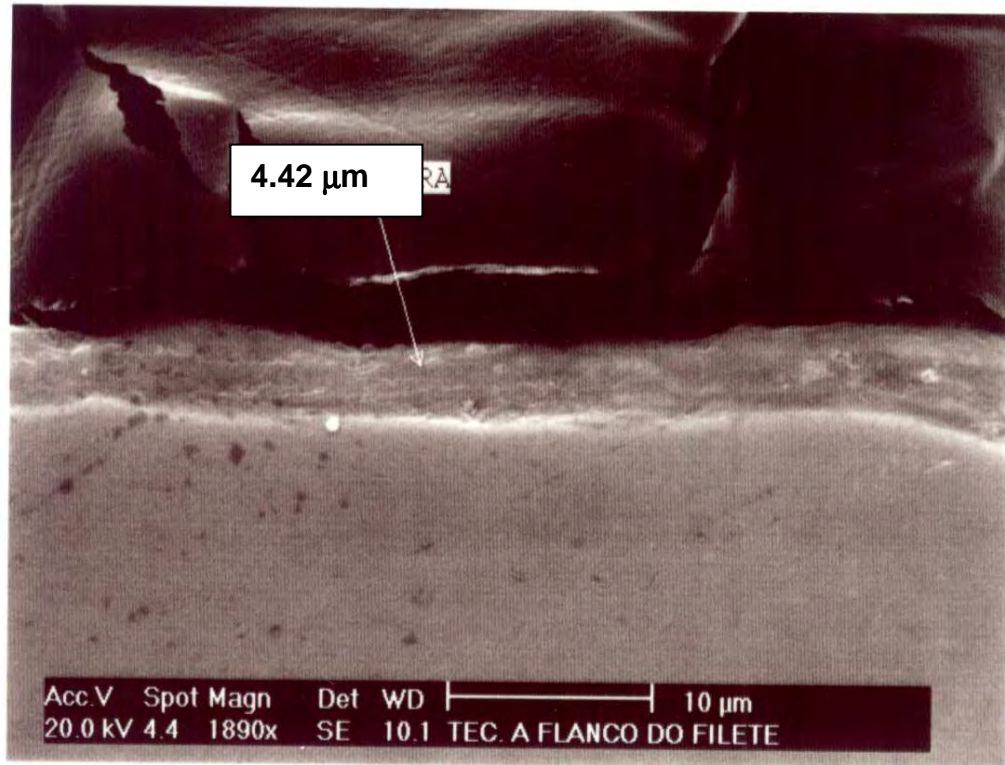


Figura 4.17 – Detalhe do revestimento depositado sobre o flanco da rosca. Tecnologia “A”.

Nas Figuras 4.18 e 4.19 mostram-se detalhes das camadas revestidas no fundo do filete e na face de apoio do parafuso (cabeça), respectivamente. Nota-se a grande diferença na espessura revestida, no mesmo parafuso, mas medidas em diferentes regiões.

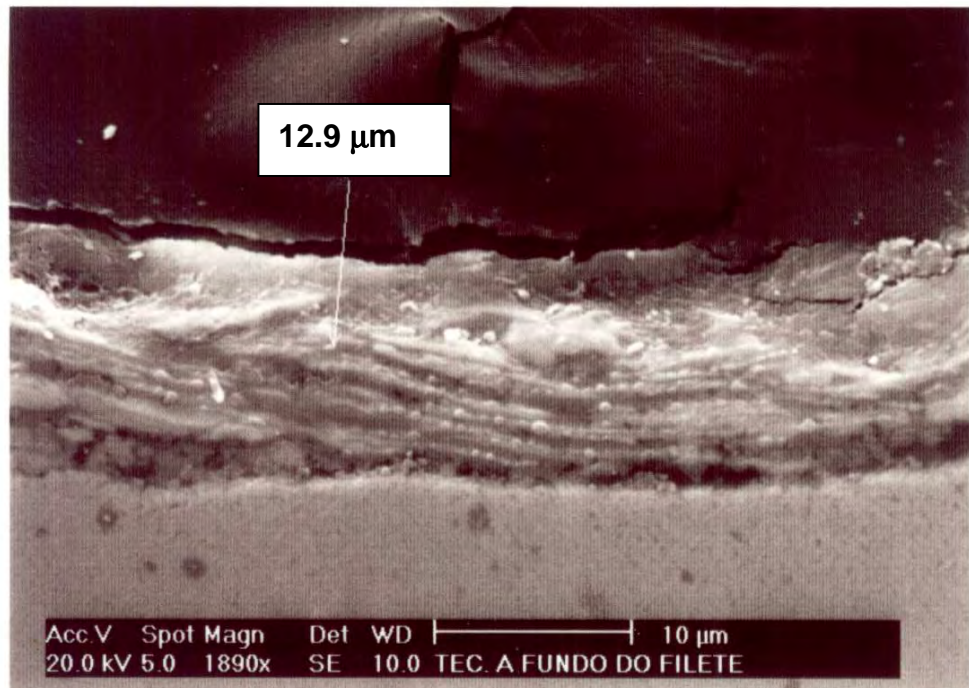


Figura 4.18– Detalhe do revestimento depositado sobre o fundo do filete da rosca. Tecnologia “A”.

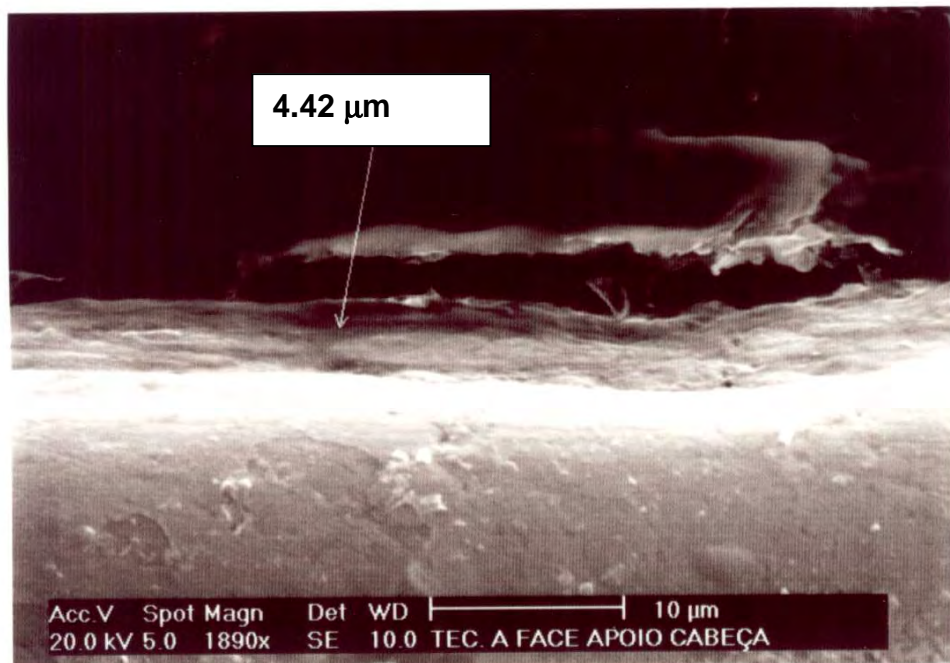


Figura 4.19 – Detalhe do revestimento depositado sobre a face de apoio da cabeça - Tecnologia “A”.

Nas Figuras 4.20 a 4.23 mostram-se, agora para a tecnologia B, os aspectos das superfícies recobertas.

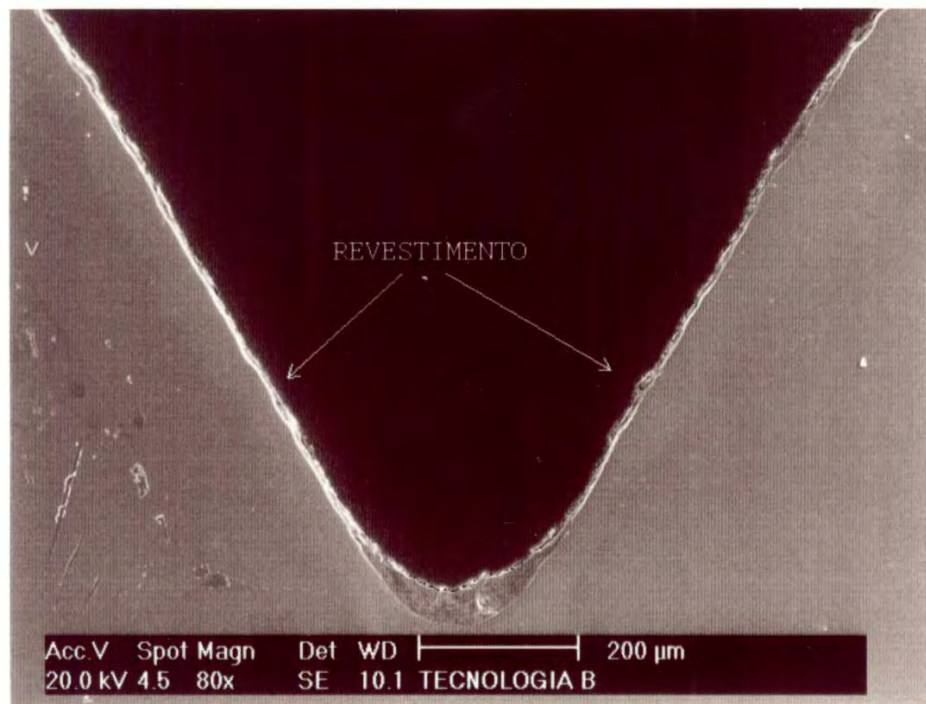


Figura 4.20 – Aspecto do revestimento depositado de coloração branca delineando o flanco e o fundo do filete da rosca - Tecnologia “B”.

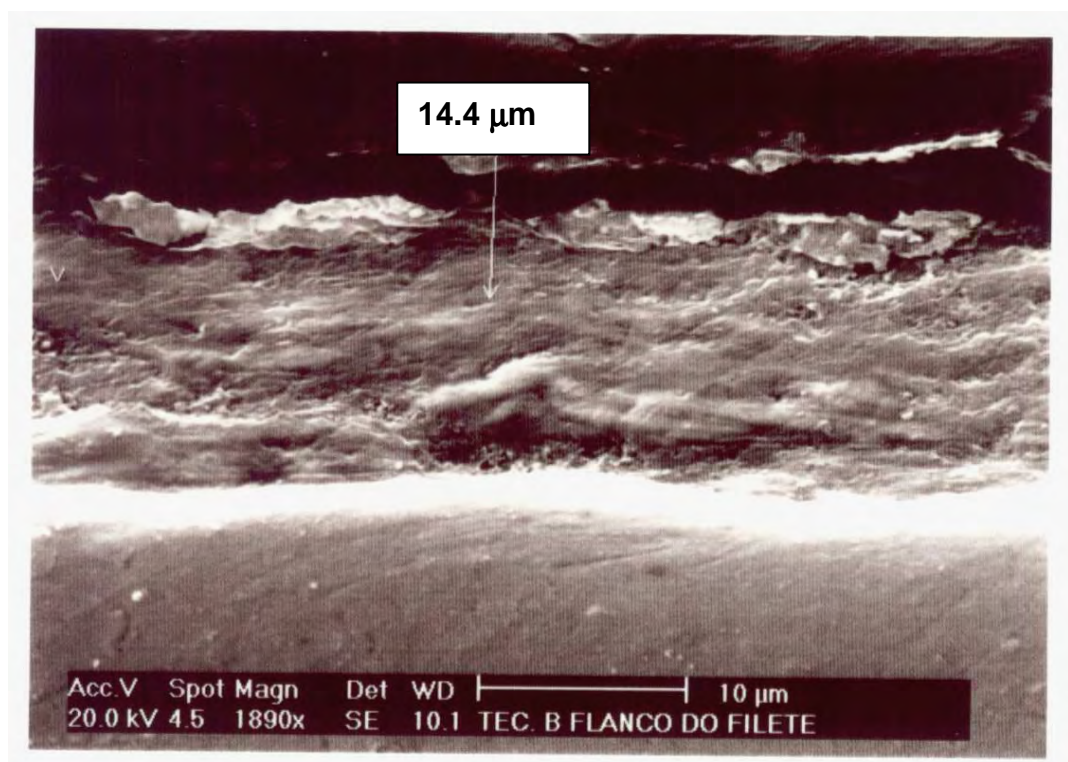


Figura 4.21 – Detalhe do revestimento depositado sobre o flanco da rosca - Tecnologia “B”.

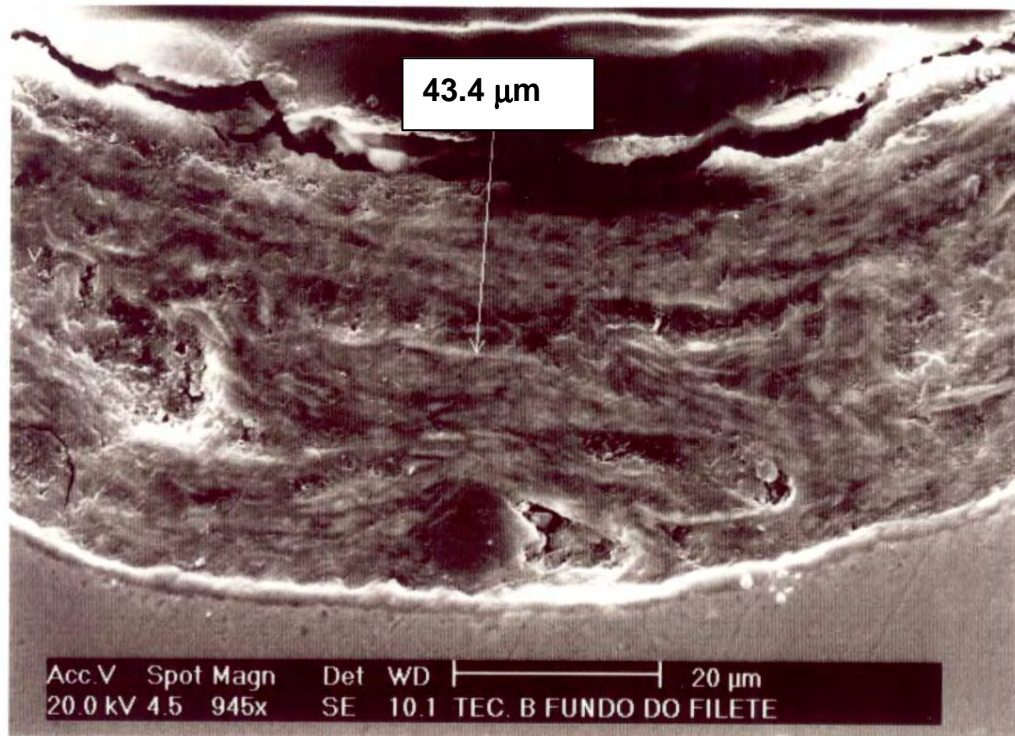


Figura 4.22– Detalhe do revestimento depositado sobre o fundo do filete da rosca - Tecnologia “B”.

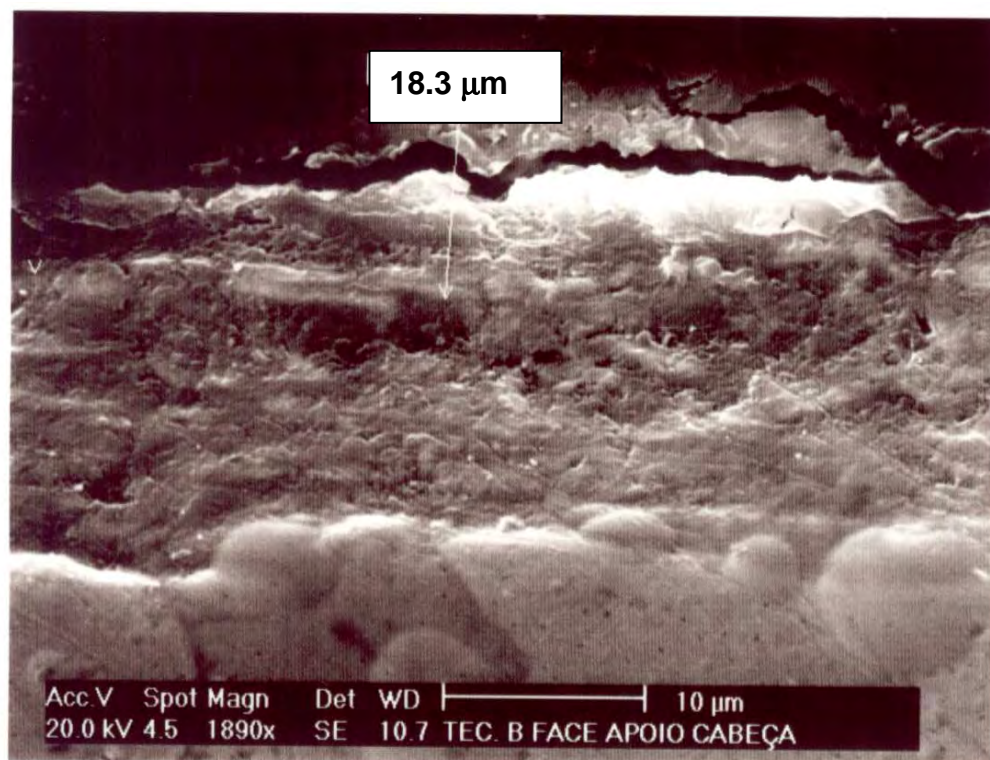


Figura 4.23 – Detalhe do revestimento depositado sobre a face de apoio da cabeça. Tecnologia “B”.

Nas Figuras 4.20 a 4.23 podem ser observadas as grandes diferenças nas espessuras de revestimentos nas superfícies. Dessa forma, assim como na tecnologia A, o método de deposição não garante a homogeneidade na espessura.

Na Figura 4.24 mostram-se os componentes que caracterizam o sistema tribológico, parafuso-espaçador e contra peça roscada, que foram montados no determinador Torque - Tensão para a realização dos ensaios de coeficiente de atrito. O parafuso é o elemento girante, espaçador e contra peça roscada permanecem fixos no equipamento. O movimento ocorre entre a superfície de apoio da cabeça do parafuso e a superfície sem revestimento do espaçador e entre a superfície revestida dos filetes do parafuso e a superfície nua da contra peça roscada.

Considerou-se no modelo as superfícies do espaçador e da contra peça roscada como duras e indeformáveis e também os parafusos de teste, especificamente os revestimentos, como uma superfície mole (deformável).

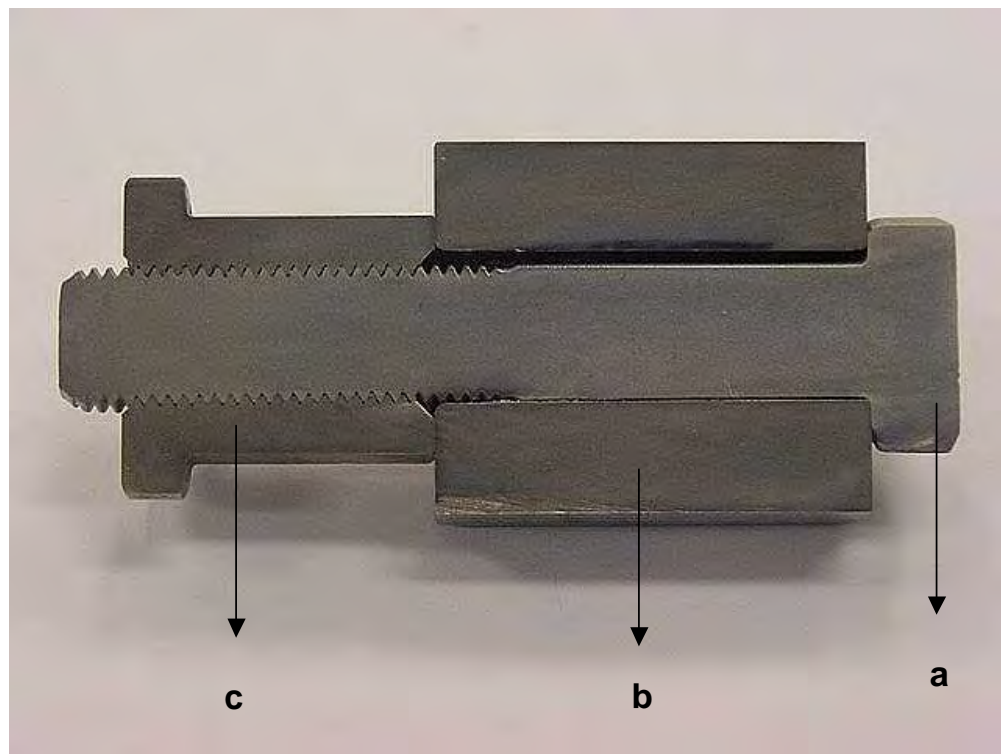


Figura 4.24 – Vista em corte da montagem: a – parafuso revestido; b – espaçador; c – contra-peça roscada.

4.1.7 – Resultados de Coeficiente de Atrito

Os resultados dos ensaios de coeficientes de atrito realizados para 15 amostras nas condições de parada de 49kN e 63 kN das tecnologias “A” e “B” são apresentados nas Fig. 4.25 a 4.28.

Relatório de Coeficiente de Atrito									
Peça: Mestrado-1		C.Q.: Tec. 'A'		Fornecedor Tecnologia 'A'					
Data Teste: 10/10/02 16:22:50				Amostras: 15 de 15					
Data Relatório: 11/10/02									
Observação: Tecnologia 'A' - Condição de Parada 49 kN									
Peça	Força Tensora (KN)	Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	K	μ G	μ K	η	μ Ges
1	49.0	120.8	49.0	71.7	0.205	0.124	0.195	0.841	0.163
2	49.0	113.3	44.2	69.0	0.193	0.109	0.188	0.865	0.152
3	49.0	118.2	48.9	69.2	0.201	0.124	0.188	0.841	0.159
4	49.0	122.0	49.7	72.2	0.207	0.127	0.197	0.837	0.164
5	49.1	129.7	49.2	80.5	0.220	0.125	0.219	0.840	0.175
6	49.1	115.8	48.5	67.2	0.196	0.122	0.183	0.844	0.155
7	49.0	120.0	49.9	70.0	0.204	0.127	0.191	0.836	0.161
8	49.0	123.5	49.4	74.1	0.210	0.126	0.202	0.839	0.166
9	49.1	119.4	48.8	70.5	0.203	0.124	0.192	0.842	0.160
10	49.0	114.8	49.2	65.6	0.195	0.125	0.179	0.840	0.154
11	49.1	114.8	48.4	66.4	0.195	0.122	0.181	0.844	0.154
12	49.1	113.1	48.0	65.0	0.192	0.121	0.177	0.846	0.151
13	49.0	114.3	49.2	65.0	0.194	0.125	0.177	0.840	0.153
14	49.1	121.9	46.4	75.5	0.207	0.116	0.205	0.854	0.164
15	49.1	115.7	48.4	67.2	0.196	0.122	0.183	0.844	0.155
Média	49.0	118.5	48.5	69.9	0.201	0.123	0.190	0.844	0.159
Média+3S	49.2	132.3	52.8	82.9	0.225	0.136	0.226	0.865	0.179
Média-3S	48.9	104.6	44.1	56.9	0.178	0.109	0.155	0.822	0.139

Figura

4.25 – Resultados de coeficiente de atrito para a tecnologia “A”. Condição de parada 49kN.

Relatório de Coeficiente de Atrito									
Peça: Mestrado-2		C.Q.: Tec. 'A'		Fornecedor Tecnologia 'A'					
Data Teste: 11/10/02 09:15:33				Amostras: 15 de 15					
Data Relatório: 11/10/02									
Observação: Tecnologia 'A' - Condição de Parada 63 kN									
Peça	Força Tensora (KN)	Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	K	μ G	μ K	η	μ Ges
1	63.0	141.8	62.8	79.0	0.187	0.124	0.167	0.842	0.147
2	63.0	142.5	61.3	81.2	0.188	0.120	0.172	0.848	0.148
3	63.1	142.5	62.5	80.0	0.188	0.123	0.169	0.843	0.148
4	63.0	148.7	61.4	87.2	0.197	0.120	0.185	0.847	0.155
5	63.0	141.2	61.4	79.8	0.187	0.120	0.169	0.847	0.147
6	63.0	145.4	62.2	83.1	0.192	0.122	0.176	0.844	0.151
7	63.1	142.3	62.1	80.2	0.188	0.122	0.170	0.845	0.148
8	63.0	143.0	62.1	80.8	0.189	0.122	0.171	0.844	0.149
9	63.1	145.3	60.1	85.1	0.192	0.117	0.180	0.852	0.151
10	63.0	153.5	61.7	91.7	0.203	0.121	0.194	0.846	0.160
11	63.1	146.8	61.6	85.2	0.194	0.121	0.180	0.847	0.153
12	63.0	137.2	60.5	76.6	0.182	0.118	0.162	0.850	0.142
13	63.0	148.7	62.1	86.5	0.197	0.122	0.183	0.844	0.155
14	63.1	142.9	62.0	80.9	0.189	0.122	0.171	0.845	0.148
15	63.1	161.8	61.7	100.1	0.214	0.121	0.212	0.846	0.170
Média	63.0	145.6	61.7	83.8	0.192	0.121	0.177	0.846	0.151
Média+3S	63.2	163.4	63.8	101.6	0.216	0.126	0.215	0.854	0.172
Média-3S	62.9	127.8	59.6	66.0	0.169	0.116	0.140	0.838	0.131

Figura 4.26 – Resultados de coeficiente de atrito para a tecnologia “A”.
Condição de parada 63 kN.

Relatório de Coeficiente de Atrito

Peça: Mestrado3B C.Q.: Tec "B" Fornecedor Tecnologia "B"
Data Teste: 22/10/02 14:47:39 Amostras: 15 de 15
Data Relatório: 22/10/02
Observação: Tecnologia "B" Condição de Parada 49 kn

Peça	Força Tensora	Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	K	μG	μK	η	μGes
1	49.0	133.7	42.2	91.5	0.227	0.103	0.249	0.874	0.182
2	49.0	136.5	40.4	96.1	0.232	0.097	0.262	0.883	0.186
3	49.1	129.3	43.1	86.2	0.220	0.106	0.234	0.870	0.175
4	49.0	134.6	43.2	91.3	0.229	0.106	0.248	0.869	0.183
5	49.1	136.2	41.0	95.1	0.231	0.099	0.259	0.880	0.185
6	49.1	130.1	41.6	88.5	0.221	0.100	0.240	0.878	0.176
7	49.1	133.7	40.5	93.2	0.227	0.097	0.253	0.883	0.181
8	49.1	142.5	42.4	100.1	0.242	0.103	0.272	0.874	0.194
9	49.1	124.8	44.2	80.6	0.212	0.109	0.219	0.865	0.168
10	49.1	128.0	42.4	85.6	0.217	0.103	0.233	0.874	0.173
11	49.1	135.6	40.8	94.8	0.230	0.098	0.258	0.882	0.184
12	49.0	126.4	42.5	83.9	0.215	0.104	0.228	0.873	0.171
13	49.0	134.8	40.2	94.6	0.229	0.096	0.257	0.884	0.183
14	49.0	118.9	42.5	76.3	0.202	0.104	0.208	0.873	0.160
15	49.0	131.6	41.3	90.3	0.224	0.100	0.246	0.879	0.178
Média	49.0	131.8	41.9	89.9	0.224	0.102	0.245	0.876	0.179
Média+3S	49.2	149.1	45.4	109.1	0.253	0.113	0.297	0.894	0.204
Média-3S	48.9	114.5	38.3	70.7	0.195	0.090	0.192	0.859	0.153

Figura 4.27 – Resultados de coeficiente de atrito para a tecnologia “B”.
Condição de parada 49 kN.

Relatório de Coeficiente de Atrito

Peça: Mestrado-4 C.Q.: Tec. ' B ' Fornecedor Tecnologia " B "
Data Teste: 16/10/02 17:15:01 Amostras: 15 de 15
Data Relatório: 16/10/02
Observação: Tecnologia ' B ' - Condição de Parada 63 kN

Peça	Força Tensora (KN)	Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	K	μG	μK	η	μGes
1	63.0	167.8	57.9	109.9	0.222	0.112	0.233	0.860	0.177
2	63.0	170.0	57.4	112.6	0.225	0.110	0.238	0.863	0.179
3	63.0	170.6	60.1	110.4	0.226	0.117	0.234	0.852	0.180
4	63.1	167.0	58.3	108.6	0.221	0.113	0.230	0.859	0.176
5	63.1	182.9	57.3	125.6	0.242	0.110	0.266	0.863	0.194
6	63.0	184.2	57.3	126.9	0.244	0.110	0.269	0.863	0.196
7	63.0	185.3	59.0	126.2	0.245	0.114	0.267	0.856	0.197
8	63.0	172.4	56.7	115.6	0.228	0.109	0.245	0.865	0.182
9	63.0	167.8	59.2	108.5	0.222	0.115	0.230	0.855	0.177
10	63.0	169.4	60.8	108.5	0.224	0.119	0.230	0.849	0.179
11	63.0	166.2	55.9	110.3	0.220	0.107	0.234	0.868	0.175
12	63.0	170.6	58.9	111.6	0.225	0.114	0.236	0.857	0.180
13	63.1	173.5	56.9	116.6	0.229	0.109	0.247	0.865	0.183
14	63.0	163.6	55.9	107.6	0.216	0.107	0.228	0.868	0.172
15	63.0	169.3	58.4	110.8	0.224	0.113	0.235	0.859	0.179
Média	63.0	172.0	58.0	114.0	0.227	0.112	0.241	0.860	0.182
Média+3S	63.1	192.3	62.3	134.5	0.254	0.123	0.285	0.877	0.205
Média-3S	62.9	151.8	53.7	93.5	0.201	0.101	0.198	0.843	0.159

Figura 4.28 – Resultados de coeficiente de atrito para a tecnologia “B”.
Condição de parada 63 kN.

Das tabelas anteriores tem-se:

Força tensora: é a força pré-estabelecida no determinador Torque x Tensão;

Torque total: é o somatório do torque na rosca e torque na cabeça do parafuso;

Torque na rosca: é a parcela de torque necessária para vencer o atrito na rosca;

Torque na cabeça: é a parcela de torque necessária para vencer o atrito entre a face de apoio da cabeça do parafuso e a superfície de apoio da contra peça;

Coefficiente k: Coeficiente de torque ou “*nut factor*” que é uma constante experimental, utilizada para avaliar ou descrever a relação entre o torque aplicado ao parafuso e a pré-carga alcançada.

O coeficiente de torque k é determinado por uma série de fatores tais como: coeficiente de atrito, tolerâncias dimensionais, entre outros e calculado por meio da Eq. (2.1).

Coefficiente de atrito na rosca μ_g : calculado por meio da Eq. (3.2).

Coefficiente de atrito na cabeça μ_k : calculado pela Eq. (3.3).

Rendimento η : Ao apertar um fixador, além da geração da força axial, ocorre, por ação das forças de atrito na rosca e na superfície de assentamento da cabeça, um momento torçor atuante no fixador, reduzindo assim sua capacidade de geração de força axial. O rendimento η é a relação entre a resistência no estado uniaxial (Tração) e a resistência no estado combinado de tensões (Tração e Torção) e calculado por meio da Eq. (3.4).

Coefficiente de atrito global μ_{ges} : É um coeficiente de referência para caracterizar o comportamento do atrito global de uma junta aparafusada quando não é possível a medição em separado do torque na rosca M_G , e do torque na cabeça M_k (DIN 946, 1991) sendo calculado como:

$$\mu_{ges} = \frac{MA/F_v - 0,159.P}{0,578d_2 + \frac{D_{k_M}}{2}} \quad (4.1)$$

Sendo: MA – torque total;
 Fv – força tensora;
 p – passo;
 d_2 – diâmetro primitivo da rosca;
 D_{KM} – diâmetro médio de atrito da cabeça do parafuso.

4.1.8 – Análises dos Resultados

Das análises dos resultados, tem-se:

1 - A relação Força x Torque na Rosca é aproximadamente linear, mostrando que o coeficiente de atrito na rosca, μ_g , é próximo de uma constante nas condições de parada de 49 kN e 63 kN (Jiang, 2001). Nas Figuras 4.29 e 4.30 apresentam-se os gráficos Força x Torque na Rosca para as tecnologias "A" e "B" na condição de parada de 63 kN para oito ensaios.

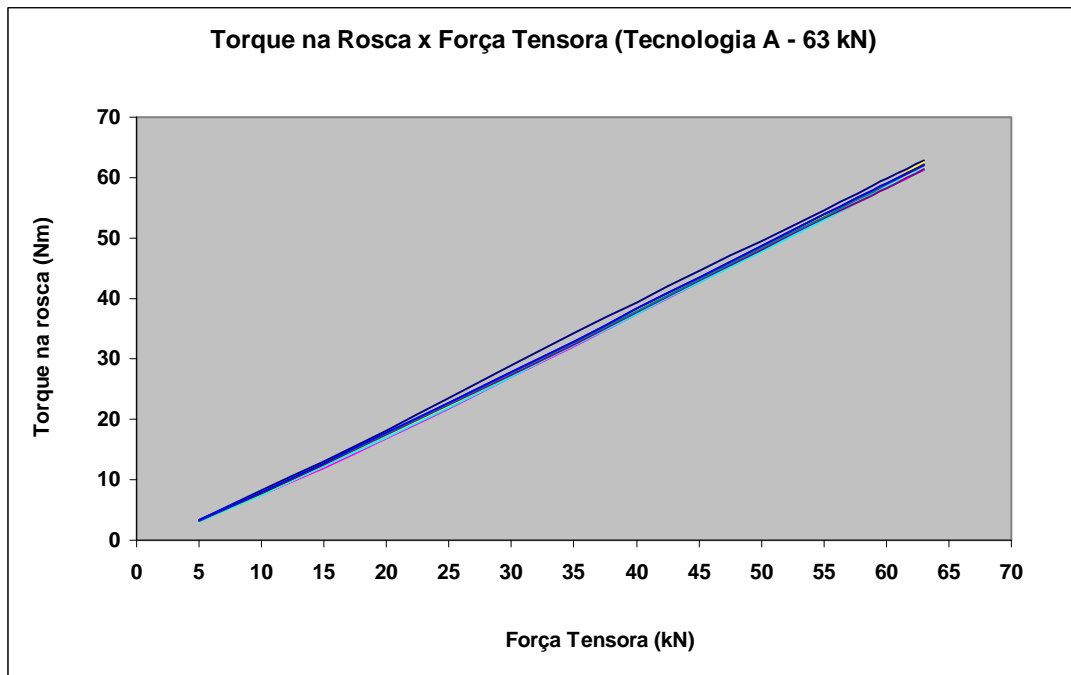


Figura 4.29 - Força x Torque na Rosca - Tecnologia A - 63 kN.

