



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15180-TDI/1296

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE REVESTIMENTOS
SUPERFICIAIS EM ELEMENTOS ROSCADOS DE FIXAÇÃO
QUANDO SUBMETIDOS A TORQUE**

Irineu dos Santos Yassuda

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Maria do Carmo de Andrade Nono e Francisco Piorino Neto, aprovada em 23 de fevereiro de 2006.

INPE
São José dos Campos
2008

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15180-TDI/1296

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE REVESTIMENTOS
SUPERFICIAIS EM ELEMENTOS ROSCADOS DE FIXAÇÃO
QUANDO SUBMETIDOS A TORQUE**

Irineu dos Santos Yassuda

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Maria do Carmo de Andrade Nono e Francisco Piorino Neto, aprovada em 23 de fevereiro de 2006.

INPE
São José dos Campos
2008

620.1

Yassuda, I. S.

Estudo do comportamento de revestimentos superficiais em elementos roscados de fixação quando submetidos a torque / Irineu dos Santos Yassuda. – São José dos Campos: INPE, 2006.

101 p. ; (INPE-15180-TDI/1296)

1. Parafusos. 2. Porcas. 3. Superfícies. 4. Corrosão.
5. Dacromet. 6. Bicromatizados. 7. Fosfato. 8. Camada de zinco. I. Título.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
**ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e
Sensores**

Dr. Chen Ying An



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Francisco Piorino Neto



Orientador(a) / IAE/CTA / SJC Campos - SP

Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Otávio Santos Cupertino Durão



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Carlos de Moura Neto



Convidado(a) / ITA / SJC Campos - SP

Aluno (a): Irineu dos Santos Yassuda

São José dos Campos, 23 de fevereiro de 2006

“Não são os grandes projetos que dão certo, são os pequenos detalhes”.

STEPHEN KANITZ
Pensamentos - Qualitymark

*A meus pais,
Lourdes dos Santos Yassuda e
Tadahiro Yassuda.*

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Aos meus orientadores, Prof^a. Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono e Prof. Dr. Francisco Piorino Neto, pelo conhecimento transmitido e pela orientação e apoio na realização deste estudo.

À Volkswagen do Brasil, por disponibilizar os laboratórios e materiais utilizados neste estudo.

Ao Eng^o Eduardo de Almeida Jr., pelo apoio na realização do estudo.

Ao Eng^o Martin Wilke e aos Srs. Antonio da Silva e Marcos Antonio Araújo da Silva, pelos conhecimentos transmitidos, bibliografias e análise crítica do estudo realizado.

À AG Machines, pela utilização dos seus equipamentos e o apoio de seus técnicos.

Aos Srs. Luiz Fernando Bonard e Valdirlei da Silva Gouvêa, pela paciência e apoio na realização dos ensaios mecânicos.

Ao Serviço de Pós-graduação do INPE, pelo excelente apoio administrativo que contribuiu para este Mestrado fosse realizado a contento.

Aos meus pais, por sempre acreditarem na importância do estudo.

Agradeço a todas as pessoas que me ajudaram a vencer mais esta etapa da vida.

RESUMO

Neste trabalho, propõe-se o estudo do efeito dos tratamentos superficiais sobre o comportamento mecânico de elementos roscados, utilizados em veículos automotivos comerciais. Essa análise baseia-se na comparação das superfícies resultantes nos revestimentos e nos substratos destes elementos após a aplicação de diferentes esforços de torque e velocidade. Esses esforços aplicados em condições bastante próximas às encontradas no processo produtivo normal, mas com temperatura, torque e velocidades controlados. Esse tipo de ensaio tornou-se possível graças ao advento das parafusadora de torque e velocidades controladas por sistemas digitais. Os resultados foram analisados por meio de microscopia óptica, para se determinar as condições limites do processo. Estas condições são repetidas nos ensaios que produzem amostras analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDX). Como existe uma extensa variedade de elementos de fixação roscados e de revestimentos foram selecionados elementos M6 e M10 classe 8.8 com os revestimentos mais comumente utilizados que são o dacromet, bicromatizado, zinco negro e fosfatizado. A análise desenvolvida pode ser utilizada como metodologia para a determinação de parâmetros de desenvolvimento de processos de uniões por elementos roscados. Esses parâmetros auxiliam a estabelecer a velocidade de montagem que permita a conservação dos tratamentos superficiais dos parafusos e a otimização dos tempos de montagem, permitindo, desta forma, maior produtividade, garantindo a vida útil e a preservação dos equipamentos. Os resultados apresentam como as camadas dos revestimentos se comportaram em termo de desgaste e os seus modos de falha. Constata-se, também, que a falha da superfície está mais relacionada à velocidade do processo e a falha de substrato está correlacionada ao torque aplicado.

ANALYSIS OF SUPERFICIAL COVERING BEHAVIOR IN SCREW THREADS OF FIXTURE ELEMENTS WHEN SUBMITTED TO TORQUE

ABSTRACT

The objective in this study is evaluation of mechanical behavior of different types of superficial treatments in screw threads used in commercial vehicles. This analysis was based on the comparison of the resultant over surfaces of these elements the application after different efforts of torques and speed. These efforts had been applied in same conditions to ones normal productive processes conditions, but with controlled temperature, torque and speeds. This kind of test was possible after the advent of equipments with torque and speeds controlled for digital systems. The results had been analyzed by means of microscopy optics to determine the conditions limits of the process and these conditions had been repeated in validated samples had been analyzed by scanning electronic microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectrometry (EDS). There exists an extensive number of different elements of setting and coatings had been selected M6 and M10 elements class 8.8 with coatings more used than are dacromet, dichromate, black zinc and phosphate. The developed analysis can be used as a methodology for the determination of critical parameters of development of processes of unions for this kind of elements, establish the optimum assembly speed to the conservation of the superficial treatments of the screws reduction of times of assembly, greater productivity, guaranteeing the useful life and the preservation of the equipment. The results had shown the failure mode of the layers and the interrelations speed and layer consuming. It was also consisted that the failure of the surface is related to the speed of the process and the substratum failure is correlated to the applied torque.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
1 INTRODUÇÃO.....	27
1.1 Histórico.....	27
1.2 Aplicações de Elementos Roscados no Brasil.....	31
1.3 Objetivos desta Investigação.....	31
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	33
2.1 Dimensões dos Componentes.....	35
2.2 Tratamentos Térmicos.....	36
2.3 Proteção Contra Corrosão.....	36
2.4 Coeficiente de Atrito.....	36
2.5 Torque de Montagem e Torque de Travamento.....	36
2.6 Análise das Forças Atuantes nos Elementos Roscados.....	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 Critérios de Seleção dos Elementos Roscados.....	45
3.2 Materiais e Características Físicas e Químicas dos Elementos Roscados Selecionado (Substratos).....	46
3.3 Materiais e Características Físicas e Químicas dos Elementos Roscados Selecionados (Revestimentos Superficiais).....	48
3.3.1 Revestimento Zinco Bicromatizado.....	48
3.3.2 Revestimento Dacromet.....	50
3.3.3 Revestimento Zinco Negro.....	52
3.3.4 Revestimento Fosfatizado.....	54
3.4 Metodologia.....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1 Elementos Roscados Bicromatizado.....	63

4.1.1	Parâmetros Mecânicos de Montagem.....	63
4.1.2	Análise do Revestimento do Tipo Bicromatizado.....	66
4.2	Elementos Roscados com Revestimento do Tipo Dacromet.....	71
4.2.1	Parâmetros Mecânicos de Montagem.....	71
4.2.2	Análise do Revestimento de Dacromet.....	74
4.3	Elementos Roscados com Fosfato B110.....	78
4.3.1	Parâmetros Mecânicos de Montagem.....	78
4.3.2	Análise do Revestimento do Tipo Fosfatizado.....	81
4.4	Elementos Roscados Revestidos com Zinco Negro.....	85
4.4.1	Parâmetros Mecânicos de Montagem.....	85
4.4.2	Análise do Revestimento do Tipo Zinco Negro.....	88
4.5	Comparação dos Resultados.....	92
4.6	Comparação dos Resultados.....	98
5	CONCLUSÕES.....	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

LISTA DE FIGURAS

1.1 - Parafuso de Arquimedes (a) e uma versão dos cadernos de Da Vince (b).....	27
1.2 – Desenho do século XIX mostrando aplicação de parafusos em arma de fogo.....	28
1.3 - Equipamento de fabricação de elemento roscado por conformação a frio.....	29
1.4 – Desenho do século XIX comparando uma rosca Whitworth e uma Sellers.....	30
2.1 - Ilustração que apresenta uma montagem clássica, para promover junção de peças.....	33
2.2 - Exemplos de danos decorrentes de parâmetros não controlados durante o processo de montagem em: a) parafuso e b) porca.....	35
2.3 - Diagrama que apresenta a força de tração axial sobre o eixo do parafuso e a correspondente compressão nos elementos unidos.....	37
Fonte: Cortesia Volkswagen Caminhões e Ônibus.....	37
2.4 - Denominações das partes componentes de uma rosca.....	38
Fonte: Cortesia Volkswagen Caminhões e Ônibus.....	38
2.5 - Decomposição de forças atuantes em um filete.....	39
Fonte: cortesia Volkswagen Caminhões e Ônibus.....	39
2.6 - Posição do ângulo α em uma rosca métrica.....	41
Fonte: Cortesia Volkswagen Caminhões e Ônibus.....	41
2.7 - Deformação devido às tensões na interface entre o parafuso e a porca, (100 X)....	42
2.8 - Comparação entre as marcas deixadas pelos esforços nos diferentes filetes e o esboço do diagrama de esforços sobre os mesmo representando a distribuição de desigual de esforços entre os filetes.....	43
2.9 - Região de ruptura ocorrida no ponto onde se previa a maior concentração, observa- se que a ruptura ocorreu por esforço de torção.....	43
3.1 – Micrografia de um parafuso classe 8.8 submetido aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento a 425 oC (10X).....	46
Fonte: Cortesia Volkswagen Caminhões e Ônibus.....	46
3.2 - Parafuso com superfície revestida pelo processo de bicromatização.....	49
3.3 – Imagem obtida por MEV do revestimento bicromatizado mostrando a camada: externa (cromo) e a camada interna (zinco) depositado em um parafuso 8.8.....	49
3.4 - Conjunto de elementos roscados com revestimento de dacromet.....	51

3.5 - Imagem obtida por MEV do revestimento do tipo dacromet depositado em um parafuso 8.8.....	52
3.6 - Parafuso com revestimento de zinco negro.....	53
Fonte: Cortesia Volkswagen Caminhões e Ônibus.....	53
3.7 – Imagem obtida por MEV mostrando revestimento do tipo zinco negro depositado em um parafuso 8.8.....	54
Fonte: Cortesia Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.....	54
3.8 - Cristais de fosfato com ampliação de 3500X tendo como substrato um parafuso classe 8.8.....	56
3.9 – Imagem obtida por MEV do revestimento fosfatizado apresentando o depósito em um parafuso 8.8.....	56
Fonte: Cortesia Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.....	56
3.10 - Fluxograma apresentando os procedimentos que foram adotados neste estudo...58	
3.11 - Regiões numa montagem típica porca/parafuso.....	59
3.12 - (a) Diagrama esquemático do equipamento Atlas Copco para ensaio de torque. (b) exemplo do registro gráfico do comportamento mecânico da união roscada (Cortesia Volkswagen Caminhões e Ônibus).....	61
4.1 - Curva característica de torque aplicado X tempo de montagem para os parafusos M10X25 bicromatizados.....	65
4.2 – Seção transversal de um filete de um parafuso de aço 8.8 com revestimento bicromatizado, região que não sofreu esforços mecânico (3500X).....	66
4.3 – Revestimento do tipo bicromatizado sobre um filete após ensaio de rosqueamento (84x).....	67
4.4 – Revestimento do tipo bicromatizado sobre um filete resultante do esforço de torque de 10 N.m e velocidade de aperto de 350 rpm. (aumento 300x).....	67
4.5 – Revestimento bicromatizado sobre um filete resultante do esforço de torque de 84N.m e velocidade de aperto de 135rpm (aumento 300x).....	68
4.6 - Imagem ampliada a partir da Figura 4.5 utilizada para a análise por EDX.....	69
4.7. Espectros de EDX obtidos para a região A do terceiro filete, como visualizado na Figura 4.5.....	70

4.8 - Curva característica de torque aplicado X tempo de montagem para os parafusos M10X25 dacromet.....	73
4.9 – Revestimento do tipo dacromet, apresentando as camadas de alumínio e de zinco com substrato de aço num parafuso 8.8, antes do ensaio mecânico (aumento 50X).	74
4.10 - Revestimento do tipo dacromet sobre um filete após ensaio de rosqueamento (67x).....	75
4.11 – Revestimento do tipo dacromet sobre um filete resultante do esforço de torque de 10 N.m e velocidade de aperto de 135rpm (aumento 1500x).....	75
4.12 - Revestimento do tipo bicromatizado sobre um filete resultante do esforço de torque de 80N.m e velocidade de aperto de 80 rpm (aumento 1000x).....	76
4.13. Espectros de EDX obtidos para a região A, B e C do terceiro filete, como mostrado na figura 4.12.....	77
4.14 - Curva característica de torque aplicado X tempo de montagem para os parafusos M10X30 fosfatizado.....	80
4.15 – Seção transversal de um filete de um parafuso de aço 8.8 com revestimento fosfatizado, região que não sofreu esforços mecânico (1000X).....	81
4.16– Revestimento de fosfato sobre um filete de um parafuso 8.8 após ensaio de rosqueamento (100x).....	82
4.17 – Revestimento de fosfato sobre um filete resultante do esforço de torque de 10N.m e velocidade de aperto de 315rpm (aumento 1000x).....	83
4.18– Revestimento de fosfato sobre um filete resultante do esforço de torque de 80N.m e velocidade de aperto de 80rpm (aumento 300x).....	83
4.19 – Análise por EDX do revestimento tipo fosfatizado região A (fosfatizado exposto a 81N.m e velocidade de 90rpm).....	84
4.20 - Gráfico da relação torque aplicado X tempo de montagem nos parafusos M6X14 com revestimento de zinco negro.....	88
4.21 - Revestimento zinco negro sobre um filete após ensaio de rosqueamento (100x).	89
4.22– Revestimento de zinco negro sobre um filete na região D, onde os esforços de montagem são praticamente inexistentes.....	89
4.23 – Revestimento de zinco negro sobre um filete resultante do esforço de torque de 10 N.m e velocidade de aperto de 545 rpm (aumento 1500x).....	90

4.24 – Revestimento de zinco negro sobre um filete resultante do esforço de torque de 17N.m e velocidade de aperto de 109rpm (aumento 3500x).....	90
4.25 – EDX do substrato e da camada de zinco negro na região ABC (zinco negro exposto a 17N.m e velocidade e 545rpm).....	91
4.26 - Comparativo entre as posições A e E do parafuso M10X25 bicromatizado.....	93
4.27 - Diagrama comparativo entre as posições A e E do parafuso M10X25 dacromet.....	95
4.28 - Diagrama comparativo entre as posições A e E do parafuso M10X30 Fosfatizado.	96
4.29 - Diagrama comparativo entre as posições A e E do parafuso M6X14 zinco negro.	97

LISTA DE TABELAS

3.1 - Valores de parâmetros de propriedades mecânicas características para o substrato de aço médio carbono.....	47
3.2 - Valores característicos de torque de montagem e de força de tração máximas e mínimas, esforços dentro da região elástica.....	47
3.3 - Valores de torque de montagem e de força de tração máximas e mínimas, acima da região elástica.....	47
3.4 – Parâmetros de identificação das amostras utilizadas para ensaios mecânicos com revestimento do tipo bicromatizado.....	50
3.5 - Comparação de espessura de revestimento e tempo até o início de perda de resistência mecânica em câmara de névoa salina.....	51
3.6 – Parâmetros de identificação das amostras utilizadas para ensaios mecânicos com revestimento do tipo dacromet.....	52
3.7 – Parâmetros de identificação das amostras utilizadas para ensaios mecânicos com revestimento do tipo zinco negro.....	54
3.8 – Identificação das amostras utilizadas para ensaios com revestimento de fosfato.....	56
4.1 - Ensaio de determinação do nível crítico de conjuntos parafuso-rosca com revestimento tipo bicromatizado.....	63
4.2 - Ensaio de análise dos níveis críticos com revestimento tipo bicromatizado.....	65
4.3 - Resultados das análises pontuais por EDX na seção transversal da região E do terceiro filete do parafuso com revestimento do tipo bicromatizado.....	71
4.4 - Ensaio de determinação de nível crítico de conjuntos parafuso-rosca com revestimento dacromet.....	71
4.5 - Ensaio de análise dos níveis críticos com revestimento tipo dacromet.....	73
4.6 - Resultados das análises pontuais por EDX na seção transversal da região E do terceiro filete do parafuso com revestimento de dacromet.....	78
4.7 - Ensaio de terminação de nível crítico de conjuntos parafuso-rosca com revestimento tipo fosfatizado. (continua).....	78

4.8 - Ensaio de análise dos níveis críticos com revestimento tipo fosfatizado.....	80
4.9 - Resultados das análises pontuais por EDX na seção transversal da região E do terceiro filete do parafuso com revestimento do tipo Fosfatizado.....	85
4.10 - Ensaio de determinação de nível crítico do zinco negro.....	85
4.11 - Ensaio de análise dos níveis críticos com revestimento tipo zinco negro.....	87
4.12 – Resultados das análises pontuais por EDX na seção transversal da região E do terceiro filete do parafuso com revestimento do tipo zinco negro.....	92
4.13 – Comparação entre as características dos revestimentos utilizados.....	92

LISTA DE SÍMBOLOS

α	-	Ângulo da rosca
β	-	Ângulo do filete
d_r	-	Diâmetro menor da rosca
d_m	-	Diâmetro primitivo / Diâmetro médio
d_f	-	Diâmetro maior do filete da rosca
p	-	Passo da rosca
F	-	Força de tração no corpo do parafuso
F_v	-	Componente da força F no eixo vertical em relação à superfície do filete
F_x	-	Componente da força F no eixo horizontal em relação à superfície do filete
μ	-	Coefficiente de atrito da superfície do filete
N	-	Força de reação do filete à força F
P	-	Força de aperto
h	-	Altura da porca
p_c	-	Comprimento da região de contato
d	-	Diâmetro da montagem
T	-	Torque aplicado
σ	-	Tensão na superfície

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ISO – International Organization for Standardization

ASTM - American Society for Testing and Materials

SAE – Society of Automotive Engineers

ANSI- American National of Standards Institute

DIN - Deutsches Institut für Normung e. V.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Histórico

Não é necessário observar por muito tempo ao nosso redor para perceber a onipresença dos elementos roscados no dia a dia. Desde simples móveis em residências até nos mais sofisticados equipamentos podem ser encontrados esses elementos. A sua presença constante faz praticamente que possam ser ignorados. A atenção só se volta para eles quando há necessidade de desmontá-los e/ou ocorre uma falha ou simplesmente por não serem disponíveis as ferramentas adequadas.

No entanto, essa presença é relativamente recente, tornando-se generalizada a partir do século XX.

Apesar de não existirem evidências físicas deste tipo de elemento no Egito Antigo, Babilônia, Grécia ou no Império Romano, é certo que na Antigüidade se conhecia seu princípio. Existem registros da utilização de um processo de elevação de água, que consistia em um fuso inserido dentro de um tubo. Ao se girar esse fuso a água era elevada de uma extremidade para a outra. Esse sistema conhecido como Parafuso de Arquimedes é bem anterior ao grego, sendo utilizado no Egito e há possibilidade de que tenha sido o processo utilizado para a irrigação dos Jardins da Babilônia (Figura 1.1)[1].

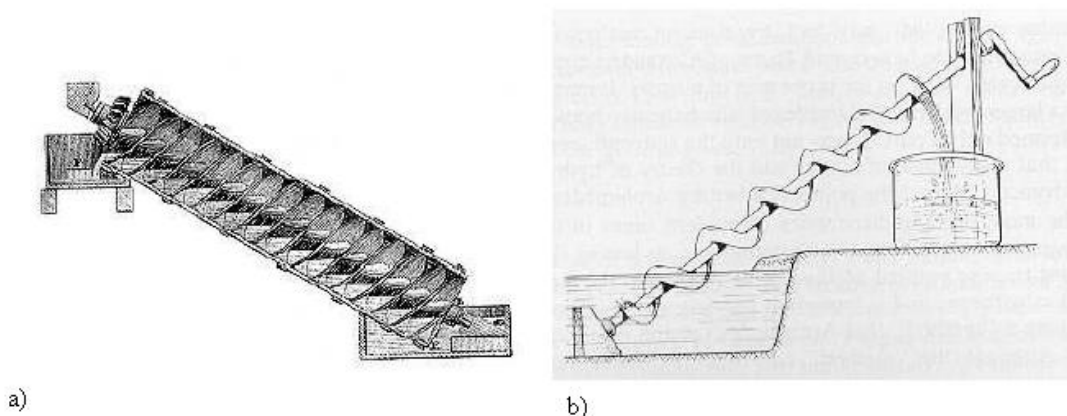


FIGURA 1.1 - Parafuso de Arquimedes (a) e uma versão dos cadernos de Da Vince (b).
Fonte:[1].