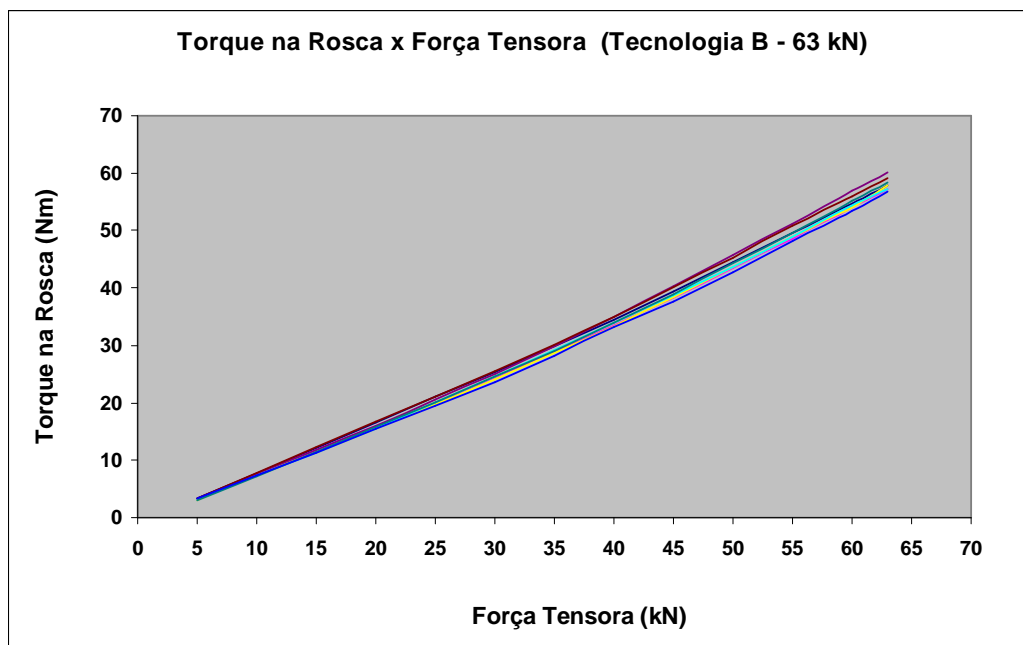


Figura 4.30 - Força x Torque na Rosca - Tecnologia B - 63 kN.

2 - A dispersão do coeficiente de atrito na rosca para 15 amostras testadas é apresentada nas Fig. 4.31 e 4.32 aonde se verifica que o coeficiente de atrito para a tecnologia "A" nas cargas de 49 kN e 63 kN é bastante homogêneo com uma mínima dispersão.

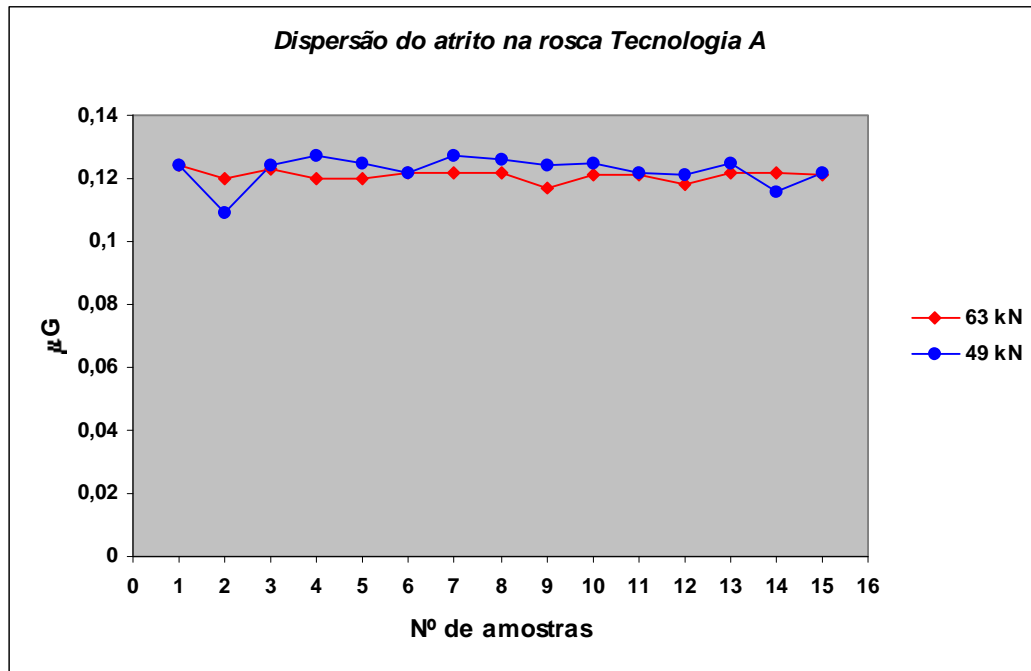


Figura 4.31 - Dispersão do atrito na rosca - Tecnologia A.

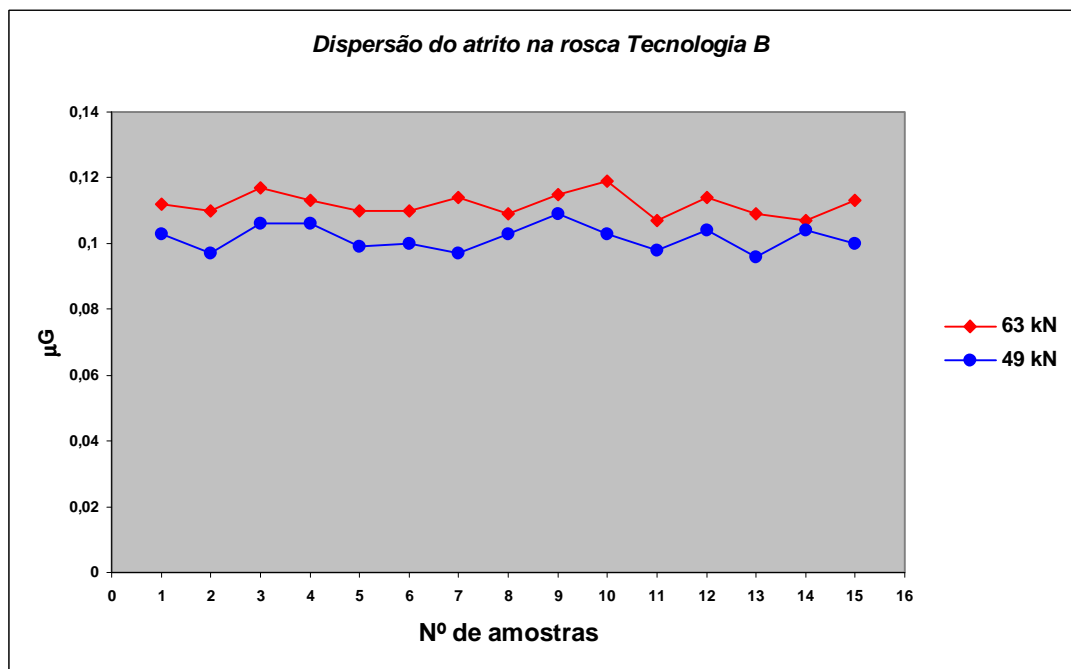


Figura 4.32 - Dispersão do atrito na rosca - Tecnologia B.

Para o coeficiente de atrito na rosca, a área aparente de contato é muito diferente da área real e de difícil quantificação. Baseado no fato de que foram mantidas fixas as variáveis de ensaio, a exceção do tipo de tecnologia e que também qualitativamente a área real de contato aumentou com o aumento da carga pode-se dizer que os coeficientes de atrito gerados na rosca na condição

de 49 kN e 63 kN foram bastantes homogêneos e independentes da área real de contato para a tecnologia A.

Já para a tecnologia "B" os resultados de atrito foram homogêneos nas cargas individuais de 49 kN e 63 kN, mas apresentando-se ligeiramente menor na carga de 49 kN. Nessas condições de interface, sugere-se que a natureza do revestimento, empregado pela tecnologia "B", com adições de cerca de 9,32% de Ti, em relação à "A", tenham aumentado a resistência ao cisalhamento na interface, principalmente em elevadas cargas.

3 - Dos experimentos realizados, a relação Força x Torque na Cabeça demonstrou não ser linear indicando que o coeficiente de atrito na cabeça apresenta grandes variações. As análises das Figuras 4.33 e 4.34 mostram a não linearidade. Resultados semelhantes foram obtidos por Jiang, (2001). Da Equação 3.3 verifica-se a dependência inversa do coeficiente de atrito na cabeça, μ_k , com D_{KM} , que é o diâmetro efetivo de atrito da cabeça do parafuso sobre a contra-peça. A variação de μ_k é causada pela alteração da área real de contato com a variação da carga. Tal fato pode ser verificado nas Fig. 4.61 e 4.65 aonde se verifica a alteração da área real de contato com o aumento da carga.

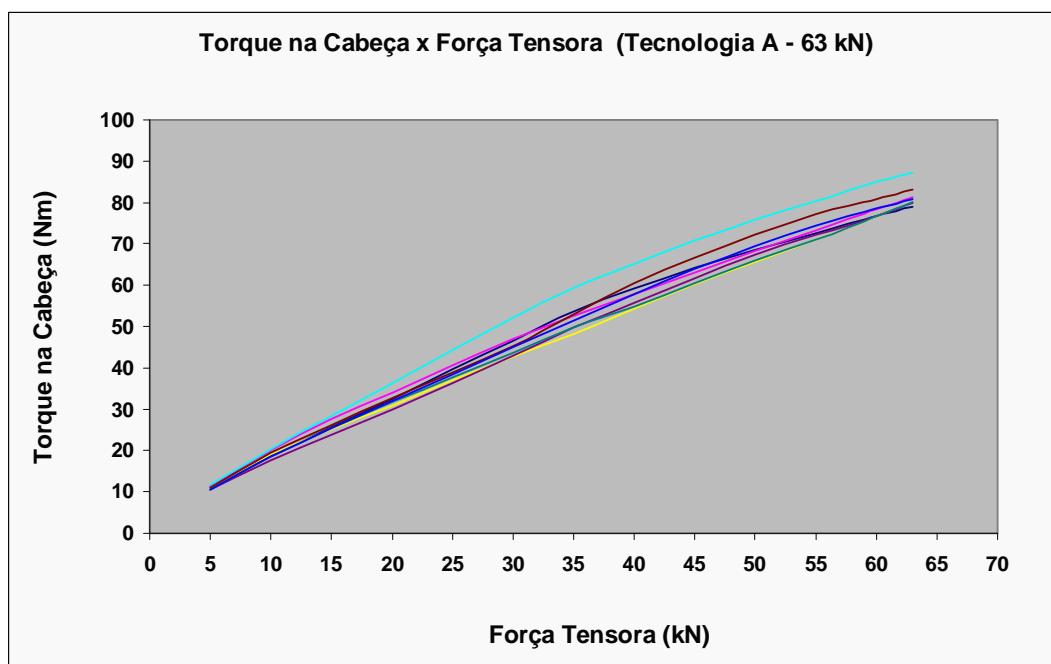


Figura 4.33 - Força x Torque na Cabeça - Tecnologia A - 63 kN.

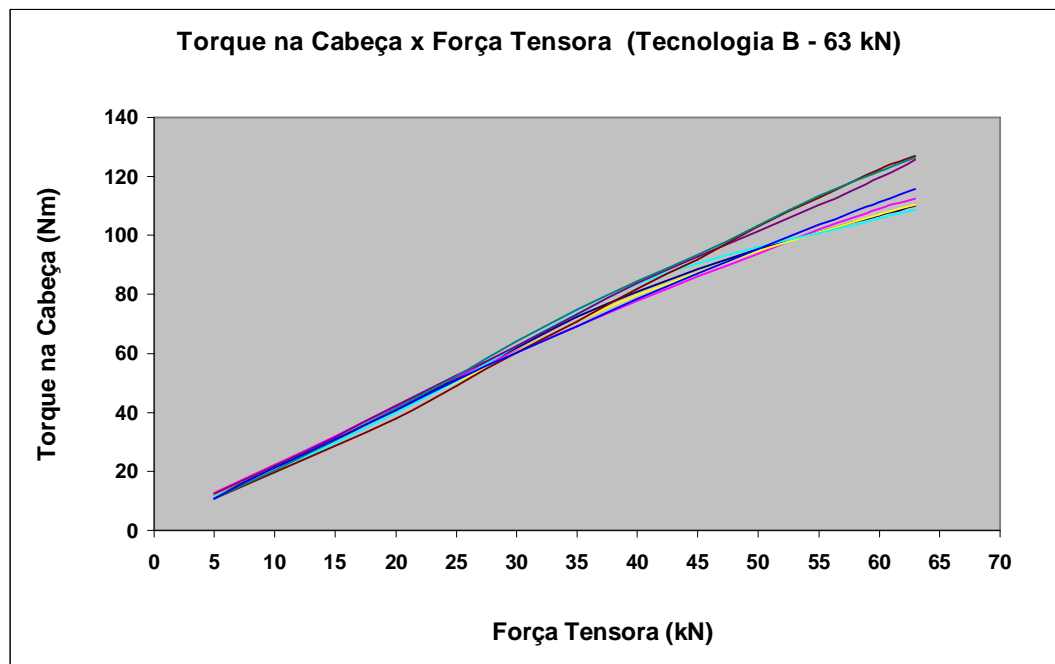


Figura 4.34 - Força x Torque na Cabeça - Tecnologia B - 63 kN.

Nas Figuras 4.35 e 4.36 mostram-se a variação do coeficiente de atrito na cabeça para 15 amostras. Verificam-se comparativamente valores superiores de μ_k para 49 kN em função de uma menor área de contato.

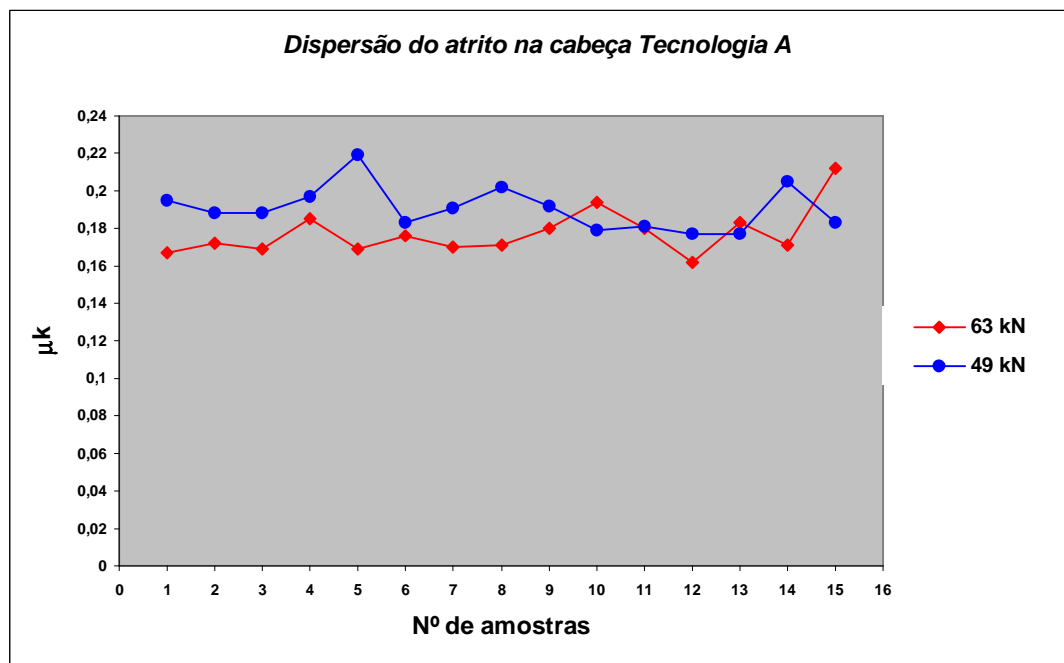


Figura 4.35 - Dispersão do atrito na cabeça Tecnologia A.

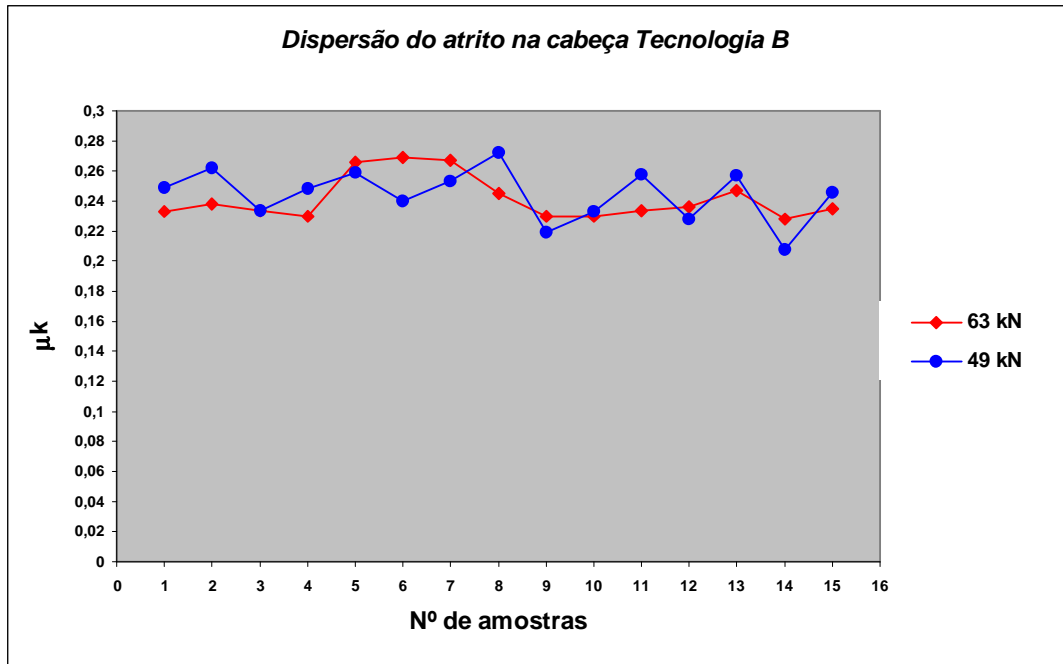


Figura 4.36 - Dispersão do atrito na cabeça Tecnologia B.

Na Figura 4.37 mostra-se a relação do coeficiente de atrito médio no filete de rosca, μ_G , com a força tensora. Observa-se, para cargas crescentes, que o mesmo aumenta com o incremento das cargas. Para a tecnologia "B", verifica-se um comportamento crescente tendendo a estabilizar a partir de 60 kN. Para a tecnologia "A", o coeficiente de atrito tende a estabilizar a partir de 45 kN.

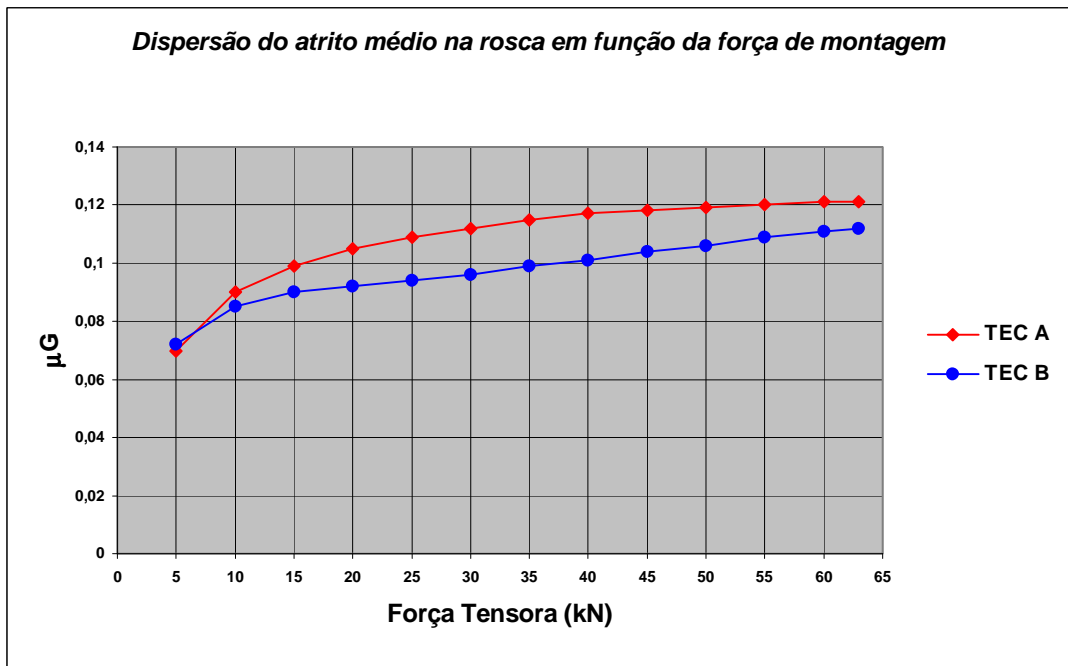


Figura 4.37 - Dispersão do coeficiente de atrito com aumento das cargas.

Para o coeficiente de atrito na cabeça, μ_k , para a tecnologia “A”, apresentado na Fig. 4.38, tem-se inicialmente valores elevados da ordem de 0,29 a 0,31 sofrendo um decréscimo significativo até 15 kN. Para a tecnologia “B”, verifica-se uma estabilização na faixa de 15 a 35 kN e a partir daí um decréscimo até 0,24. Para a tecnologia “A”, a diminuição é contínua até 0,18. Tal fato se deve ao aumento da área de contato.

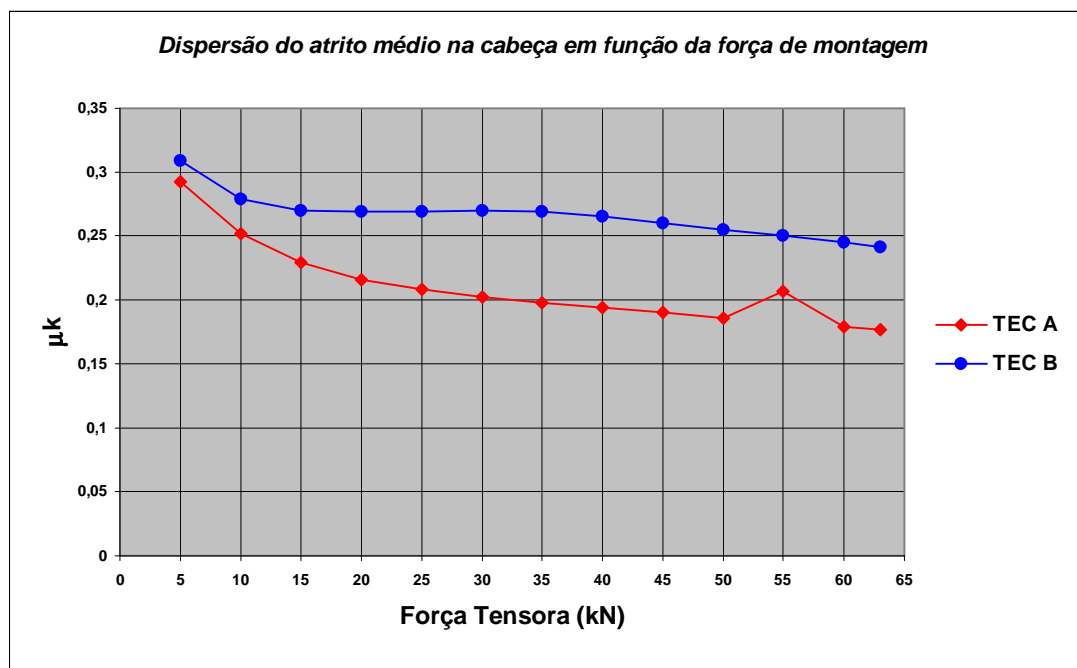


Figura 4.38 - Dispersão do coeficiente de atrito na cabeça com aumento das cargas.

Para o coeficiente de atrito global μ_{ges} , que é um coeficiente de referência para caracterizar o comportamento do atrito global da fixação, nota-se que o mesmo sofre um decréscimo significativo até 15 kN para ambas as tecnologias. Para a tecnologia B a partir de 15 kN seus valores, na medida do aumento das cargas são próximos a uma constante. Para a tecnologia A todos os valores foram inferiores aos da tecnologia B e a partir do aumento das cargas seus valores foram decrescentes. As Figuras 4.39 e 4.40 ilustram o comportamento do atrito global.

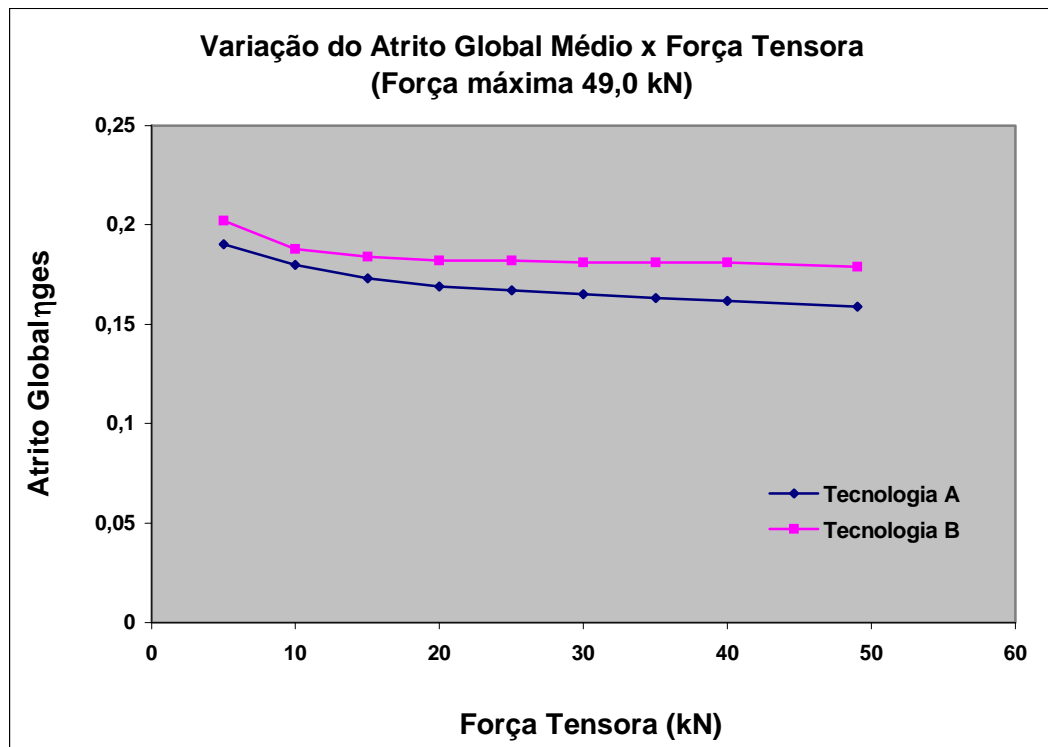


Figura 4.39 - Variação do coeficiente de atrito global μ_{ges} , para as tecnologias “A” e “B” – Carga de 49 kN.

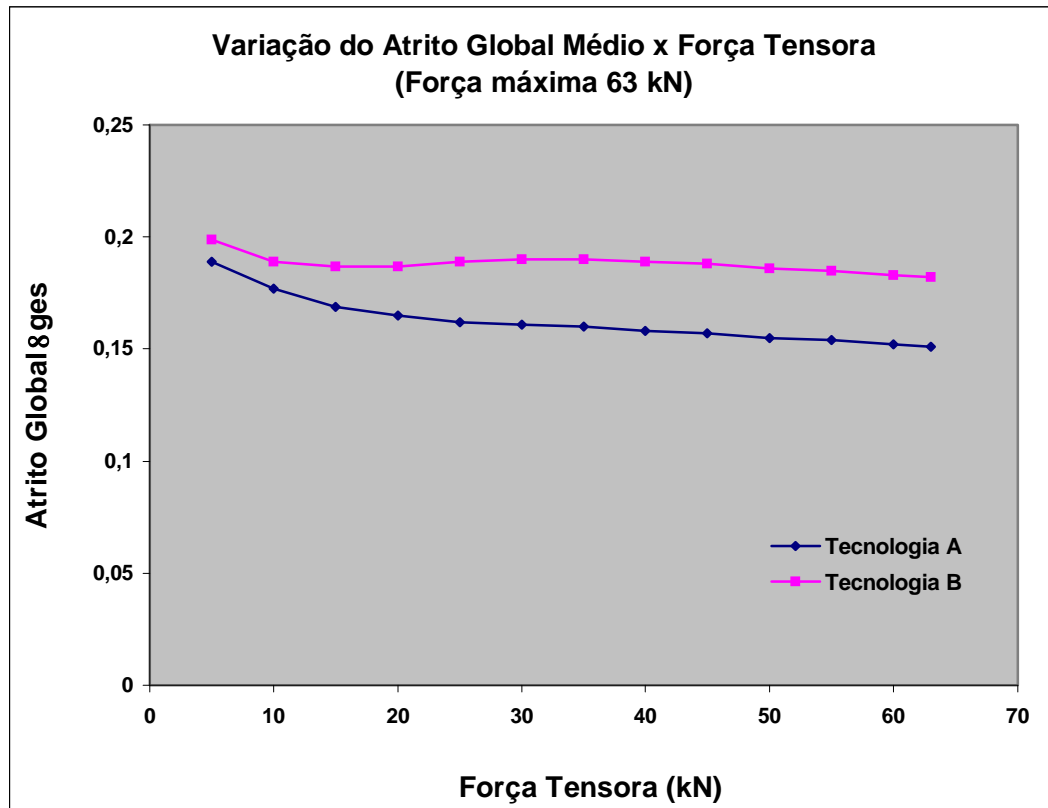


Figura 4.40 - Variação do coeficiente de atrito global μ_{ges} , para as tecnologias “A” e “B” – Carga de 63 kN.

Quanto ao coeficiente de torque médio, K , que é uma constante experimental utilizada para avaliar ou descrever a relação entre o torque aplicado ao parafuso e a pré-carga alcançada e pode ser expresso como uma combinação de fatores (Handbook of Bolts and Bolted Joints, 2001). Ele é relacionado a: diâmetro; ao passo do parafuso; ao fator atrito na rosca que é função do coeficiente de atrito na rosca; ao diâmetro primitivo e finalmente fator atrito na superfície de apoio que é função de coeficiente de atrito na superfície de apoio e o diâmetro médio de apoio sobre a superfície. Verifica-se que em se utilizando a Equação 2.1 ou 3.1, a relação torque x tensão não é linear (Jiang, 2001), já que é influenciado pelo coeficiente de atrito. Por meio dos ensaios realizados tem-se que o coeficiente de torque K diminui com o aumento da carga. Das Figuras 4.41 e 4.42 verificam-se valores máximos de K no início do aperto e seu decréscimo à medida que a carga aumenta. Estes resultados estão de acordo com a não linearidade das curvas Força x Torque. A maior contribuição é aquela dada pela relação Força x Torque na Cabeça (Fig. 4.33 e 4.34) (Jiang, 2001).

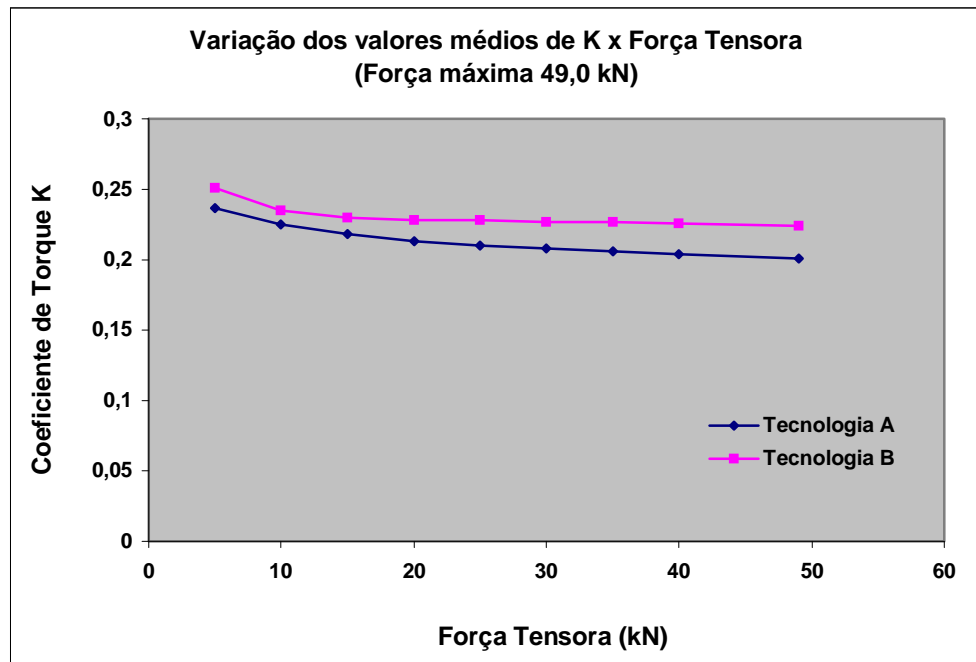


Figura 4.41 - Variação do coeficiente de torque médio K - Carga de 49 kN.

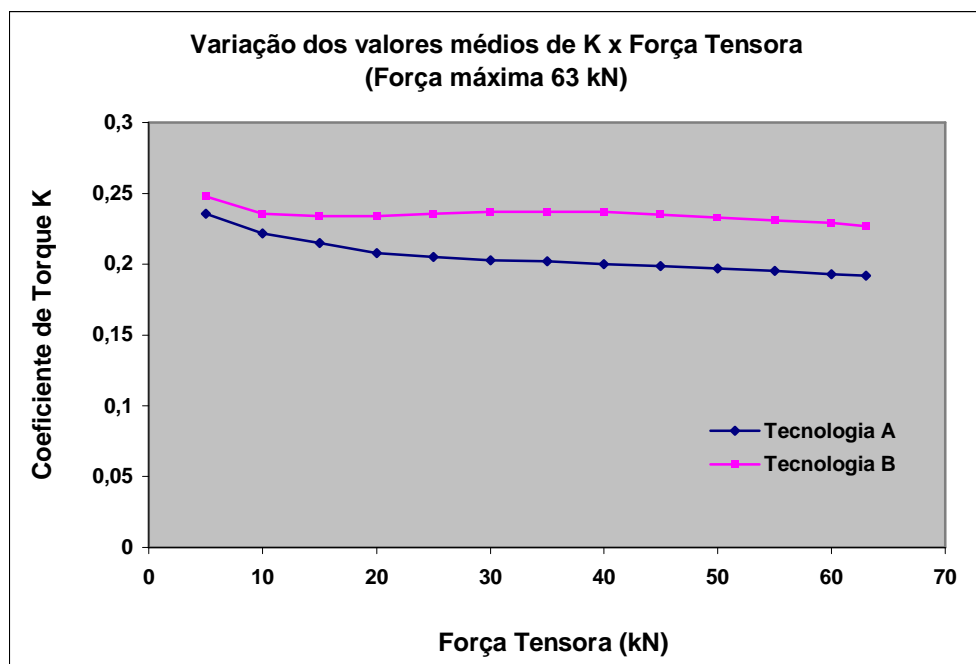


Figura 4.42 - Variação do coeficiente de torque médio K - Carga de 63 kN.

Na Figura 4.43 pode-se observar a variação do coeficiente de torque K médio como uma função do coeficiente de atrito global.

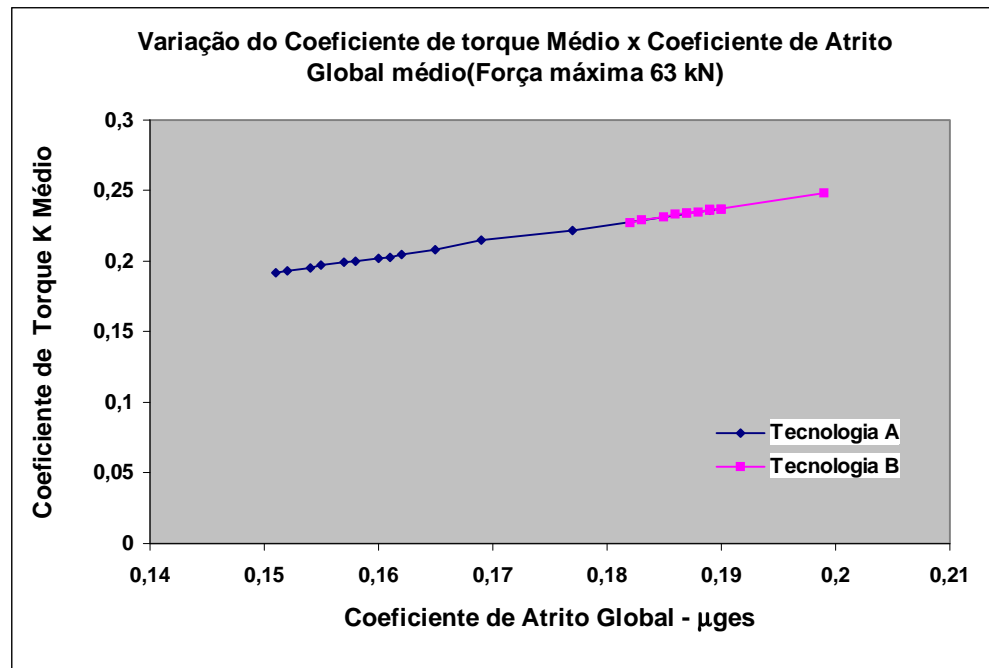


Figura 4.43 - Variação do coeficiente de torque médio K x Coeficiente de atrito Global μ_{ges} .

O rendimento apresentado pela tecnologia “B” foi ligeiramente superior que para a tecnologia “A”, conforme mostrado nas Fig. 4.44 e 4.45.

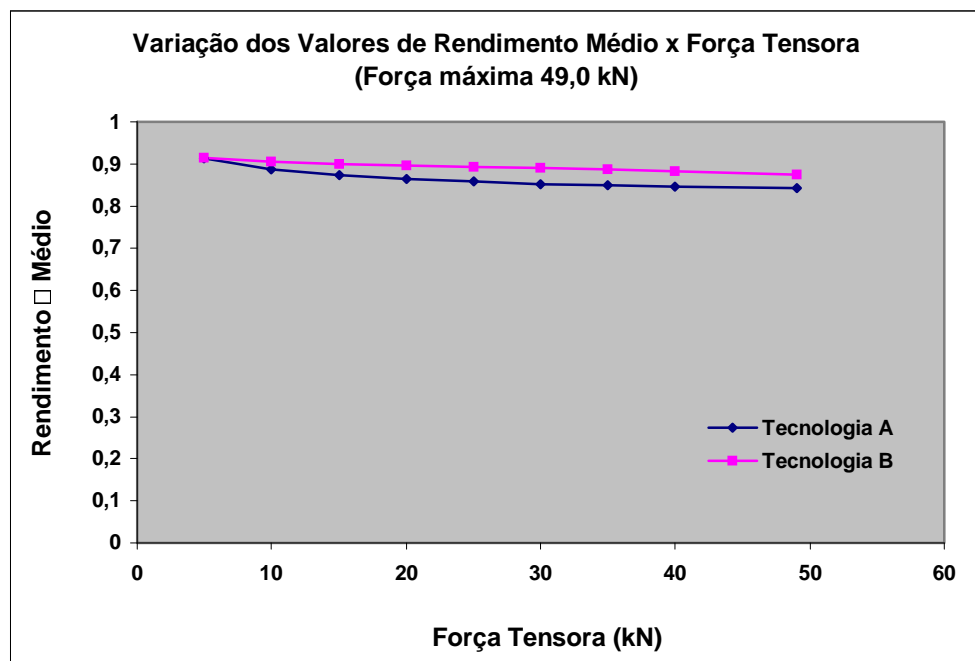


Figura 4.44 - Variação do rendimento – Força de 49 kN.

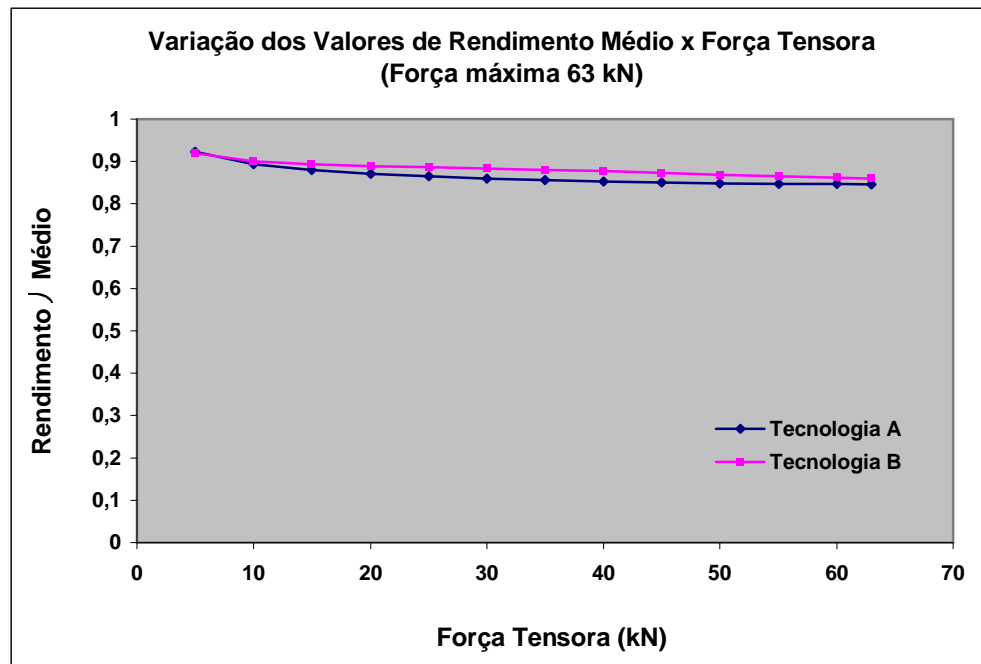


Figura 4.45 - Variação do rendimento – Força de 63 kN.

A partir da Equação 3.4 verifica-se que o rendimento é dependente do coeficiente de atrito na rosca. Tem-se que o aumento do coeficiente de atrito na rosca reduz o rendimento do parafuso e por conseqüência sua capacidade de geração de força tensora no estado combinado de tensões (Fig. 4.46).

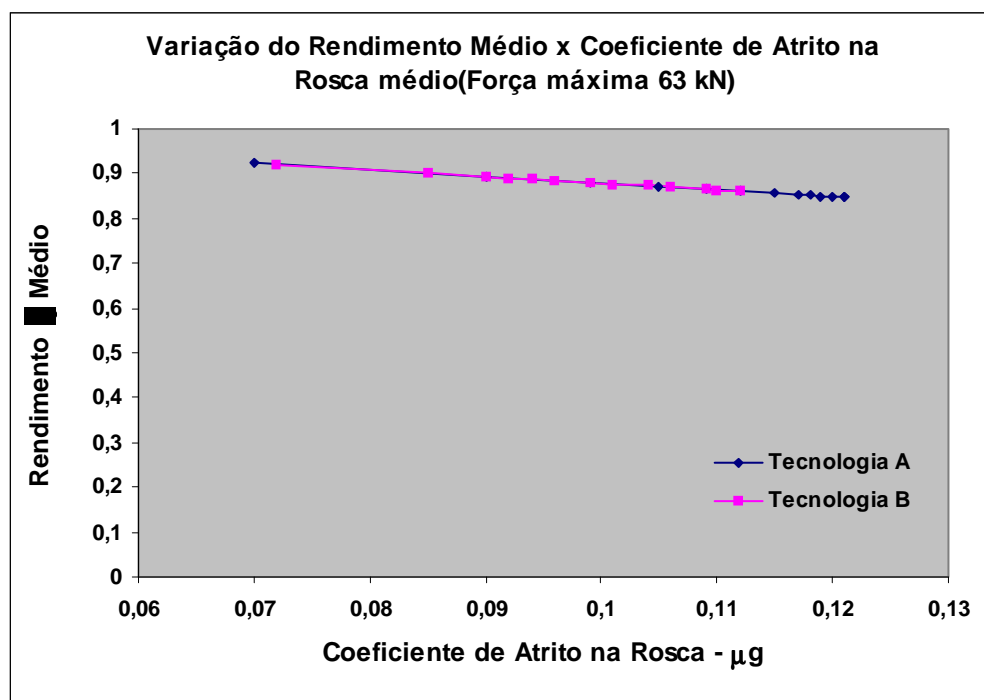


Figura 4.46 Variação do Rendimento x Coeficiente de Atrito na Rosca.

As variações do torque total (Média $\pm 3\sigma$), em função do número de amostras testadas, para as duas tecnologias são mostradas nas Fig. 4.47 a 4.50. Nelas observa-se que a menor dispersão verificada foi aquela da tecnologia A.

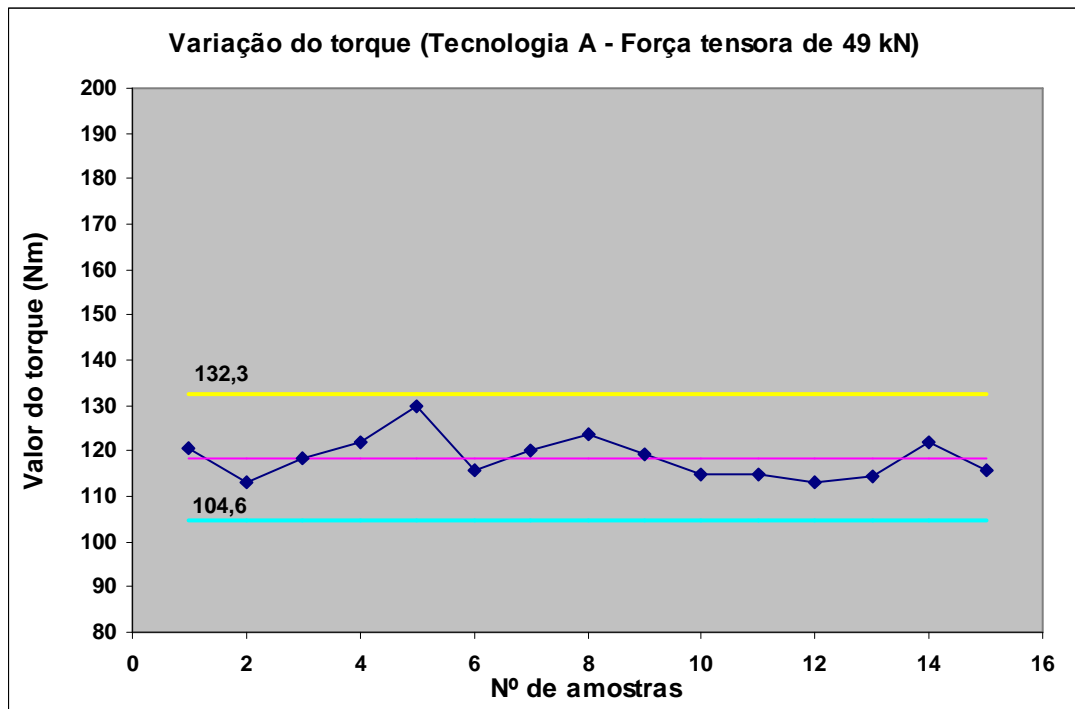


Figura 4.47 - Variação do Torque total – Força de 49 kN – Tecnologia “A”.

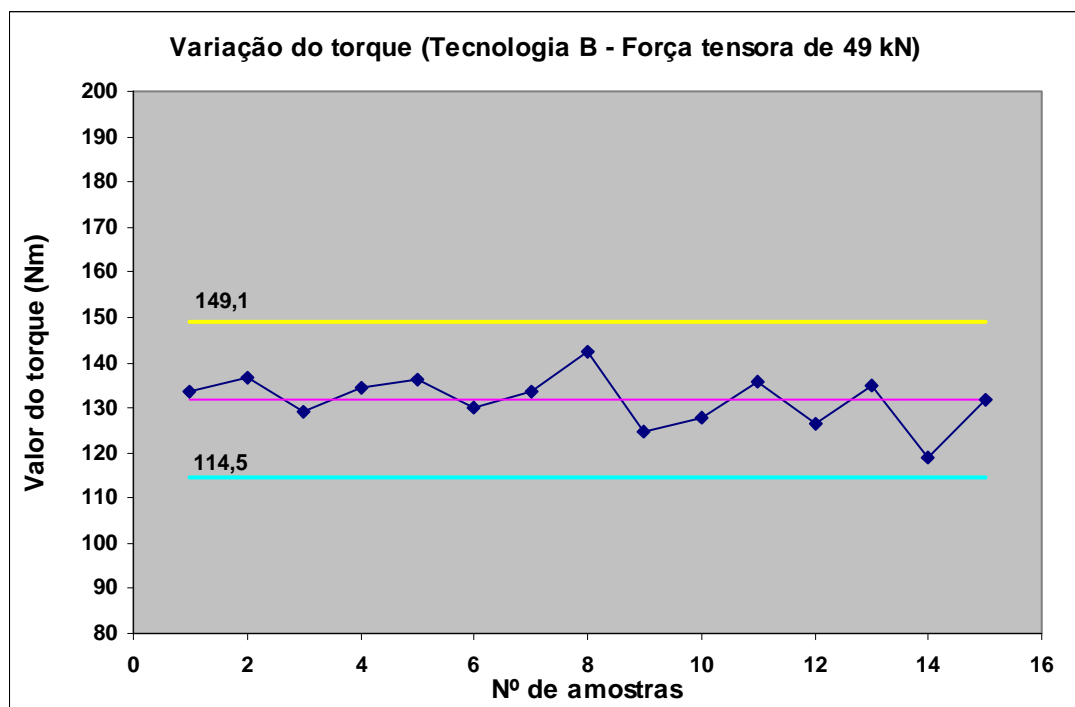


Figura 4.48 - Variação do Torque total – Força de 49 kN – Tecnologia “B”.

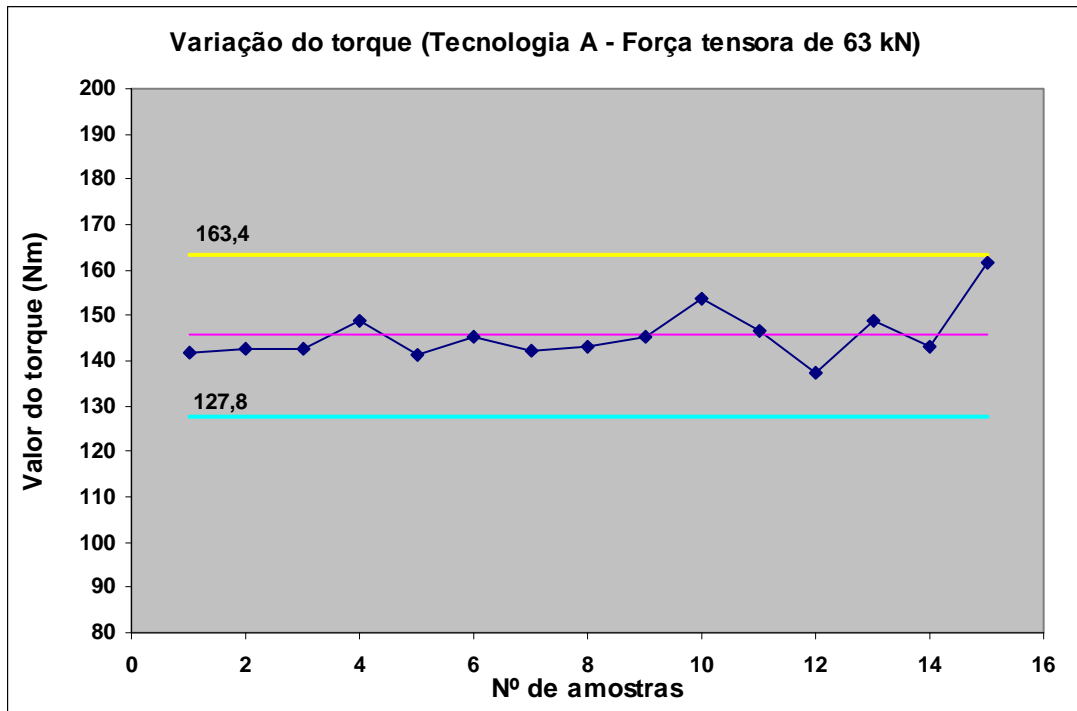


Figura 4.49 - Variação do Torque total – Força de 63 kN – Tecnologia “A”.

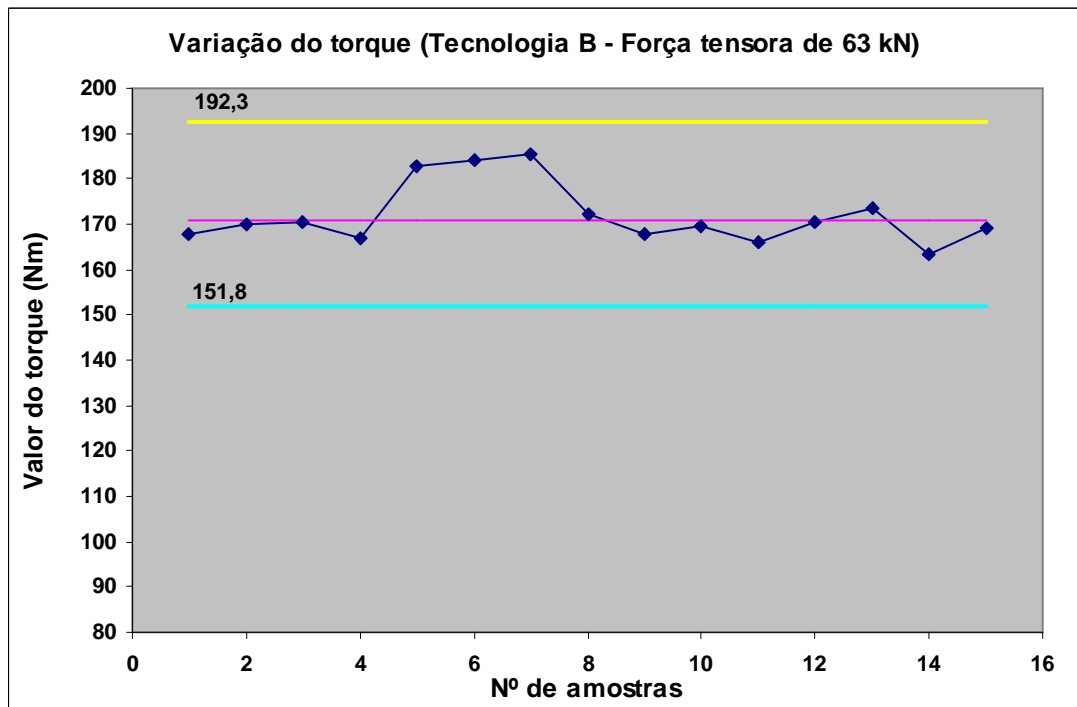


Figura 4.50 - Variação do Torque total – Força de 63 kN – Tecnologia “B”.

A variação do torque total para cargas crescentes até 63 kN é mostrada nas Fig. 4.51 e 4.52 apresentando valores bem consistentes.

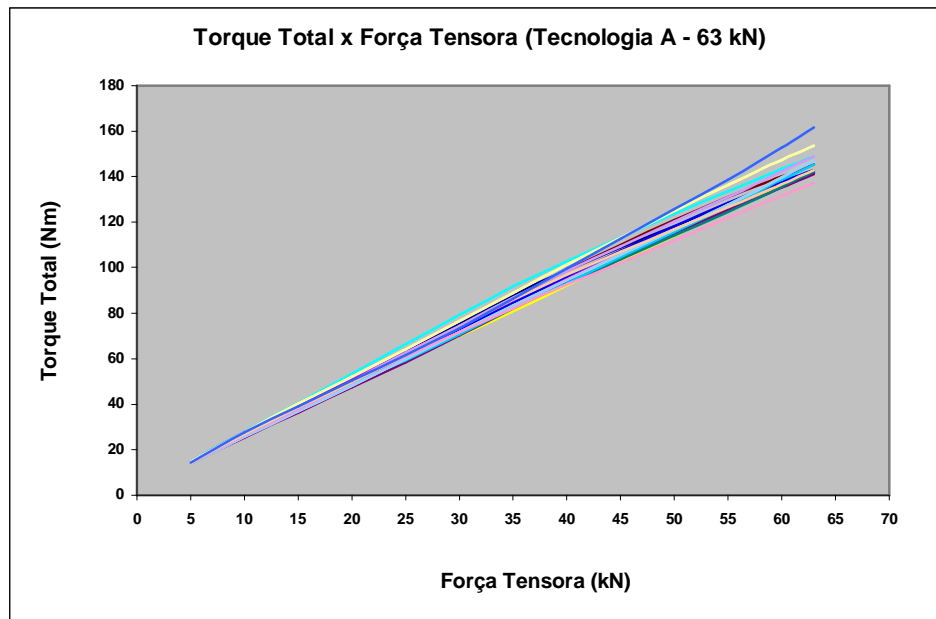


Figura 4.51 - Variação do Torque total – Tecnologia A.

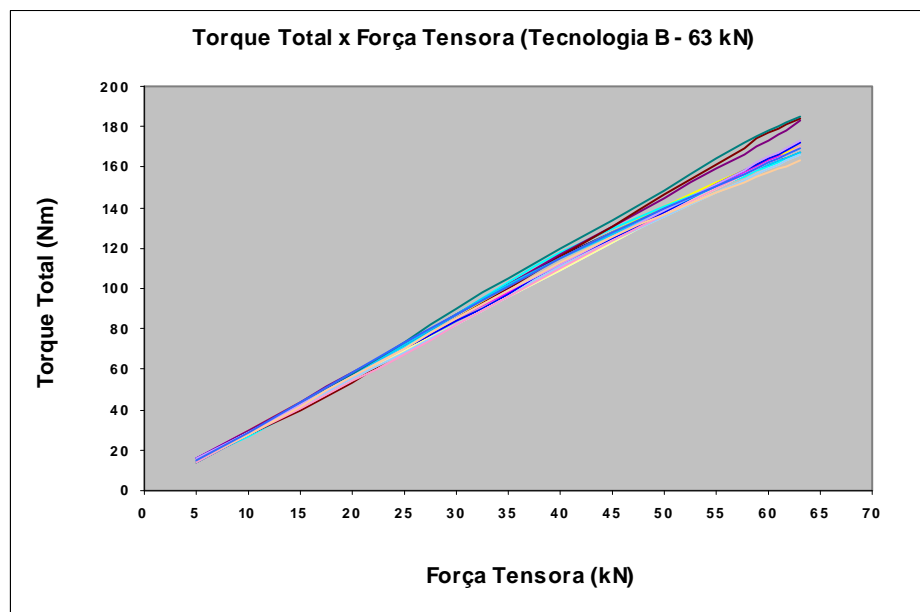


Figura 4.52 - Variação do Torque total – Tecnologia B.

Acredita-se que para melhor entender os fenômenos interfaciais que ocorreram e melhor analisar os resultados apresentados nas Fig. 4.25 a 4.52, dever-se-ia ter disponível equipamentos para identificação dos óxidos presentes e inclusive a seqüência em que eles se sobrepõem no substrato de aço. Esses equipamentos não estavam disponíveis e saiu do escopo desse trabalho. Entender o comportamento de sistemas tribológicos é uma tarefa que exige que se entre em detalhes nas propriedades dos meios interfaciais, principalmente em níveis de filmes óxidos.

4.2 – AVALIAÇÕES DAS SUPERFÍCIES APÓS OS ENSAIOS DE APARAFUSAMENTO

4.2.1 - Avaliação dos Aspectos Gerais da Superfície do Parafuso Após o Ensaio de Aparafusamento

Ao término dos ensaios de aparafusamento procedeu-se o exame visual que buscou verificar o estado das superfícies em contato, da rosca do parafuso com a contra-peça roscada e da face de apoio da cabeça do parafuso com o espaçador.

Nas Figuras 4.53 a 4.55 mostram-se os aspectos da superfície revestida do parafuso e os danos sofridos pelo revestimento.

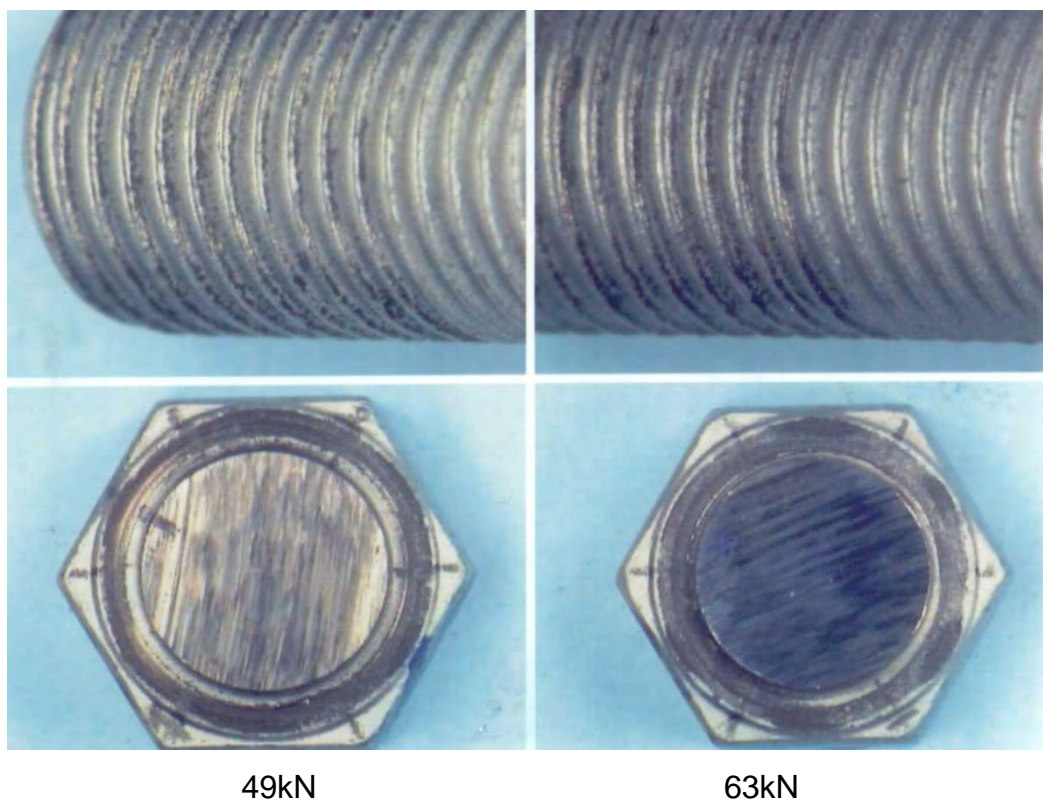


Figura 4.53 – Regiões de contato, face de apoio da cabeça e região roscada da tecnologia “A”.

Para ambas as tecnologias verificaram-se comparativamente que para a face de apoio da cabeça, o grau de dano sobre o revestimento aumenta na medida em que a carga é aumentada de 49 kN para 63 kN. Também é

macroscopicamente mais uniforme com relação à região roscada em função das superfícies planas em contato. Com relação à região roscada, observa-se também o aumento do grau de dano do revestimento com o aumento da carga, mas o mesmo não é homogêneo ao longo do flanco de pressão.



63 kN

49 kN

Figura 4.54 – Regiões de contato, face de apoio da cabeça e região roscada da tecnologia “B”.

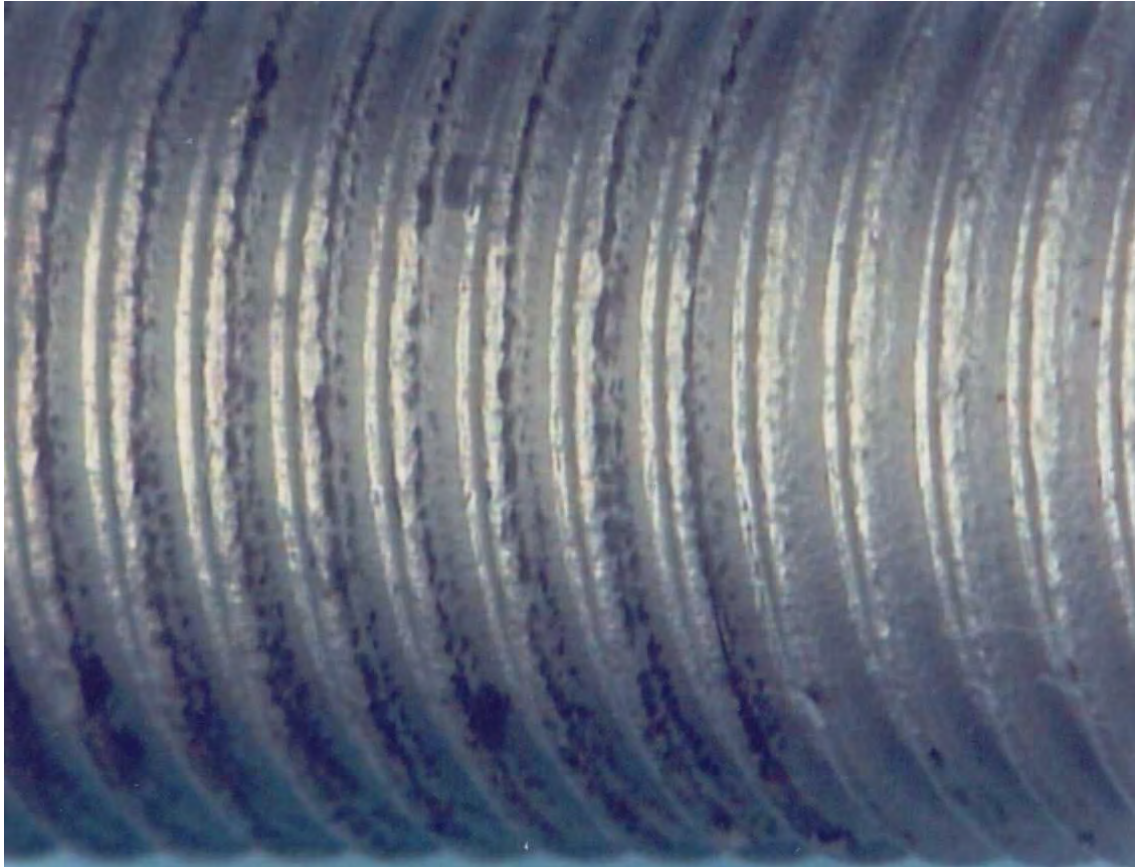


Figura 4.55 – Detalhe da região roscada evidenciando que o contato não é homogêneo ao longo do flanco de pressão.

4.2.2 - Avaliação da Resistência à Corrosão

Os parafusos foram submetidos a testes de resistência à corrosão (Figura 4.56) cujos resultados foram focos de corrosão ferrosa com 200 horas na região de apoio da cabeça e nenhum tipo de corrosão sobre a região dos filetes que estavam submetidos às cargas de 49 kN e 63 kN conforme mostrado na Fig. 4.57.

A corrosão ferrosa iniciou-se a partir do diâmetro interno da face apoio, região mais solicitada, e se deve ao fato de que nesta região o contato foi mais efetivo provocando um dano maior ao revestimento e em algumas partes expondo o metal base, ocasionando a formação de áreas anódicas (região onde ocorre a corrosão) bem superiores às áreas catódicas (regiões protegidas pelo revestimento). Já para a região roscada, como o contato não é homogêneo e ocorre em pequenas regiões ao longo do flanco de pressão, o revestimento não foi tão afetado. Nessas regiões, como as áreas catódicas

são superiores às áreas anódicas, tem-se a formação de pilhas galvânicas onde o metal do revestimento (zinco) será o ânodo da pilha, formada em presença de um eletrólito, protegendo assim catodicamente o material base (Figura 4.57).



Figura 4.56 – Disposição dos parafusos na câmara de névoa salina.



Figura 4.57 – Parafusos após teste de névoa salina onde se verificam focos de oxidação ferrosa sobre a face de apoio da cabeça.

4.2.3-Avaliação da Espessura do Revestimento e Aspectos Tridimensionais das Superfícies

Com relação à espessura remanescente do revestimento após ensaios, para o flanco do filete não foi possível efetuar as medições, pois as áreas de contato real se distribuíram de maneira bem aleatória e não uniforme, tornando difícil a incidência do raio laser do equipamento, utilizado para focalizar aquelas áreas que sofreram danos, embora o sistema de medição seja por Raio X. Para a face de apoio da cabeça as medidas foram realizadas em modo automático. Como verificado que o contato real iniciou-se a partir do diâmetro interno da face de apoio e foi mais efetivo na medida do aumento das cargas de 49 kN para 63 kN, as medições para as duas tecnologias foram realizadas em três regiões, conforme mostrado na Fig. 4.58.