Esse tipo de equipamento apresentava diversas dificuldades visto que, na época, era bastante difícil a fabricação de um fuso metálico pois, além de exigir um processo de fundição e de conformação dispendiosos para época, depois de pronto exigia muito esforço para ser movimentada à uma velocidade adequada para se elevar a água. O processo da roda de água é muito mais simples, limitando o uso do parafuso até que se

desenvolvessem motores e métodos de fabricação mais eficientes. Isto só veio a ocorrer após a Revolução Industrial [2].

Não há evidências da utilização de elementos roscados como elementos de fixação na Antigüidade e na Idade Média. Existe a possibilidade que, na antiguidade, os Romanos terem desenvolvido um parafuso para fixação em madeira enrolando um fio metálico num pino cônico que, depois de aquecidos se soldavam e então eram afiados com o uso de uma lima manual. Esse método não prosperou devido à dificuldade de se obter um produto final de boa qualidade com as ferramentas da época [3].

O primeiro registro consistente da utilização deste tipo de componente foi feito em um manuscrito do século XV, atualmente na biblioteca do Vaticano. Também foram descritos nos cadernos de Da Vinci e utilizados por Gutenberg em sua prensa. No entanto, o que realmente evidenciou a necessidade do desenvolvimento dos elementos roscados foi o advento das armas de fogo. Devido ao impacto gerado pela detonação da pólvora tornou-se necessária a criação de um elemento de fixação que pudesse unir duas peças de maneira confiável e que resistisse a esforços elevados (Figura 1.2) [1,2].

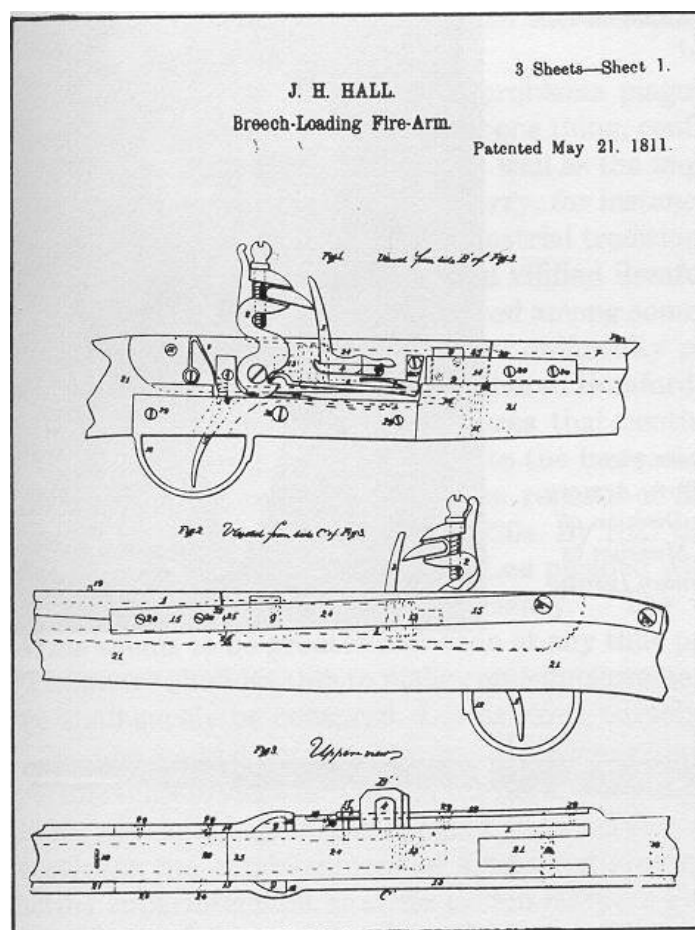


FIGURA 1.2 – Desenho do século XIX mostrando aplicação de parafusos em arma de fogo.

Fonte: [2].

Os primeiros elementos roscados eram feitos seguindo o modelo romano ou tinham seu filete esculpido num cilindro metálico. Como eram feitos manualmente, não era possível se obter um filete de formato regular; portanto, não existia a possibilidade de intercambiabilidade. Os primeiros conjuntos de parafuso e porca surgiram no final do século XVI como resultado de um longo trabalho de ajustes.

Com o advento da Revolução Industrial, o uso de elementos roscados generalizou-se, sendo aplicado em todas as máquinas. Processos novos de fabricação foram criados basicamente através da usinagem dos parafusos. Estes métodos também rudimentares não permitiam a intercambiabilidade.

Neste período, cada elemento era ajustado manualmente com sua contra-peça. Para facilitar eventuais manutenções era comum gravar-se uma ou mais letras gregas nos elementos e na contra-peça correspondente, com o objetivo de facilitar a identificação dos pares.

O problema persistiu até 1800 quando o inventor inglês Henry Maudesley construiu o primeiro equipamento que possibilitava ao operador fazer parafusos com qualquer passo e diâmetro, transformando o antigo e imperfeito sistema de produzir parafusos em um processo exato e científico [4].

Seu processo de corte é ainda utilizado, mas para produção em larga escala surgiram posteriormente processos de conformação nos quais são utilizadas matrizes para enrolar as roscas num cilindro com o diâmetro primitivo. No início, esse cilindro era aquecido até 870°C antes da conformação e, atualmente, este procedimento é realizado a frio (Figura 1.3). Processos de fabricação similares também foram utilizados para a fabricação das porcas [3].



FIGURA 1.3 - Equipamento de fabricação de elemento roscado por conformação a frio.

Outro capítulo deste processo de desenvolvimento foi o estabelecimento de uma padronização para a fabricação deste tipo de componente, uma vez que até então cada fabricante desenvolvia o seu próprio padrão. Em 1841 foi apresentado ao Instituto dos Engenheiros Civis na Inglaterra, por Joseph Whitworth, o primeiro sistema para padronização de fixadores, que foi adotado como padrão britânico e ficou conhecido como Sistema Whitworth[4].

No entanto, nos Estados Unidos da América (EUA), um fabricante de máquinas chamado William Sellers propôs melhorias ao padrão britânico que foi adotado como padrão, e em vários países europeus, e conhecido como Sistema Sellers (Figura 1.4).

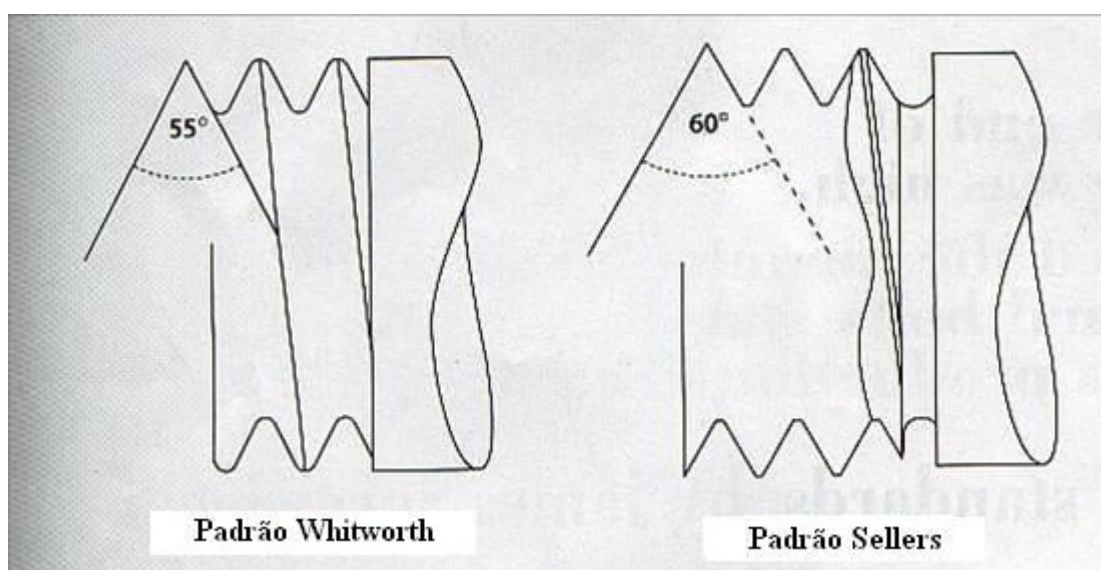


FIGURA 1.4 – Desenho do século XIX comparando uma rosca Whitworth e uma Sellers.

Fonte: [1].

Após a segunda Guerra Mundial, ficou evidente a necessidade de unificar os sistemas. Em 1948, EUA, Canadá e Inglaterra criaram um sistema unificado baseado as dimensões em polegadas. No mesmo ano, na Europa, a Organização Internacional de Padronização (ISO) iniciou um estudo para estabelecer um sistema que pudesse ser aplicado mundialmente. Destes estudos resultaram dois sistemas denominados ISO Métrico e ISO Polegada. Em 1970, o sistema ISO Métrico foi aperfeiçoado e gerou o Sistema Métrico Ótimo, que se tornou base para aplicações aeroespaciais e de exigências elevadas [3].

Atualmente, existe uma grande variedade de sistemas como ASTM, SAE, ANSI, rosas métricas ISO, rosas Whitworth, rosas tubulares Whitworth, rosas trapezoidais, rosas redondas, rosas de transmissão de potência e rosas Acme. Soma – se a isto o emprego de diversos materiais, tratamentos, forma de fixação e revestimentos superficiais, conforme as especificidades de cada segmento industrial ou região do globo, totalizando cerca de 8000 padrões para fixadores em todo o mundo. [3, 5, 6].

Essa diversidade de normas e processo na indústria mecânica moderna permite uma grande variedade de elementos de fixação roscados, com diferentes combinações entre dimensões, formatos, tolerâncias, materiais, tratamentos térmicos ou revestimentos. Atualmente, diversas empresas dispõem de processos exclusivos de fabricação, protegidos por patentes e por segredos industriais [3,4]. Esses processos representam mais um fator na multiplicação de opções para as características dos elementos de fixação disponíveis aos projetos modernos.

1.2 Aplicações de Elementos Roscados no Brasil

Nos últimos anos, devido à necessidade das empresas brasileiras competirem no mercado internacional e à entrada de novos competidores no mercado nacional, tornou-se fundamental o aperfeiçoamento de seus processos produtivos. Esse aperfeiçoamento tem por meta reduzir os custos e elevar os níveis da qualidade de seus produtos, focando esforços em cada etapa do processo para se obter a maior produtividade possível. Nas empresas mecânicas, uma das etapas mais comuns dos processos é a montagem de elementos roscados. Estes elementos, como porcas e parafusos e demais elementos de fixação roscados, como prisioneiros, fixadores e tubulações, representam uma etapa do processo na montagem de sistemas, que mesmo sendo aparentemente pequenas em relação ao processo total, absorve uma considerável parcela de tempo e de energia. Por exemplo, estima-se que na Volkswagen sejam realizados diariamente cerca de quatro milhões de montagens deste tipo, em média duas mil por veículo. Considerando que cada uma representa cerca de R\$ 0,50 em custo, incluindo os equipamentos envolvidos, mão-de-obra e energia utilizadas, o custo diário é de cerca de dois milhões de reais.

Um outro fator a ser considerado é a montagem adequada dos elementos de fixação roscados, que é importante para se evitar uma eventual falha deste componente. Em muitos casos, essas falhas implicam em operações de desmontagem e remontagens demoradas, que podem prejudicar a qualidade final do produto. Além disto, causam modificação no fluxo do processo produtivo o que acarreta um aumento custos e riscos de acidentes [2,3].

1.3 Objetivos desta Investigação.

Neste estudo, são realizadas análises comparativas dos comportamentos mecânicos dos revestimentos dos elementos roscados com diferentes tratamentos superficiais. Essas análises estão focalizadas no comportamento mecânico das superfícies e de seu substrato, quando submetida a esforços relacionados ao torque e a velocidade de aperto. Pela análise do comportamento da camada superficial dos revestimentos e dos substrato destes elementos, foi possível avaliar os parâmetros que determinam as condições limites para a otimização dos processos de montagem para cada tipo de revestimento. Os revestimentos selecionados para a realização deste estudo foram resultados de processos de bicromatização, fosfatização, dacromet e zinco negro.

Não é objetivo deste estudo uma análise matemática rigorosa dos esforços na superfície dos parafusos, uma vez que se trata de uma superfície de modelagem

complexa (trata-se de uma hélice com curvatura nos três eixos) e por terem sido utilizados equipamentos de aplicação industrial que não permitiriam eliminar as influências dos inúmeros fatores que atuam neste tipo de processo. Para minimizar os eventuais desvios, foram feitas calibrações dos equipamentos a cada ensaio, controle da temperatura ambiente durante os ensaios e seleção dos lotes das amostras, de forma a garantir parâmetros de comparação confiáveis.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Elementos roscados de fixação podem ser descritos como conjuntos compostos de um cilindro envolvido por um filete, de maneira a formar um helicóide e uma contra peça composta por um outro elemento constituído por um furo com um filete similar formando uma helicóide na parte interna. Estes dois elementos unem-se através de um movimento de giro que faz com que os filetes se encaixem um ao outro. Esta união caracteriza-se pela possibilidade de ser desmontada.

Neste estudo, o conjunto filete e cilindro e o conjunto filete e furo são denominados como rosca.

A forma mais conhecida deste tipo de conjunto é o parafuso e a porca, que está representados na Figura 2.1.

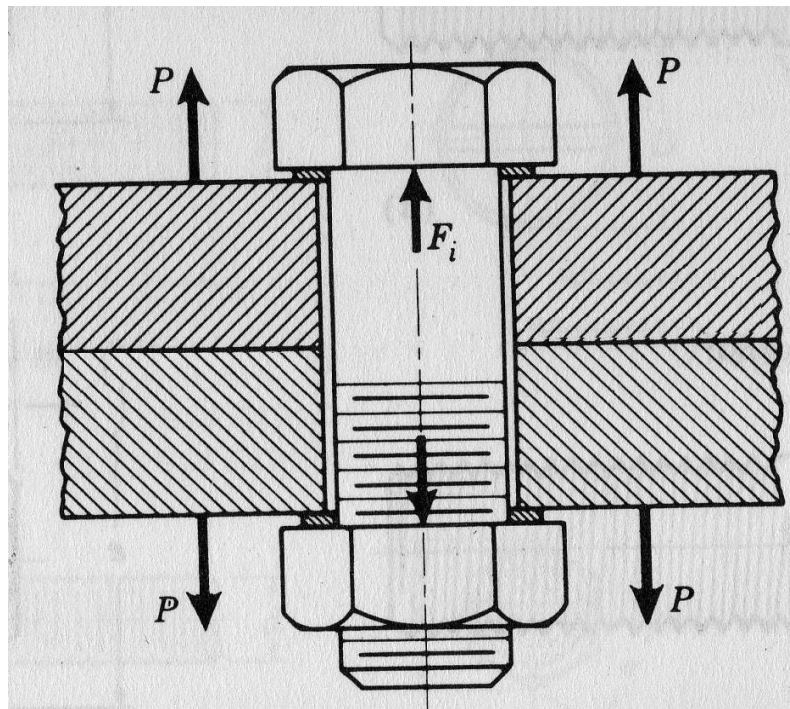


FIGURA 2.1 - Ilustração que apresenta uma montagem clássica, para promover junção de peças.

Existe uma extensa variedade de equipamentos para a realização da montagem e desmontagem destes conjuntos, desde os mais simples aos mais complexos, o

desenvolvimento e a seleção dependem dos parâmetros desejados para o processo, como velocidade, torque, dimensões e ambiente onde será utilizado, e dos custos envolvidos. Neste estudo foram utilizados equipamentos automáticos denominados parafusadoras.

Um parafuso é composto da rosca, que pode ou não cobrir toda a superfície do cilindro, e uma cabeça que pode apresentar diversos tipos de formato nos quais a parafusadora irá se encaixar e permitir a aplicação do torque. O formato da cabeça apresenta uma série de características determinadas por normalizações. A parafusadora possui diversos tipos de adaptadores para poderem atuar nas diferentes especificações para a montagem dos elementos roscados.

Um desenvolvimento relativamente recente são as parafusadoras de torque constante, que permitem o controle do torque e da velocidade através de controles digitais. Elas permitem a realização de montagens e desmontagens com parâmetros controlados de velocidade e torque por meio de softwares. Eles permitem programar as velocidades e os torques que serão aplicados nos elementos durante o processo, e coletam os dados de resposta destes aos esforços recebidos de forma a gerar dados para análise. Esse avanço não estava disponível na realização do trabalho de Colenci [4], apesar de ser citado o seu desenvolvimento, não lhe foi possível desenvolver trabalhos com uso deste recurso.

Neste estudo, foram utilizadas roscas métricas e a sistemática que permite descrevê-las é apresentada no exemplo que segue:

M10X25 - dacromet

- M = informa que se trata de uma rosca métrica;
- 10 = diâmetro primitivo;
- 25 = comprimento total da rosca;
- revestimento constituído de dacromet.

Em decorrência da necessidade de se ter velocidade otimizada nos processos de montagem e de se garantir a segurança no aperto destes elementos, as suas superfícies necessitam ser submetidas a esforços próximos à sua resistência mecânica máxima. Se esse limite for excedido o material ficará sujeito a danos que poderão causar sua falha. Esta falha pode ser a ruptura mecânica do conjunto, a ruptura do revestimento superficial (expondo o elemento à corrosão) ou ainda uma variação no coeficiente de atrito das superfícies que poderá causar uma futura perda de aperto [7,8].

Nas Figuras 2.2a e 2.2b são apresentados exemplos de filetes danificados devido ao excesso de velocidade de aperto durante o processo de montagem. Trata-se de um conjunto parafuso e porca, com revestimento superficial de fosfato, onde é possível observar a destruição do revestimento e da rosca, acarretando a perda da função do conjunto.

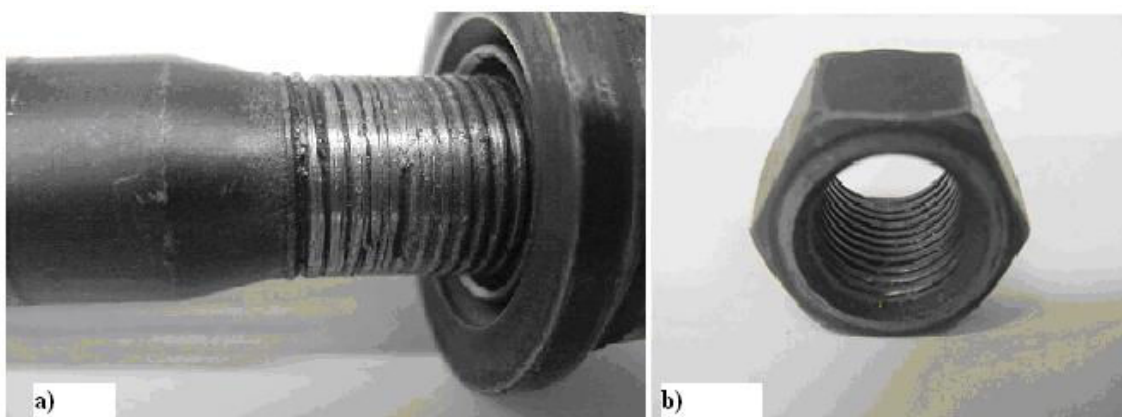


FIGURA 2.2 - Exemplos de danos decorrentes de parâmetros não controlados durante o processo de montagem em: a) parafuso e b) porca.

Para melhorar as características superficiais dos parafusos, além de tratamentos térmicos, estão sendo desenvolvidos revestimentos superficiais compostos de camadas de materiais que permitem melhorar as propriedades físico-químicas dos conjuntos. Esses revestimentos eram em grande maioria oriundos de processos eletroquímicos de deposição; no entanto, devido a questões ambientais e à necessidade de melhorar cada vez mais as propriedades dos elementos, estão sendo desenvolvidos novos processos físicos de “spinnig”, imersão e jateamento. Esses processos ainda enfrentam questões de custo, capacidade de produzir elementos com geometrias complexas e limitações quando às dimensões dos componentes. As características das camadas que constituem esses revestimentos permitem controlar os parâmetros de coeficiente de atrito, resistência, estética, propriedades elétricas e mecânicas, e resistência à corrosão.

Um ponto importante a reforçar é a obrigatoriedade da eliminação do uso de componentes com revestimentos superficiais que contenham elementos químicos como o Cr^{6+} dos projetos [8] para veículos automotores, que tende a se tornar mais rígida e mais abrangentes nos próximos anos.

A seleção do tipo de revestimento, portanto, deve levar em consideração a resistência aos esforços mecânicos aplicados durante de processo de montagem, o tipo de utilização, as características elétricas desejadas, as condições ambientais no qual o componente irá atuar, a estética e o custo do componente [9,10,11].

Os processos de obtenção de alguns tipos de revestimentos superficiais são mantidos como segredos industriais dos seus fabricantes, não sendo possível conhecer com exatidão os parâmetros desses processos.

2.1 Dimensões dos Componentes

As dimensões dos elementos roscados são determinadas de acordo com: esforços mecânicos que serão submetidos, meio ambiente no qual o veículo irá atuar, tipos de elementos que serão unidos, características dos materiais que estarão em contato com o conjunto, peso desejado, custo, normas de segurança e de legislação aplicáveis, facilidade de manutenção e eventual necessidade de estanqueidade [9,12,13,14]. A

natureza e as características do revestimento implicam na mudança das dimensões do elemento, uma vez que acrescenta sua espessura às dimensões do componente, modificando também o seu formato, visto que a deposição do revestimento não segue rigorosamente a geometria do substrato, aumentando o raio das arestas e causando variações das dimensões devido a variações na espessura.

2.2 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos utilizados antes e depois da aplicação do revestimento visam mudar as características mecânicas da superfície do substrato. Isso ocorre através da difusão dos elementos, o que permite a formação de interfaces diluídas, como será demonstrado neste trabalho, homogeneizando o revestimento e eliminando o hidrogênio retido.

2.3 Proteção Contra Corrosão

Uma causa comum na falha de fixações roscadas é a sua sensibilidade à corrosão, decorrente da existência de diferenças de potencial elétrico entre as regiões protegidas por um revestimento superficial intacto e as regiões onde existem ruptura ou desgaste no revestimento. Neste caso, o metal base é exposto ao ambiente corrosivo [7,15,16]. Um outro fator que agrava a corrosão neste tipo de componente é a existência de frestas entre os filetes de uma união e entre os elementos unidos. Estas frestas, mesmo que possuam tamanhos microscópicos, absorvem a umidade por capilaridade e outros elementos presentes na atmosfera como ácidos e sais, que resultam na formação de pilhas galvânicas que aceleram o processo de corrosão.

2.4 Coeficiente de Atrito

Um dos parâmetros importantes na montagem de elementos de fixação roscados é o coeficiente de atrito das superfícies. Estes coeficientes definem a magnitude do torque de travamento. O coeficiente de atrito influencia na capacidade que tem os elementos de fixação roscados em manter seu torque de travamento, minimizando o risco de se soltarem.

Deve ser observado, para efeitos de manutenção, que o coeficiente de atrito diminui após cada montagem ou desmontagem.

2.5 Torque de Montagem e Torque de Travamento

O funcionamento de uma união feita por parafuso e porca consiste em prender um conjunto mecânico por meio da pressão gerada por um torque de aperto. Esse conjunto fica sujeito a um esforço de compressão enquanto o cilindro central do parafuso fica sujeito a um esforço tração (Figura 2.3). As superfícies dos filetes da rosca ficam sujeitas a um esforço de cisalhamento, e que é analisado mais adiante.

A tensão no corpo do parafuso é a resposta do conjunto à força de união que os elementos de fixação roscados estão exercendo na montagem e é proporcional ao torque aplicado. Este torque deve ser determinado levando-se em conta as dimensões e as propriedades mecânicas dos elementos.

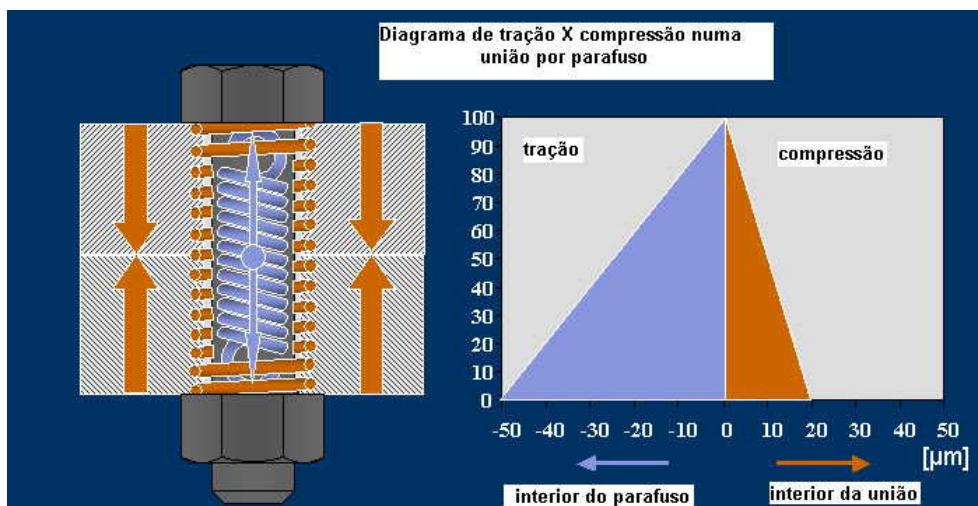


FIGURA 2.3 - Diagrama que apresenta a força de tração axial sobre o eixo do parafuso e a correspondente compressão nos elementos unidos.

Um torque aplicado menor que o torque de travamento ideal poderá resultar em um afrouxamento do conjunto; se este torque for maior poderá ocasionar a ruptura do conjunto [9,17,18]. O torque de travamento é definido como o torque final que é aplicado na montagem de forma que se garanta a manutenção da mesma durante a utilização normal do conjunto. Numa utilização livre de vibrações, se o conjunto não falhar no momento da montagem, dificilmente irá falhar durante o uso, em decorrência da metodologia de dimensionamento utilizada atualmente.

Devido à deformação elástica e ao coeficiente de atrito dos elementos envolvidos, o torque de travamento deve manter o conjunto montado diante das solicitações impostas à junta durante seu trabalho. Para a desmontagem, esse torque necessita ser superado.

2.6 Análise das Forças Atuantes nos Elementos Roscados

O cálculo de uma união roscada é baseado numa carga de trabalho agindo sobre o conjunto. Esta carga de trabalho e a deformação elástica resultante dos componentes podem causar uma força axial, uma força transversal, um momento de flexão e um momento de torque, dependendo de cada caso. Neste estudo, considera-se vamos considerar apenas a aplicação de uma força no sentido do eixo do parafuso, de forma a simplificar os cálculos. Portanto, não há componentes de flexão ou esforço transversal ao eixo do parafuso.

Na Figura 2.4 estão denominadas as várias partes componentes de um elemento roscado. Esta nomenclatura parte do conceito no qual a rosca é descrita como sendo um cilindro metálico no qual é moldado um filete de forma helicoidal.

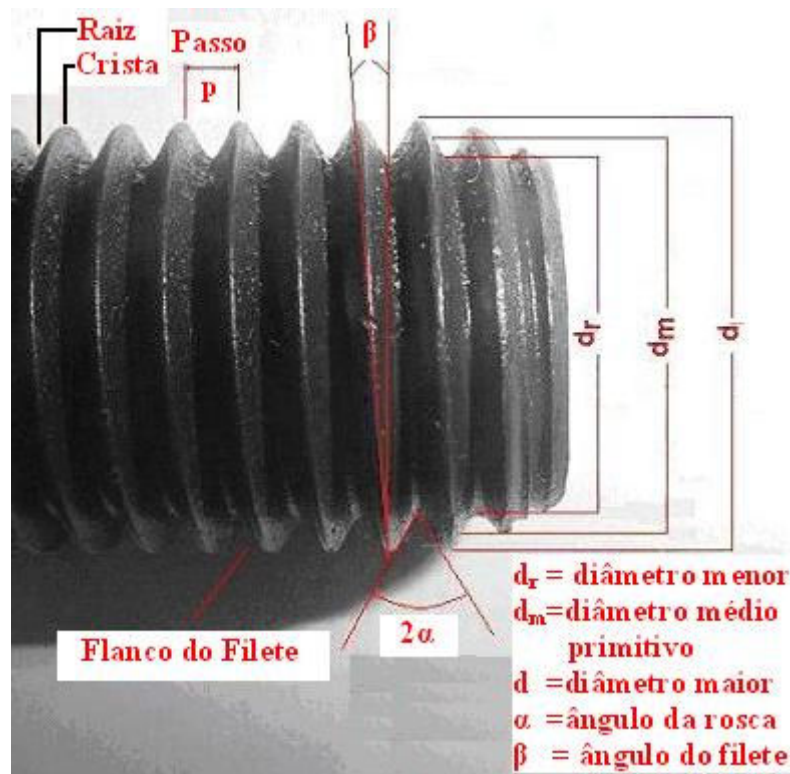


FIGURA 2.4 - Denominações das partes componentes de uma rosca.

Considerando-se uma rosca de perfil quadrado, na qual o ângulo α é zero, um filete que tenha sido moldado em um comprimento exatamente igual a uma volta no parafuso, obtém-se uma Figura similar a um triângulo retângulo como está sendo apresentado na figura 2.5. Desta forma, o filete desenvolvido é a hipotenusa deste triângulo retângulo e a base é a circunferência retificada correspondente ao diâmetro médio da rosca (d_m) e cuja altura é o avanço do parafuso (l). O avanço é a distância que a porca percorre paralelamente ao eixo do parafuso, quando girada de uma volta, e β é o ângulo de hélice da rosca. A somatória de todas as forças que agem na direção do eixo do parafuso é representada por F [1].

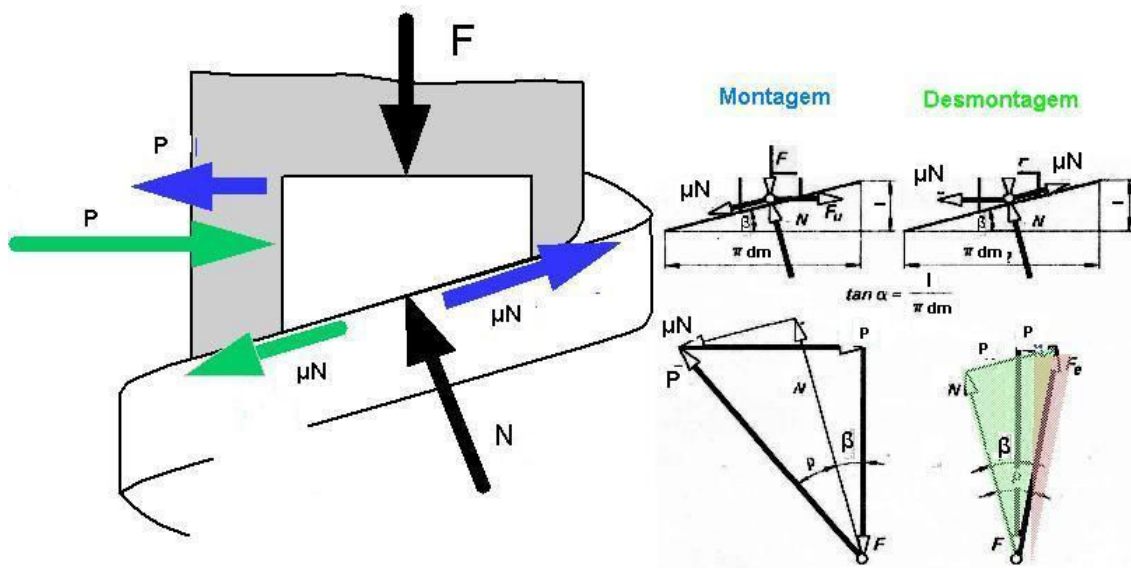


FIGURA 2.5 - Decomposição de forças atuantes em um filete.

As forças que atuam na superfície nos sentidos horizontal (x) e vertical (v), são dadas por:

montagem:

$$\sum F_v = F + \mu N \operatorname{sen} \beta - N \cos \beta = 0 ; e \quad (1)$$

$$\sum F_x = P - N \operatorname{sen} \beta - \mu N \cos \beta = 0 ; \quad (2)$$

desmontagem:

$$\sum F_v = F - N \operatorname{sen} \beta + \mu N \cos \beta = 0 ; e \quad (3)$$

$$\sum F_x = -P - N \operatorname{sen} \beta + \mu N \cos \beta = 0 ; \quad (4)$$

em que:

μ = coeficiente de atrito da superfície

F = força de tração sobre o parafuso

N = força de reação do filete

d_m = diâmetro médio do parafuso

β = ângulo da hélice

P = força de aperto

Resolvendo os sistemas de equações, tem-se:

montagem:

$$P = \frac{F(\operatorname{sen}\beta + \mu \cos \beta)}{\cos \beta - \mu \operatorname{sen}\beta} ; \quad (5)$$

desmontagem:

$$P = \frac{F(\mu \cos \beta - \operatorname{sen}\beta)}{\cos \beta + \mu \operatorname{sen}\beta} . \quad (6)$$

Dividindo-se o numerador e o denominador por $\cos \beta$ e considerando $\operatorname{tg} \beta = l/\pi d_m$ (Figura 2.5), tem-se:

montagem:

$$P = \frac{F[(l/\pi d_m) + \mu]}{1 - (\mu l/\pi d_m)} ; \quad (7)$$

desmontagem:

$$P = \frac{F[\mu - (l/\pi d_m)]}{1 + (\mu l/\pi d_m)} . \quad (8)$$

Como o torque é o produto da força pelo raio médio $d_m/2$, tem-se:

montagem:

$$T = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \mu \pi d_m}{\pi d_m - \mu l} \right) ; \quad (9)$$

desmontagem:

$$T = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{\mu \pi d_m - l}{\pi d_m + \mu l} \right) . \quad (10)$$

As considerações feitas levaram em conta uma rosca de perfil quadrado, na qual o ângulo α é zero. No entanto, nas aplicações de fixação, este ângulo é diferente de zero e tem importante participação no valor do torque de travamento (Figura 2.6).

Portanto, dividindo-se os termos de que contêm atrito pelo $\cos \alpha$, tem-se:

$$T = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{l + \mu\pi d_m \sec \alpha}{\pi d_m - \mu l \sec \alpha} \right) \quad (11)$$

Admitindo que as forças sejam distribuídas uniformemente sobre a superfície do filete, quando montado em uma porca de altura h , pode-se determinar a tensão mecânica na superfície dos filetes do conjunto, que é dada pela equação:

$$\sigma = \frac{-4p_c F}{\pi h (d_2 - d_{21})} \quad (12)$$

onde:

p_c = comprimento da região de contato entre a porca e o parafuso

d = diâmetro da montagem

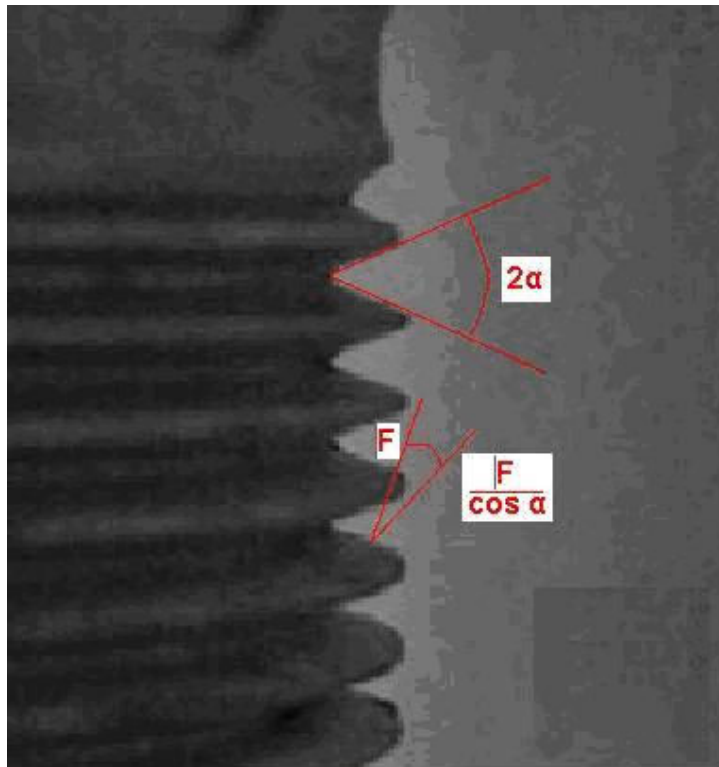


FIGURA 2.6 - Posição do ângulo α em uma rosca métrica.

Na Figura 2.7 observa-se que o efeito do cisalhamento é semelhante tanto na superfície da porca e no parafuso. De uma forma geral procura-se especificar o material do parafuso como sendo mais resistente e duro, e a porca deve ser mais macia e dúctil, uma vez que, em caso de falha, a porca é o componente mais fácil e barato de ser substituído [12,17].

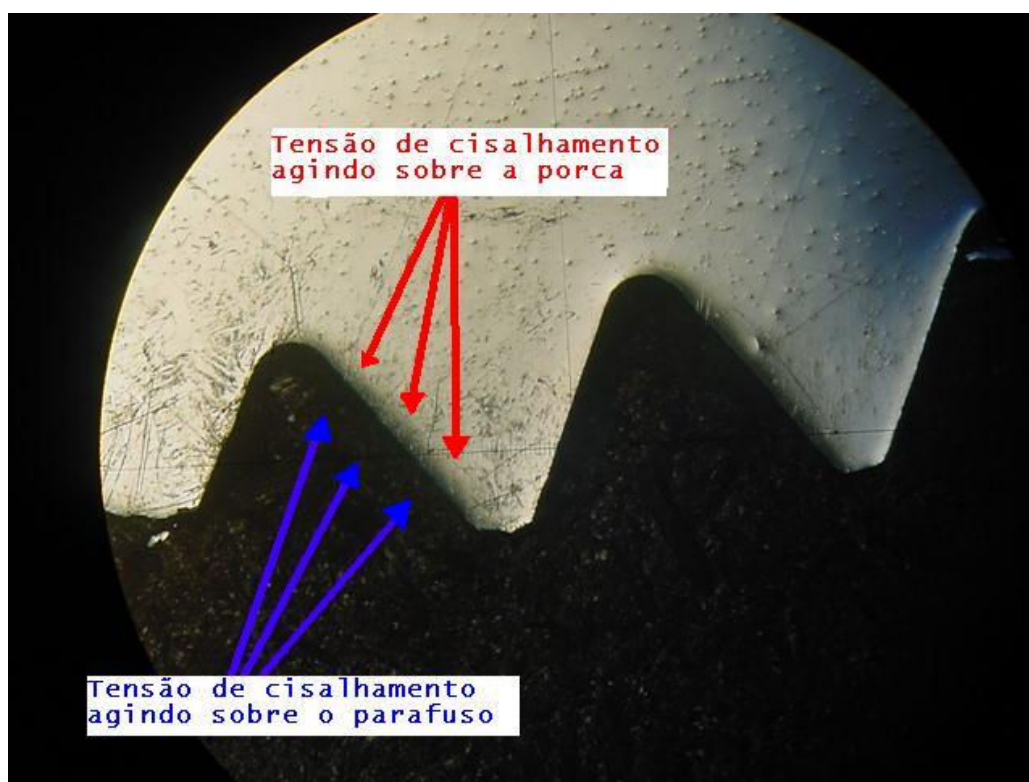


FIGURA 2.7 - Deformação devido às tensões na interface entre o parafuso e a porca, (100 ×)

Devido às alterações das formas geométricas do elemento sob efeito das cargas aplicadas durante a montagem, a distribuição de cargas entre os filetes da rosca não ocorre de forma homogênea. Numa montagem, normalmente 1/3 da força total se concentra-se no primeiro filete e apenas uma pequena carga ocorre no último filete [4].

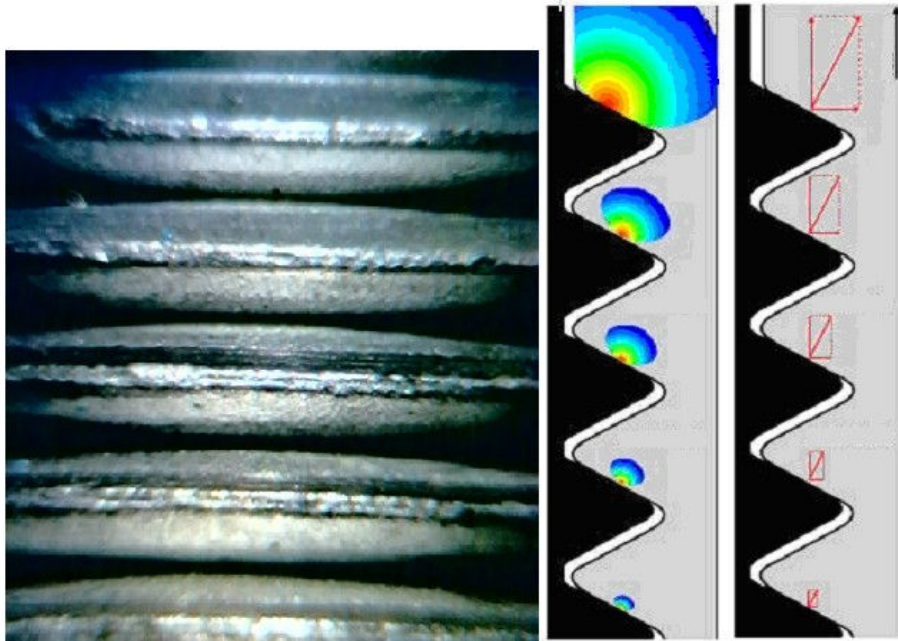


FIGURA 2.8 - Comparação entre as marcas deixadas pelos esforços nos diferentes filetes e o esboço do diagrama de esforços sobre os mesmos representando a distribuição de desigual de esforços entre os filetes.