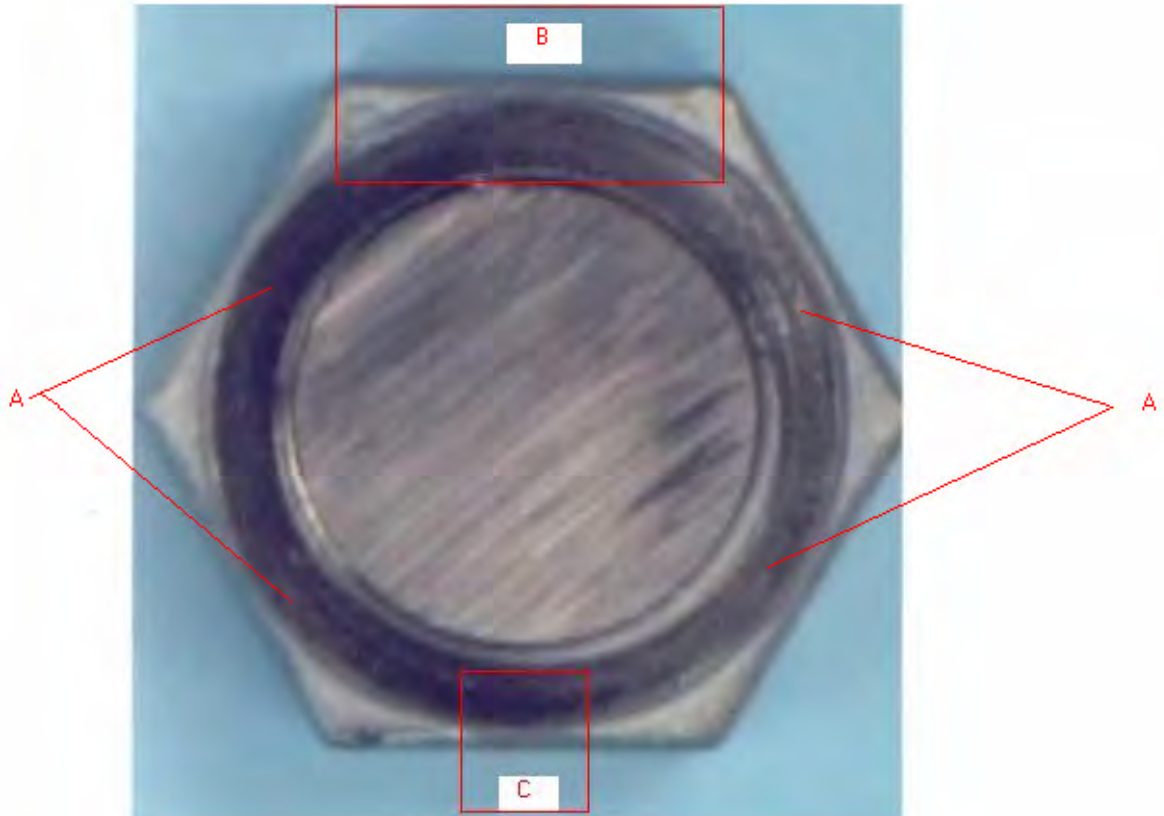


Figura 4.58 – Regiões de medição da espessura.

Região A - correspondente sobre todo o diâmetro da face de apoio.

Região B - correspondente a uma região da face de apoio correspondente a 1/6 da face sextavada.

Região C - sobre a mesma região B, porém, em uma área de maior contato real.

Verifica-se uma redução significativa das espessuras nas regiões A, B e C em função das cargas aplicadas. As menores espessuras verificadas foram 0,74 μm e 0,19 μm (região C) da tecnologia A para as cargas de 49 kN e 63 kN respectivamente, conforme resultados apresentados nas Tab. 4.5 e 4.6. A espessura inicial medida para a face de apoio foi 4,24 μm , conforme mostrado na Tab. 4.3.

Tabela 4.5 – Resultados de medição de espessura – Tecnologia “A” - 49 kN.

	Região A μm	Região B μm	Região C μm
Nº de pontos	36	25	16
Média	2,77	1,09	0,74
Desvio Padrão	0,94	0,55	0,35
Maior valor	4,54	2,19	1,41
Menor valor	1,03	0,32	0,22

Tabela 4.6 – Resultados de medição de espessura – Tecnologia “A” - 63 kN

	Região A μm	Região B μm	Região C μm
Nº de pontos	36	25	9
Média	1,13	0,32	0,19
Desvio Padrão	0,63	0,07	0,03
Maior valor	2,89	0,46	0,24
Menor valor	0,33	0,20	0,14

Para a tecnologia B, as espessuras remanescentes na região C foram de 0,67 μm e 1,28 μm constantes das tabelas 4.7 e 4.8. A espessura média na condição de recebimento foi de 16,54 μm (Tabela 4.4).

Tabela 4.7 – Resultados de medição de espessura – Tecnologia “B” - 49 kN.

	Região A μm	Região B μm	Região C μm
Nº de pontos	36	25	16
Média	1,93	0,71	0,67
Desvio Padrão	1,75	0,27	0,20
Maior valor	7,52	1,71	1,08
Menor valor	0,32	0,43	0,46

Tabela 4.8 – Resultados de medição de espessura – Tecnologia “B” - 63 kN.

	Região A μm	Região B μm	Região C μm
Nº de pontos	36	25	16
Média	1,17	1,50	1,28
Desvio Padrão	0,40	0,63	0,34
Maior valor	2,63	3,56	1,99
Menor valor	0,68	0,77	0,72

Nas Figuras 4.59 e 4.60 mostram-se o levantamento topográfico da região B para as tecnologias “A” e “B” na condição de 49 kN demonstrando o decréscimo de espessura a partir do diâmetro interno da face de apoio.

Analisando-se as espessuras iniciais dos revestimentos e as associando à medida ao final da primeira utilização do parafuso, observa-se que, percentualmente o revestimento da tecnologia B sofreu maiores taxas de deformações plásticas do que a tecnologia A. Após a primeira utilização, ambos chegaram a espessuras próximas, mas com imensa diferença na espessura inicial, antes de serem submetidos aos primeiros carregamentos. Elevadas taxas de deformação estão associadas a encruamento da microestrutura e isso possivelmente pode ter influenciado à ligeira superioridade do coeficiente global μ_{ges} e conseqüentemente na resistência ao cisalhamento encontrado no revestimento B.

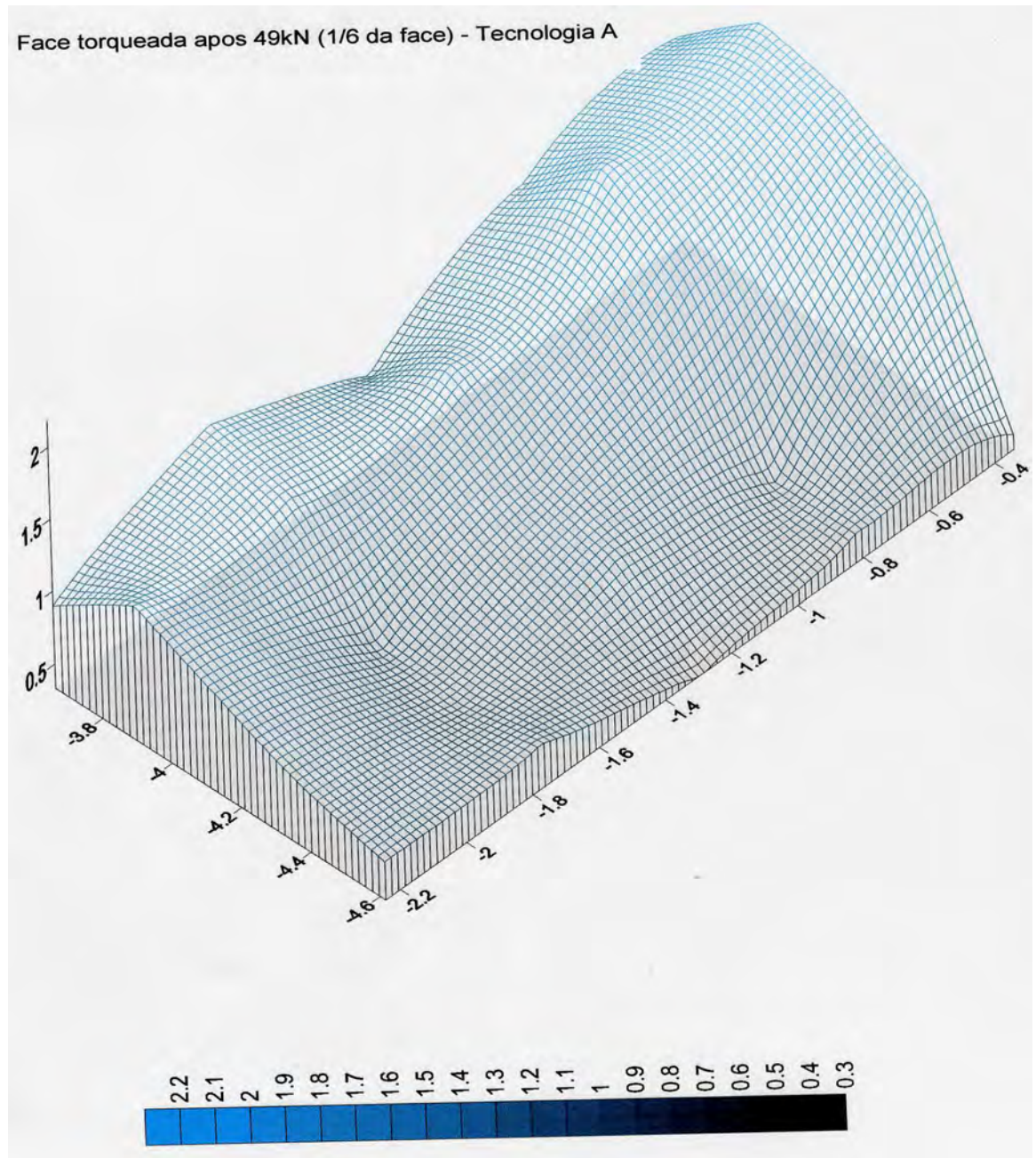


Figura 4.59 – Região B – 49 kN – Tecnologia “A”.

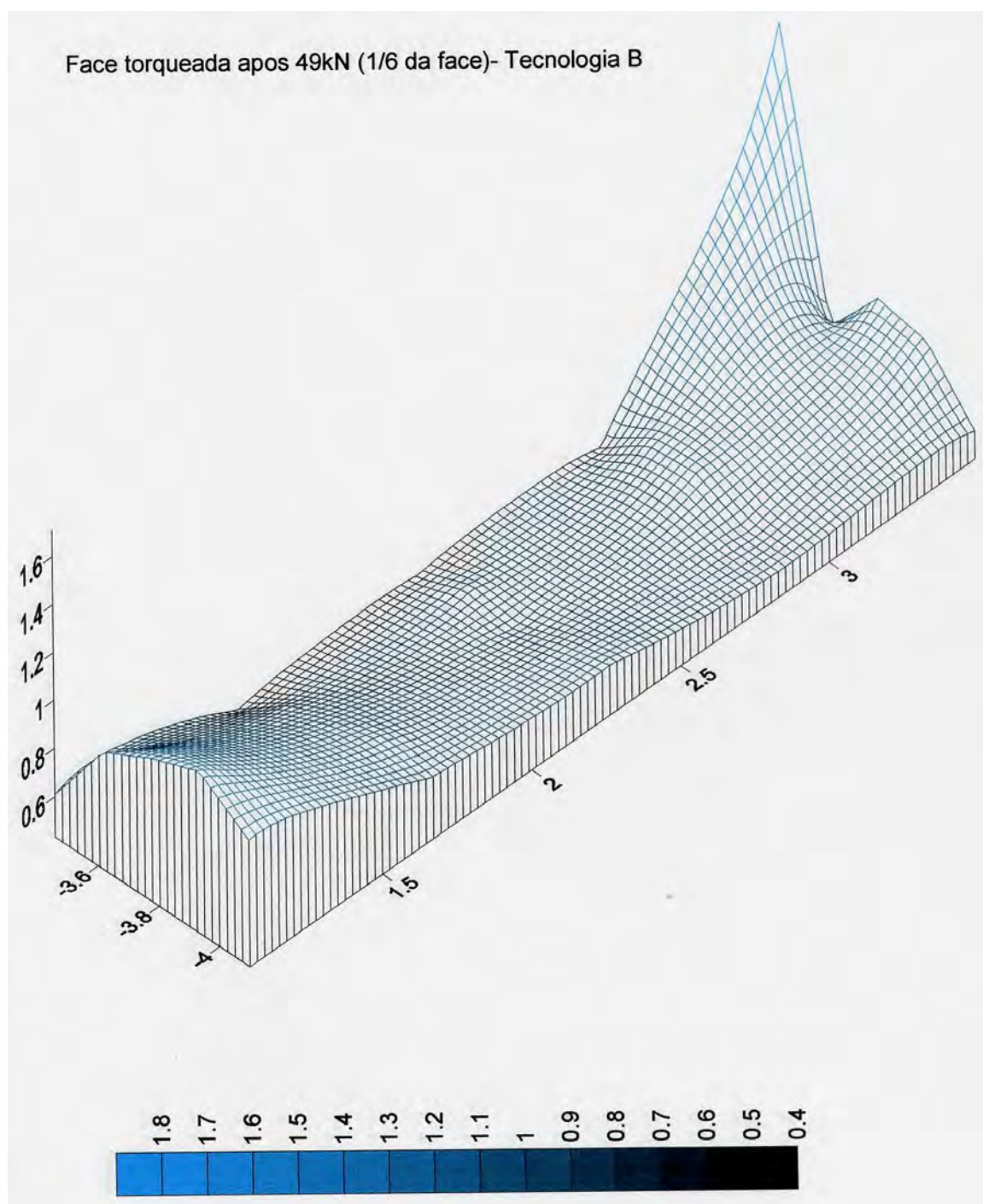


Figura 4.60 – Região B – 49 kN – Tecnologia “B”.

4.2.4.- Avaliações das Superfícies Efetivas de Contato Após Ensaios de Aparafusamento

No microscópio eletrônico de varredura foram avaliadas as superfícies dos parafusos, após os ensaios de aparafusamento. Nas Figuras 4.61 a 4.64 mostram-se detalhes das superfícies.



Figura 4.61 – Face de apoio da cabeça do parafuso submetida à carga de 49 kN.

Com relação à face de apoio da cabeça do parafuso, o que se verifica é que existem três regiões distintas, uma mais interna evidenciando uma completa deformação plástica do revestimento, uma intermediária evidenciando parte do revestimento deformado e outra não e uma externa mostrando que ocorreu contato, mas o mesmo não foi efetivo. O grau de dano e a área real de contato aumentaram na medida do aumento das cargas. Mas de toda forma a área aparente de contato é maior que na região roscada.

Na Figura 4.61 observa-se que a área real de contato é menor do que a área aparente. Nas superfícies comumente utilizadas em engenharia, o contato entre metais, mesmo em baixas cargas, ocorre no regime plástico. Segundo Hutchings (1995), isso pode ser previsto por meio do índice de plasticidade, ϕ , que considera as características mecânicas do par metálico (dureza e módulo de elasticidade) e a topografia da superfície (desvio padrão das irregularidades e raio médio da asperidade).



Figura 4.62 – Detalhe da região mais interna (Fig. 4.61) evidenciando uma completa deformação plástica do revestimento.

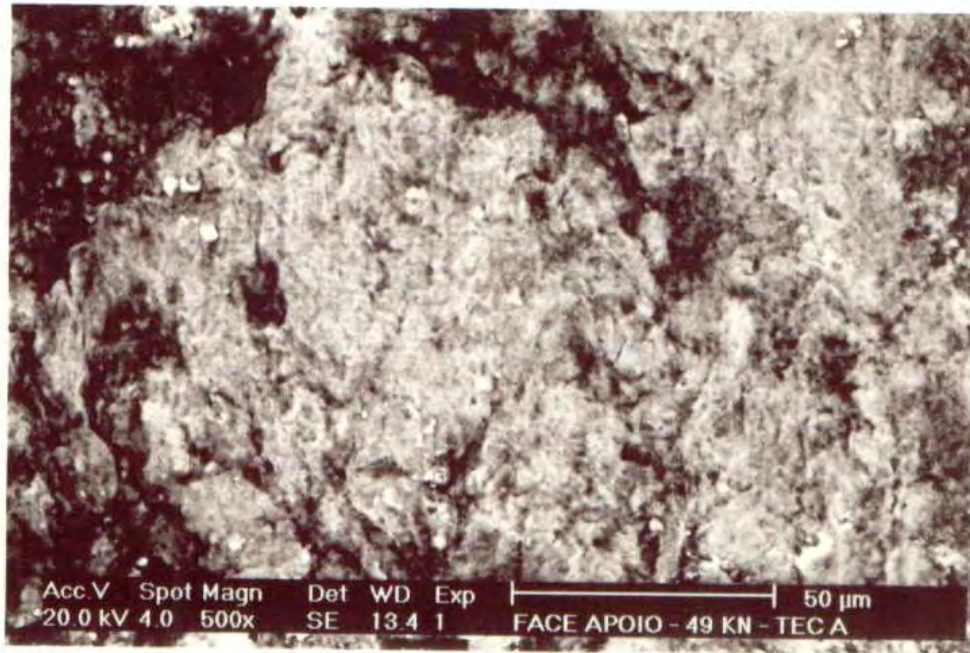


Figura 4.63 – Região intermediária (Fig. 4.61) evidenciando que parte do revestimento sofreu deformação e outra não.

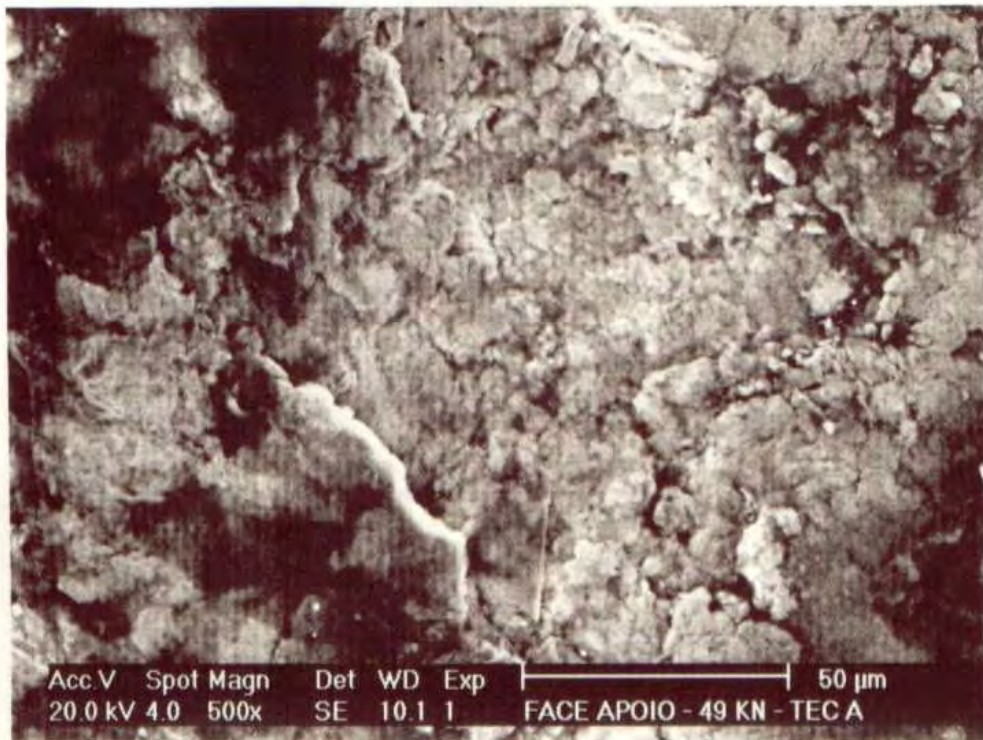


Figura 4.64 – Região mais externa (Fig. 4.61) evidenciando que ocorreu contato, mas o mesmo não foi efetivo.

O efeito do aumento da carga é mostrado nas Fig. 4.65 a 4.68.

Em sistemas tribológicos, o aumento da carga promove o aumento do fluxo plástico de material, aumentando as áreas individuais de contato e consequentemente, aumentando a área real de contato (Hutchings, 1995).

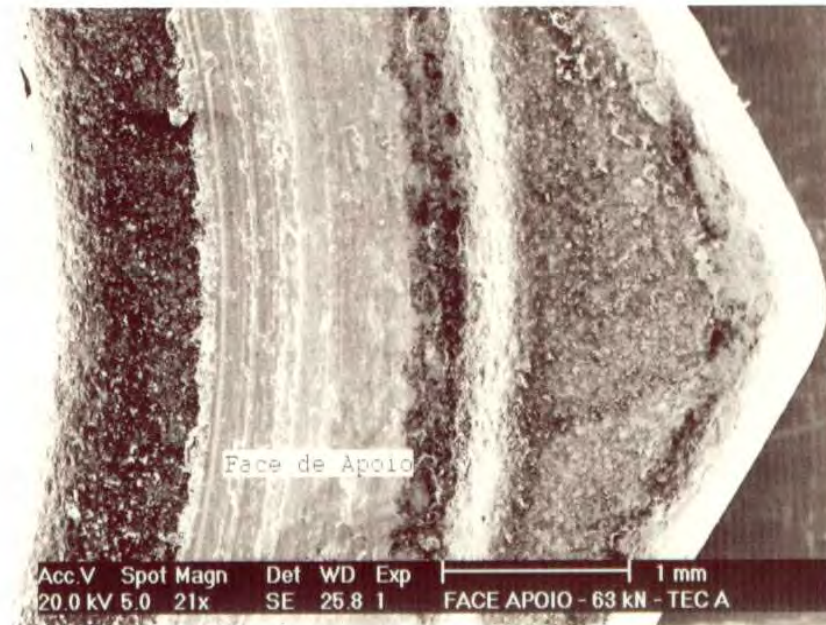


Figura 4.65 – Verifica-se uma maior área real de contato para a carga de 63 kN.

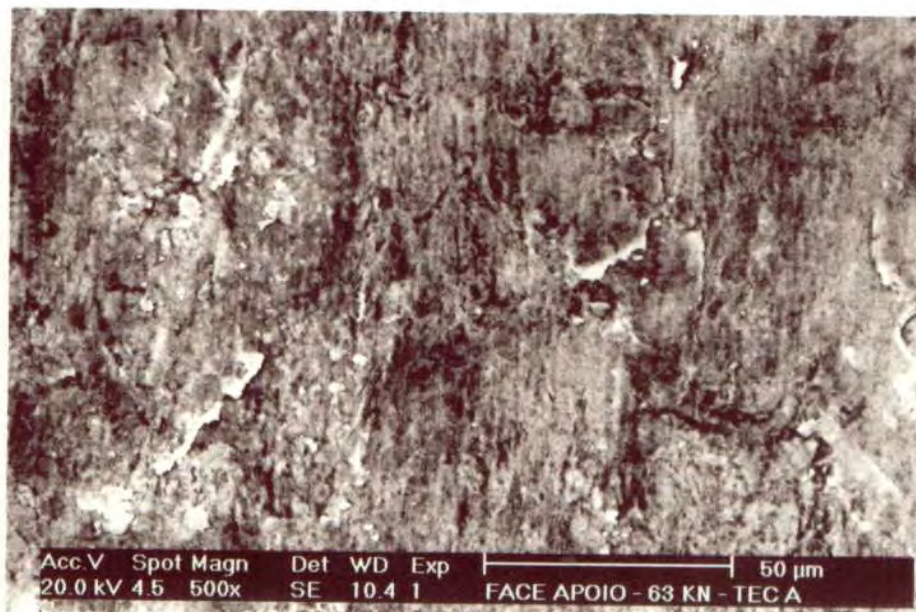


Figura 4.66 – Detalhe da região mais interna mostrando a completa deformação plástica, a orientação característica da deformação é devido ao sentido de aperto.

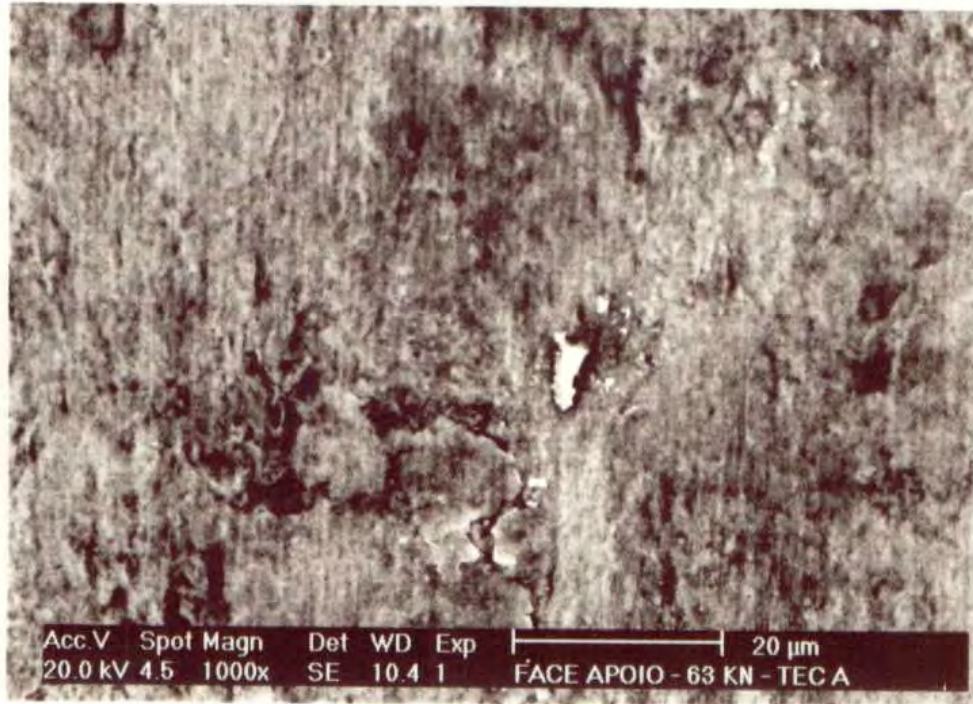


Figura 4.67 – Região interna com aumento de 1000x .

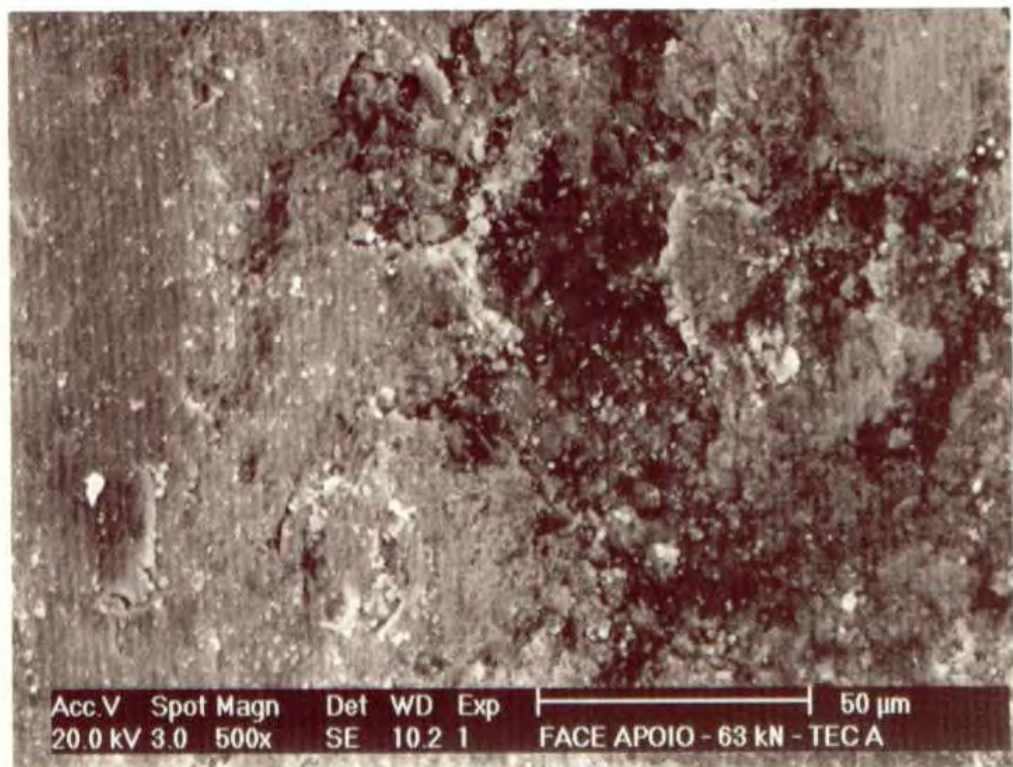


Figura 4.68 – Região de transição evidenciando a deformação plástica sofrida pelo revestimento lado esquerdo e outra parte íntegra, lado direito.

Com relação à região roscada verificou-se o mesmo mecanismo de deformação a exceção das áreas de contato real que são bastante aleatórias e ocorrem concentradas em pequenas regiões (Figura 4.69). O contato efetivo se inicia da crista para o fundo do filete. Não ocorre um contato completo ao longo do flanco de pressão devido às tolerâncias dimensionais das partes (Figuras 4.70 e 4.71). Nas áreas de contato real, a grande deformação plástica sofrida pelo revestimento pode ser observada na Figura 4.72.

O sentido da deformação plástica é devido ao sentido de aperto, pode-se verificar a completa deformação plástica sofrida pelas asperidades em contato e as camadas de revestimento se deformando plasticamente (Figura 4.72).

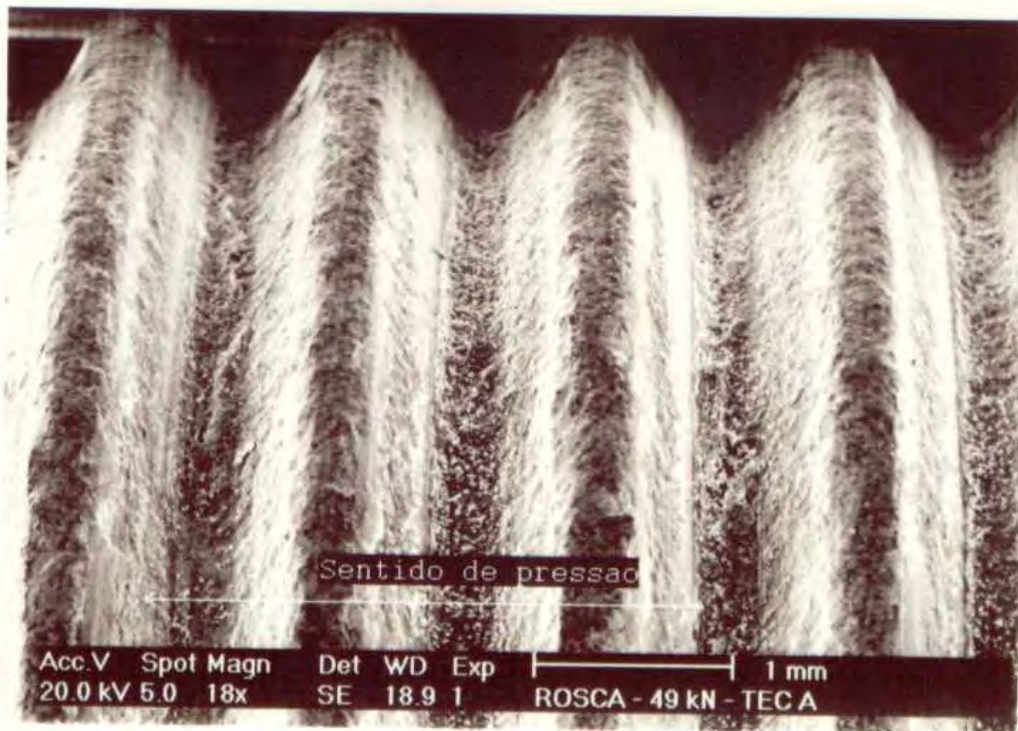


Figura 4.69 – Vista geral da rosca evidenciando o dano sofrido pelo revestimento no flanco de pressão.

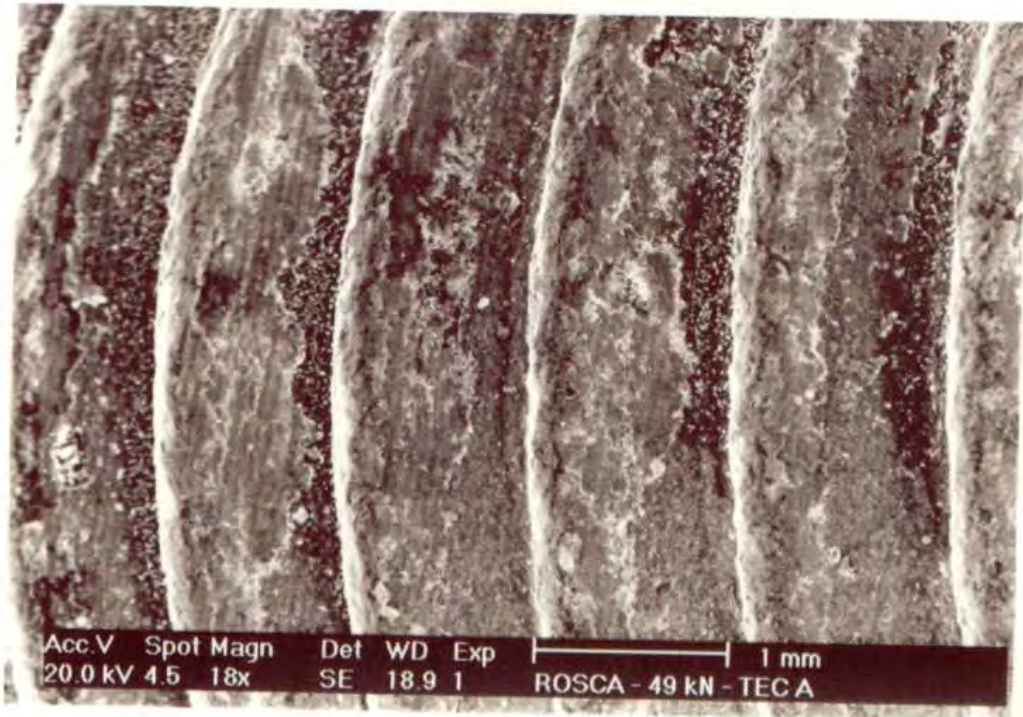


Figura 4.70 – Detalhe dos filetes mostrando que o contato efetivo é muito mais irregular sobre o flanco de pressão do que sobre a face de apoio.