FIGURA 2.9 - Região de ruptura ocorrida no ponto onde se previa a maior concentração, observa-se que a ruptura ocorreu por esforço de torção.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Critérios de Seleção dos Elementos Roscados

Os elementos roscados (parafusos e porcas) objeto deste estudo foram selecionados dentre aqueles atualmente utilizados no processo de montagem de partes dos caminhões produzidos pela Volkswagen Caminhões e Ônibus, em sua fábrica situada em Resende, RJ.

Os elementos roscados foram selecionados, de acordo com o tipo de revestimento superficial e dimensões:

- M10x25 – com revestimento bicromatizado;
- M10X25 – com revestimento dacromet;
- M10x30 – com revestimento fostatizado;
- M6x14 – com revestimento zinco negro; e
- Porcas de aço inox M10 e M6.

A seleção obedeceu aos critérios de:

- ser utilizado normalmente no processo
- evitar dimensões maiores que poderiam comprometer a realização dos ensaios mecânicos ao exigir níveis esforços acima da capacidade dos equipamentos disponíveis. Dimensões maiores também exigiriam que fossem realizados cortes nas amostras para serem analisadas, o que poderiam causar danos e falsos resultados. Elementos menores, por outro lado, não permitiriam ensaios confiáveis, em especial no que tange ao controle de temperatura e à exatidão das medidas com os equipamentos disponíveis. Estes parâmetros definiram as dimensões M6 a M10.
- possuir dimensões que permitissem comparações entre si e entre os diferentes revestimentos. A exceção foi o parafuso de zinco negro com dimensão M6, pois não existe em uso no momento um elemento M10 com esse revestimento. No entanto, seu estudo é válido, pois permite gerar valores para estas comparações entre os elementos sem muitas distorções

- as porcas utilizadas foram de aço inox M10 e M6, material que não é utilizado na indústria automobilística. Neste estudo tem a vantagem de simplificar os ensaios, pois facilita a interpretação dos resultados encontrados. Isto porque as porcas com outros tipos de revestimentos ou com o mesmo revestimento do parafuso, dificultam a análise dos resultados para identificar o limites de esforço. Quando observadas ao microscópio as camadas adicionais tornam difícil identificar o momento da falha do revestimento, o que resulta em um aumento do número de variáveis do processo.

3.2 Materiais e Características Físicas e Químicas dos Elementos Roscados Seleccionados (Substratos).

A classe de parafusos 8.8 utilizada neste estudo corresponde ao aço de médio carbono cuja composição característica é dada por: 0,25 a 0,55 % C, 0,035 % P, 0,035 % S e 0,003 % B. Este aço é submetido aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento a 425°C (Figura 3.1), para que possuam os valores dos parâmetros de propriedades mecânicas listados na Tabela 3.1.

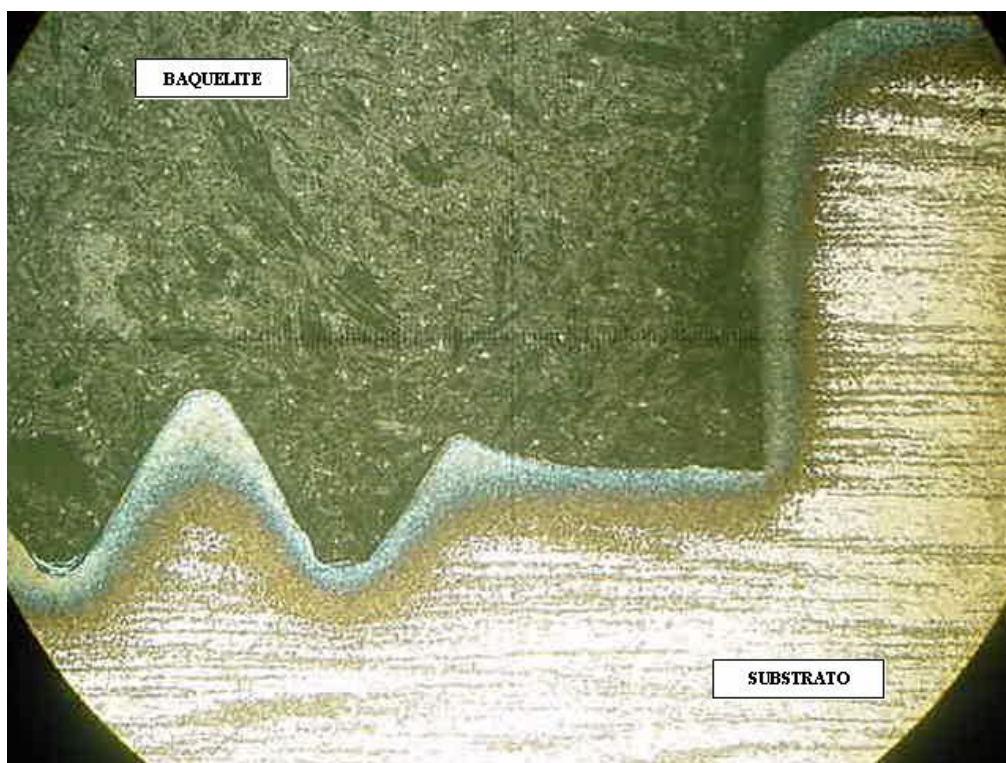


FIGURA 3.1 – Micrografia de um parafuso classe 8.8 submetido aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento a 425 oC (10X).

TABELA 3.1 - Valores de parâmetros de propriedades mecânicas características para o substrato de aço médio carbono.

Diâmetro	Resistência à tração Mín. (MPa)	Resistência à tração Máx. (MPa)	Dureza (Brinell)
$1/4 \leq d \leq 3/4$	586	827	302
$3/4 < d \leq 1$	537	792	302
$1 < d \leq 1\ 1/2$	510	723	285

Fonte: [19,20].

Nas tabelas 3.2 e 3.3 são representados os valores dos torques de montagem e as forças de tração máximas e mínimas para elementos roscados de aço de médio carbono.

TABELA 3.2 - Valores característicos de torque de montagem e de força de tração máximas e mínimas, esforços dentro da região elástica.

ROSCA	Classe de Resistência 4,8 VML 340			Classe de Resistência 5,8 VML 420			Classe de Resistência 6,8 VML 480			Classe de Resistência 8,8 VML 640/660			Classe de Resistência 10,9 VML 940			Classe de Resistência 12,9 VML 1100		
	MA	FM mín	FM máx	MA	FM mín	FM máx	MA	FM mín	FM máx	MA	FM mín	FM máx	MA	FM mín	FM máx	MA	FM mín	FM máx
M4	1,2	1,1	2,3	1,5	1,4	2,9	1,7	1,6	3,3	2	1,9	3,9	3,5	3,3	6,8	4	3,8	7,8
M5	2,5	1,9	4,1	3	2,3	4,9	3,5	2,7	5,7	4,5	3,5	7,3	7	5,5	11	8	6,2	13
M6	5	2,9	5,9	6	3,5	7,2	6	3,8	7,9	8	5,1	11	12	7,6	16	14	8,9	19
M7	10	4,8	10	13	6,2	13	14	6,7	14	20	9,6	20	30	14	30	35	17	35
M8	20	7,7	16	25	9,6	20	30	12	24	40	15	32	55	21	44	65	25	52
M10	35	11	24	45	15	31	50	16	34	65	21	44	95	31	65	110	36	75
M12x1,5	35	11	24	45	15	31	50	16	34	65	23	44	95	33	65	110	39	75
M14X1,5	60	17	36	75	21	45	85	24	51	110	31	67	160	45	97	190	54	115
M16X1,5	90	23	48	110	28	59	130	33	70	170	43	91	240	60	129	290	73	156
M18X1,5	130	29	62	160	36	77	180	40	86	250	56	120	350	78	168	400	89	192

Fonte: [21].

TABELA 3.3 - Valores de torque de montagem e de força de tração máximas e mínimas, acima da região elástica. (continua)

ROSCA	Classe de Resistência	Momento de torção prévio (N.m+ 90°)	Força de tensão prévia (kN)		Momento de torção de aperto (N.m)	
			F _m mín.	F _m máx.	M _a mín.	M _a máx.
M6	8,8	8,0	10,5	14,5	10,0	17,0
M6	10,9	10,0	15,5	20,0	14,5	23,5
M6	12,9	10,0	18,5	22,5	17,0	26,5
M8	8,8	20,0	19,5	26,0	24,0	41,0
M8	10,9	20,0	29,0	36,0	35,5	57,0
M8	12,9	20	34	41,5	41,5	65

Tabela 3.3 – conclusão

ROSCA	Classe de Resistência	Momento de torção prévio (N.m+ 90°)	Força de tensão prévia (kN)		Momento de torção de aperto (N.m)	
			F _m mín.	F _m máx.	M _a mín.	M _a máx.
M10	8.8	40	31	41,5	47,5	81
M10	10,9	50	45,5	57	70	110
M10	12,9	50	54	66	81	130
M12X1,5	8.8	60	48	64	85	145
M12X1,5	10,9	90	71	88	125	200
M12X1,5	12,9	90	83	100	145	230
M14X1,5	8.8	100	69	91	140	240
M14X1,5	10,9	150	100	125	205	335
M14X1,5	12,9	150	115	145	235	380
M16X1,5	8.8	120	95	125	215	380
M16X1,5	10,9	180	135	170	310	510
M16X1,5	12,9	180	160	195	360	585
M18X1,5	8.8	140	125	165	315	555
M18X1,5	10,9	210	175	220	450	745
M18X1,5	12,9	210	205	250	525	855

Fonte: [21].

3.3 Materiais e Características Físicas e Químicas dos Elementos Roscados Selecionados (Revestimentos Superficiais).

Atualmente, em novos projetos, tem havido preferência pela utilização da zincagem mecânica como alternativa à zincagem eletroquímica para evitar o efeito de fragilidade por hidrogênio retido, o que torna as peças quebradiças, característica típica do processo de zincagem eletrolítica. No entanto, essas técnicas ainda apresentam algumas limitações em termos de custo, propriedades mecânicas e geometria do substrato. Portanto, estes motivos, este estudo utilizou elementos roscados provenientes de ambos os processos.

As características dos processos de revestimento destes componentes, são descritas abaixo:

3.3.1 Revestimento Zinco Bicromatizado

É um processo eletroquímico de deposição de uma camada constituída de zinco e outra de cromo, sobre um substrato de aço ou ferro (Figura 3.2).



FIGURA 3.2 - Parafuso com superfície revestida pelo processo de bicromatização.

A camada de cromo deve possuir menor porosidade do que a camada de zinco aumentando sua resistência à corrosão e ao desgaste. Na Figura 3.3 pode ser observado que o revestimento superficial é composto de duas camadas, sendo que a mais externa é a menos densa (menor massa de material do revestimento por área revestida). Este tipo de revestimento apresenta resistência à corrosão e condutividade elétrica elevadas, o que viabiliza a sua utilização em situações onde houver a necessidade de uniões eletricamente condutoras, ou seja, onde a corrente elétrica tem que fluir entre os componentes da montagem de forma a permitir o uso da união como parte de um circuito elétrico. Quando existirem necessidades estéticas ou funcionais, podem ser adicionados filmes de lubrificantes orgânicos ou esmaltes às superfícies dos elementos roscados.

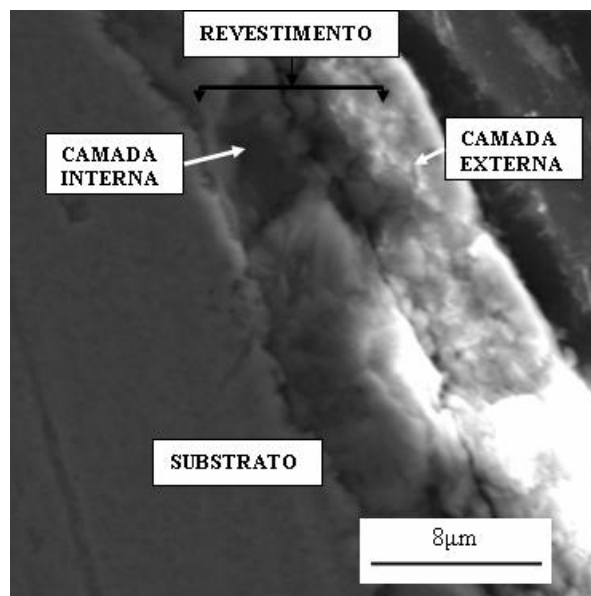


FIGURA 3.3 – Imagem obtida por MEV do revestimento bicromatizado mostrando a camada:externa (cromo) e a camada interna (zinco) depositado em um parafuso 8.8.

Este tipo de revestimento superficial é utilizado em substratos que possuem resistência à tração com valores inferiores a 100 N/mm² e dureza superficial inferior a 370 H_V.

A espessura típica do revestimento para este tipo de aplicação em elementos de junções rosqueadas deverá estar entre 8 e 15µm. Sua qualidade deve permitir uma resistência à corrosão de 120 a 240h, em ensaio em névoa salina para o revestimento, e de 720h, para o substrato [22].

O material do substrato pode apresentar sensibilidade à fragilização por hidrogênio, uma vez que o processo de deposição deste revestimento é eletroquímico no qual o hidrogênio envolvido pode penetrar na superfície do substrato causando falhas na estrutura do material permitindo a formação e a propagação de trincas.

Esta fragilização, considerando a geometria e os tipos de esforços que os elementos roscados são submetidos, faz este tipo de componente particularmente sensível às falhas desta natureza. Estas falhas se caracterizam por uma ruptura frágil, repentina com esforços menores do que os previstos em projeto, podendo afetar a funcionabilidade e a segurança do veículo. Neste caso, são necessários tratamentos térmicos para a eliminação do hidrogênio [23]. Esse tratamento consiste no aquecimento do componente entre 100 e 400°C de forma a promover a saída do hidrogênio retido na estrutura do material.

TABELA 3.4 – Parâmetros de identificação das amostras utilizadas para ensaios mecânicos com revestimento do tipo bicromatizado.

DESCRIÇÃO DO PARAFUSO	DESCRIÇÃO DA PORCA
Código N.010.254,11	Código NA
Tipo de Revestimento bicromatizado C355	Tipo de Revestimento Aço inox
Dimensões M10X25	Dimensões M10
Classe 8.8	Coefficiente de Atrito: 0,10 a 0,16

3.3.2 Revestimento Dacromet.

Dacromet é um processo registrado pela Metal Coatings International, Inc., de Chardon, Ohio, que permite a aplicação de camadas compostas de zinco e de alumínio sobre substratos ferrosos através de um processo não eletroquímico [23,24,25]. Este processo consiste na aplicação dos metais na forma líquida por *spining* ou imersão, seguida de um aquecimento em 320°C. Sobre esta camada é depositada uma outra camada constituída de cromatos, tendo como resultado final um revestimento superficial com resistência mecânica alta, aderência e resistência à corrosão elevada. A espessura total deste revestimento pode variar entre 8 e 18µm (Figura 3.5).

É conhecido que esse tipo de revestimento permite uma proteção elevada do metal base em decorrência de quatro fatores combinados:

1) as camadas de zinco e de alumínio, que compõem o revestimento, protegem o substrato das ações agressivas do meio ambiente, tanto do ponto de vista químico como mecânico;

2) o zinco atua como eletrodo de sacrifício e sofre corrosão para proteger o aço, através de um efeito eletroquímico no qual o zinco atua como anodo;

3) os óxidos metálicos presentes no revestimento e na matriz do substrato reduzem as reações de corrosão do zinco e do aço; e

4) as áreas danificadas no revestimento são protegidas pelos óxidos de zinco e cromatos.

Na Tabela 3.5 são apresentados resultados relacionando a espessura de dois tipos de revestimentos com o tempo de manutenção da resistência mecânica em ensaios em câmara de névoa salina.

TABELA 3.5 - Comparação de espessura de revestimento e tempo até o início de perda de resistência mecânica em câmara de névoa salina. Fonte: [26].

Tipo de revestimento	Espessura de camada (μm)	Tempo de perda da resistência mecânica (h)
Dacromet	5	600
	10	1000
Zinco bicromatizado	5	200
	10	400

O fabricante informa que o coeficiente de atrito da superfície com revestimento do tipo dacromet é de 0,24. Segundo a empresa francesa Chimicolors S/A, uma versão comercial deste processo, na qual um filme adicional de lubrificante orgânico é aplicado por jateamento ou imersão, resulta na redução do coeficiente de atrito para 0,12 a 0,18.

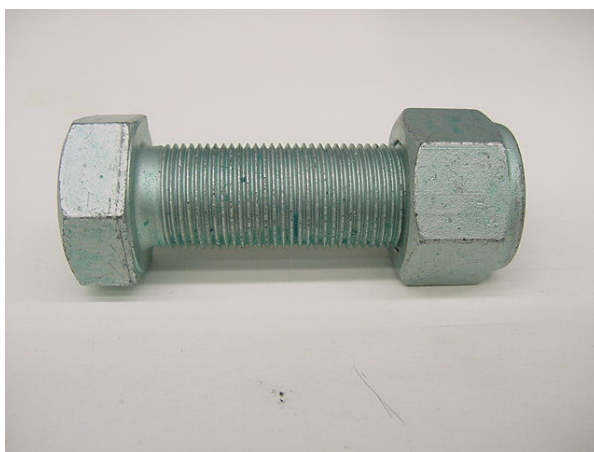


FIGURA 3.4 - Conjunto de elementos roscados com revestimento de dacromet.

O revestimento do tipo dacromet apresenta uma aparência cinza prateada, sendo que é possível adicionar ao lubrificante orgânico pigmentações com diversas cores (Figura 3.4). Não é recomendável para aplicações que necessitem de boa condutividade

elétrica, pois as camadas de óxidos metálicos e de lubrificante atuam como dielétricos [26].

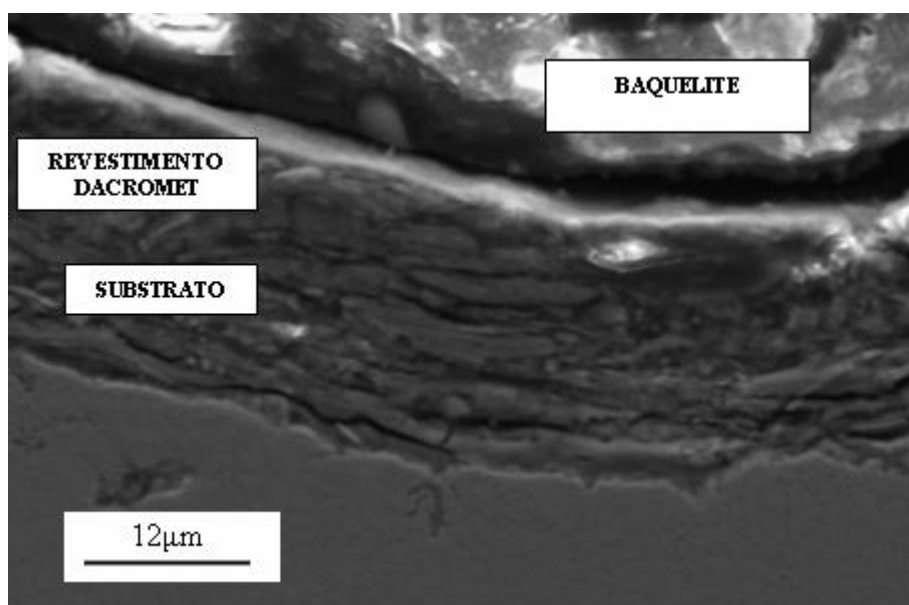


FIGURA 3.5 - Imagem obtida por MEV do revestimento do tipo dacromet depositado em um parafuso 8.8.

TABELA 3.6 – Parâmetros de identificação das amostras utilizadas para ensaios mecânicos com revestimento do tipo dacromet.

DESCRIÇÃO DO PARAFUSO	DESCRIÇÃO DA PORCA
Código NFE 800627 LF	Código NA
Tipo de Revestimento dacromet SZ 100	Tipo de Revestimento INOX
Dimensões M10X25	Dimensões M10
Classe 8.8	Coefficiente de Atrito: 0,08 a 0,16

3.3.3 Revestimento Zinco Negro

Este tipo de revestimento é obtido pela aplicação de zinco e de alumínio sobre um substrato de aço ou ferro através de *spray*, por jateamento eletrostático ou por processo de *spin*. É considerado eficiente para o revestimento de componentes com dimensões pequenas e de formas complexas [27]. O revestimento resultante apresenta uma coloração negra (Figura 3.6), com aderência ao substrato e dureza superficial altas. Devido às suas propriedades mecânicas ótimas é indicado para ser aplicado sobre substratos com resistência à tração superior a 100N/mm^2 e dureza superior a 320 Hv.

Deve ter espessura de revestimento variando entre 10 μ m e 25 μ m, podendo resistir a 720h no ensaio em câmara de névoa salina [26].



FIGURA 3.6 - Parafuso com revestimento de zinco negro.

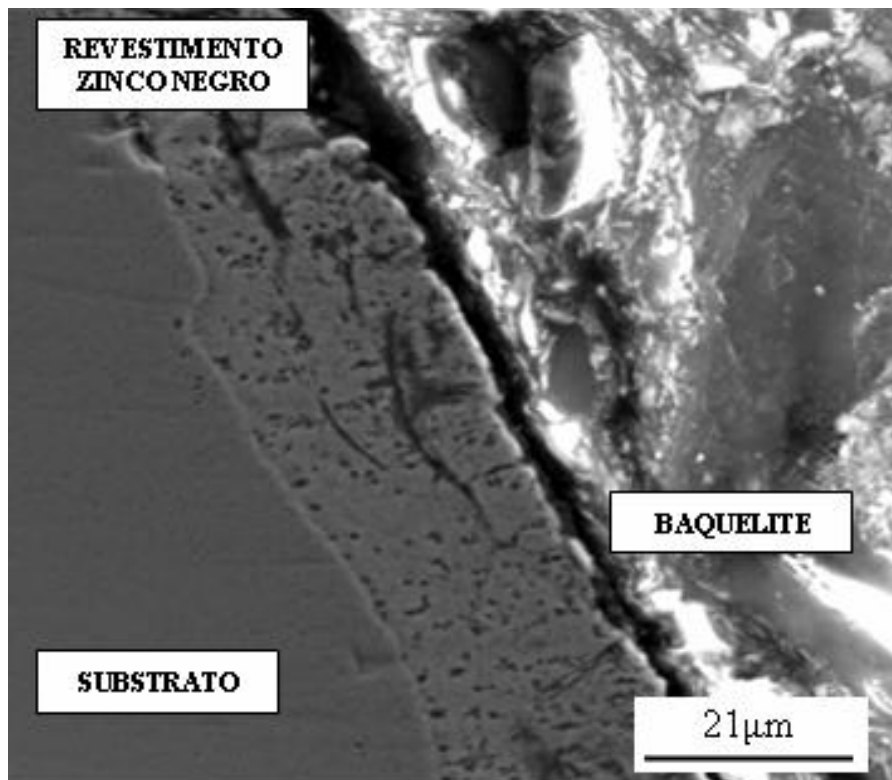


FIGURA 3.7 – Imagem obtida por MEV mostrando revestimento do tipo zinco negro depositado em um parafuso 8.8.

TABELA 3.7 – Parâmetros de identificação das amostras utilizadas para ensaios mecânicos com revestimento do tipo zinco negro.

DESCRIÇÃO DO PARAFUSO	DESCRIÇÃO DA PORCA
Código NFE 802402 ED	Código NA
Tipo de Revestimento zinco negro SZ 100	Tipo de Revestimento INOX
Dimensões M6X14	Dimensões M6
Classe 8.8	Coefficiente de Atrito: 0,10 a 0,16

3.3.4 Revestimento Fosfatizado

A fosfatização é um processo de proteção de metais, que consiste em recobrir as peças metálicas com fosfatos neutros (PO_4^{-3}) e monoácidos [$\text{H}(\text{PO}_4)^{2-}$], de zinco, ferro e manganês. Como os fosfatos desses elementos são pouco solúveis em água, depositam-se sobre a superfície metálica em contato com soluções e fosfatos, quando forem atingidas por determinadas condições, sob a forma de revestimento fino de cristais. A velocidade de deposição, o retículo e a forma do revestimento dependem da nucleação e crescimento dos cristais.

As principais propriedades da película de fosfato são: baixa porosidade; alto poder isolante, que impede a propagação de correntes galvânicas; grande aderência à superfície metálica; boa afinidade pelos óleos e vernizes; baixo custo de aplicação entre outros. A deposição de camadas cristalinas de fosfato exige que as peças estejam perfeitamente limpas, isentas de óleos ou de óxidos [28,29].

Um processo normal de fosfatização pode ser resumido em seis etapas:

- desengraxe;
- decapagem;
- fosfatização;
- apassivação;
- secagem; e
- proteção final.

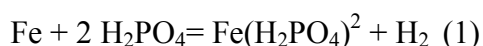
Após os banhos de desengraxe e de decapagem, as peças são lavadas com água corrente, de modo que os álcalis neutralizem o ácido do decapante. A lavagem após o banho ácido impede que o banho fosfatizante tenha aumentada a sua acidez livre, passando a funcionar como decapante.

Pode ser conseguida uma avaliação do grau de limpeza atingido imergindo ou pulverizando as peças com soluções de ferricianeto de potássio ou de sulfato de cobre. Nas áreas limpas aparecerá uma coloração azul (se empregado o ferricianeto de potássio) ou avermelhada (se empregado o sulfato de cobre). Já um teste que não deixa resíduo é o teste do atomizador, que consiste em pulverizar a superfície a ser testada, previamente seca ao ar, com água. Nas áreas sujas haverá a formação de gotículas, enquanto que nas áreas limpas a água escorrerá sob a forma de um filme contínuo.

A solução de limpeza deve ser formulada procurando-se assegurar a concentração adequada dos reagentes; garantir um pH ideal para uso efetivo das

substâncias tensoativas e detergentes; manter este pH ideal através de soluções chamadas de "soluções-tampão", que neutralizam as impurezas ácidas ou básicas. Deve conter também um reagente que elimine a chamada "dureza da água" (a dureza consiste, principalmente, em elevadas concentrações de sais de cálcio e magnésio), bem como inibidores que evitem o ataque à superfície metálica, impedindo assim a sua decapagem. Os tanques devem ser sofrer limpeza semanal, para remoção de resíduos [28].

Quanto à fosfatização propriamente dita, deve-se considerar que no tratamento das superfícies de ferro com ácido fosfórico diluído há a formação de fosfato férrico biácido e desprendimento de hidrogênio, conforme a reação (1):



Continuando o ataque, ocorre a formação de fosfatos de ferro neutros, insolúveis, que precipitam sobre a superfície metálica. Estas películas de fosfato de ferro II, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$, sofrem oxidação e passam a fosfato de ferro III, FePO_4 , sofrendo alterações em seu retículo cristalino e, conseqüentemente, diminuição do seu poder de aderência.

Os fosfatos de zinco e manganês não apresentam este problema. Os revestimentos cristalinos de zinco contêm fosfato hidratado sob a forma de $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ e traços de fosfato de ferro II.

O banho fosfatizante deve ter de 2 a 5% de concentrado fosfatizante dissolvido em água. Os principais componentes são: sulfato de zinco, ZnSO_4 , ácido fosfórico, H_3PO_4 , e catalisadores; estes últimos - nitratos, nitritos, peróxidos e cloratos - têm a função de diminuir o tempo de operação, precipitar o ferro II presente em solução e oxidar o hidrogênio formado pelo ataque do ácido ao metal. Altas concentrações de catalisador dão "capas" com cristais finíssimos e bem aderentes (Figura 3.8).

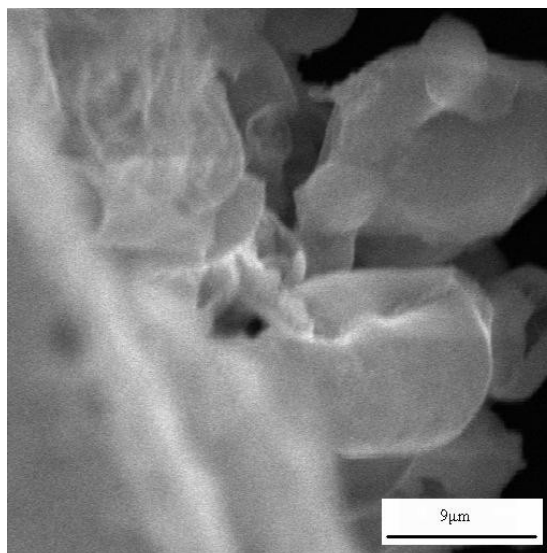


FIGURA 3.8 - Cristais de fosfato com ampliação de 3500X tendo como substrato um parafuso classe 8.8.

Devem ser controlados a quantidade de fosfato do metal presente, o índice de acidez livre e total e a concentração de ferro II dos banhos fosfatizantes. Os revestimentos de fosfato conferem ao ferro, zinco, cobre e suas ligas, excelente resistência à corrosão. Favorecem a aderência de tintas e, por serem isolantes, impedem a propagação de correntes elétricas superficiais, que respondem pela formação de ferrugem sob a camada da tinta [28]. Para utilização na indústria automotiva a espessura do revestimento pode variar entre 10µm e 25µm.

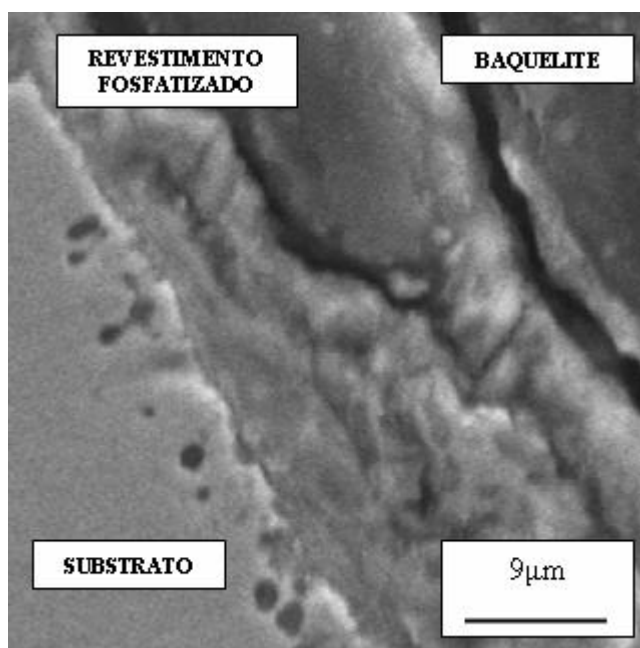


FIGURA 3.9 – Imagem obtida por MEV do revestimento fosfatizado apresentando o depósito em um parafuso 8.8.

TABELA 3.8 – Identificação das amostras utilizadas para ensaios com revestimento de fosfato.

DESCRIÇÃO DO PARAFUSO	DESCRIÇÃO DA PORCA
Código N.010.230-4	Código NA
Tipo de Revestimento fosfato B110	Tipo de Revestimento Inox
Dimensões M10X30	Dimensões M10
Classe 10,9	Coefficiente de Atrito 0,12 a 0,18

3.4 Metodologia

Na Figura 3.10 é apresentado o fluxograma dos procedimentos adotados neste estudo.

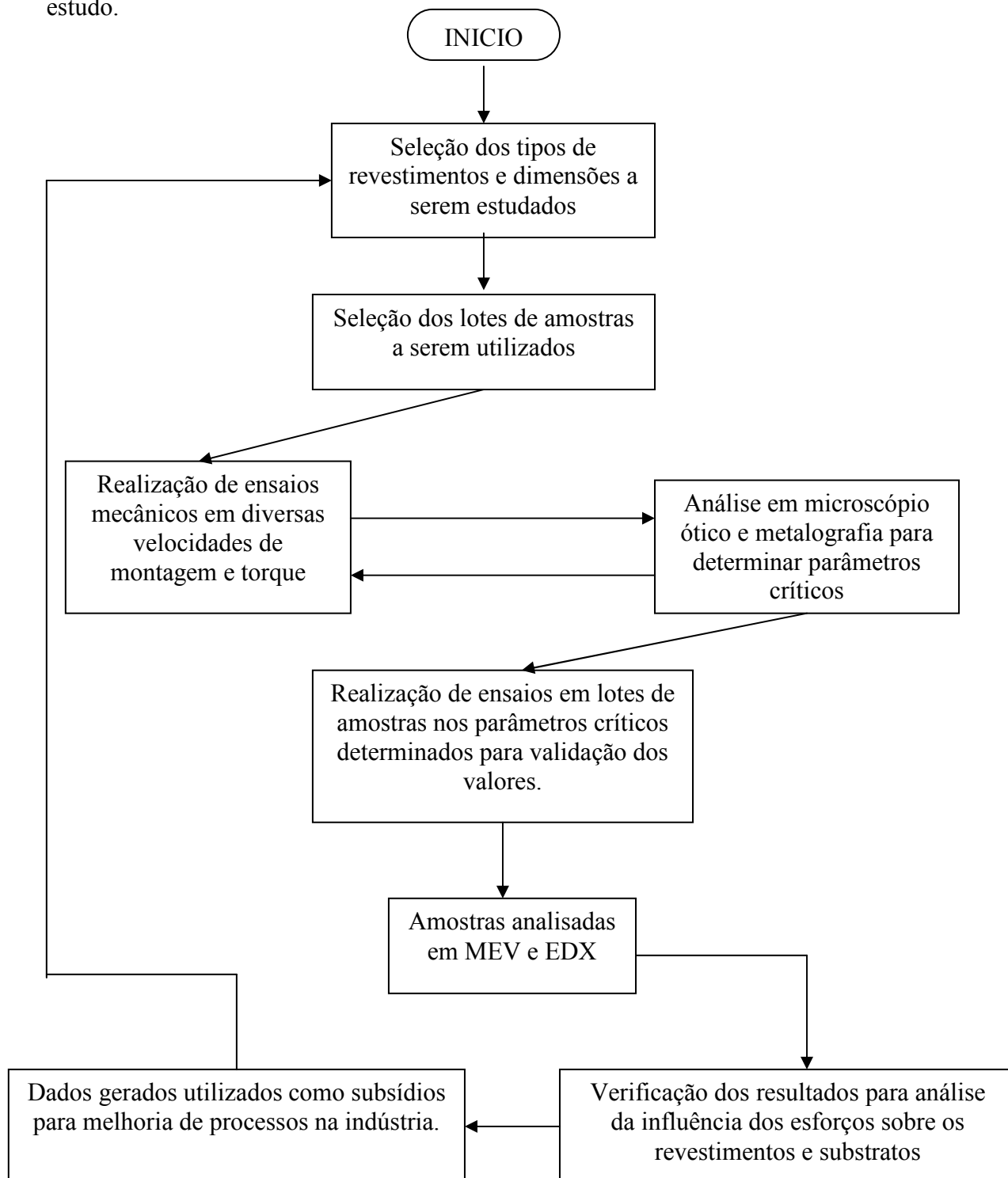


FIGURA 3.10 - Fluxograma apresentando os procedimentos que foram adotados neste estudo.

Os estudos foram realizados em amostras de mesmo um lote para minimizar as variações normais de processo. Essas amostras foram submetidas a esforços de velocidade de montagem e de torque crescentes. Esses ensaios foram realizados com os equipamentos para aplicação de torque controlado - Atlas Copco Focus 2000 modelo ETV S9 600 e Atlas Copco Focus S2000 modelo ETP S9 600 – ETV utilizados S7 -70 e s9180 com o auxílio da equipe técnica da GS Machines Ltda. A temperatura no ambiente durante o processo foi mantida em 23°C.

Após cada etapa as amostras foram caracterizadas por microscopia óptica, estereografia nos laboratórios da Volkswagen Caminhões e ônibus em Resende, Rio de Janeiro, com o uso do Microscópio Óptico - Olympus PME-3, 5X10X20X50X100, Esteroscópio Digimess, Esteroscópio Digital - Olympus MIC D.

Através dessas análises foram determinados os parâmetros para novos ensaios e esse processo repetiu-se até que fossem determinados os parâmetros de limite de resistência dos conjuntos roscados. Nessas condições limites foram realizados ensaios com diversas amostras para validação do processo. As superfícies externas destas amostras foram analisadas com o uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Também foram analisadas as seções transversais das amostras por espectroscopia por energia de raios X dispersiva (EDX). Para estas caracterizações de superfícies foram utilizados os seguintes equipamentos: MEV da marca JEOL, modelo JSM-5310, com EDX acoplado (Instituto Nacional de Pesquisa Espacial) e MEV da marca LEO com EDX acoplado (Centro Tecnológico de Aeronáutica). As análises das superfícies e interfaces foram realizadas em amostras sem e com ataque químico superficial à base de ácidos e desengraxantes específicos para os materiais envolvidos. Nas superfícies sem ataque químico foram observadas as presenças de defeitos como poros, trincas, falhas na aderência do revestimento e análises químicas por EDX.

Para a obtenção de imagens para a observação de defeitos foi utilizada a técnica MEV por elétrons secundários.

Para facilitar a discussão dos resultados obtidos nesse estudo a estrutura de um conjunto porca e parafuso foi dividida em seis regiões, identificadas na Figura 3.11.

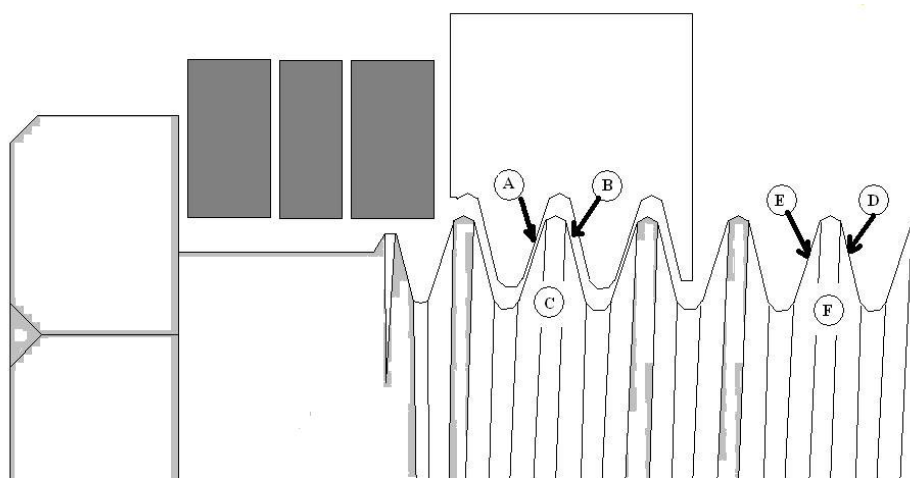


FIGURA 3.11 - Regiões numa montagem típica porca/parafuso.

Este diagrama representa a visão em corte transversal de uma montagem parafuso, porca e arruelas. As regiões A, B e C encontram-se sob a porca e isoladas por ela do meio ambiente e se encontram sob esforços mecânicos. As regiões D, E e F encontram-se fora da porca expostos ao ambiente. Cada região apresenta as seguintes propriedades:

A: Região onde a força de tração F é maior durante a montagem do conjunto e durante a vida da montagem. Portanto, o esforço de torque é maior nessa região (Figura 2.8), Recomenda-se que a velocidade de montagem seja menor e, portanto, o esforço de desgaste na superfície tende a ser menor. As falhas de ruptura do conjunto ocorrem em grande maioria neste ponto durante o processo de montagem.

B: Região oposta à região A no filete, que não sofre os esforços principais durante a montagem, mas irá receber os esforços da desmontagem. Até o momento da desmontagem, portanto, essa região preserva o revestimento superficial intacto.

C: Substrato do filete que recebe os esforços principais de torção e tensão do conjunto. É na sua superfície que se iniciam a maiorias da fraturas que levam a ruptura do conjunto quando o mesmo sofre esforços e montagem além do limite.

D: Região que recebe o esforço de desmontagem depois de vencido o torque de travamento. Essa região nessa etapa recebe esforços de tração e tensão relativamente baixos. Se a velocidade de desmontagem for excessiva poderá sofrer danos no seu revestimento e perda de função do componente numa eventual remontagem.

E: Região sujeita ao esforço de montagem, onde em geral a torção e a tensão são menores que as de travamento e serviço. Nessa região, a velocidade de montagem deve ser a maior possível; portanto, podem ocorrer danos relacionados à velocidade de montagem.

F: Substrato das regiões D e E, em geral não sofre esforços elevados. Sua importância está em dar ancoragem à montagem e desmontagem do conjunto. Em geral, recomenda-se que não tenha uma dimensão muito exagerada para redução de custos. Como regra, pensa-se em 5 voltas de comprimento além da porca.