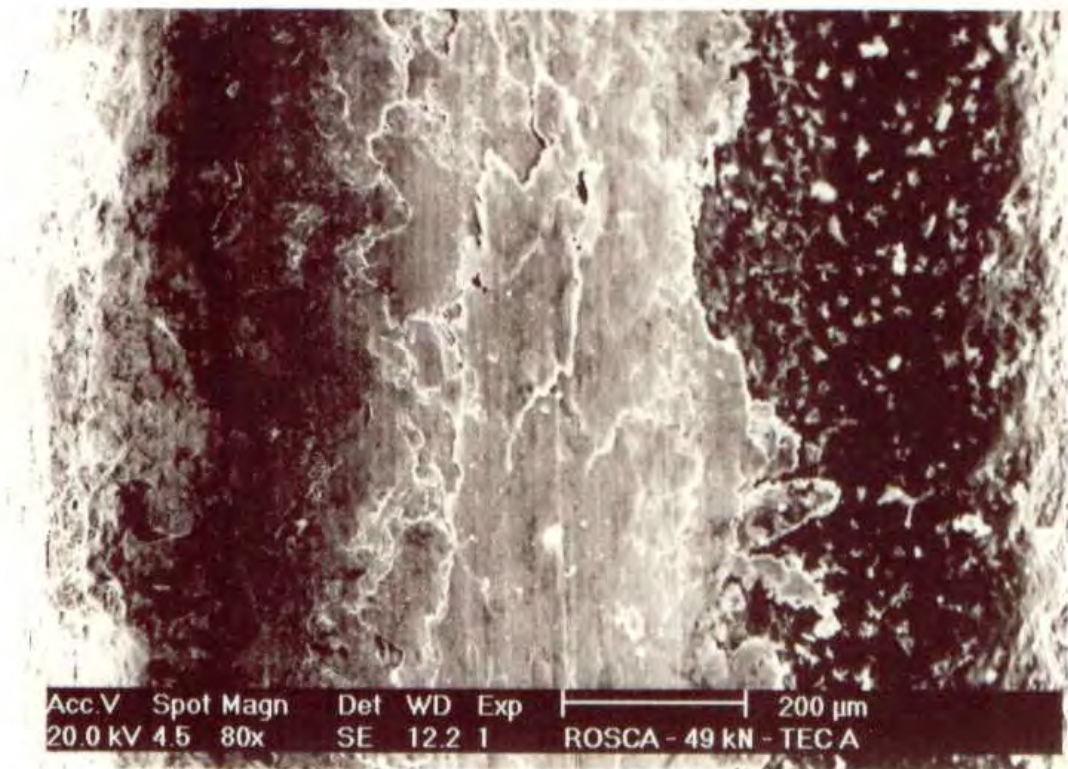


Figura 4.71 – Detalhe do flanco de pressão.

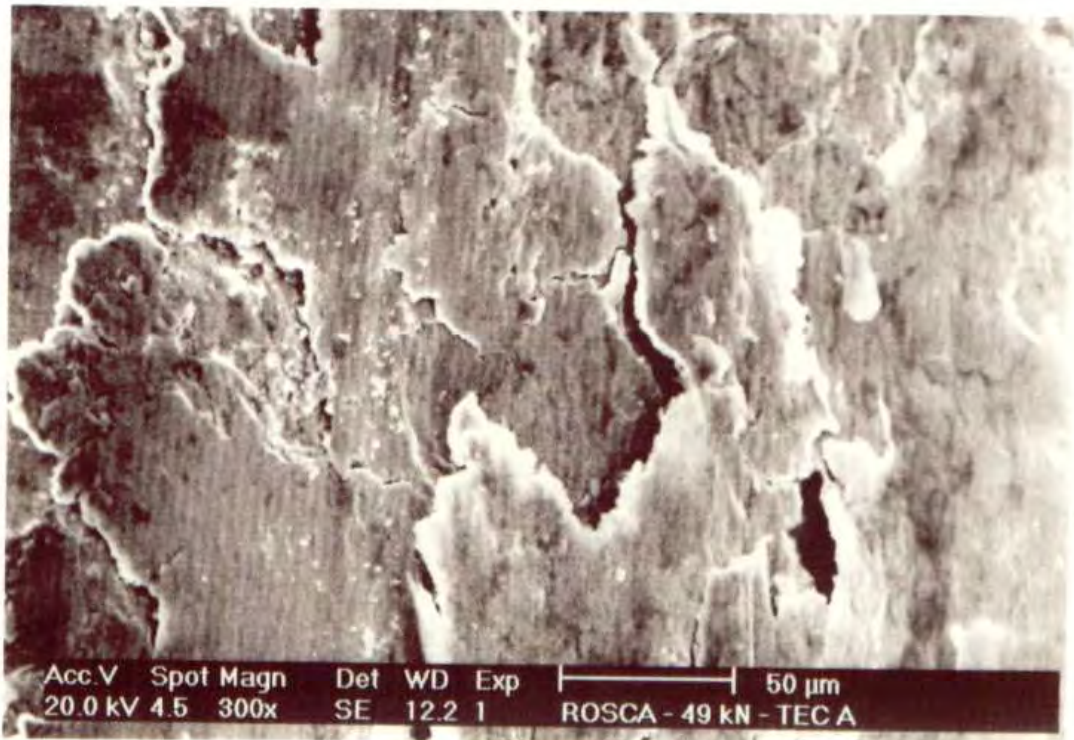


Figura 4.72 – Maior ampliação da Fig. 4.71 mostrando o sentido do fluxo de deformação plástica devido ao aperto.

Nas Figuras 4.71 e 4.72 observa-se a completa deformação plástica sofrida bem como as camadas de revestimento, na forma de placas sobrepostas umas às outras.

De maneira análoga verifica-se o aumento do grau de dano ao revestimento sobre o flanco de pressão com o aumento da carga para 63 kN nas Fig. 4.73 a 4.78.

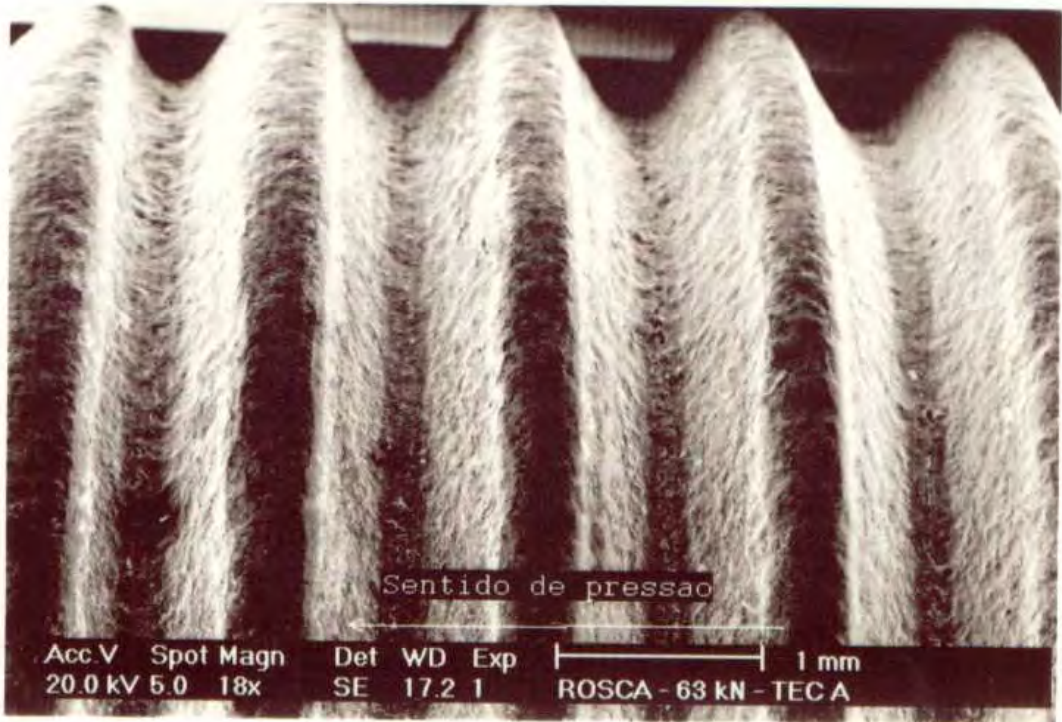


Figura 4.73 – Vista geral da rosca evidenciando o dano sofrido pelo revestimento no flanco de pressão com carga de 63 kN.

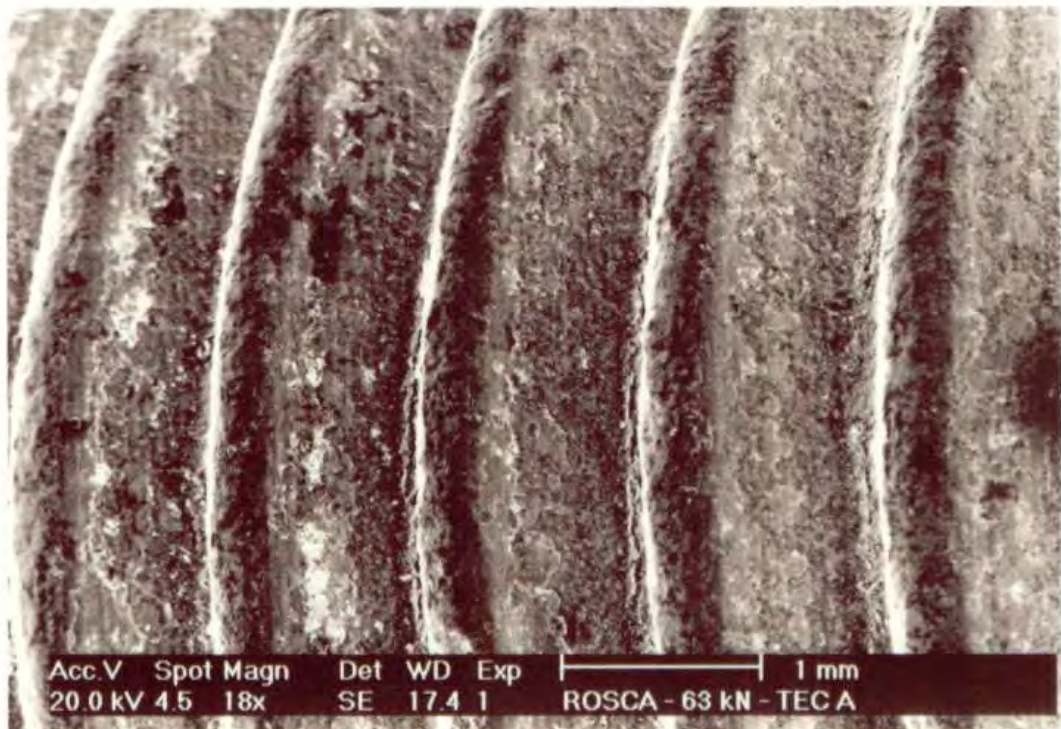


Figura 4.74 – Detalhe dos filetes evidenciando uma maior área de contato

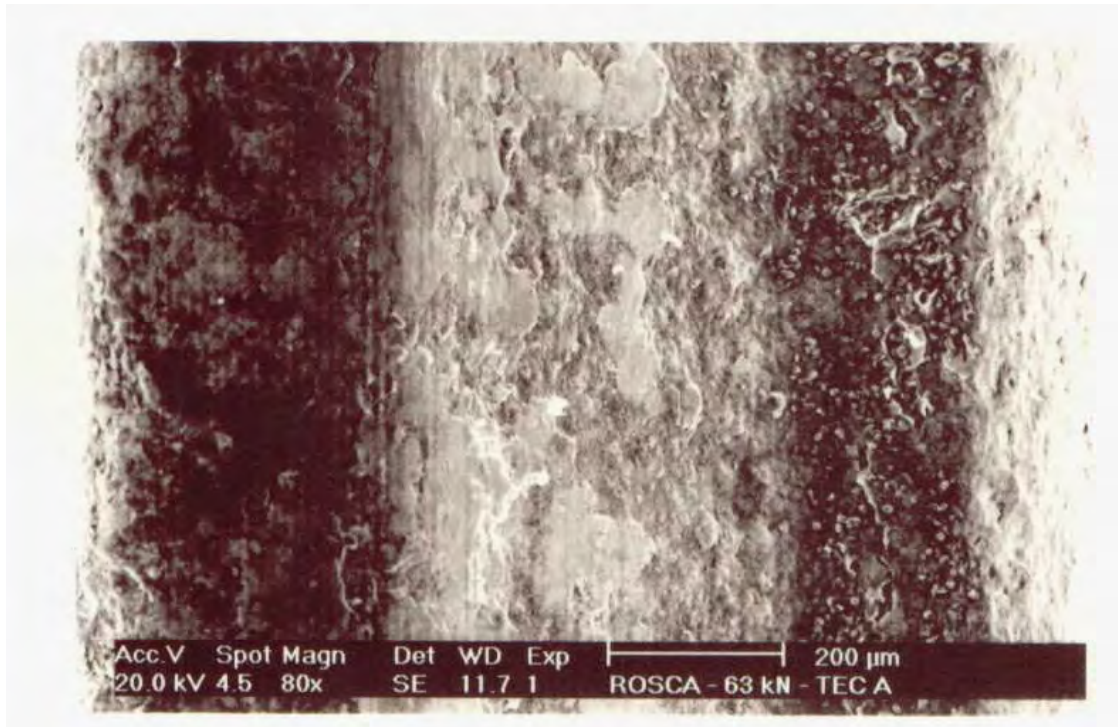


Figura 4.75 – Na medida do aumento da carga verifica-se um contato mais íntimo ao longo do flanco de pressão.

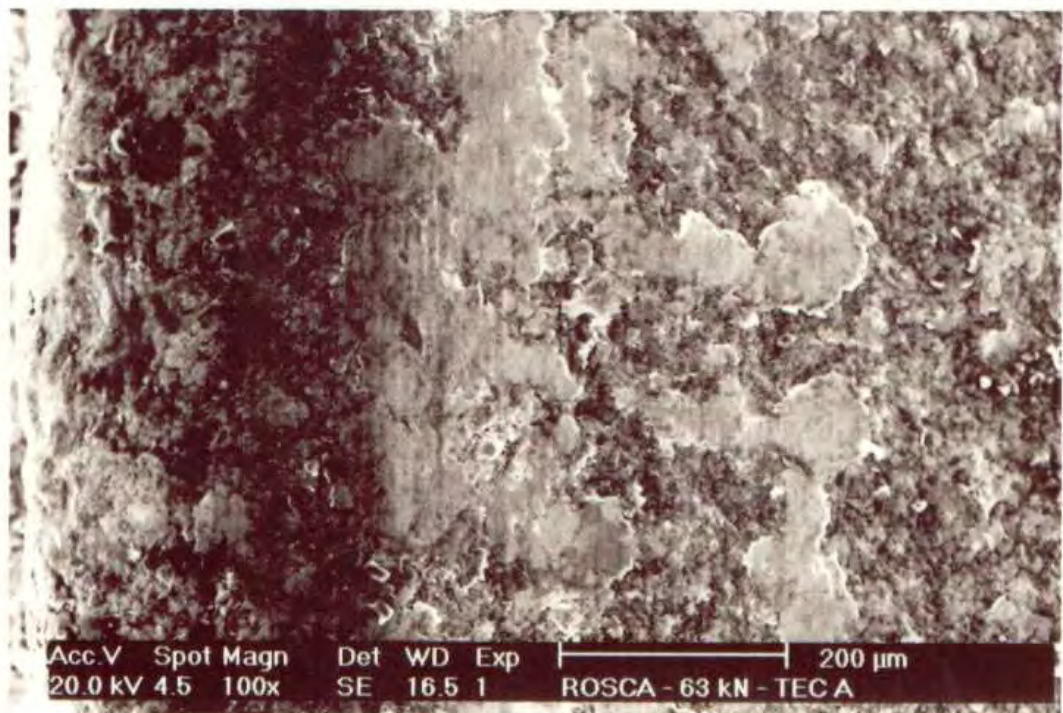


Figura 4.76 – Nota-se que mesmo tendo um contato mais íntimo não significa que a área aparente de contato é igual à área real de contato.

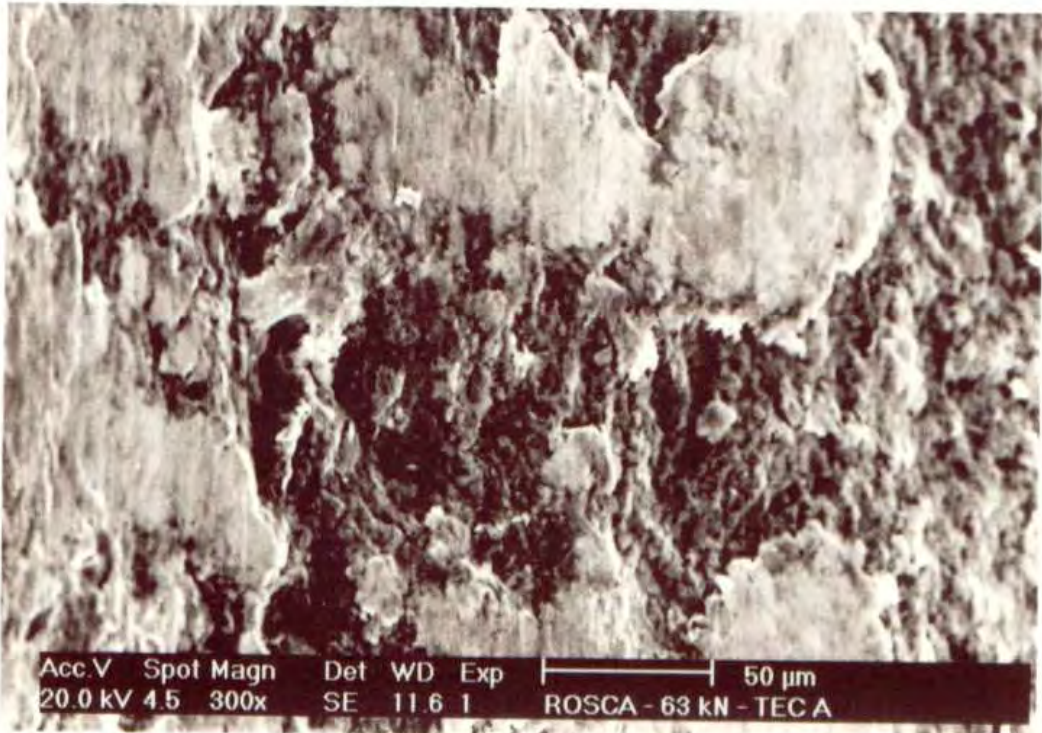


Figura 4.77 – Detalhe da Figura 4.76 mostrando a deformação plástica somente em algumas asperidades.

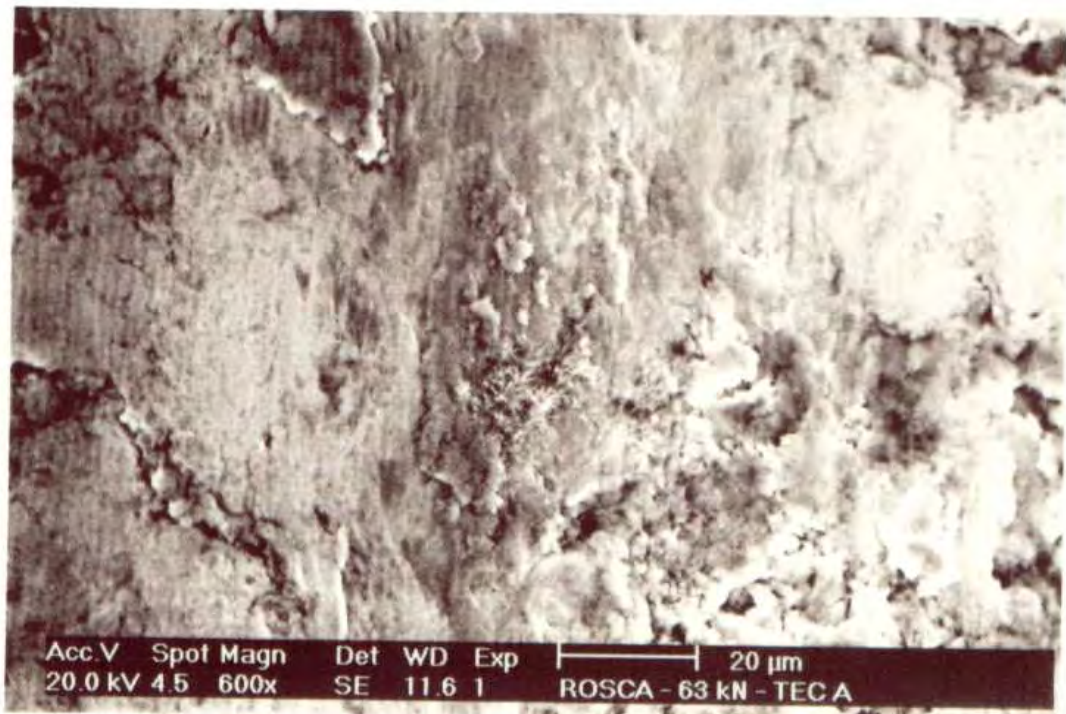


Figura 4.78 – Região de completa deformação plástica.

As análises das Figuras 4.61 a 4.78 conduzem a observações a respeito da influência da carga no fluxo de deformações plásticas nas superfícies revestidas. É claro que as deformações plásticas e conseqüentemente a área real de contato, aumenta com a carga. O efeito desse aumento de área no coeficiente de atrito não segue uma regra geral. Segundo Hutchings (1995), as Leis de Atrito, de forma bastante generalistas e simplificadas, afirmam a independência do coeficiente de atrito com a carga normal, com a área aparente e com a velocidade de deslizamento. Por outro lado, as condições da interface é que ditarão o comportamento do sistema tribológico quanto ao atrito. As superfícies em estudo são revestidas por compostos à base de Al e Zn, que apresentam baixas tensões de cisalhamento. Outro fator de relevante importância é a oxidação desses revestimentos, quando expostos à atmosfera. Essa camada de óxidos, por sua vez, também atuará na interface, facilitando ou dificultando o cisalhamento. Na tecnologia A, possivelmente ter-se-á a formação de óxidos de Zn e de Al, enquanto para a B, o de titânio também poderá estar presente.

4.3 – AVALIAÇÃO DA REUSABILIDADE DOS PARAFUSOS

Buscando avaliar os revestimentos principalmente com relação à consistência dos valores de atrito bem como o grau de deterioração dos mesmos, procedeu-se uma série de quatro apertos e desapertos em um mesmo parafuso na carga de 49 KN, cujos resultados são mostrados nas Tab. 4.9 e 4.10. Os resultados encontrados são apresentados na forma gráfica nas Fig. 4.79 a 4.104.

Tabela 4.9 - Reusabilidade - Força tensora 49 kN - Tecnologia A.

PARAF. 1	Torque Total	Torque Rosca	Torque Cabeça	K	μ_G	μ_K	Rendimento	μ_{ges}
Aperto 1	140,6	49,3	91,3	0,239	0,125	0,252	0,839	0,193
Aperto 2	166,7	57	109,6	0,283	0,149	0,303	0,801	0,231
Aperto 3	201,7	72,9	128,7	0,342	0,2	0,355	0,723	0,283
Aperto 4	250,7	91,3	159,3	0,425	0,258	0,439	0,641	0,355
PARAF. 2	Torque Total	Torque Rosca	Torque Cabeça	K	μ_G	μ_K	Rendimento	μ_{ges}
Aperto 1	142,9	49,1	93,8	0,243	0,125	0,259	0,84	0,197
Aperto 2	174	67,8	106,1	0,295	0,184	0,293	0,747	0,242
Aperto 3	*	-	-	-	-	-	-	-
Aperto 4	*	-	-	-	-	-	-	-
PARAF. 3	Torque Total	Torque Rosca	Torque Cabeça	K	μ_G	μ_K	Rendimento	μ_{ges}
Aperto 1	135,9	48,3	87,5	0,231	0,122	0,242	0,845	0,186
Aperto 2	179,8	68,7	111,1	0,306	0,187	0,307	0,742	0,251
Aperto 3	186,4	78,5	107,9	0,317	0,218	0,298	0,696	0,261
Aperto 4	*	-	-	-	-	-	-	-
PARAF. 4	Torque Total	Torque Rosca	Torque Cabeça	K	μ_G	μ_K	Rendimento	μ_{ges}
Aperto 1	141,8	47,7	94,1	0,241	0,12	0,26	0,847	0,195
Aperto 2	163,1	61,2	101,8	0,277	0,163	0,281	0,779	0,226
Aperto 3	187,3	70,3	117	0,318	0,192	0,323	0,735	0,262
Aperto 4	219,6	84,8	134,8	0,373	0,238	0,373	0,668	0,31

* Parafuso retirado para análises.

Tabela 4.10 - Reusabilidade - Força tensora 49 kN - Tecnologia B.

PARAF. 1	Torque Total	Torque Rosca	Torque Cabeça	K	μ_G	μ_K	Rendimento	μ_{ges}
Aperto 1	143,4	54,2	89,1	0,243	0,141	0,246	0,815	0,197
Aperto 2	160,4	58,3	102	0,272	0,154	0,281	0,794	0,222
Aperto 3	197,2	77,5	119,6	0,335	0,214	0,33	0,701	0,276
Aperto 4	241,2	90,1	151	0,41	0,255	0,418	0,645	0,342
PARAF. 2	Torque Total	Torque Rosca	Torque Cabeça	K	μ_G	μ_K	Rendimento	μ_{ges}
Aperto 1	138,7	50,9	87,7	0,236	0,13	0,243	0,831	0,19
Aperto 2	149,5	57,3	92,2	0,254	0,151	0,255	0,799	0,206
Aperto 3	195,6	76,4	119,2	0,333	0,211	0,33	0,705	0,275
Aperto 4	269	89,7	179,2	0,456	0,253	0,495	0,647	0,382
PARAF. 3	Torque Total	Torque Rosca	Torque Cabeça	K	μ_G	μ_K	Rendimento	μ_{ges}
Aperto 1	143,1	55,9	87,2	0,243	0,146	0,241	0,806	0,197
Aperto 2	154,1	60,8	93,2	0,262	0,162	0,257	0,782	0,213
Aperto 3	195,9	81	114,8	0,332	0,225	0,317	0,685	0,274
Aperto 4	*	-	-	-	-	-	-	
PARAF. 4	Torque Total	Torque Rosca	Torque Cabeça	K	μ_G	μ_K	Rendimento	μ_{ges}
Aperto 1	139	53,9	85	0,236	0,14	0,235	0,816	0,191
Aperto 2	158,1	61,5	96,5	0,268	0,164	0,266	0,778	0,219
Aperto 3	*	-	-	-	-	-	-	
Aperto 4	-	-	-	-	-	-	-	

* Parafuso retirado para análises.

Nas Figuras 4.79 e 4.80 são sintetizados os resultados encontrados, para o coeficiente de atrito na cabeça μ_K e coeficiente de atrito na rosca μ_G com o

número de utilizações (apertos) do parafuso. Observa-se que a cada novo aperto do parafuso, esse coeficiente de atrito eleva. Isso mostra que os sucessivos aparafusamentos estão promovendo alterações na interface revestimento-substrato e aumentando a resistência ao cisalhamento.

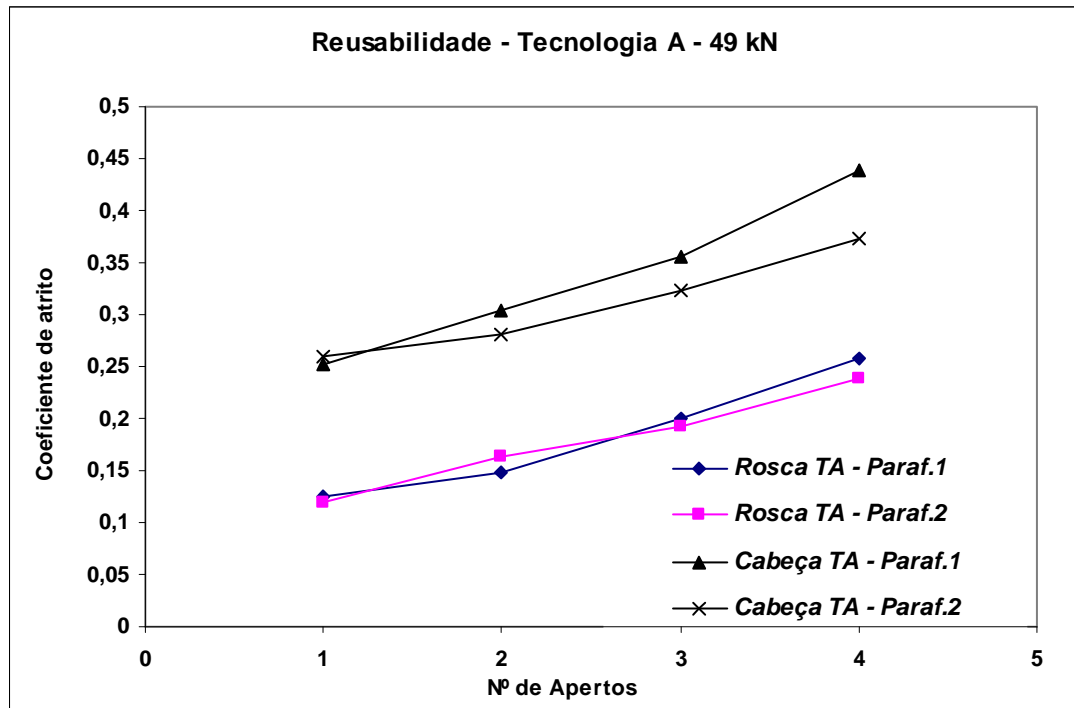


Figura 4.79 - Variação do coeficiente de atrito na rosca e na cabeça – Tecnologia A.

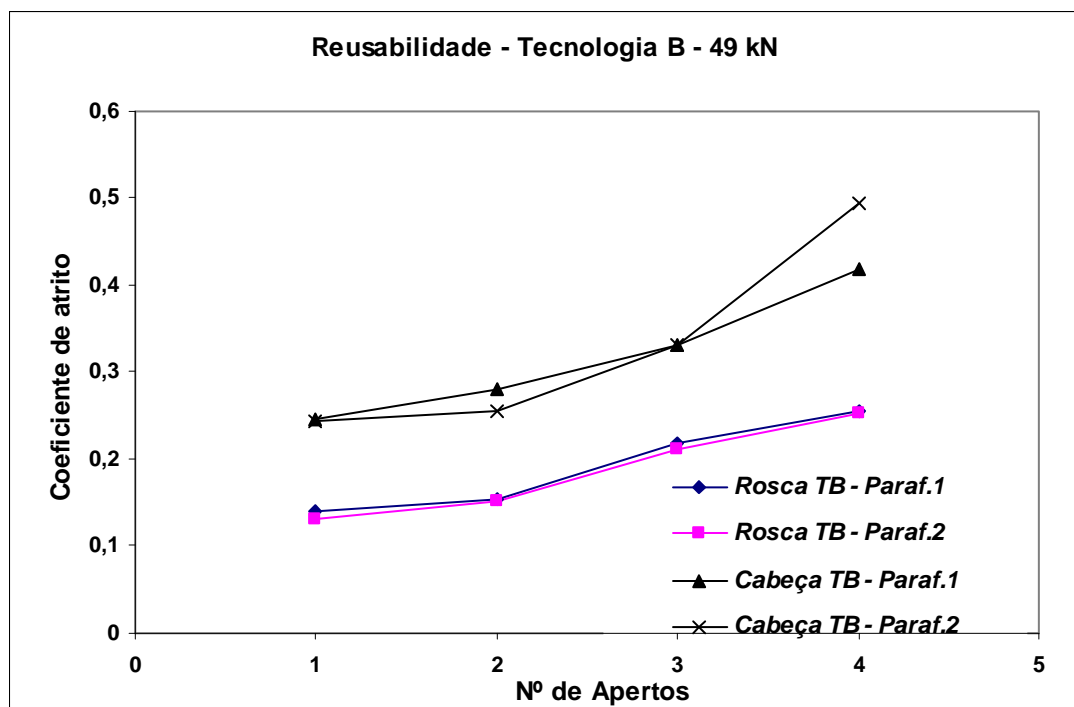


Figura 4.80 - Variação do coeficiente de atrito na cabeça – Tecnologia B.

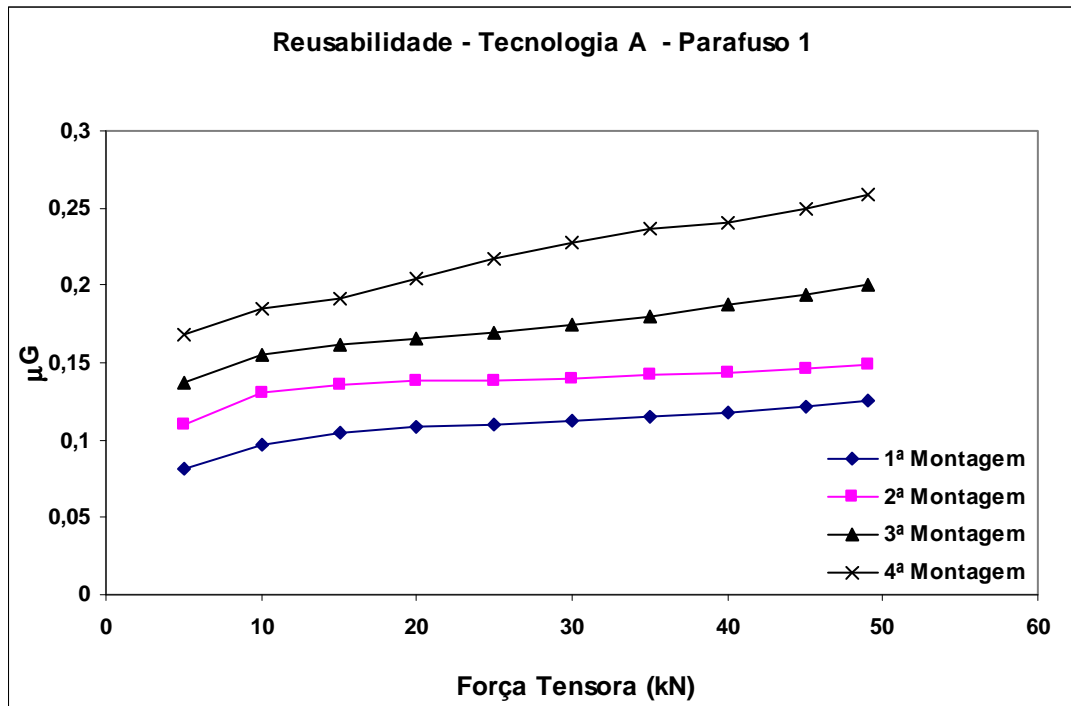


Figura 4.81 - Variação do coeficiente de atrito na rosca - Tecnologia A.