Nota-se que este estudo não abrange a região que se encontra entre a porca e a cabeça do parafuso. Essa região sofre os esforços de tração e cisalhamento de montagem e durante a operação do parafuso, mas como não está recebendo esforços específicos ao seu revestimento, não está no escopo deste estudo.

As análises químicas por EDX foram realizadas em regiões de cerca de $1 \mu\text{m}^2$, localizadas nos filmes e nos substratos, conforme descritas por Vieira [30].

As demais amostras foram submetidas a diversas velocidades e torques e então submetidas às caracterizações semelhantes àquelas utilizadas para as amostras não ensaiadas.

Na Figura 3.12a é apresentado um diagrama esquemático do equipamento de montagem com parâmetros ajustáveis da marca Atlas Copco Focus S2000. Esse equipamento permite aplicar ao conjunto esforços de torque e velocidade definidos por

software. Na Figura 3.12b é apresentado um exemplo do registro gráfico do comportamento da união rosqueada na forma de uma curva de torque aplicada em função do tempo de sua aplicação.

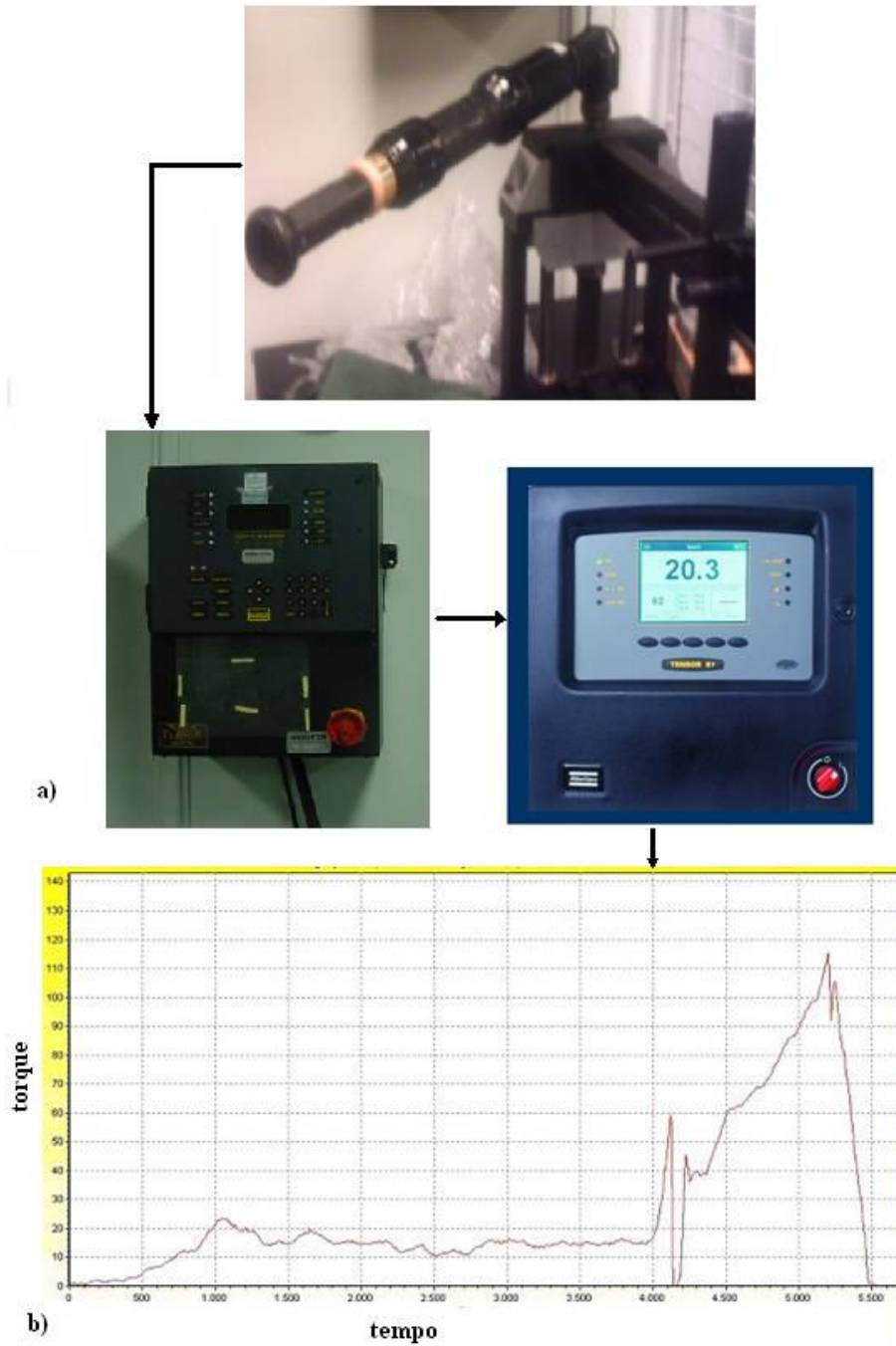


FIGURA 3.12 - (a) Diagrama esquemático do equipamento Atlas Copco para ensaio de torque. (b) exemplo do registro gráfico do comportamento mecânico da união rosqueada (Cortesia Volkswagen Caminhões e Ônibus).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Elementos Roscados Bicromatizado

4.1.1 Parâmetros Mecânicos de Montagem.

Foram realizados ensaios de mecânicos de montagem em parafusos M10X25 bicromatizado.

Na primeira etapa de ensaios foram testados os comportamentos dos parafusos em diversas velocidades e diferentes valores de torque de forma a se determinar as condições limite de resistência mecânica a esses esforços. A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros e os resultados dos ensaios realizados.

TABELA 4.1 - Ensaio de determinação do nível crítico de conjuntos parafuso-rosca com revestimento tipo bicromatizado. (continua).

	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)	Observação
1	45	100	20	450	90	Riscos de processo, não atravessou o revestimento.
2	50	100	20	450	90	Riscos de processo, não atravessou o revestimento.
3	60	100	20	450	90	Riscos mais profundos
4	70	100	20	450	90	Riscos mais profundos
5	80	100	20	450	90	Riscos mais profundos
6	90	100	20	450	90	Danificou o filete
7	100	100	20	450	90	Quebra do parafuso região A
8	100	100	20	450	90	Quebra do parafuso região A
9	95	100	20	450	90	Quebra do parafuso região A
10	92,5	100	20	450	90	Quebra do parafuso região A
11	91	100	20	450	90	Quebra do parafuso região A
12	90	100	20	450	90	Quebra do parafuso região A
13	80	100	20	450	90	Danificou os filetes
14	85	100	20	450	90	Quebra do parafuso região A
15	82	100	20	450	90	Danificou os filetes
16	83,5	100	20	450	90	Danificou os filetes
17	84	100	20	450	90	Destruição dos filetes e gerou 47°C
18	84	100	20	450	90	Danificou os filetes
19	84	90	20	405	90	Quebra do parafuso região A
20	84	85	20	382,5	90	Quebra do parafuso região A

Tabela 4.1 - conclusão

	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)	Observação
21	84	100	30	450	135	
22	84	100	20	450	90	
23	84	100	10	450	45	Espanou a 33°C
24	84	90	30	405	135	Espanou a 30°C
25	84	90	20	405	90	Espanou a 38°C
26	84	90	10	405	45	Espanou a 38°C
27	84	80	30	360	135	
28	84	80	20	360	90	
29	83	80	10	360	45	
30	83	100	30	450	135	
31	83	100	20	450	90	
32	83	100	10	450	45	
33	83	90	30	405	135	Testado com uma arruela.
34	83	90	20	405	90	
35	83	90	10	405	45	
36	83	80	30	360	135	
37	83	80	20	360	90	
38	83	80	10	360	45	

V1: Velocidade com que é realizada a montagem do conjunto, ou seja, a velocidade de montagem que se imprime à porca do início do parafuso até o momento em que ela faz contato com o fim da montagem, no nosso caso a primeira arruela.

V2: Velocidade com que é aplicado o torque no conjunto, essa velocidade é menor que a V1 para evitar um impacto que faria o conjunto se romper.

Deve ser observado que o número de amostras é diferente para cada tipo de revestimento. Isto decorre do número de ciclos de ensaios necessários até se determinar os parâmetros críticos.

Pode ser observado que na condição limite onde o parafuso falha ocorre uma elevação na temperatura durante a montagem. No futuro, este aumento de temperatura poderá servir de referência para a análise do ponto de início de falha do elemento.

Nos elementos que apresentaram ruptura foi constatado que esta ocorreu na região de contato com o primeiro filete da porca. A região de ruptura apresenta um aspecto correspondente à falha associada ao torque (Figuras 2.8 e 2.9).

Os casos descritos como espanamento consistiram em falhas dos filetes no qual o parafuso perdeu a função. Em alguns casos, ocorreu antes mesmo de ser aplicado o torque de aperto. Isto é decorrente da destruição do revestimento e do substrato nas regiões do filete onde entram em contato a porca e o parafuso.

Os danos no revestimento variaram desde riscos leves, que não alcançaram o substrato, até a remoção do revestimento deixando o substrato exposto ao ambiente.

Após determinada uma condição na qual as velocidades de rosqueamento e os esforços de torque aplicados apresentaram-se como limites do ensaio, elas foram repetidas com diversas amostras, para verificar a consistência dos resultados (tabela 4.2). O comportamento torque X tempo destas amostras pode ser visualizado no formando o gráfico da Figura 4.1.

TABELA 4.2 - Ensaio de análise dos níveis críticos com revestimento tipo bicromatizado.

Nº	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)
1	84	80	30	360	135
2	84	80	30	360	135
3	84	80	30	360	135
4	84	80	30	360	135
5	84	80	30	360	135
6	83	100	30	450	135
7	83	100	30	450	135
8	83	100	30	450	135
9	83	100	30	450	135
10	83	100	30	450	135

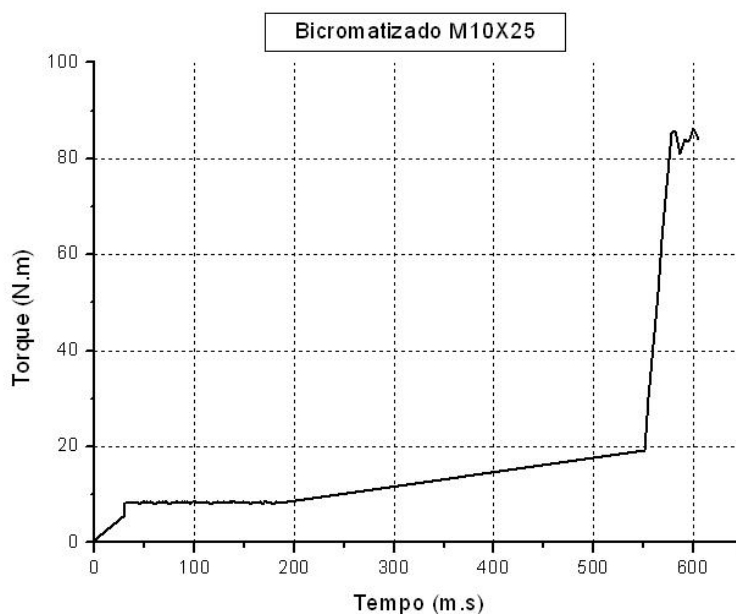


FIGURA 4.1 - Curva característica de torque aplicado X tempo de montagem para os parafusos M10X25 bicromatizados.

Através de microscopia óptica foram verificadas, nas varias regiões do parafuso, os resultados dos esforços aplicados. Desta análise, definiram-se os parâmetros considerados críticos. Os ensaios nesses limites foram repetidos para validação dos resultados encontrados.

Os resultados obtidos para o conjunto parafuso-rosca com revestimento do tipo bicromatizado apresentaram valores muito próximos dos previstos. Para o torque máximo de aperto previsto de 81N.m (Tabela 3.3) e o valor médio obtido nesta investigação foi entre 83 e 84N.m.

Note que a forma da curva na Figura 3.12b não apresenta exatamente a mesma forma da curva na figura 4.1, isto é devido ao uso da montagem em dois estágios, com velocidade aproximação e aperto diferentes. Com essa prática evita-se o impacto, que no gráfico da Figura 3.12b é possível perceber pela oscilação no início do aperto.

4.1.2 Análise do Revestimento do Tipo Bicromatizado

Na Figura 4.2 é apresentada uma seção transversal do filete de um parafuso bicromatizado antes do ensaio de rosqueamento. Pode ser observado que a espessura do revestimento é bastante irregular, embora o seu valor médio esteja em 12 μ m, dentro da faixa prevista pelo fornecido pelo fabricante, ou seja, entre 8 e 15 μ m. Essa irregularidade é considerada normal dentro dos padrões industriais de produção por eletrodeposição.

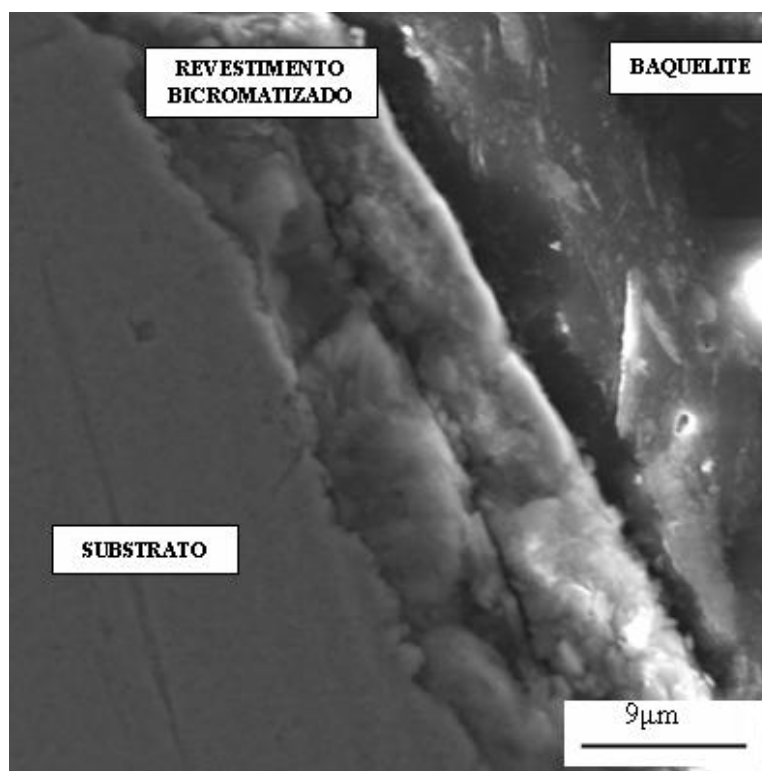


FIGURA 4.2 – Seção transversal de um filete de um parafuso de aço 8.8 com revestimento bicromatizado, região que não sofreu esforços mecânicos (3500X).

A análise do revestimento dos filetes na região E (Figuras 4.3 e 4.4) apresenta os resultados do revestimento de utilização para um torque aplicado de cerca de 10 N.m e velocidade de aperto de 350rpm, A região A (Figura 4.5) com o resultado do esforço de 84N.m e velocidade de aperto de 135rpm.

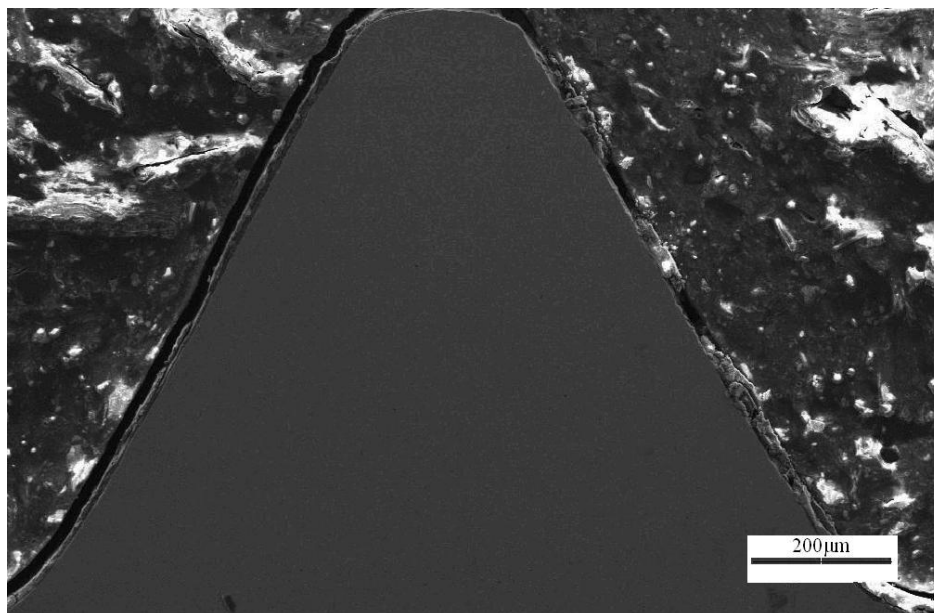


FIGURA 4.3 – Revestimento do tipo bicromatizado sobre um filete após ensaio de rosqueamento (84x).

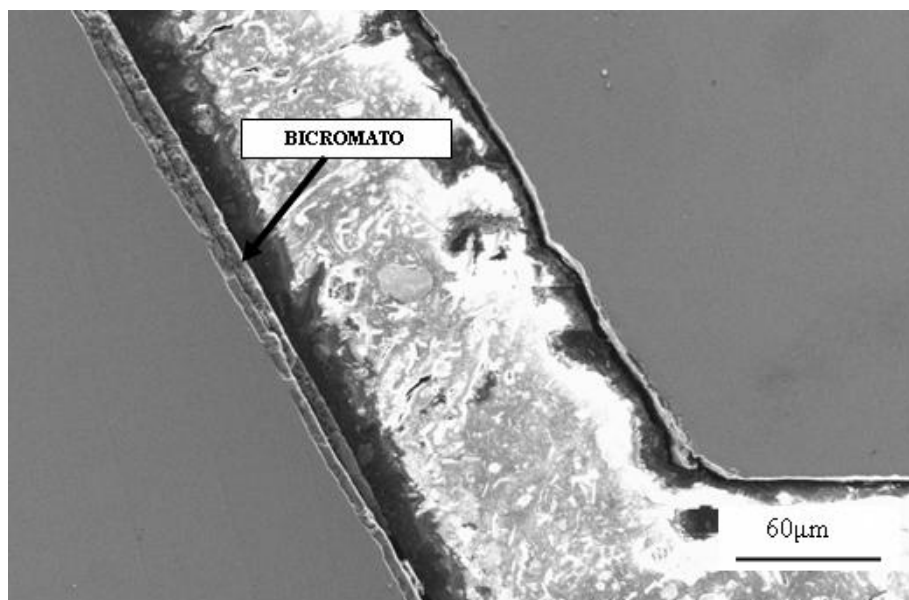


FIGURA 4.4 – Revestimento do tipo bicromatizado sobre um filete resultante do esforço de torque de 10 N.m e velocidade de aperto de 350 rpm. (aumento 300x).

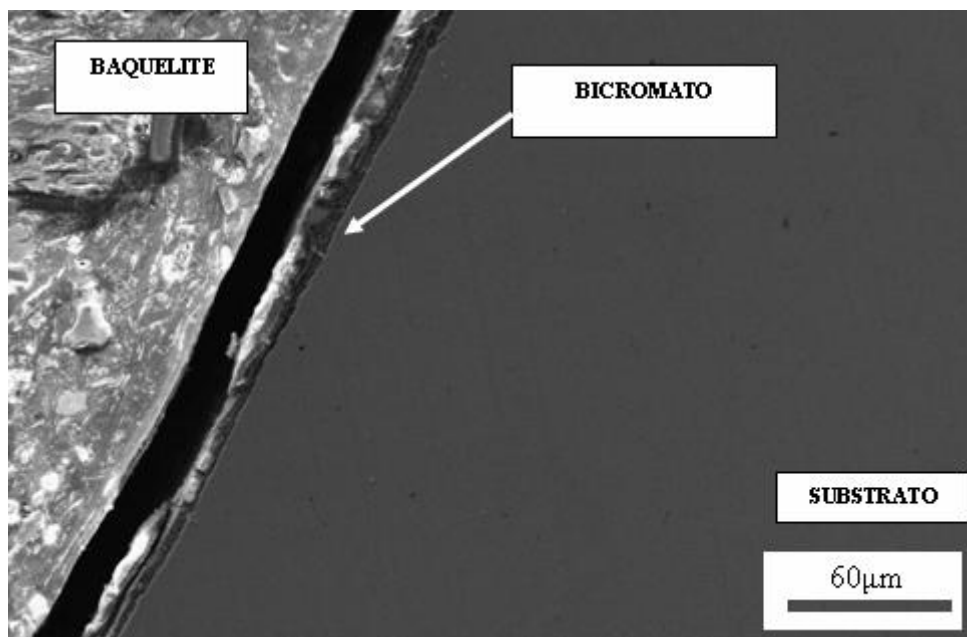


FIGURA 4.5 – Revestimento bicromatizado sobre um filete resultante do esforço de torque de 84N.m e velocidade de aperto de 135rpm (aumento 300x).

Em ambas as regiões pode-se verificar que o revestimento bicromatizado, apesar de ter sido danificado, os danos não evidenciam rupturas suficientemente profundas a ponto de expor o substrato ao meio ambiente.

Nas análises por EDX da região do substrato próximo à do revestimento bicromatizado é possível observar a presença de zinco difundido no substrato. Essa difusão pode ter ocorrido durante o processo de desidrogenização do parafuso. Esse processo não tem por objetivo melhorar a aderência do revestimento; no entanto, como ele envolve o aquecimento até temperaturas entre 100 e 400°C, permite a difusão dos elementos, melhorando a aderência.

Na Figura 4.6 são apresentadas as regiões do filete onde foram realizadas as análises por EDX para a detecção da ocorrência de difusão atômica de átomos do revestimento no substrato e vice-versa.

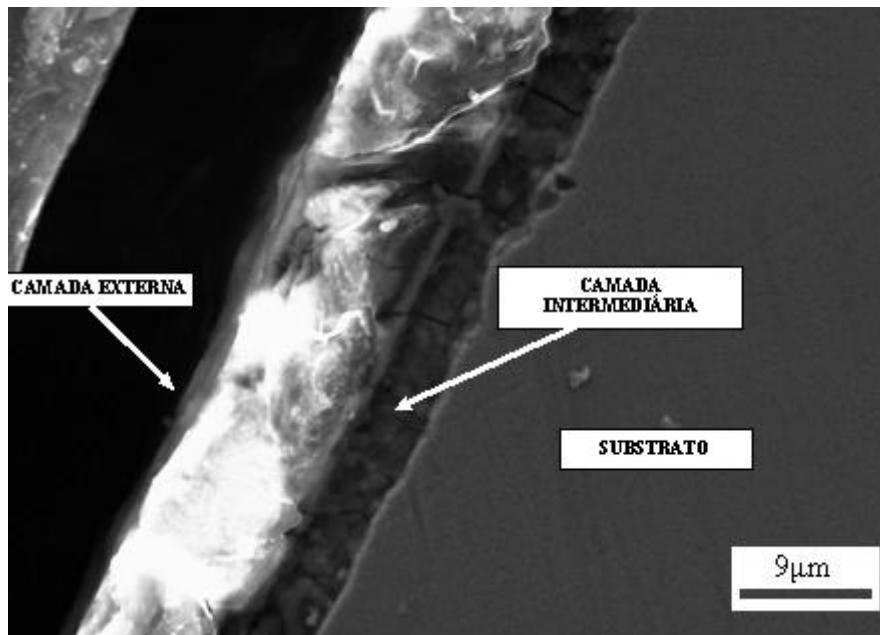
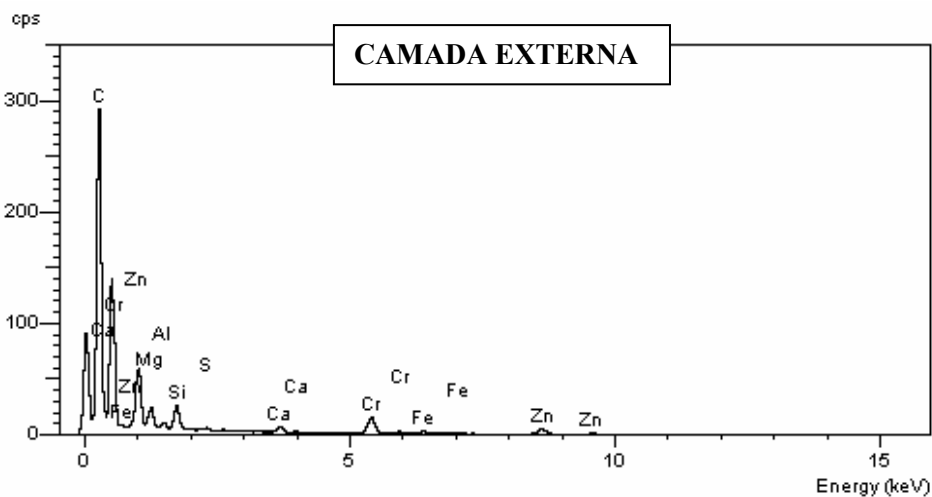


FIGURA 4.6 - Imagem ampliada a partir da Figura 4.5 utilizada para a análise por EDX.

Os espectros de EDX obtidos para os diferentes revestimentos analisados são apresentados na Figura 4.7. Pode ser observada a presença de vários elementos químicos que não são componentes dos revestimentos ou do substrato como carbono (proveniente do baquelite usado no embutimento da amostra e/ou solventes orgânicos utilizados na limpeza da amostra), cálcio (proveniente da manipulação da amostra) e alumínio (proveniente do abrasivo utilizado no polimento da superfície da amostra).



a)

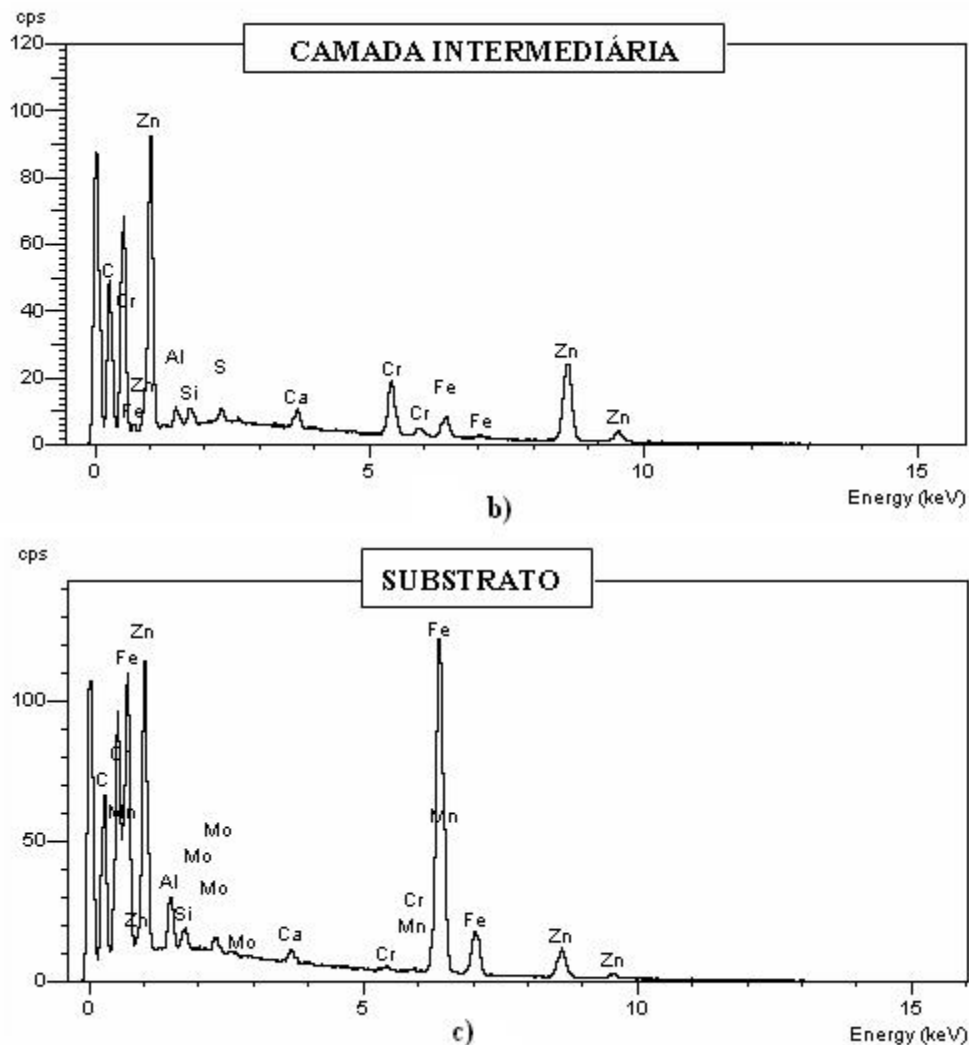


FIGURA 4.7. Espectros de EDX obtidos para a região A do terceiro filete, como visualizado na Figura 4.5.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados das análises químicas semi-quantitativas obtidas por EDX pontual. Observa-se a presença de átomos de ferro nas duas camadas do revestimento. Os átomos de cromo difundiram no revestimento de zinco e no substrato de aço e os átomos de zinco difundiram apenas no substrato de aço. Pode ser observado que a diluição da interface revestimento de zinco-substrato parece ser bastante eficiente para a interface, uma vez que, após a etapa de rosqueamento o revestimento de zinco permanece aderente ao substrato (Figura 4.5). Por outro lado, o revestimento de cromo ao revestimento de zinco apresenta uma aderência menor, devido principalmente à resistência do revestimento de cromo.

TABELA 4.3 - Resultados das análises pontuais por EDX na seção transversal da região E do terceiro filete do parafuso com revestimento do tipo bicromatizado.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	Si (% at.)	Fe (% at.)	Cr (% at.)	Mn (% at.)	Mo (% at.)	Al (% at.)	Zn (% at.)
Revestimento externa	2,01	1,72	54,20	-	-	-	-
Revestimento intermediária	2,79	6,67	12,61	-	-	-	77,63
Substrato	1,99	72,45	0,40	0,43	0,98	5,77	18,00

C = proveniente da baquelite, incorporado durante a etapa de polimento superficial (maior parte) e componente da composição química do aço

O = proveniente da oxidação superficial da amostra

Ca = contaminação resultante do manuseio da amostra

Mn e Mo = devem fazer parte da composição química do aço, mas em pequenas quantidades.

4.2 Elementos Roscados com Revestimento do Tipo Dacromet

4.2.1 Parâmetros Mecânicos de Montagem

Foram realizados ensaios de mecânicos de montagem em parafusos M10X25 dacromet.

Na primeira etapa de ensaios foram testados os comportamentos dos parafusos em diversas velocidades e diferentes valores de torque, de forma a se determinar as condições limite de resistência mecânica dos mesmos a esses esforços. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros e os resultados dos ensaios realizados.

TABELA 4.4 - Ensaio de determinação de nível crítico de conjuntos parafuso-rosca com revestimento dacromet. (continua).

Nº	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)	Observação
1	80	80	20	360	90	
2	90	80	20	360	90	Espanou a 45°C
3	75	80	20	360	90	Falha
4	90	80	20	360	90	Espanou a 40°C
5	88	80	20	360	90	(Nenhum dano significativo)
6	87	80	20	360	90	Espanou 110°C
7	87	100	10	450	45	
8	87	100	20	450	90	
9	88	100	30	450	135	

Tabela 4.4 - conclusão

Nº	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)	Observação
10	88	100	10	450	45	(Nenhum dano significativo)
11	88	100	20	450	90	
12	88	90	10	405	45	
13	88	90	20	405	90	
14	88	90	30	405	135	Espanou a 110°C
15	88	80	30	360	135	
16	88	80	20	360	90	Espanou
17	88	80	10	360	45	

Foi observado que, na condição limite, onde o parafuso falha, ocorre uma elevação na temperatura durante a montagem. Esse aumento foi de maior intensidade em relação aos outros revestimentos utilizados neste estudo. No futuro, este aumento de temperatura poderá servir de referência para a análise do ponto de início de falha do elemento, necessitando um estudo focado nos fatores que definem a intensidade desta elevação de temperatura.

Como no caso do bicromatizado, para os elementos que apresentaram ruptura, ela ocorreu na região de contato com o primeiro filete da porca. A região de ruptura apresenta um aspecto correspondente à falha associada ao torque (Figuras 2.8 e 2.9).

Os casos descritos como espanamento consistiram em falhas dos filetes no qual o parafuso perdeu a função. Em alguns casos ocorreu antes mesmo de ser aplicado o torque de aperto. Nestes casos, o conjunto perde sua função impossibilitando até mesmo a condição de desmontagem do conjunto, indicando que o filete se rompeu do cilindro primitivo, ficando a porca livre para girar sem transmitir esforço ao conjunto.

Os danos no revestimento variaram desde riscos, leves que não alcançaram o substrato, até a remoção do revestimento, deixando o substrato exposto ao ambiente. Desta forma observa-se que os parâmetros utilizados excederam a resistência mecânica do revestimento. Esta verificação é feita por microscopia. Os riscos no dacromet são fáceis de serem vistos, pois as superfícies cinza fosca dos filetes passam para cinza escuro e depois para um tom negro brilhante.

Após determinada uma condição na quais as velocidades de rosqueamento e os esforços de torque aplicados se apresentaram como limite do ensaio, foram realizados com diversas amostras nesta condição para verificar a consistência dos resultados (tabela 4.5). O comportamento torque X tempo destas amostras foi analisado podendo ser elaborado o gráfico da Figura 4.8.

Através de microscopia óptica foram verificadas nas varias regiões do parafuso os resultados dos esforços aplicados. Desta análise definiram-se os parâmetros

considerados críticos e os ensaios nesses limites foram repetidos para validação dos resultados encontrados.

TABELA 4.5 - Ensaio de análise dos níveis críticos com revestimento tipo dacromet.

Nº	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)
1	90	20	405	90	90
2	90	20	405	90	90
3	90	20	405	90	90
4	90	20	405	90	90
5	90	20	405	90	90
6	80	30	360	135	80
7	80	30	360	135	80
8	80	30	360	135	80
9	80	30	360	135	80
10	80	30	360	135	80

Os resultados obtidos para o conjunto parafuso-rosca com revestimento do tipo dacromet apresentaram valores muito próximos dos previstos, sendo que para o torque máximo de aperto previsto de 81N.m (Tabela 3.3) e o valor médio obtido nesta investigação foi no intervalo de 80 a 90N.

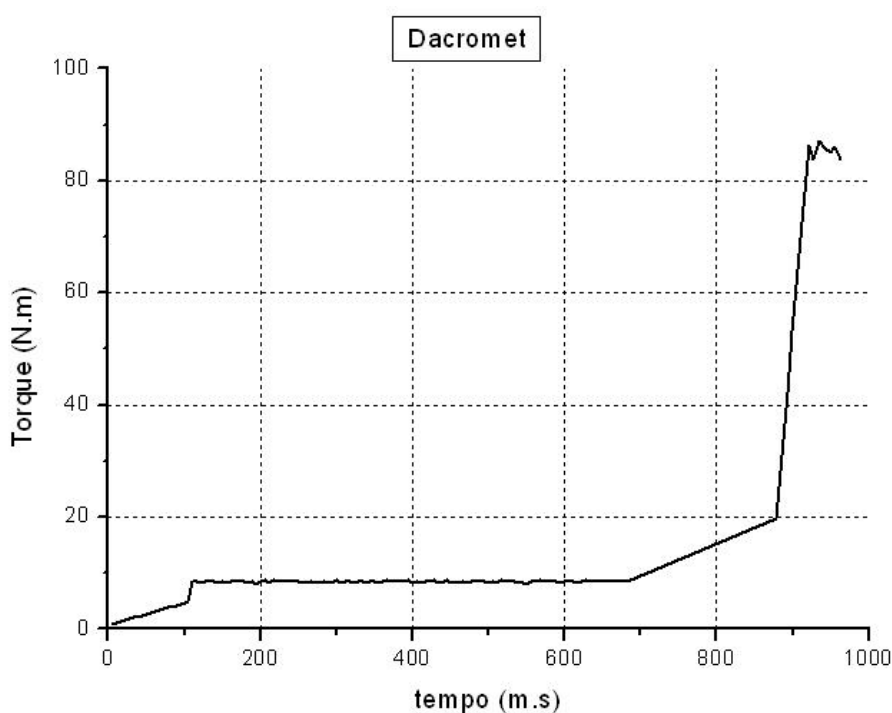


FIGURA 4.8 - Curva característica de torque aplicado X tempo de montagem para os parafusos M10X25 dacromet.

A forma da curva na Figura 3.12b não apresenta exatamente a mesma forma da curva da figura 4.8, isto deve-se ao uso da montagem em dois estágios, com velocidade de aproximação e de aperto diferentes. Com essa prática evita-se o impacto, que no gráfico da Figura 3.12b é possível perceber pela oscilação no início do aperto. O uso de velocidades diferentes também auxilia na precisão do parâmetro de torque, uma vez que com uma velocidade menor há maior controle do torque.

4.2.2 Análise do Revestimento de Dacromet.

Observa-se que os revestimentos do tipo dacromet possuem espessuras bastante irregulares, variando muito de um ponto a outro do parafuso. Isto é decorrente do processo de deposição dos revestimentos na forma líquida por *spining*. Este procedimento, quando feito em um elemento de geometria complexa, tende a formar regiões de sombra, onde o revestimento fica mais fino, e regiões mais salientes, onde o revestimento tende a ser mais espesso.

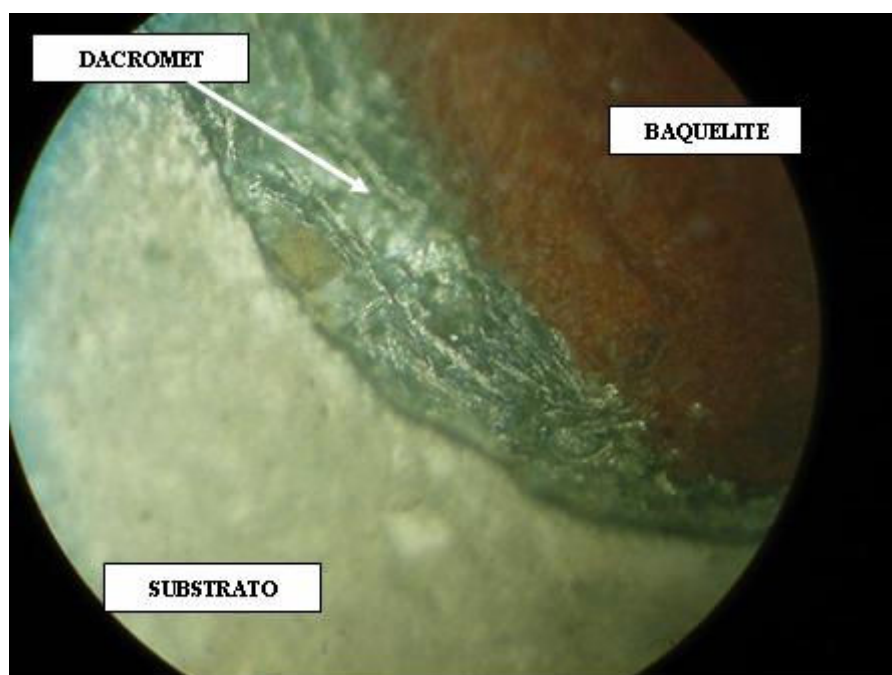


FIGURA 4.9 – Revestimento do tipo dacromet, apresentando as camadas de alumínio e de zinco com substrato de aço num parafuso 8.8, antes do ensaio mecânico (aumento 50X).

A análise do revestimento dos filetes na região E (Figuras 4.9, 4.10 e 4.12), evidenciou os resultados no revestimento da utilização de um torque aplicado de 10N.m e velocidade de aperto de 135rpm. A região A, apresentada na Figura 4.13, apresenta o resultado do esforço de 80N.m e velocidade de aperto de 80rpm. Note que a velocidade reduziu-se em relação ao bicromatizado, apresentando que a resistência do dacromet a esse tipo de esforço é menor. Portanto, o dacromet implica em tempos maiores do que o necessário, quando utilizados conjuntos bicromatizados.

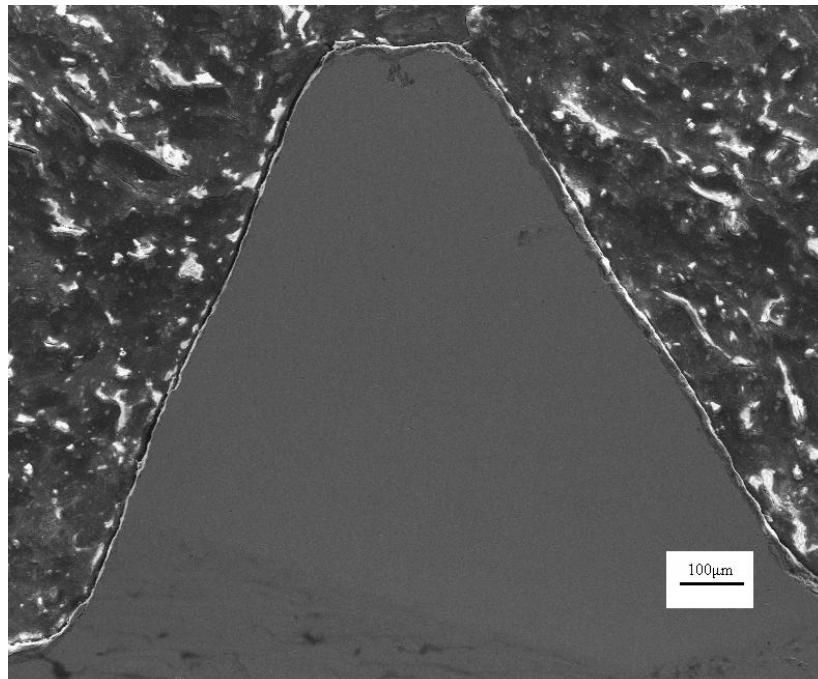


FIGURA 4.10 - Revestimento do tipo dacromet sobre um filete após ensaio de rosqueamento (67x).