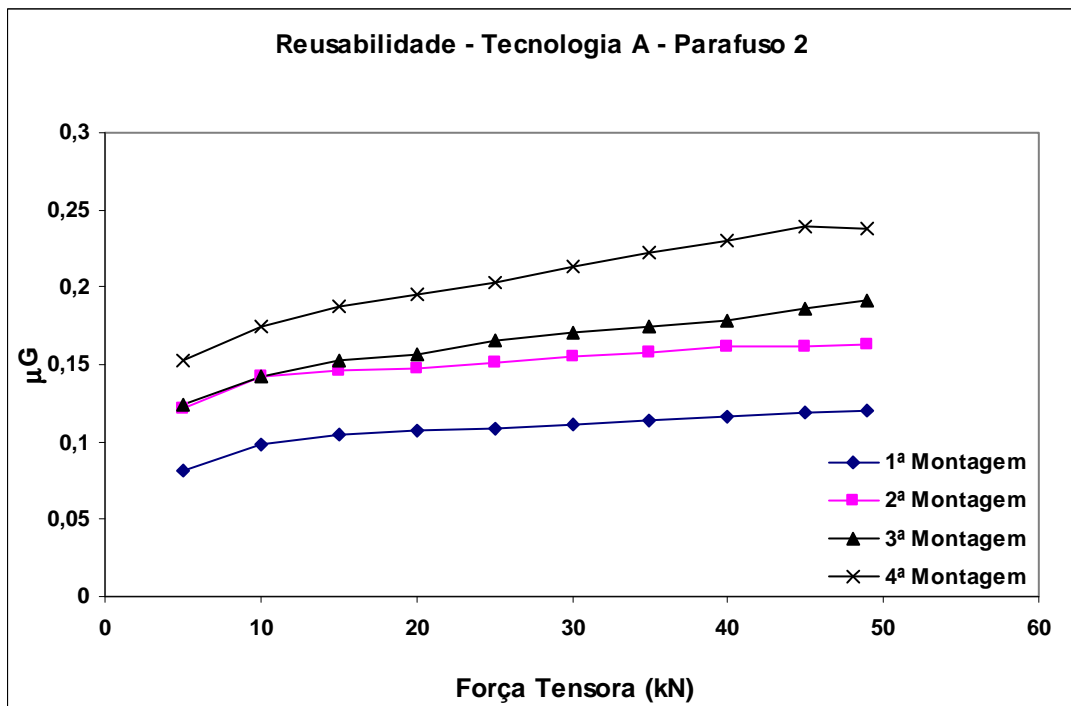


Figura 4.82 - Variação do coeficiente de atrito na rosca - Tecnologia A.

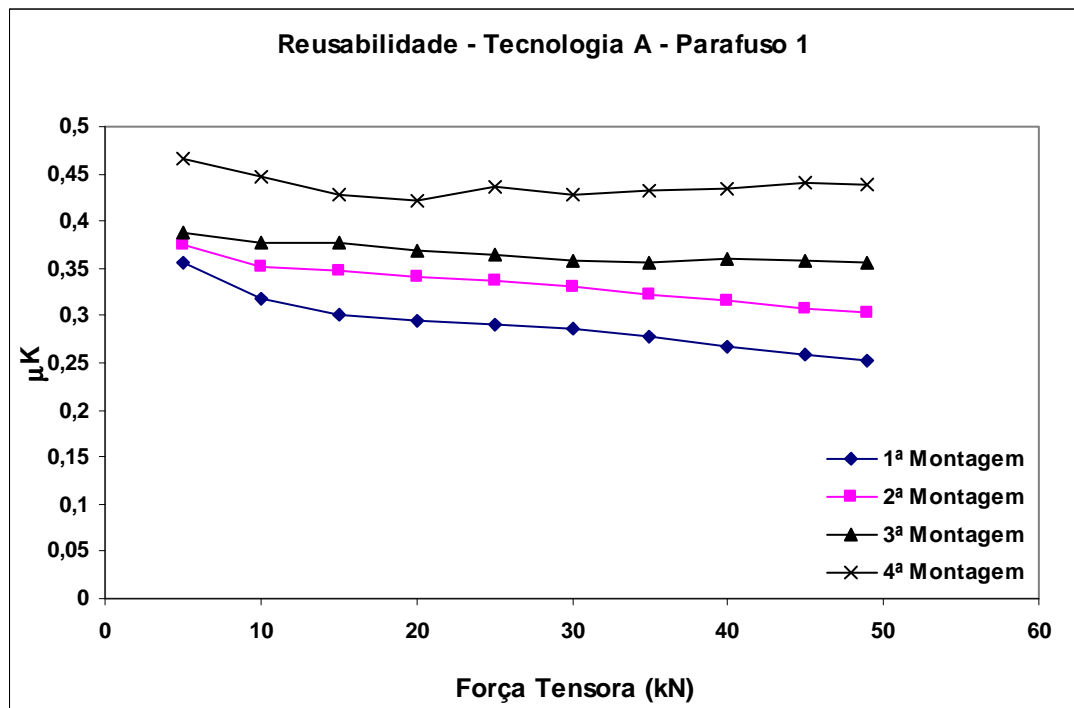


Figura 4.83 - Variação do coeficiente de atrito na cabeça - Tecnologia A.

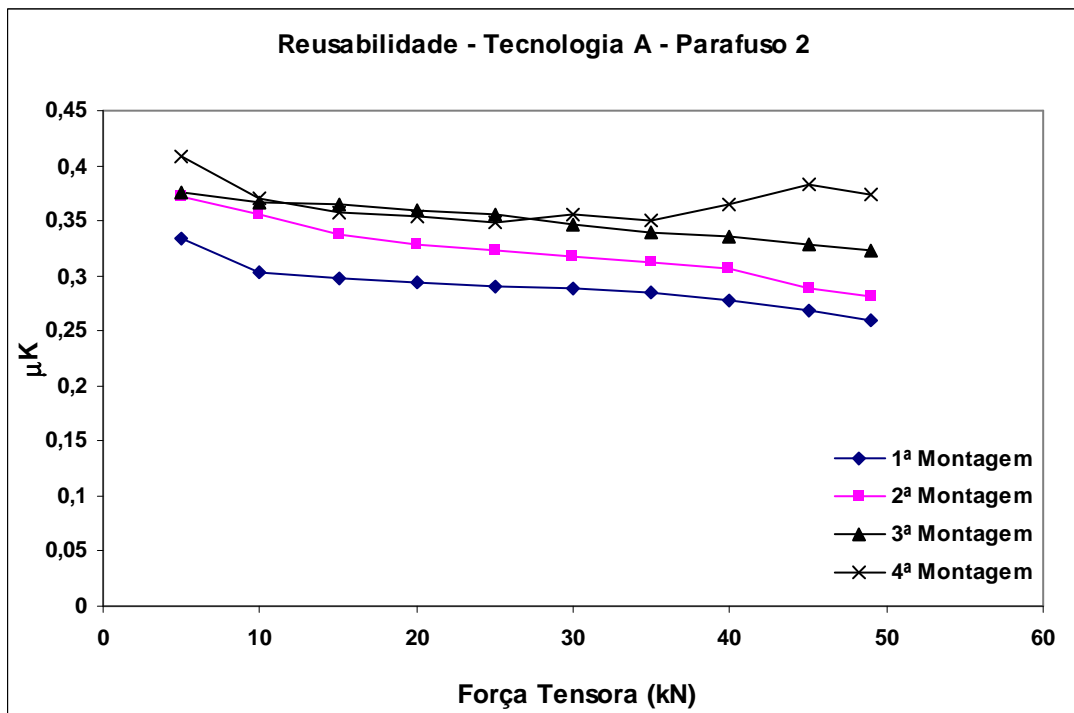


Figura 4.84 - Variação do coeficiente de atrito na cabeça - Tecnologia A.

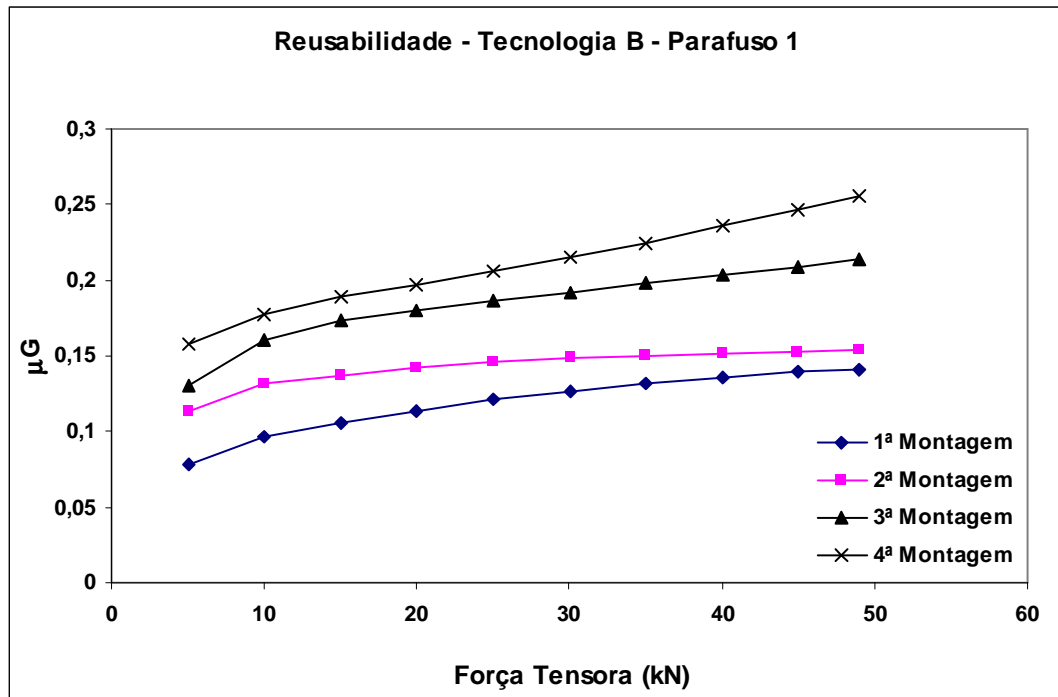


Figura 4.85 - Variação do coeficiente de atrito na rosca - Tecnologia B.

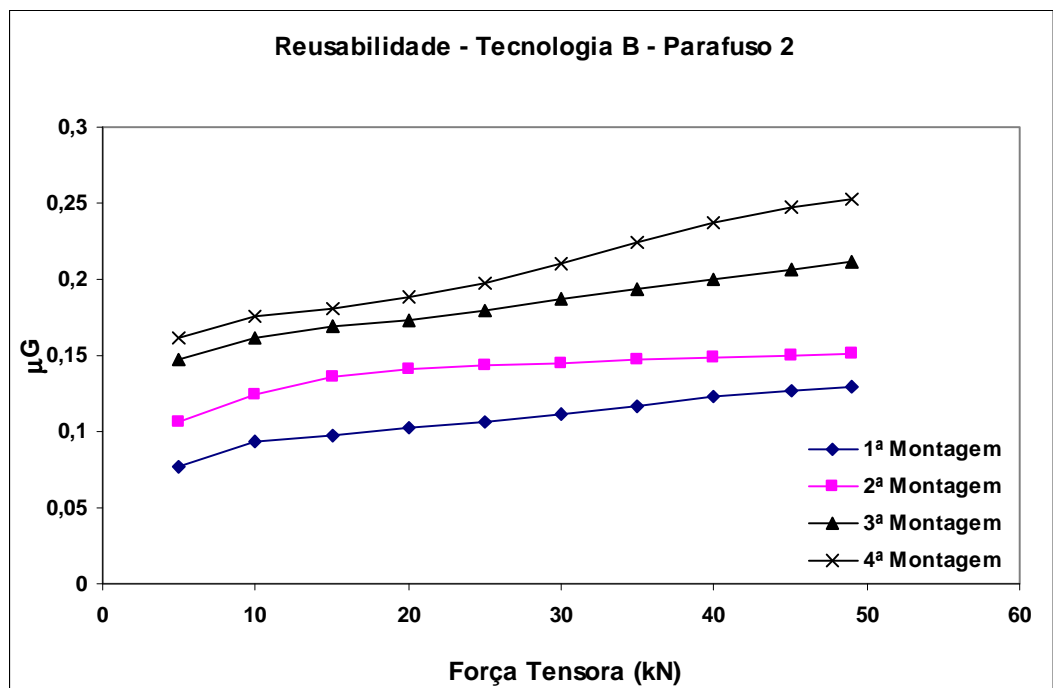


Figura 4.86 - Variação do coeficiente de atrito na rosca - Tecnologia B.

Nas Figuras 4.81, 4.82, 4.85 e 4.86 observa-se que após cada reutilização há a tendência de aumento do coeficiente de atrito na parte filetada do parafuso, μ_G . O mesmo ocorrendo com o coeficiente de atrito na cabeça μ_K , conforme mostrado nas Fig. 4.83, 4.84, 4.87 e 4.88.

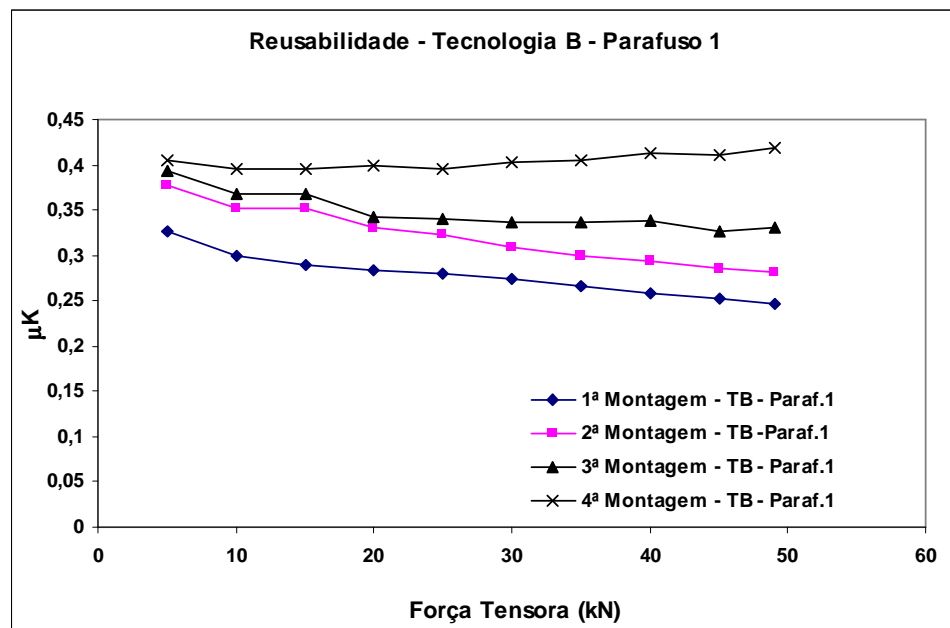


Figura 4.87 - Variação do coeficiente de atrito na cabeça - Tecnologia B.

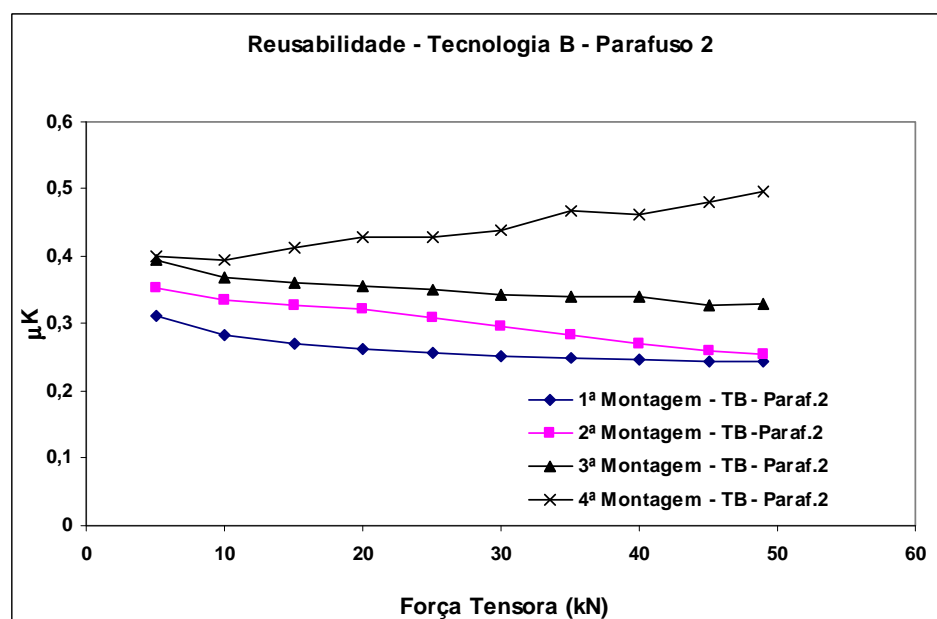


Figura 4.88 - Variação do coeficiente de atrito na cabeça - Tecnologia B.

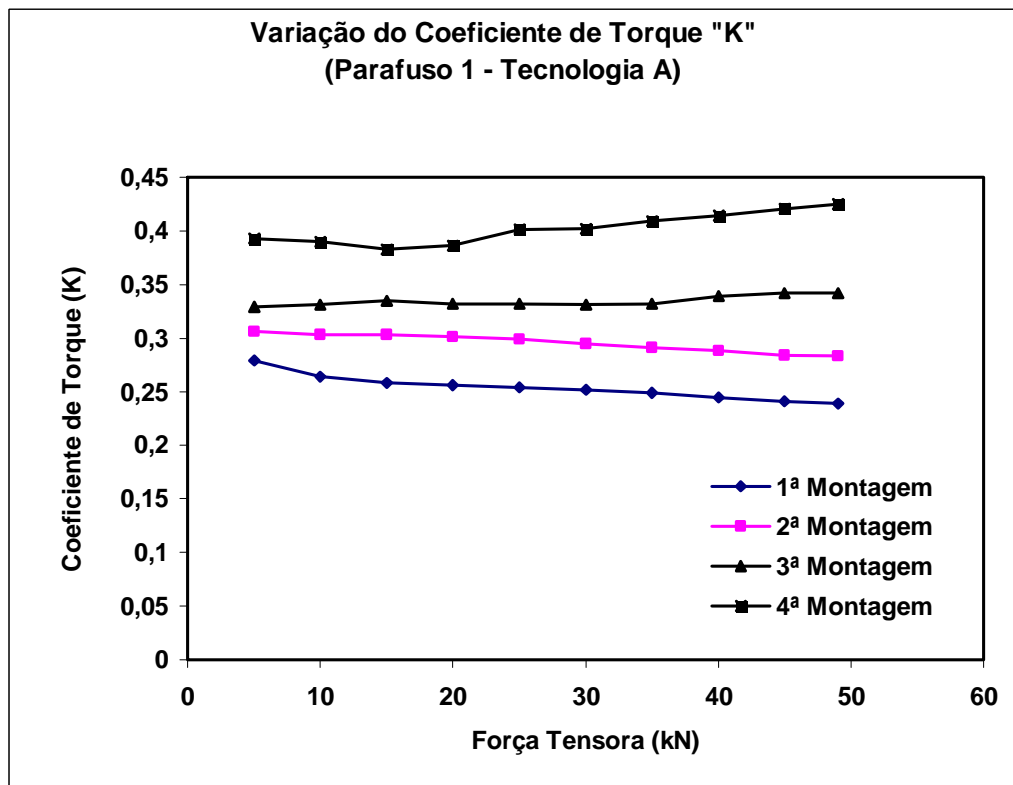


Figura 4.89 - Variação do coeficiente de torque K - Tecnologia A.

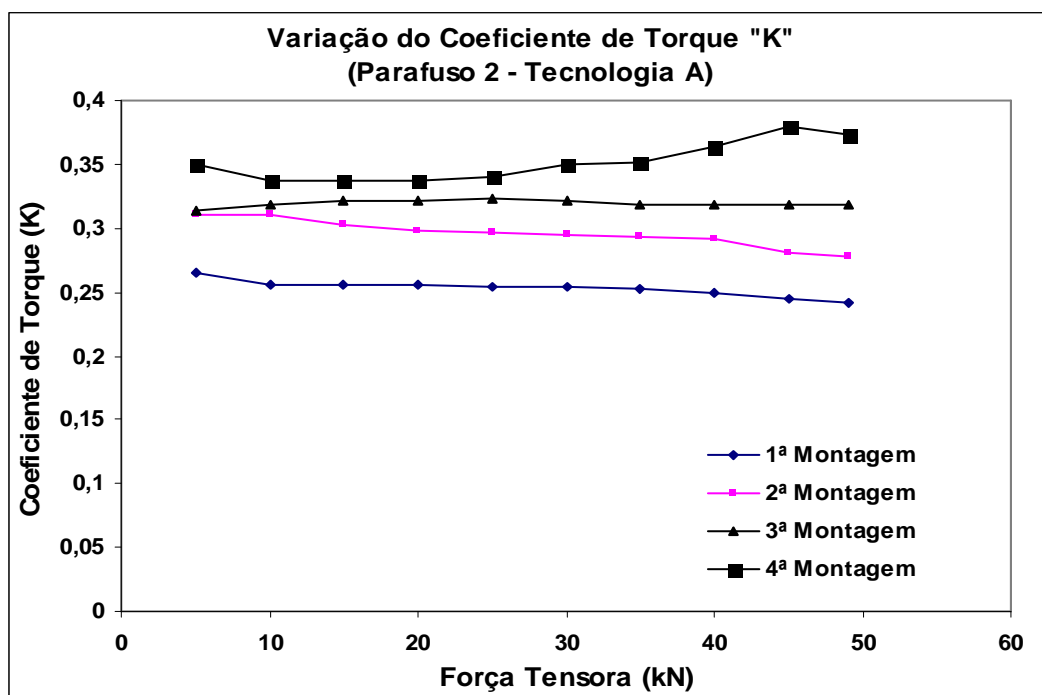


Figura 4.90 - Variação do coeficiente de torque K - Tecnologia A.

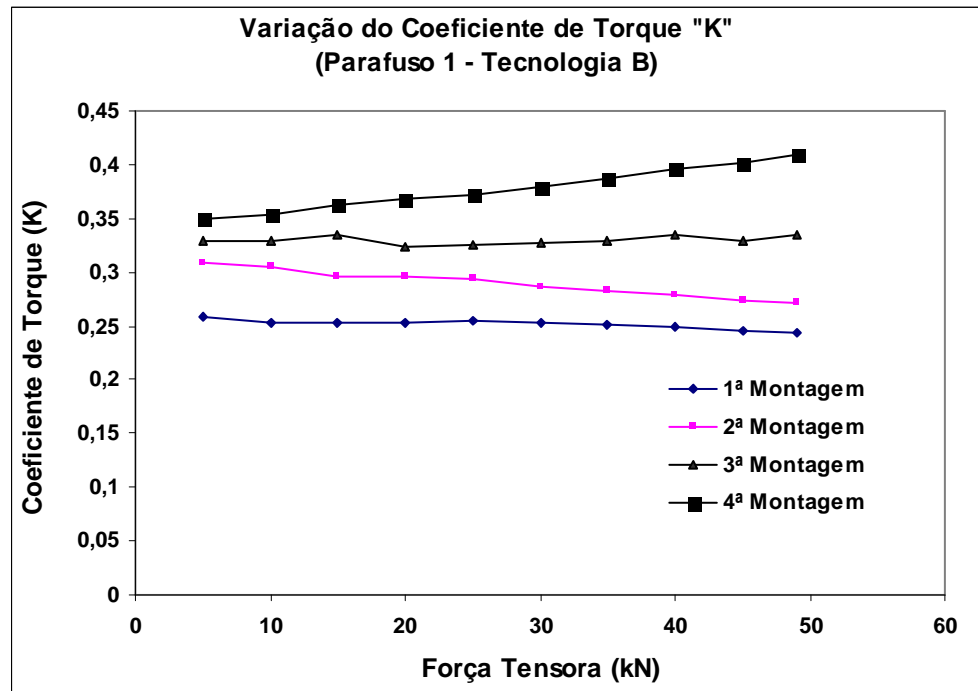


Figura 4.91 - Variação do coeficiente de torque K - Tecnologia B.

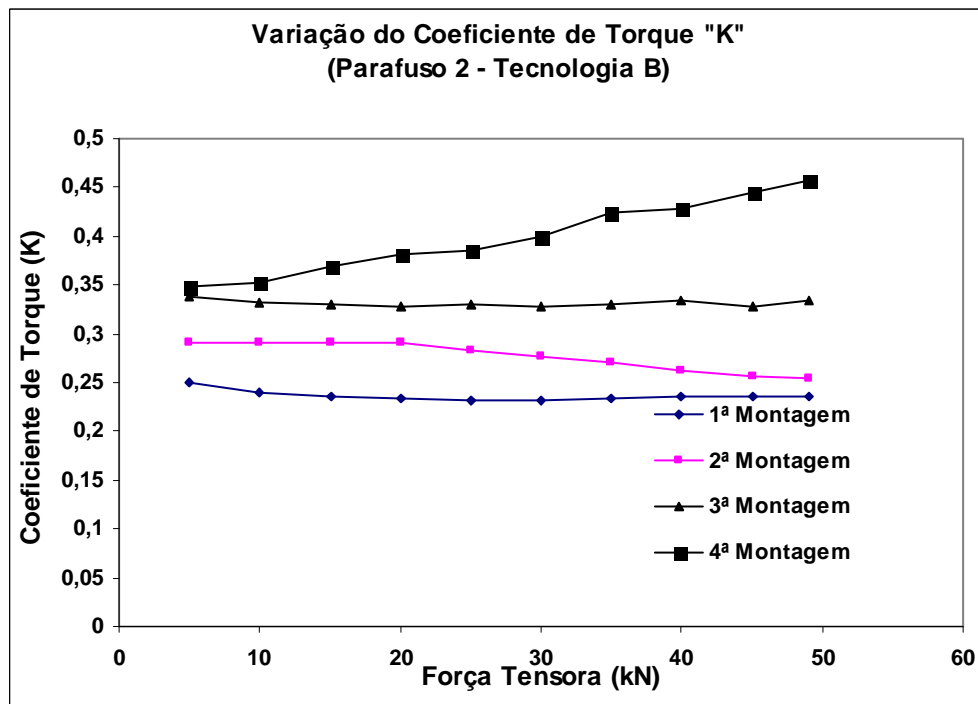


Figura 4.92 - Variação do coeficiente de torque K - Tecnologia B.

Nas Figuras 4.89 a 4.92 observa-se que após cada reutilização há o aumento do coeficiente de torque K.

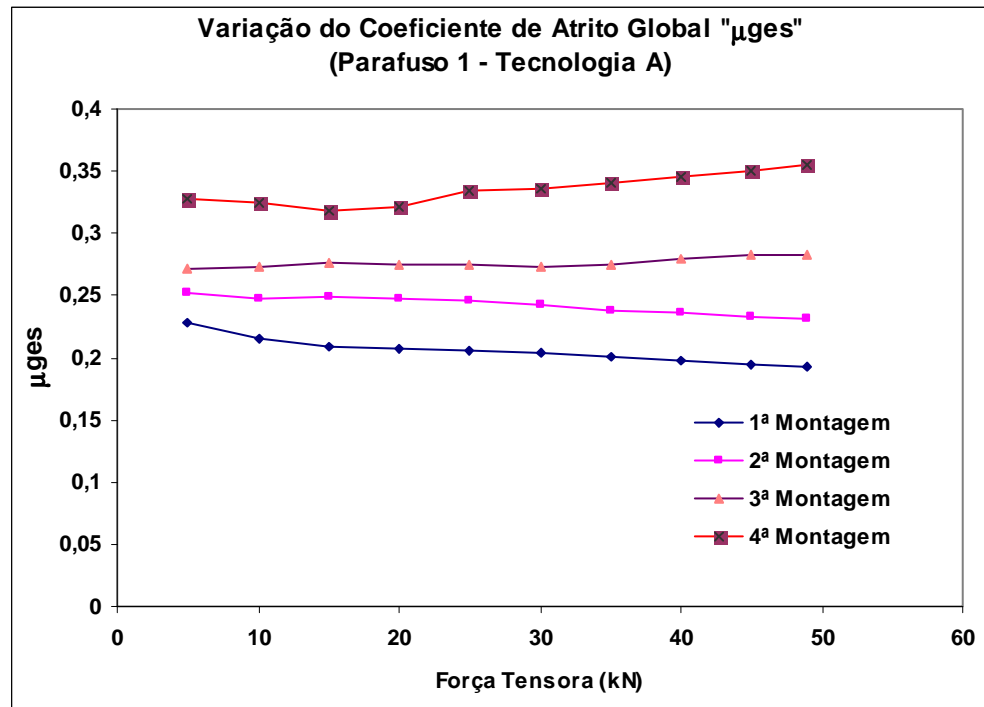


Figura 4.93 - Variação do coeficiente de atrito global - Tecnologia A.

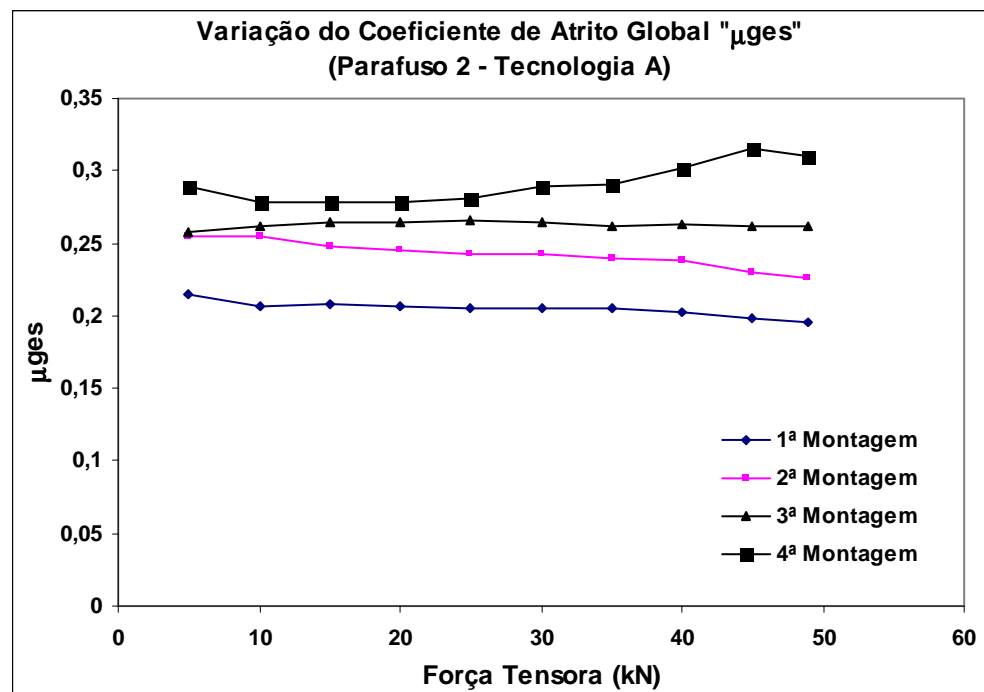


Figura 4.94 - Variação do coeficiente de atrito global - Tecnologia A.

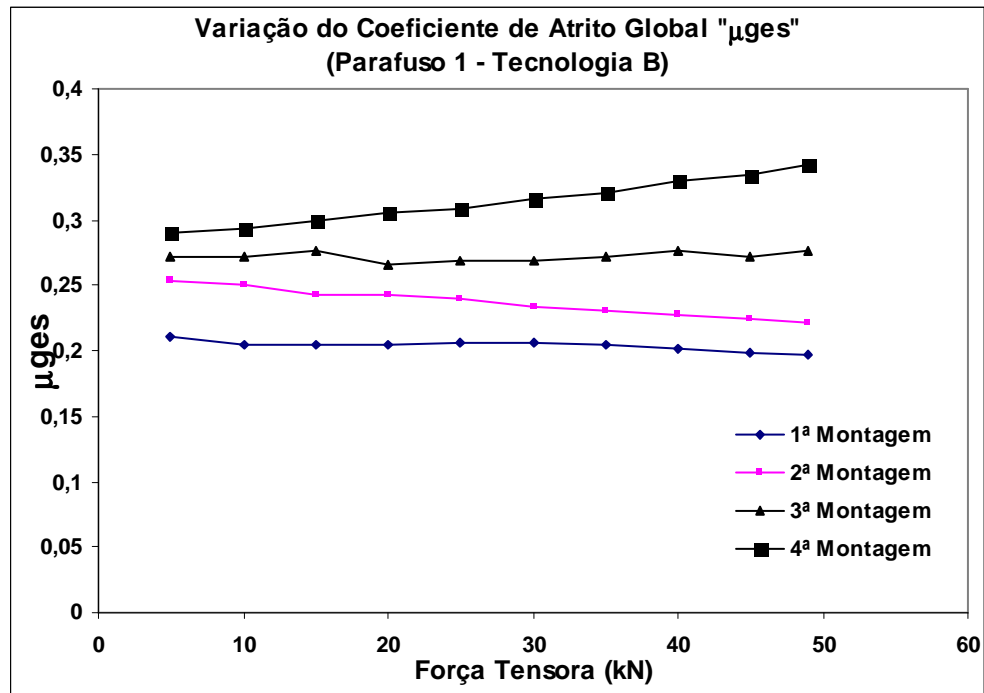


Figura 4.95 - Variação do coeficiente de atrito global - Tecnologia B.

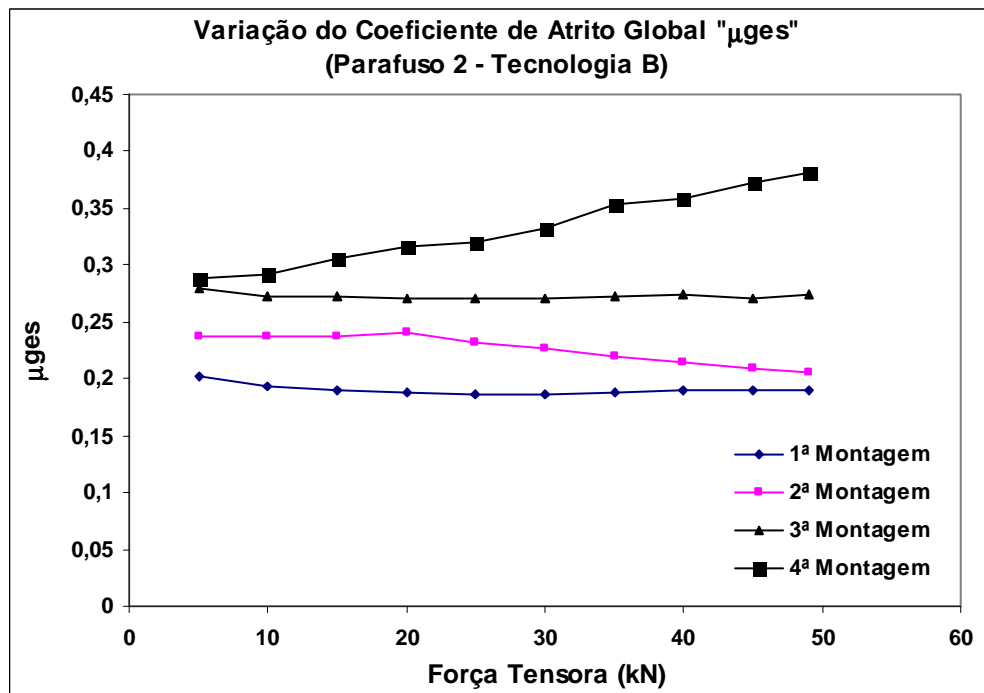


Figura 4.96 - Variação do coeficiente de atrito global - Tecnologia B.

Nas Figuras 4.93 a 4.96 observa-se que após cada reutilização há o aumento do coeficiente de atrito global, μ_{ges} ,

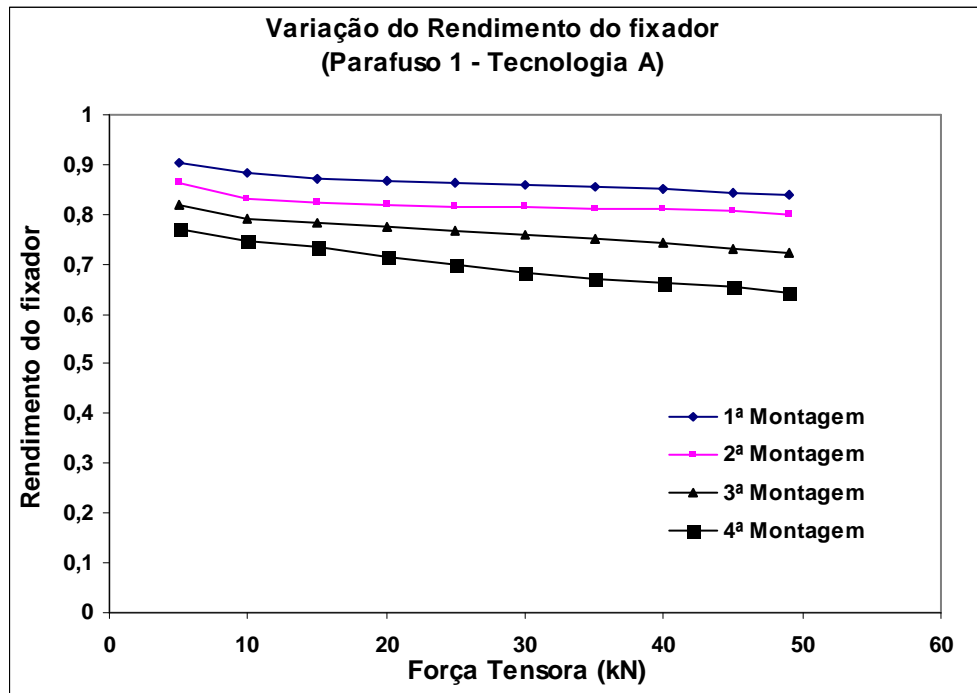


Figura 4.97 - Variação do rendimento do fixador - Tecnologia A.

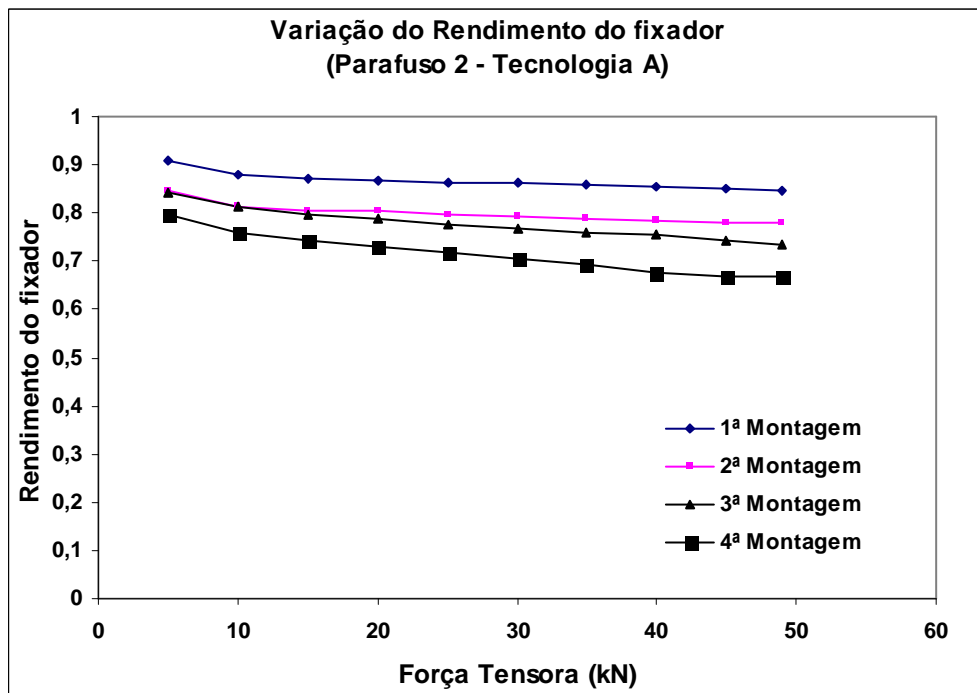


Figura 4.98 - Variação do rendimento do fixador - Tecnologia A.

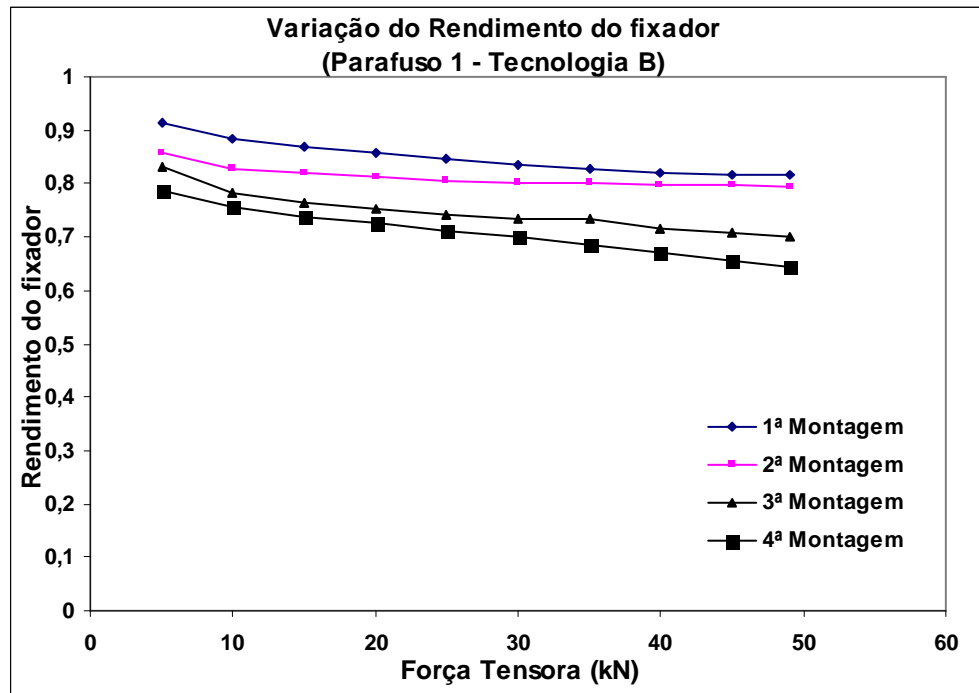


Figura 4.99 - Variação do rendimento do fixador - Tecnologia B.

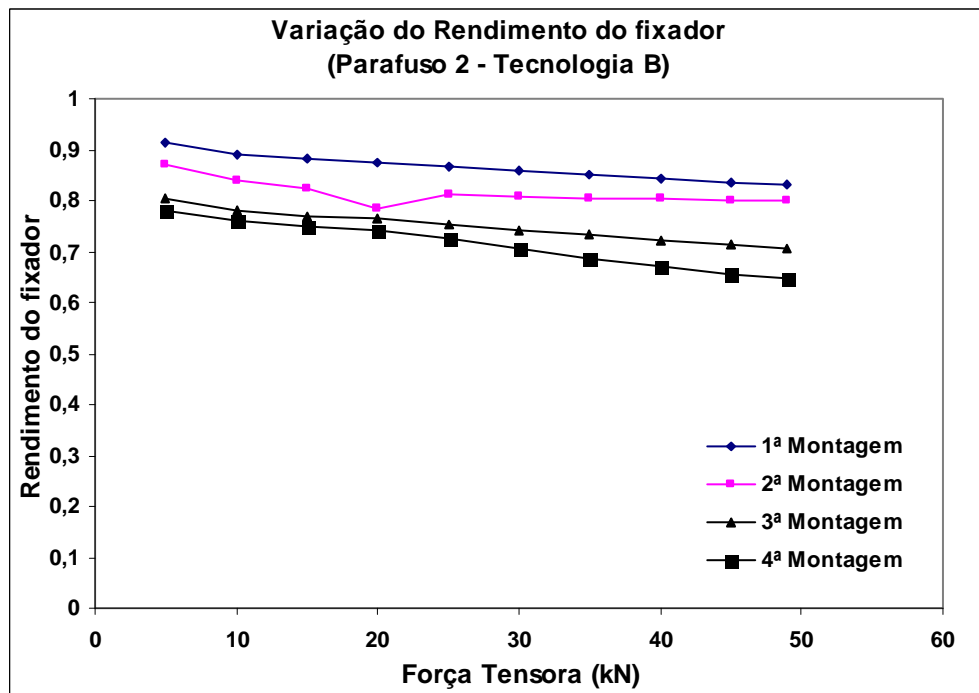


Figura 4.100 - Variação do rendimento do fixador - Tecnologia B

Nas Figuras 4.97 a 4.100 observa-se que após cada reutilização ocorre um decréscimo significativo do rendimento.

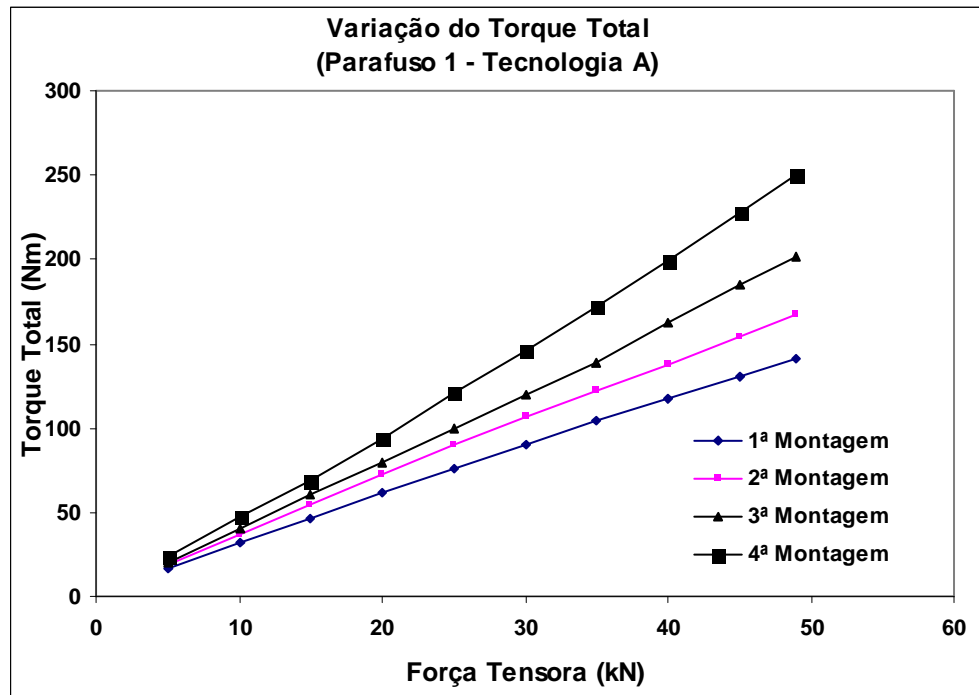


Figura 4.101 - Variação do Torque Total - Tecnologia A.

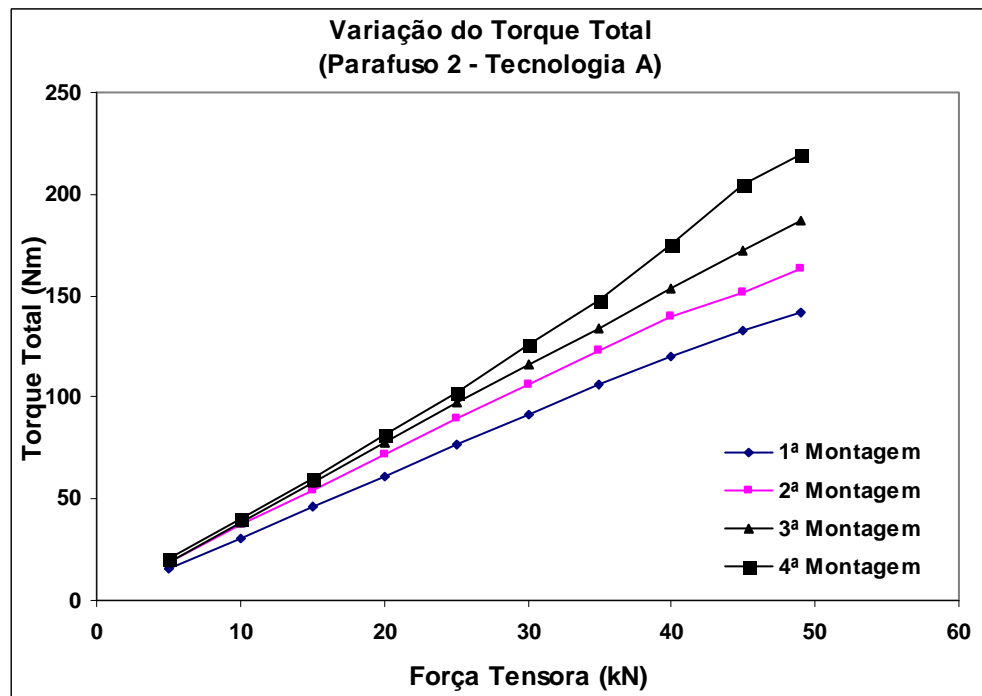


Figura 4.102 - Variação do Torque Total - Tecnologia A.

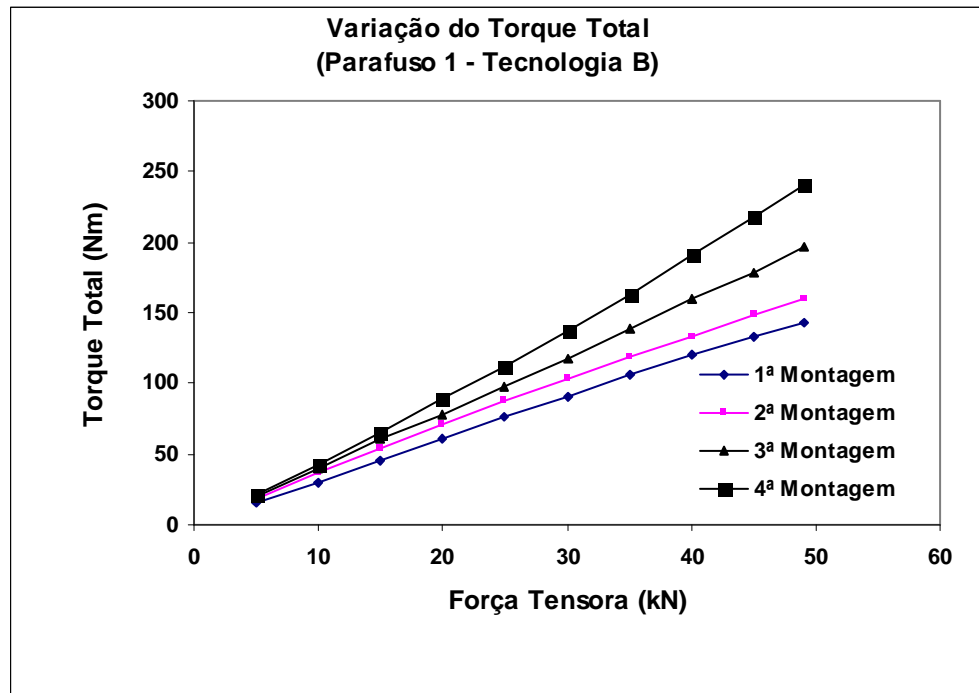


Figura 4.103 - Variação do Torque Total - Tecnologia B.

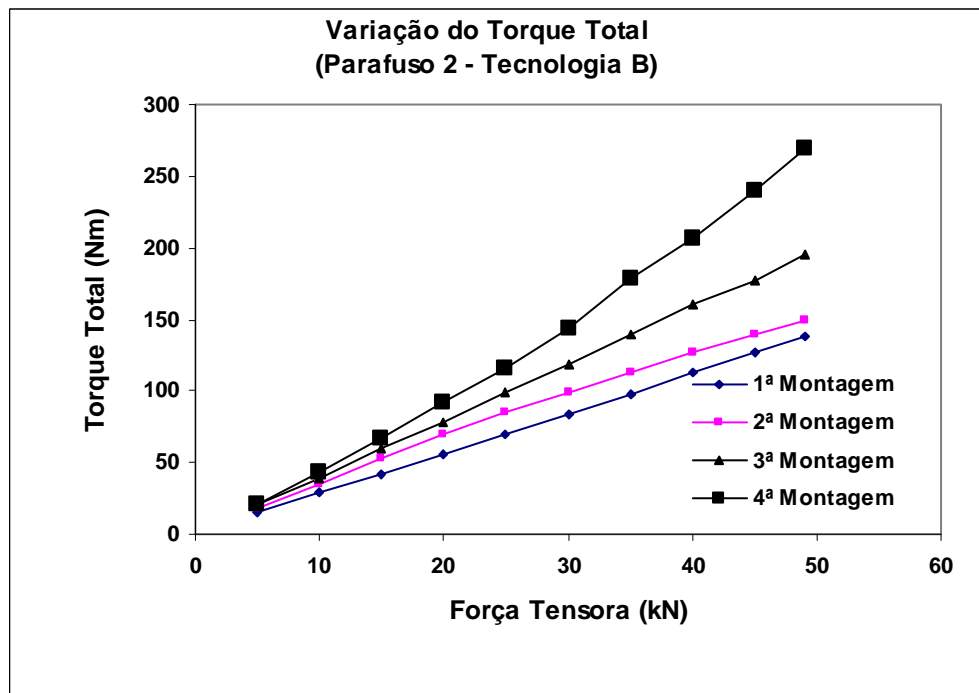


Figura 4.104 - Variação do Torque Total - Tecnologia B.

Nas Figuras 4.101 a 4.104 observa-se a grande variação do torque total da 1ª para a 4ª montagem.

Após os ensaios de reusabilidade procedeu-se análises microscópicas e ao microscópio eletrônico de varredura sobre os parafusos aonde verificou-se o aumento do grau de dano sofrido pelo revestimento após sucessivas montagens. Na Figura 4.105 observa-se o estado das superfícies em contato para a segunda e terceira reutilização, nota-se um aumento da área real de contato tanto para a face de apoio da cabeça como para a região roscada, mostrada na Fig. 4.106.

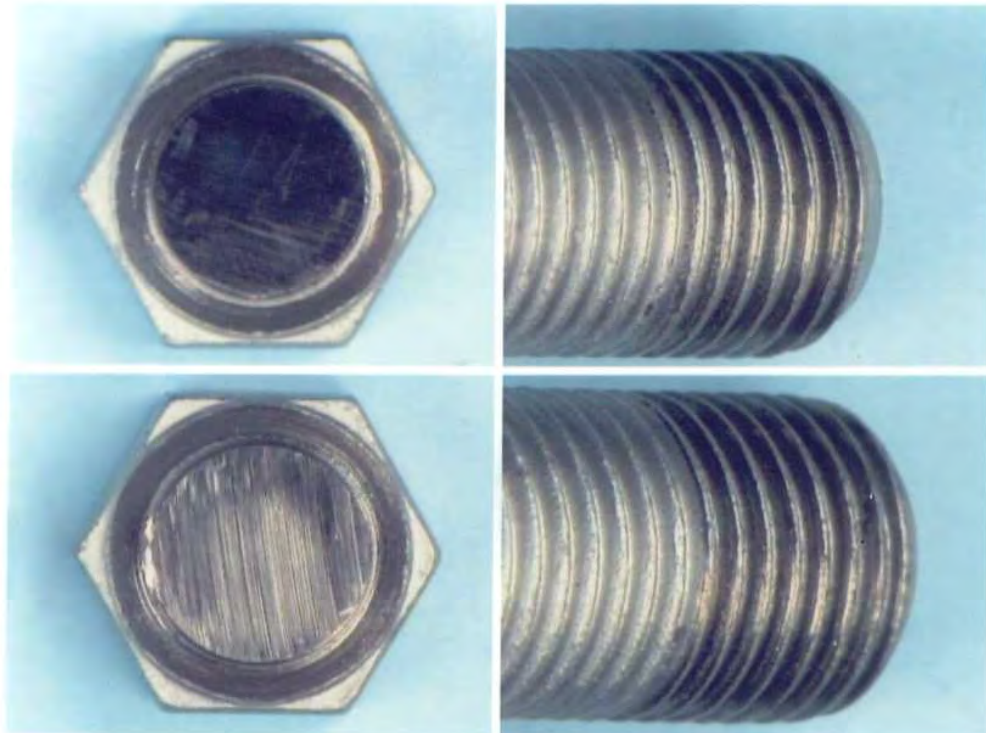


Figura 4.105 – Observa-se o aumento do grau de dano das superfícies em contato para a segunda (foto superior) e terceira (foto inferior) reutilização.

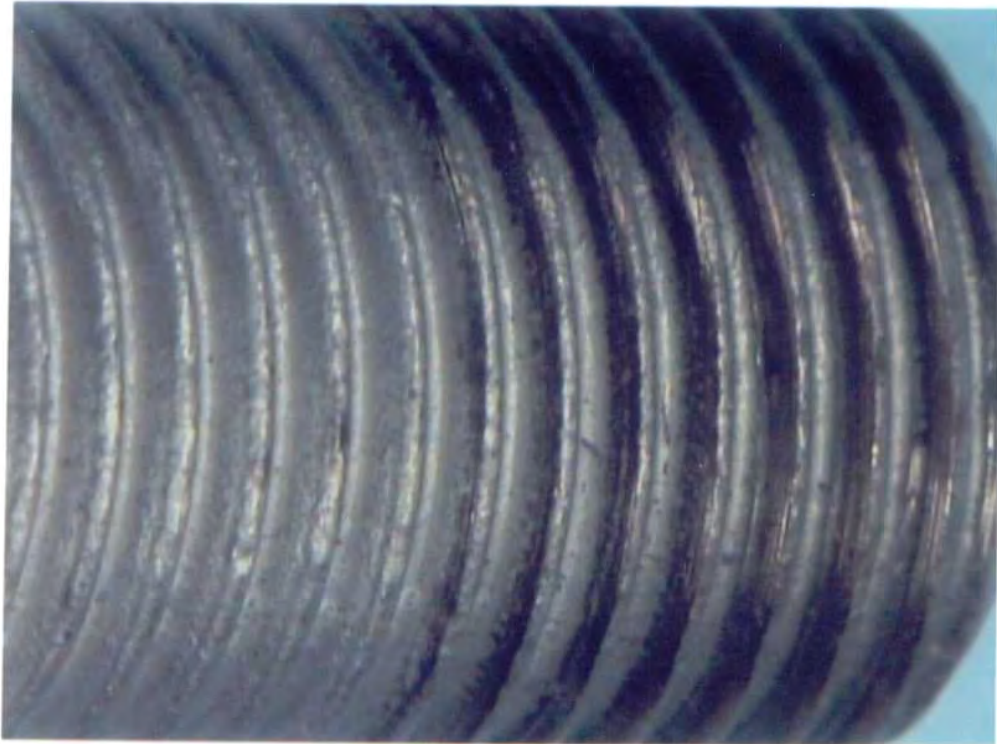


Figura 4.106 - Dano sofrido pelo revestimento na terceira reutilização.

Das análises no microscópio eletrônico de varredura, verifica-se na terceira reutilização um aumento significativo das superfícies em contato tanto para a face de apoio da cabeça (Fig. 4.107) como para a região roscada (Fig. 4.109). Na Figura 4.108 verifica-se que para a terceira reutilização praticamente já não existe revestimento e sim resíduos do mesmo. A análise química nesta região revelou que o substrato de aço foi atingido (Fig. 4.110). Nessa situação, o revestimento foi praticamente todo retirado do substrato de aço, ou seja, nessa condição o parafuso não deverá ser utilizado.

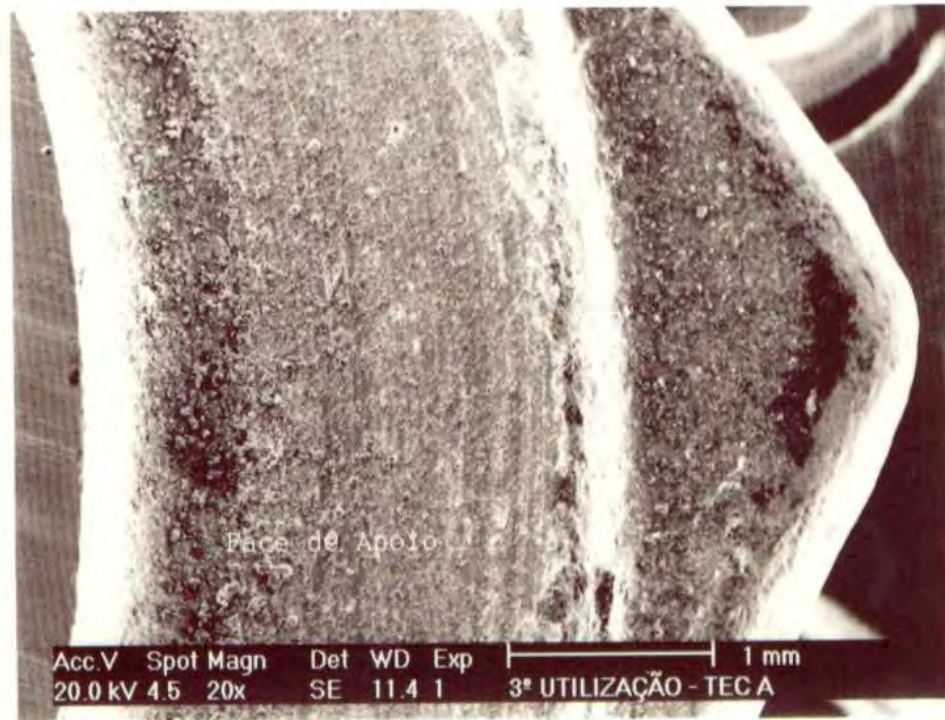


Figura 4.107 - Aumento da superfície de contato da face de apoio da cabeça.

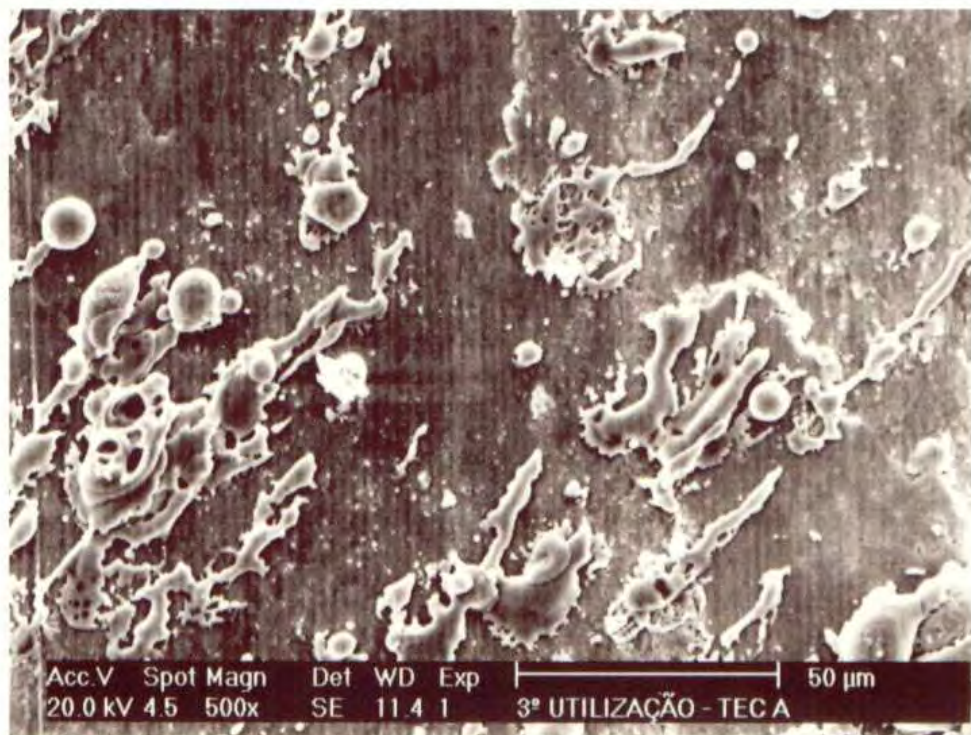


Figura 4.108 - Detalhe da superfície mostrando que atingiu-se o metal base e sobre a mesma apenas resíduos de revestimento.

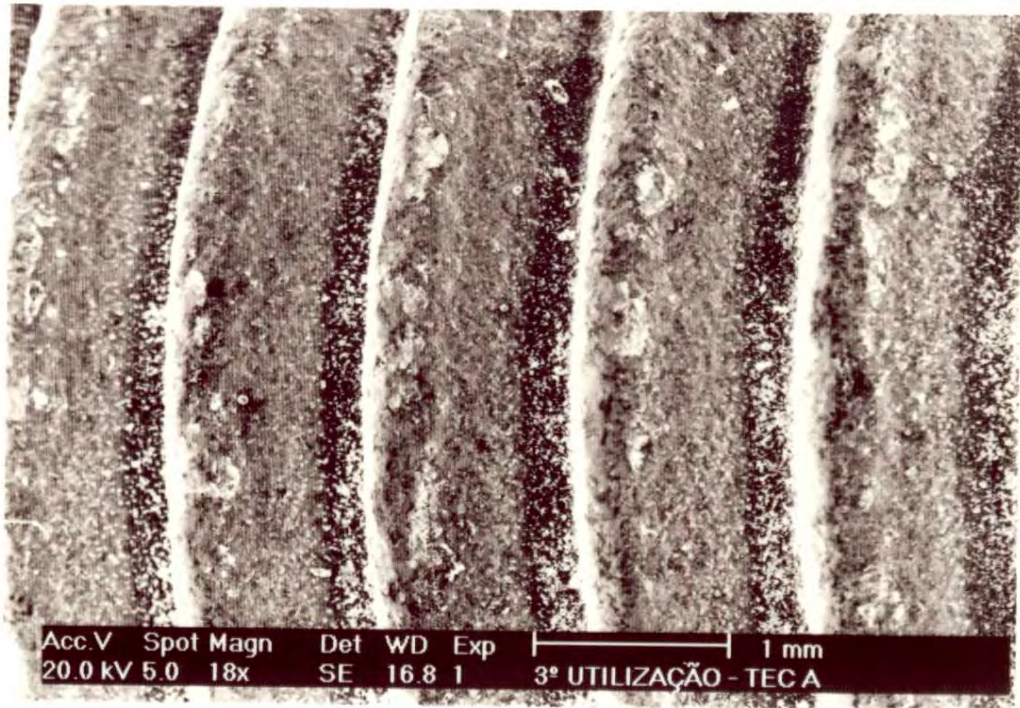


Figura 4.109 - Detalhe da região roscada evidenciando uma maior área de contato.

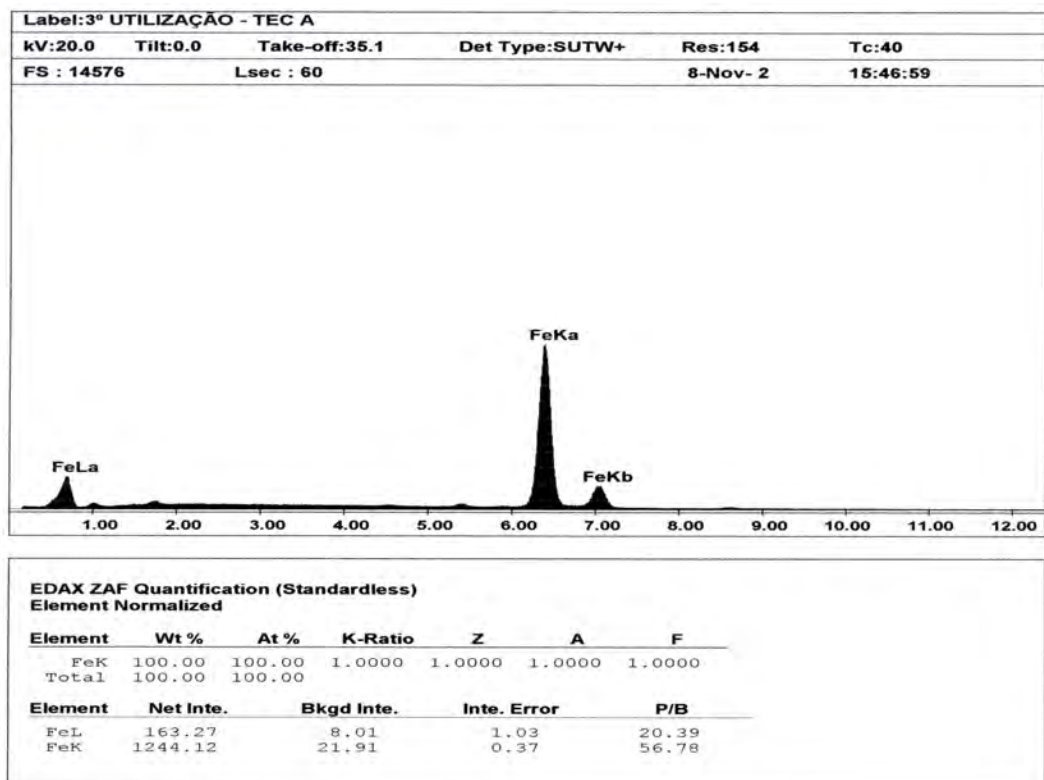


Figura 4.110 - Resultado da análise química na terceira reutilização.

O revestimento é aplicado ao substrato para garantir algumas propriedades ao sistema, como proteção à corrosão e manutenção do coeficiente de atrito dentro de faixa especificada, para que a força de fixação do sistema, força tensora, também seja suficiente para promover a devida sustentação e rigidez. As sucessivas montagens e desmontagens promovem a destruição da camada de revestimento e compromete o rendimento e desempenho do sistema.

4.4 – SÍNTESE DOS RESULTADOS ENCONTRADOS

A metodologia proposta neste trabalho foi a de avaliar e conhecer os revestimentos, suas características de lubricidade e sua consistência na relação Torque x Força Tensora. Para isto o trabalho foi dividido em 03 etapas que foram avaliações e ensaios na condição de recebimento, avaliações após ensaios e ensaios de reusabilidade. Estas etapas buscaram o entendimento global e em algumas situações o entendimento específico destes revestimentos. A seguir são sintetizados os resultados encontrados para as duas tecnologias.

4.4.1 – Aspectos qualitativos das tecnologias A e B

Na Tabela 4.11 são mostrados os aspectos qualitativos dos parafusos das tecnologias A e B nas condições de recebimento, após ensaios e na reusabilidade.

Tab. 4.11 - Aspectos qualitativos das tecnologias A e B

Análises	Condição de Recebimento		Após Ensaios		Reusabilidade	
	Tecnologia A	Tecnologia B	Tecnologia A	Tecnologia B	Tecnologia A	Tecnologia B
Visual	Conforme (Fig.4.1)	Conforme (Fig.4.1)	Aumento do grau de dano na medida do aumento das cargas. Macroscopicamente mais uniforme sobre a face de apoio. Na região roscada o dano não é homogêneo ao longo do flanco de pressão. (Fig.4.53)	Aumento do grau de dano na medida do aumento das cargas. Macroscopicamente mais uniforme sobre a face de apoio. Na região roscada o dano não é homogêneo ao longo do flanco de pressão. (Fig.4.54)	Aumento gradativo do grau de dano para a segunda e terceira reutilização. (Fig.4.105)	
Levantamento topográfico	As superfícies em geral são compostas de irregularidades, picos e vales de espessuras. As dimensões do recobrimento são muito inferiores as da tecnologia B.(Fig.4.8)	As superfícies em geral são compostas de irregularidades, picos e vales de espessuras. As dimensões do recobrimento são muito superiores as da tecnologia A.(Fig.4.9)	Para o flanco do filete não foi possível efetuar medições, pois às áreas de contato real se distribuíram de maneira bem aleatória e não uniforme e também por limitação do equipamento utilizado. Para a face de apoio da cabeça o contato real iniciou-se a partir de seu diâmetro interno. As medidas foram feitas em modo automático onde verifica-se um aplainamento da topografia da superfície em função da carga aplicada para as duas tecnologias. (Fig. 4.59 e 4.60)		Não realizado (Ver análises ao M.E.V)	
Análises ao M.E.V	Revestimento com aspecto de flocos, forma de deposição lamelar, verificam-se grandes diferenças nas espessuras dos revestimentos A e B em regiões distintas em um mesmo parafuso de cada tecnologia. O método de deposição não garante a homogeneidade na espessura.(Fig. 4.10 a 4.23)		Aumento da área real de contato em função do aumento da carga. O mecanismo é aquele devido a deformação plástica provocada pelo cisalhamento dos filmes interfaciais. Para a face de apoio da cabeça verifica-se 03 regiões distintas: Uma mais interna mostrando uma completa deformação plástica do revestimento, uma intermediária evidenciando somente uma parte do revestimento deformado e uma mais externa mostrando que ocorreu contato mas o mesmo não foi efetivo. Na região roscada o mecanismo de deformação foi o mesmo a exceção das áreas de contato real que são bastantes aleatórias e ocorrem em pequenas regiões. O contato efetivo inicia-se da crista para o fundo do filete. Não ocorre um contato completo ao longo do flanco de pressão em função das tolerâncias das partes. (Fig. 4.61 a 4.78)		Atingiu-se o metal base na terceira reutilização nas duas tecnologias, restando sobre as superfícies somente resíduos do mesmo. (Fig. 4.107 a 4.108)	
Resistência à corrosão	Conforme (480 hs sem corrosão ferrosa)		Focos de corrosão ferrosa com 200 hs na região de apoio da cabeça e nenhum tipo de corrosão sobre os filetes nas cargas de 49 kN e 63 kN. (Fig.4.57)		-	

4.4.2 – Resultados de coeficiente de atrito e torque

Na Tabela 4.12 são mostrados os resultados de coeficiente de atrito e torques realizados para 15 amostras de cada tecnologia nas condições de parada de 49 kN e 63 kN.

Tab. 4.12 - Resultados de coeficiente de atrito e torques.

Aspectos Quantitativos das Tecnologias Estudadas									
Resultados de coeficiente de atrito									
		Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	K	μ G	μ K	η	μ ges
Condição de Parada 49 kN Tecnologia A	Média	118,5	48,5	69,9	0,201	0,123	0,19	0,844	0,159
	(+) 3 σ	132,3	52,8	82,9	0,225	0,136	0,226	0,865	0,179
	(-) 3 σ	104,6	44,1	56,9	0,178	0,109	0,155	0,822	0,139
Condição de Parada 63 kN Tecnologia A	Média	145,6	61,7	83,8	0,192	0,121	0,177	0,846	0,151
	(+) 3 σ	163,4	63,8	101,6	0,216	0,126	0,215	0,854	0,172
	(-) 3 σ	127,8	59,6	66	0,169	0,116	0,14	0,838	0,131
Condição de Parada 49 kN Tecnologia B	Média	131,8	41,9	89,9	0,224	0,102	0,245	0,876	0,179
	(+) 3 σ	149,1	45,4	109,1	0,253	0,113	0,297	0,894	0,204
	(-) 3 σ	114,5	38,3	70,7	0,195	0,09	0,192	0,859	0,153
Condição de Parada 63 kN Tecnologia B	Média	172	58	114	0,227	0,112	0,241	0,86	0,182
	(+) 3 σ	192,3	62,3	134,5	0,254	0,123	0,285	0,877	0,205
	(-) 3 σ	151,8	53,7	93,5	0,201	0,101	0,198	0,843	0,159

4.4.3 – Resultados de Reusabilidade

Na Tabela 4.13 são mostrados os resultados de coeficiente de atrito e torques do primeiro ao quarto aperto, realizados para 02 parafusos de cada tecnologia na condição de parada de 49 kN.

Tab. 4.13 - Resultados de coeficiente de atrito e torques na Reusabilidade.

Aspectos Quantitativos das Tecnologias Estudadas								
Resultados de Reusabilidade Força Tensora de 49 kN								
Tecnologia A								
Parafuso 1	Torque Total (Nm)	Torque na Rosca (Nm)	Torque na Cabeça (Nm)	K	μG	μK	η	μges
Primeiro Aperto	140,6	49,3	91,3	0,239	0,125	0,252	0,839	0,193
Segundo Aperto	166,7	57	109,6	0,283	0,149	0,303	0,801	0,231
Terceiro Aperto	201,7	72,9	128,7	0,342	0,2	0,355	0,723	0,283
Quarto Aperto	250,7	91,3	159,3	0,425	0,258	0,439	0,641	0,355
Tecnologia B								
Parafuso 4								
Primeiro Aperto	141,8	47,7	94,1	0,241	0,12	0,26	0,847	0,195
Segundo Aperto	163,1	61,2	101,8	0,277	0,163	0,281	0,779	0,226
Terceiro Aperto	187,3	70,3	117	0,318	0,192	0,323	0,735	0,262
Quarto Aperto	219,6	84,8	134,8	0,373	0,238	0,373	0,668	0,31
Parafuso 1								
Primeiro Aperto	143,4	54,2	89,1	0,243	0,141	0,246	0,815	0,19
Segundo Aperto	160,4	58,3	102	0,272	0,154	0,281	0,794	0,206
Terceiro Aperto	197,2	77,5	119,6	0,335	0,214	0,33	0,701	0,275
Quarto Aperto	241,2	90,1	151	0,41	0,255	0,418	0,645	0,382
Parafuso 2								
Primeiro Aperto	138,7	50,9	87,7	0,236	0,13	0,243	0,831	0,19
Segundo Aperto	149,5	57,3	92,2	0,254	0,151	0,255	0,799	0,206
Terceiro Aperto	195,6	76,4	119,2	0,33	0,211	0,33	0,705	0,275
Quarto Aperto	269	89,7	179,2	0,456	0,253	0,495	0,647	0,382

4.4.4 - Resultados de medições de espessura e análise química

Na Tabela 4.14 são mostrados os resultados de medição de espessura na condição de recebimento em 03 regiões e sobre a face de apoio após cargas de 49 kN e 63 kN nas regiões A, B e C. Mostra-se também nesta tabela os resultados da análise química das tecnologias estudadas.

Tab. 4.14 Resultados de coeficiente de atrito e torques na Reusabilidade.

Aspectos Quantitativos das Tecnologias Estudadas									
Resultados de Medição de Espessura (μm)									
	Condição de Recebimento			Face de Apoio					
	Face Sextavada	Flanco Filete	Face de Apoio	Força de 49 kN			Força de 63 kN		
				Região A	Região B	Região C	Região A	Região B	Região C
Tecnologia A	3,58	5,41	4,24	2,77	1,09	0,74	1,13	0,32	0,19
Tecnologia B	21,34	14,96	16,54	1,93	0,71	0,67	1,17	1,5	1,28
Resultados da Análise Química (% em peso)									
Tecnologia A	Alumínio = 12,6 Silício = 21,6 Ferro = 3,2 Zinco = 51,9 Oxigênio = 10,5								
Tecnologia B	Alumínio = 6,45 Silício = 24,26 Ferro = 1,57 Zinco = 46,16 Oxigênio = 12,3 Titânio = 9,32								

Capítulo 5

Conclusões

Após a especificação do tema para o trabalho, estabelecida a metodologia para o seu desenvolvimento, realizados os experimentos e analisados os resultados, chegou-se às seguintes conclusões, apresentadas em dois grupos:

5.1 - Aspectos tribológicos do atrito, torque e força tensora

1. Os revestimentos estudados apresentaram valores de coeficientes de atrito bem uniformes e definidos para a carga aplicada para cada tecnologia.
2. A tecnologia B apresentou um rendimento ligeiramente superior ao da tecnologia A.
3. Para a mesma condição de parada, a tecnologia A apresentou menor dispersão dos valores de torques resultantes.
4. A melhor relação de consistência e uniformidade de atrito foi a da tecnologia A para o atrito na rosca nas cargas de 49 kN e 63 kN.
5. As maiores espessuras de revestimentos utilizados pelo fabricante B não foram relevantes para o desempenho do sistema tribológico e logo ao final da primeira utilização, ambos já apresentavam praticamente a mesma espessura residual.
6. Os valores do coeficiente de atrito na rosca foram substancialmente mais consistentes do que os valores de atrito na cabeça.
7. O mecanismo de atrito é aquele provocado por deslizamento, ocorrendo deformação plástica do revestimento em função da carga aplicada.

8. Em função dos resultados de atrito obtidos para as duas tecnologias e utilizando-se de meios e de métodos adequados, podem-se assegurar torques de Aperto e Forças Tensoras dentro de faixas bem definidas.
9. Em relação ao coeficiente de atrito global μ_{ges} , para fins comparativos sobre as condições especificadas, os melhores resultados foram aqueles da tecnologia A.
10. A relação Torque x Força Tensora mostrou-se consistente a partir dos coeficientes de atrito gerados pelas tecnologias A e B.

5.2 - Aspectos tribológicos de reusabilidade

11. Os revestimentos analisados não apresentaram características de reusabilidade. Com isso, recomenda-se no máximo duas utilizações para um rendimento mínimo de 80% e uma variação de torque máxima de 20%.
12. Atingiu-se o metal base na terceira reutilização.
13. Com relação à reusabilidade, verifica-se um aumento significativo e crescente dos coeficientes de atrito na rosca e na cabeça do parafuso do primeiro ao quarto aperto para as duas tecnologias.
14. O coeficiente de atrito na rosca sofreu um aumento da ordem de 100% para as tecnologias A e B.
15. O coeficiente de atrito na cabeça para a tecnologia A sofreu um aumento de 40 a 75% e para a tecnologia B de 70 a 103%.
16. A variação do torque total para a mesma carga aplicada é da ordem de 55 a 78% para tecnologia A e de 68 a 94% para a tecnologia B.
17. O rendimento para as duas tecnologias apresentou um decréscimo médio de 28%.

5.3 – Sugestões para futuros trabalhos

Durante a realização deste trabalho, algumas novas linhas poderiam ter sido conduzidas, mas para não desviar do foco inicial proposto, sugere-se que outras investigações sejam realizadas. Isto poderá enriquecer o conhecimento deste assunto às empresas utilizadoras de parafusos como elementos de sistemas de fixação e ainda com poucas informações científicas disponibilizadas. Desta forma, sugere-se que outros trabalhos sejam desenvolvidos abrangendo os seguintes tópicos:

1. Avaliar revestimentos eletrolíticos isentos de cromo hexavalente a base de zinco;
2. Avaliar a resistência à vibração transversal com relação à força tensora (pré-carga) gerada com estes revestimentos;
3. Avaliar o comportamento do coeficiente de atrito em rotações inferiores e superiores a 5 rpm, como 1, 10 e 50 rpm;
4. Estudar a formação e a influência da camada superficial de óxidos no desempenho dos parafusos.

Capítulo 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bickford, John H., 1990, "*A Introduction to Design and Behavior of Bolted Joints*", 2nd ed., rev. and expanded, New York, Marcel Dekker Inc.;

Colenci Jr., 1992, "*Um estudo de sistematização da tecnologia de fixação por parafusos de alta resistência, no caso brasileiro*", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos USP, São Carlos 1992;

Cioto, R., 2001, "*Comportamento das Juntas Rigidamente Fixadas por Parafusos, Calculo e Dimensionamento*", Sorocaba, Metalac Ind. Com. A Subsidiary Company of SpS Technologies;

Atlascopco, 1998, Catálogo Técnico, "*A mecânica da junta rosqueada*";

Fernando,S., 2001, "*An engineering insight to the fundamental behavior of tensile bolted joints*", *Steel Construction volume 35*;

Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM Vol.18, 1992, USA;

Handbook of Bolts end Bolted Joints, 1998, Marcel Dekker, INC., New York;

Handbook of Tribology, Materials, Coatings, and Surface Treatments, 1991, McGraw-Hill, INC. – USA;

Norma di calcolo Fiat, 2000, C2001;

Norma di progetto Fiat, 1989, 01374;

Norma Fiat – 957513, 2003, "*Rivestimento Anticorrosione a base di lamelle di zinco e alluminio per particolari in materiale ferroso*";

Hutchings, I.M., 1995, "*Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*", CRC Press, England, UK;

Metal Coatings Brasil, 1996, “Manual Técnico DACROMET®”;

Metal Coatings Brasil, 2000, “Informativo Técnico”;

Standard Handbook of Lubrication Engineering, 1968, Mc Graw-Hill, INC., New York;

WILLIAMS, J.A., 1995, “Engineering Tribology”, Oxford University Press; ISBN: 0198563434;

Yanyao, J., 2001, “ An experimental study of the torque-tension relationship for bolted joints” *Int.J.of Materials & Product Tecnology*, Vol. 16, Nºs 4/5, pp 417-429;

ZUM GAHR, K.H., 1987, "Microstruture and Wear of Materials", Amsterdam, Elsevier;

VDI 2230, 1983, Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zilindrische Einschraubenverbindungen;

DIN/ISO 273, 1979 , Fasteners clearance holes for bolts and screws;
ISO 4014, 1988, Hexagon head bolts – Product grades A and B

Capítulo 7

Anexo I

Normativa Fiat 957513

“Revestimento anticorrosivo a base de lamelas de zinco e alumínio para peças em material ferroso”, de 31/01/2003.

1.1 - Finalidade

Precisar as características as quais devem satisfazer os revestimentos não eletrolíticos anticorrosivos a base de lamelas de zinco e alumínio para peças em material ferroso.

Definir as modalidades e equipamentos para realização das provas de controle das características.

1.2 – Generalidade

Esta norma considera os revestimentos químicos anticorrosivos não eletrolíticos obtidos de uma dispersão em base aquosa, ou base de solventes de lamelas de zinco e alumínio, e posterior cura, sobre materiais ferrosos.

As temperaturas de cura podem variar de cerca de 180°C, para sistemas orgânicos em base solvente, e em cerca de 300 °C para aqueles sistemas inorgânicos aquosos.

Tratamentos posteriores de acabamento podem ser aplicados para conceder cores particulares e/ou modificar o grau de lubrificação, com adição de aditivos específicos tais como cera ou PTFE.

O objetivo principal do revestimento é aquele de conferir aos componentes tratados uma elevada resistência à corrosão e um valor controlado do coeficiente de atrito.

Os revestimentos aqui considerados são totalmente livres de cromo.

1.3 - Campo de aplicação

Os revestimentos não eletrolíticos a base de lamelas de zinco e alumínio são aplicáveis com processos por imersão/centrifugação ou por spray. O processo por imersão/centrifugação é próprio para componentes de pequenas e médias dimensões.

O processo por spray por sua vez já próprio para componentes de médias e grandes dimensões.

Para componentes com zonas de retenção (furos cegos, fendas em parafusos, porcas e/ou roscas finas ($\leq M6$) devem ser utilizadas instalações e ciclos de trabalho em grau de evitar acúmulos de produto aplicados em tais zonas ou de garantir a correta eliminação.

Os revestimentos em objeto, não provocam fragilização por hidrogênio, são indicados para proteção de aços temperados e de alta resistência ($R \geq 1000 \text{ N/mm}^2$). Em tal caso é necessário que, também no ciclo de pré-tatamento, sejam evitadas operações que possam provocar absorção de hidrogênio (H_2), como por exemplo, decapagem ácida, desengraxe catódico e/ou tratamento de fosfatização.

Tais revestimentos não devem ser empregados nos seguintes casos:

- Porcas autofrenantes com inserto em poliamida.
- Componentes para os quais se exigem uma boa condutibilidade elétrica.
- Componentes para os quais são previstas operações de soldagem após o tratamento.
- Componentes que venham a ser montados com aço inoxidável, magnésio, liga a base de cobre, ou outros metais que venham a formar uma pilha de corrosão.
- Limitadamente os revestimentos obtidos de dispersões aquosas, para materiais construídos em materiais para os quais a temperatura de $\cong 300^\circ\text{C}$ provoque um decaimento das características mecânicas.

1.4. – Flexibilidade e resistência a choques

O revestimento deve resistir as normais tensões, compressões e flexões previstas durante a montagem (ex: molas, arruelas elásticas), sem evidenciar esfoliações ou perda de aderência do metal base. Além de resistir as normais condições de transporte e armazenamento sem danos.

1.5 – Aspecto

O revestimento apresenta um aspecto cinza metálico semiopaco uniforme. Pode ser exigida uma coloração diversa, obtida com uma posterior pintura, que influirá na espessura do revestimento (orientativamente superior a 15 µm total), tornando-o demais crítico para os filetes da rosca.

1.6. – Classificação, designação, indicação a desenho e emprego.

Tipo	Indicação a desenho	Designação Antiga	Prescrição para emprego
I	RIV/EC 5 ① 9.57513	RIV/DAC 5 9.57511	Para utilizar exclusivamente para parafusos, em substituição ao revestimento RIC/DAC 5 e para parafusos com passo < 1,25 e coeficiente de atrito, C_f compreendido entre 0,12 a 0,30.
II	RIV/EC 5 Lub① 9.57513	-	Para prescrever exclusivamente para parafusos, com passo < 1,25 e coeficiente de atrito, C_f compreendido entre 0,10 a 0,16 ③.
III ②	RIVEC 8① 9.57513	RIV/DAC 8 9.57511	De emprego geral seja para componentes que para parafusos. Em substituição do RIV/DAC 5 prescrito para componentes e do RIV/DAC 8. No caso de parafusos, prescrever exclusivamente para roscas com passo $\geq 1,25$ e coeficiente de atrito, C_f compreendido entre 0,12 a 0,30
IV ②	RIV/EC 8 PL ① 9.57513	RIV/DAC 5 PL 9.57511	Para prescrever no caso de parafusos com passo $\geq 1,25$ e coeficiente de atrito, compreendido entre 0,10 a 0,16. ③ Em substituição ao revestimento RIV/DAC 5 PL.

① O número que segue a sigla “RIV/EC” representa a espessura mínima permitida do revestimento em micrometros.

② Os revestimentos RIV/EC 8 e RIV/EC 8 PL são constituídos normalmente de um revestimento base mais um de acabamento, na versão PL, uma substância lubrificante (ex.: PTFE) em grau de modificar o coeficiente de atrito.

③ Valores diversos de coeficiente de atrito devem ser especificados a desenho.

Eventuais cores particulares, diversas da cor prata, devem ser expressamente indicadas a desenho.

1.7 – Dimensões e tolerâncias

1.7.1 - Salvo diversamente especificado, as dimensões e tolerâncias indicadas a desenho das partes compreendem o revestimento.

1.7.2 – Espessura do revestimento em parafusos

1.7.2.1 – Quando aplicado em elementos filetados o revestimento não deve interferir na operação normal de montagem e desmontagem.

O valor da espessura do revestimento é estabelecido em base a tolerância da rosca métrica ISO, segundo UNI 5541, com classes de tolerâncias:

- **g, f e e** para roscas externas (parafusos);
- **H e G** para roscas internas (porcas).

Tais tolerâncias no caso de roscas externas se entendem antes da aplicação do revestimento enquanto, no caso de roscas internas se entendem após o revestimento.

Após o revestimento, o afastamento superior não deve ser maior que zero (dimensão nominal) no caso de rosca externa e menor que zero no caso de rosca interna.

- a) Parafusos: As espessuras de revestimento para parafusos são em função do passo da rosca e do campo de tolerância da mesma.

Nota do autor: Neste trabalho temos o parafuso M12 x 1,25, a saber;

Passo da rosca	Rosca	Espessura teórica admissível sobre a rosca (μm)		
		Posição "g"	Posição "f"	Posição "e"
-	Passo fino			
1,25	M12 x 1,25	7	10	15

Porcas: estes revestimentos tendem também a acumular-se nas roscas internas. È, portanto necessário que a rosca das porcas sejam oportunamente aumentadas, de modo a garantir a tolerância 6H após aplicação do revestimento.

2. Prescrição para a Qualificação do revestimento

Submeter o componente às provas e controles especificados abaixo verificando a correspondência dos resultados com os valores/limites prescritos a projeto e/ou ficha técnica do produto para uso específico.

2.1 – Ambiente de prova

Temperatura	23 \pm 5 °C
Pressão Atmosférica	860 – 1060 mmbar
Umidade relativa	45 – 70%

2.2 - Materiais e processos de revestimento

Nota do autor: Os processos de revestimentos encontram-se em fase final de Qualificação pela FIAT Auto.

2.3 - Características

As características abaixo se referem à superfície significativa do componente.

Por superfície significativa se entende aquela parte da superfície que é essencial ao aspecto e/ou emprego do componente tratado.

Esta pode ser indicada a desenho ou concordada no pedido; em caso contrário deve-se considerar significativa toda a superfície do componente.

Nos parafusos, a superfície significativa compreende a cabeça e o corpo, as fendas de manobra, eventuais arruelas imperdíveis e a superfície externa das porcas.

2.3.1 - Exame visual

A superfície do componente deve ser isenta de defeitos do tipo porosidade, inclusões, trincas, empolamentos, etc e de zonas isentas de revestimento.

O revestimento deve ter um aspecto uniforme, ser perfeitamente catalisado, seco ao tato e resistir as normais condições de operação de manipulação, estocagem e instalação sem esfoliar-se ou perder adesão.

Em parafusos e porcas não se deve verificar acúmulo de produto sobre os filetes, e em fendas de modo a interferir na operação de montagem.

2.3.2 – Verificação da ausência de compostos de cromo hexavalente

Segundo Norma Fiat 7.M5000.

2.3.3 - Espessura

A espessura mínima local, medida em uma zona da região significativa com um dos métodos abaixo, deverá resultar como o especificado no ponto 2.3.3.6 para os vários tipos de revestimento.

2.3.3.1 – Método magnético

conforme Norma ASTM B 568 ou segundo Norma Fiat 50757, utilizando o equipamento Magna-Gage, Mikrotest ou outro equivalente que permita uma precisão de no mínimo $\pm 10\%$. A adotar-se nos controles correntes.

2.3.3.2 – Método de fluorescência por Raios X

Segundo ASTM B568.

De uso geral, adotar preferencialmente no caso de componentes de pequenas dimensões. Necessita de calibração específica para cada tipo de revestimento.

2.3.3.3 – Método Micrográfico

Segundo Norma ASTM B 487 ou Norma Fiat 50758.

Adotar nos casos de contestação ou aonde não seja possível recorrer aos métodos anteriores.

2.3.3.4 - Espessura do revestimento para parafusos

A espessura dos revestimentos depositados sobre elementos filetados não deve prejudicar a normal operação de aparafusamento e desaparafusamento.

Ao mesmo tempo deve ser tal que satisfaça os requisitos previstos nos itens 2.3.5 e 2.3.7.

Após o revestimento os componentes roscados devem aparafusar-se manualmente sobre calibres apropriados do tipo passa/não passa.

A espessura mínima dos revestimentos, medida com os métodos acima descritos devem atender os limites prescritos no ponto 2.3.3.6 ou segundo a prescrição indicada a desenho.

2.3.3.5 - Áreas de medição

Dada a variabilidade da espessura do revestimento em parafusos e porcas, ela é medida em um ponto significativo para fins de resistência à corrosão.

Parafusos com cabeça hexagonal ou tipo Torx externa tal ponto se encontra em torno do centro da superfície da cabeça ou ao centro da extremidade do corpo.

Parafusos com cabeça cilíndrica com hexágono interno e para parafusos com entalhes e fenda em cruz, o ponto de medição deve ser sobre a superfície plana da cabeça, entre a borda e o hexágono interno, entre a borda e a fenda em cruz, ou sobre a face lateral da cabeça.

No caso de porcas, a medição da espessura é realizada sobre uma face do hexágono ou sobre o plano de apoio.

2.3.3.6 – Valores de espessura

Os valores de espessura devem estar nos seguintes limites:

RIV/EC 5 $\geq 5\mu\text{m}$

RIV/EC 5 LUB $\geq 5\mu\text{m}$

RIV/EC 8 $\geq 8\mu\text{m}$

RIV/EC 8 PL $\geq 8\mu\text{m}$

A espessura máxima, medida sobre a cabeça do parafuso, não deve ser superior a 25 μm .

2.3.4 – Adesão do revestimento

A avaliação da adesão do revestimento ao metal base deve ser efetuada com os seguintes métodos:

2.3.4.1 – Adesão a novo

2.3.4.1.1

Tomar 03 amostras para cada tipo de particular a controlar.

2.3.4.1.2

Identificar sobre a amostra, como superfície de prova, a superfície mais plana possível, não filetada, de no mínimo 1 cm^2 .

2.3.4.1.3

Desengravar com heptano a superfície em exame.

2.3.4.1.4

Aplicar sobre a superfície, a temperatura ambiente, uma tira de fita adesiva em plástico vinílico elástico (Norma Fiat 9.55367) com uma ligeira e uniforme pressão manual, evitando a formação de bolhas de ar.

2.3.4.1.5

Retirar manualmente a fita da amostra, retirando-a rapidamente de baixo para cima, perpendicularmente superfície em exame.

2.3.4.1.6

Considerar o resultado mais insatisfatório entre as 3 medições efetuadas para cada particular. A adesão do revestimento ao metal base deve ser superior à coesão do próprio revestimento.

2.3.4.1.7

Sobre a fita é permitida a presença de traços de revestimento de pequenas dimensões ($< 3 \text{ mm}^2$) que no conjunto seja menor que 20% da superfície em exame.

Não é por sua vez permitida a presença sobre a fita de fragmentos de revestimento de dimensões $> 3 - 4 \text{ mm}^2$, nem algum destaque do metal base.

2.3.4.2 Adesão após envelhecimento**2.3.4.2.1**

Submeter os componentes em exame em prova de névoa salina, segundo Norma 50180, método B1 por 96 horas.

Nota: No caso de elementos de pequenas dimensões, aonde não seja possível realizar as incisões (superfícies planas $< 1 \text{ cm}^2$), é possível efetuar o teste sobre corpos de prova de dimensões adequadas, submetidos ao mesmo tratamento que os componentes em exame.

2.3.4.2.2

Após secagem e condicionamento a temperatura ambiente por 10 minutos, repetir as operações dos pontos 2.3.4.1.4 e 2.3.4.1.5.

2.3.4.2.3

Não são permitidos destaques ≥ 3 mm da linha de incisão realizada, nem a presença sobre a fita de fragmentos de revestimento devido ao destaque do metal base.

2.3.5 – Resistência à corrosão**2.3.5.1**

Após no mínimo 24 horas do término da operação de cura do revestimento, recolher um número de componentes de tal modo que a soma da área da superfície significativa seja ≥ 1 dm².

2.3.5.2

Submeter os componentes à prova de corrosão em névoa salina conforme Norma 50180 método A1.

Os vários tipos de revestimentos deverão atender os requisitos prescritos abaixo:

Tipo de Revestimento	Tempo mínimo (h) de exposição no qual não deve evidenciar-se	
	Produtos de corrosão do zinco	Produtos de corrosão do metal base
RIV/EC 5	-----	300
RIV/EC 5 LUB	-----	300
RIV/EC 8	-----	480
RIV/EC 8 PL	144	480

2.3.5.3

salvo de outro modo especificado, a avaliação da resistência à névoa salina deve ser realizada a olho nú e a uma normal distância. A presença de

produtos de corrosão branca do zinco, por uma extensão $\leq 5\%$ da superfície significativa total exposta, não constitui causa de reprovação.

O número total de focos de corrosão ferrosa deve resultar $\leq 1 \text{ dm}^2$ (valor maior é motivo de reprovação).

A presença de produtos de corrosão em zonas que não constituem a superfície significativa, não é motivo de reprovação.

2.3.6 – Resistência à temperatura

2.3.6.1

Expor os componentes em exame em uma câmara úmida ventilada por 3 horas a $150 \pm 3^\circ\text{C}$ (temperatura medida no componente) e sucessivamente submetê-los a prova de corrosão em névoa salina, segundo Norma 50180 método A1.

2.3.6.2

Segundo o tipo de revestimento, a duração de exposição e os requisitos deverão ser aqueles indicados no item 2.3.5.2.

2.3.7 – Proteção catódica do revestimento

2.3.7.1

Sobre o componente em exame, ou sobre corpo de prova, incidir com um punção idôneo o revestimento até atingir o metal base. A incisão deve ter uma largura não superior a 0,5 mm.

2.3.7.2

Expor o componente ou corpo de prova em exame em câmara de névoa salina segundo Norma Fiat 50180 método A1 por 96 horas.

2.3.7.3

Ao término da prova não é permitido o aparecimento de corrosão ferrosa sobre a superfície da incisão.

2.3.8 Resistência à gasolina**2.3.8.1**

Realizar a prova segundo Norma Fiat 50743.

2.3.8.2

Secar o componente e condiciona-lo no ambiente de prova por um tempo de 120 minutos, após avaliar a condição da superfície.

2.3.8.3

Não são permitidos defeitos superficiais (ex.;manchas, destaques, empolamentos) com relação à parte inexistente.

2.3.9 - Resistência a líquidos de limpeza de parabrisas**2.3.9.1**

Realizar a prova segundo Norma Fiat 50743/01 Método B.

2.3.9.2

Secar o componente e condiciona-lo no ambiente de prova por um tempo de 120 minutos, após avaliar a condição da superfície.

2.3.9.3

Não são permitidos defeitos superficiais (ex.:manchas, destaques, empolamentos) com relação à parte inexistente.

2.4 - Coeficiente de atrito

2.4.1

Salvo diversamente indicado a desenho os coeficientes de atrito dos parafusos devem atender os limites prescritos na Norma Fiat 9.52605/01.

Elementos filetados para os quais são exigidos valores de coeficiente de atrito contidos na dispersão de 0,10 a 0,16 ou 0,12 a 0,18 somente poderão ser tratados com estes processos.

O emprego de lubrificantes/acabamentos diversos daqueles prescritos devem ser autorizados pela Fiat Auto.

2.4.2

Os componentes devem resultar limpos e secos ao tato.

A verificação da correta aplicação do lubrificante deve ser efetuada através da verificação do coeficiente de atrito segundo Norma Fiat 7.G0114.

Outro método de controle deve ser concordado e aprovado pela FIAT Auto.

3. – Prescrição para o controle de fornecimento

3.1

O controle de fornecimento deve ser efetuado segundo as prescrições da Norma Fiat 9.01102/01(Distribuição reservada).

4. – Prescrição para o fornecedor

4.1

O fornecedor deve atender as prescrições gerais contidas na Norma Fiat 9.01102 “Qualidade de fornecimento”.

4.2 - Fornecimento para a Qualificação do produto

O fornecedor deve apresentar um quantitativo de produto exigido na ordem de compra anexando o Certificado de Qualidade e Conformidade, aonde serão verificadas todas as características prescritas na Ficha técnica do produto anexado, relativo ao tipo específico.

Não são permitidas não conformidades.

4.3 – Fornecimento para a produção

O produto fornecido deve estar conforme as prescrições do desenho e da norma.

Nota: Os materiais e os processos de revestimentos empregados no fornecimento devem ser iguais àqueles adotados no processo de Qualificação. O processo de revestimento deve ser certificado e verificado periodicamente pelo fornecedor do produto que informará a Fiat Auto.

Variações de características relativas ao material e/ou ao processo de revestimento podem ser introduzidas somente se autorizado pela Fiat Auto.