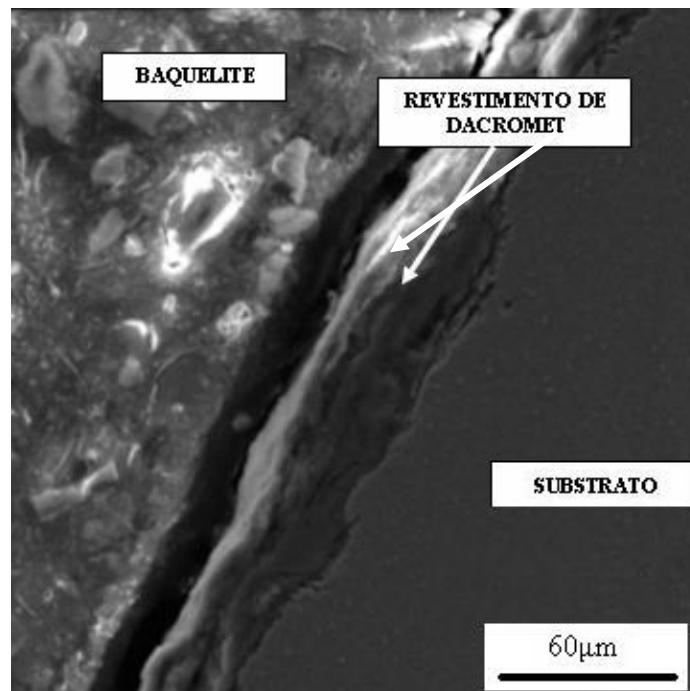


FIGURA 4.11 – Revestimento do tipo dacromet sobre um filete resultante do esforço de torque de 10 N.m e velocidade de aperto de 135rpm (aumento 1500x).

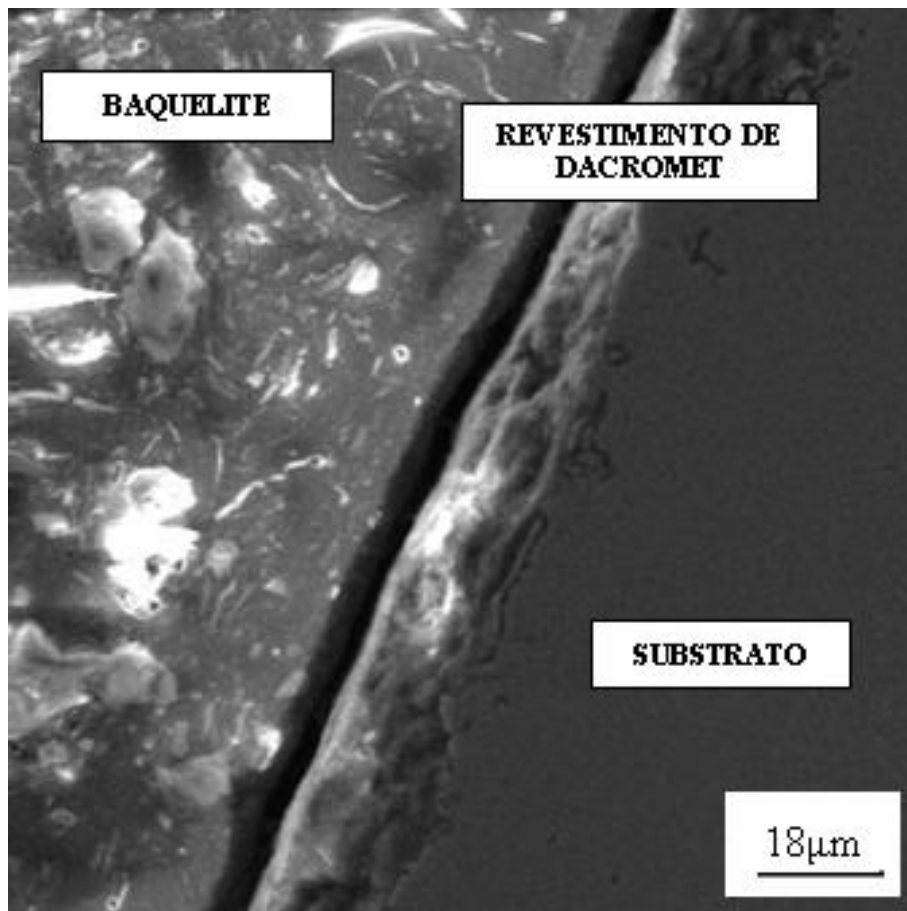


FIGURA 4.12 - Revestimento do tipo bicromatizado sobre um filete resultante do esforço de torque de 80N.m e velocidade de aperto de 80 rpm (aumento 1000x).

Em ambas as regiões verifica-se que o revestimento do tipo dacromet não sofre danos que exponha o substrato, apresentando que ele possui elevada resistência aos esforços de montagem. Nesse caso, a falha, quando ocorre, tem início no substrato.

Os espectros de EDX obtidos para os diferentes revestimentos analisados são apresentados na Figura 4.12. Observa-se a presença de vários elementos químicos que não são componentes dos revestimentos ou do substrato como: carbono (proveniente do baquelite usado no embutimento da amostra e/ou solventes orgânicos utilizados na limpeza da mesma) e silício (proveniente da sua manipulação).

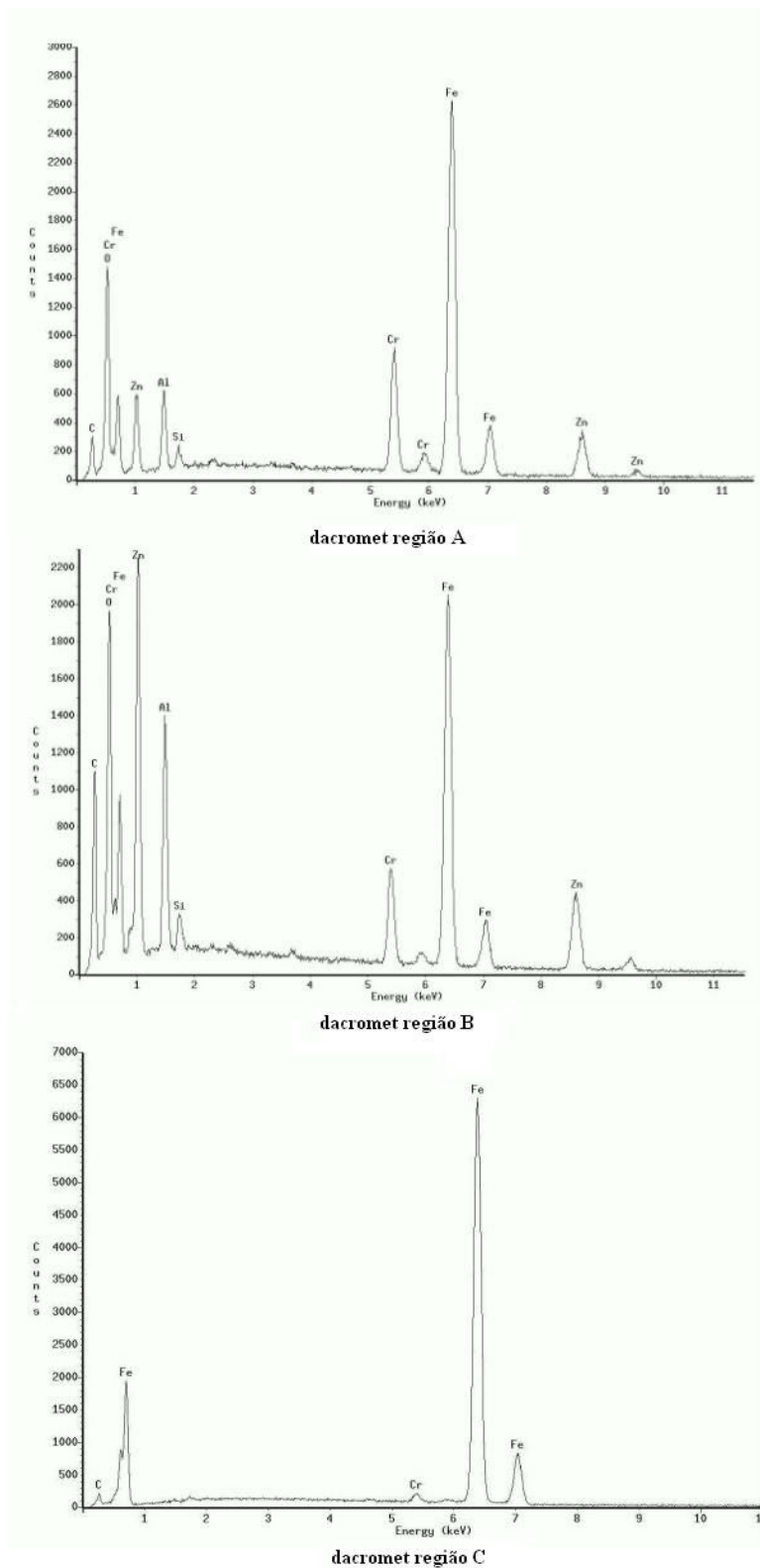


FIGURA 4.13. Espectros de EDX obtidos para a região A, B e C do terceiro filete, como mostrado na figura 4.12.

Nas análises por EDX da região do substrato, próximo ao revestimento de dacromet, é possível observar a existência de zinco e Cromo difundidos no substrato. Essa difusão pode ter ocorrido durante o processo de fabricação, onde ocorrem

processos de “*spinning*” e aquecimento. Esse fenômeno é um dos fatores que colaboram com a resistência e aderência do revestimento de dacromet ao substrato. Essas propriedades, apesar do tempo de processo possível ser maior que o do bicromatizado, explica a tendência do uso crescente deste tipo de superfície.

TABELA 4.6 - Resultados das análises pontuais por EDX na seção transversal da região E do terceiro filete do parafuso com revestimento de dacromet.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	Si (% at.)	Fe (% at.)	Cr (% at.)	Al (% at.)	Zn (% at.)
Camada dacromet - Zn	-	13,29	8,11	12,33	66,73
Camada dacromet - AL	-	-	5,13	1,21	89,38
Substrato	0,99	64,73	12,84	9,42	17,29

Verificou-se que o revestimento de dacromet é constituído de camadas alternadas de zinco e alumínio e possui uma estrutura heterogênea, sendo detectadas composições diferentes em diferentes pontos, havendo no entanto diluição de elementos entre o revestimento e o substrato.

4.3 Elementos Roscados com Fosfato B110

4.3.1 Parâmetros Mecânicos de Montagem.

Foram realizados ensaios de mecânicos de montagem em parafusos M10X30 fosfatizado.

Na primeira etapa de ensaios foram testados os comportamentos dos parafusos para diversas velocidades e diferentes níveis de torque de forma a se determinar as condições de seu limite de resistência a esses esforços. A tabela 4.7 apresenta os parâmetros e os resultados dos ensaios realizados.

TABELA 4.7 - Ensaio de terminação de nível crítico de conjuntos parafuso-rosca com revestimento tipo fosfatizado. (continua).

Nº	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)	Observação
1	70	80	10	360	45	
2	80	80	10	360	45	
3	90	80	10	360	45	Espanou a 50°C
4	97	80	10	360	45	Espanou a 45°C
5	85	80	10	360	45	Espanou a 35°C
6	83	80	10	360	45	Espanou a 30°C
7	82	80	10	360	45	Espanou
8	81	80	10	360	90	

Tabela 4.7 – Conclusão

Nº	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)	Observação
9	81	80	20	360	135	Espanou
10	81	80	30	360	45	
11	82	80	10	450	45	Espanou
12	81	100	10	450	90	Espanou
13	81	100	20	450	135	
14	81	100	30	405	45	Espanou a 45°C
15	81	90	10	405	90	Espanou a 30°C
16	81	90	20	405	135	
17	81	90	30	360	45	Espanou
18	81	80	10	360	90	Espanou a 33°C
19	81	80	20	360	135	Espanou
20	81	80	30	315	45	Espanou
21	81	70	10	315	90	
22	81	70	20	315	135	
23	81	70	30	360	45	Espanou

Observou-se que na condição limite, onde o parafuso falha, ocorre uma elevação na temperatura ($\Delta 7$ a 27°C) durante a da montagem. No futuro, este aumento de temperatura poderá servir de referência para a análise do ponto de início de falha do elemento. Os valores desta elevação de temperatura ficaram próximos do bicromatizado.

Este aumento de temperatura, e as propriedades dos filmes lubrificantes que os revestimentos fosfatizados recebem podem auxiliar num estudo posterior de melhoria de eficiência do processo. Neste estudo, este filme foi removido para reduzir os parâmetros de variabilidade entre um parafuso e outro e também para reduzir a interferência de contaminantes arrastados pelo lubrificando do meio ambiente para a amostra.

Observaram-se danos no revestimento que variaram desde riscos leves, que não alcançaram o substrato, até a remoção do revestimento deixando o substrato exposto ao ambiente.

Após determinada uma condição na quais as velocidades de rosqueamento e os esforços de torque aplicados apresentaram-se como limite do ensaio, foram novamente realizados os ensaios nas mesmas condições com diversas amostras para verificar a consistência dos resultados (tabela 4.8). O comportamento torque X tempo destas amostras foi analisado e pode-se elaborar gráfico da Figura 4.14.

Através de microscopia óptica, foram verificados nas varias regiões do parafuso os resultados dos esforços aplicados. Dessa análise definiram-se os parâmetros considerados críticos. Os ensaios nesses limites foram repetidos para validação dos resultados encontrados.

TABELA 4.8 - Ensaio de análise dos níveis críticos com revestimento tipo fosfatizado.

Nº	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)
1	80	450	45	450	45
2	80	450	45	450	45
3	80	450	45	450	45
4	80	450	45	450	45
5	80	450	45	450	45
6	81	315	90	315	90
7	81	315	90	315	90
8	81	315	90	315	90
9	81	315	90	315	90
10	81	315	90	315	90

Os resultados obtidos para o conjunto parafuso-rosca com revestimento do tipo fosfatizado apresentaram valores muito próximos dos previstos. O torque máximo de aperto previsto de 81N.m (Tabela 3.2) e o valor médio obtido nesta investigação encontra-se na faixa entre 80 e 81N.m.

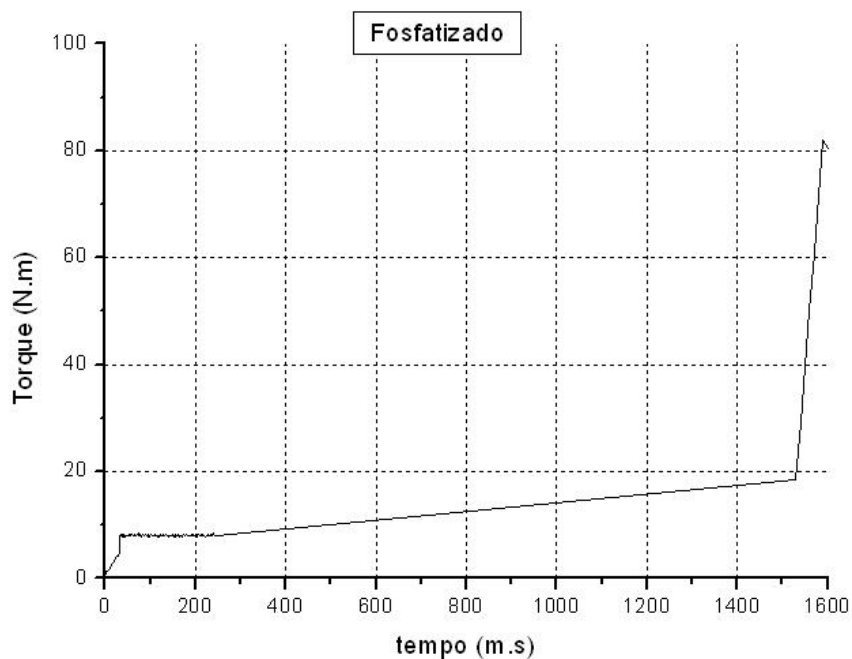


FIGURA 4.14 - Curva característica de torque aplicado X tempo de montagem para os parafusos M10X30 fosfatizado.

O fato do tempo de processo ter sido maior é mais uma decorrência das dimensões da amostra, que têm um comprimento de 30mm, enquanto as demais têm essa dimensão como 25mm. Fazendo a correção, compensando a diferença das dimensões, o tempo é de 1300ms.

Note que a forma da curva na Figura 3.12b não apresenta exatamente a mesma forma da curva Figura 4.14, isto é devido ao uso da montagem em dois estágios, com velocidade aproximação e aperto diferentes. Com essa prática evita-se o impacto, que no gráfico da Figura 3.12b é possível perceber pela oscilação no início do aperto, .

4.3.2 Análise do Revestimento do Tipo Fosfatizado.

Na Figura 4.15 é apresentado uma seção transversal do filete de um parafuso fosfatizado numa área que não sofreu esforço do ensaio de rosqueamento.

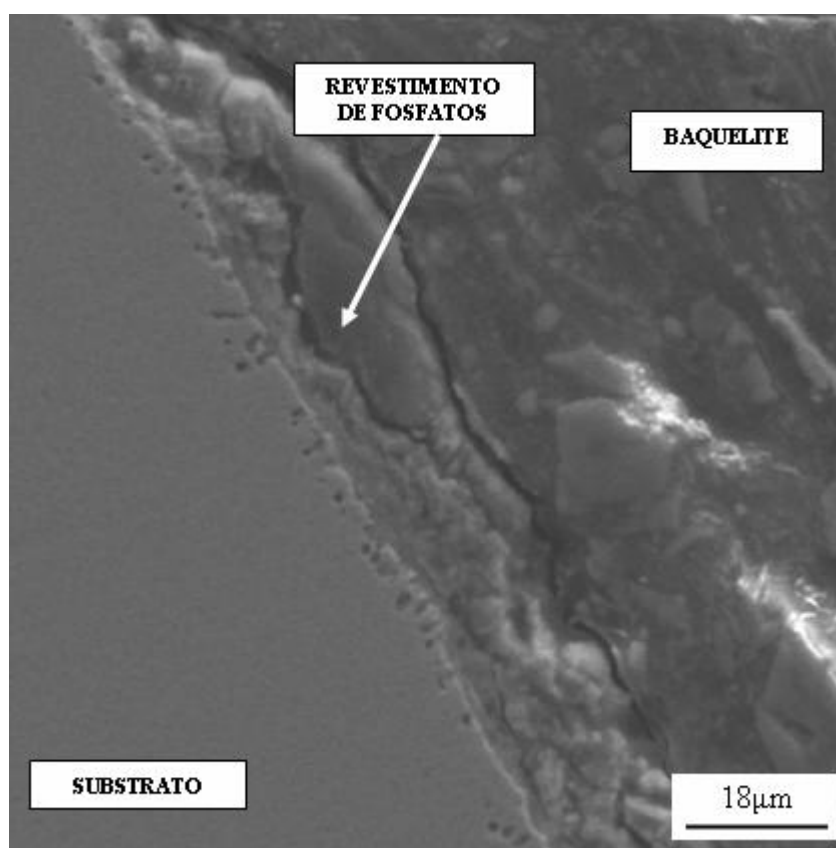


FIGURA 4.15 – Seção transversal de um filete de um parafuso de aço 8.8 com revestimento fosfatizado, região que não sofreu esforços mecânicos (1000X).

Observou-se que a espessura do revestimento é bastante irregular, embora o seu valor médio esteja em $20\mu\text{m}$, dentro da faixa prevista para fornecimento [9], ou seja, uma espessura de revestimento variando entre $10\mu\text{m}$ e $25\mu\text{m}$. Essa irregularidade é considerada normal dentro dos padrões industriais de produção por eletrodeposição. O

substrato apresenta grande número de “pits”, decorrente do processo de decapagem acida que o metal sofre durante o processo de preparação para a fosfatização. A limpeza perfeita do substrato antes da aplicação do banho de fosfatização é fundamental para o sucesso do processo.

Os danos às superfícies foram pequenos, evidenciando que a resistência do revestimento de cristais de fosfato que se forma na superfície tem capacidade de proteger o substrato de agressões do ambiente (Figuras 4.16, 4.17 e 4.18).

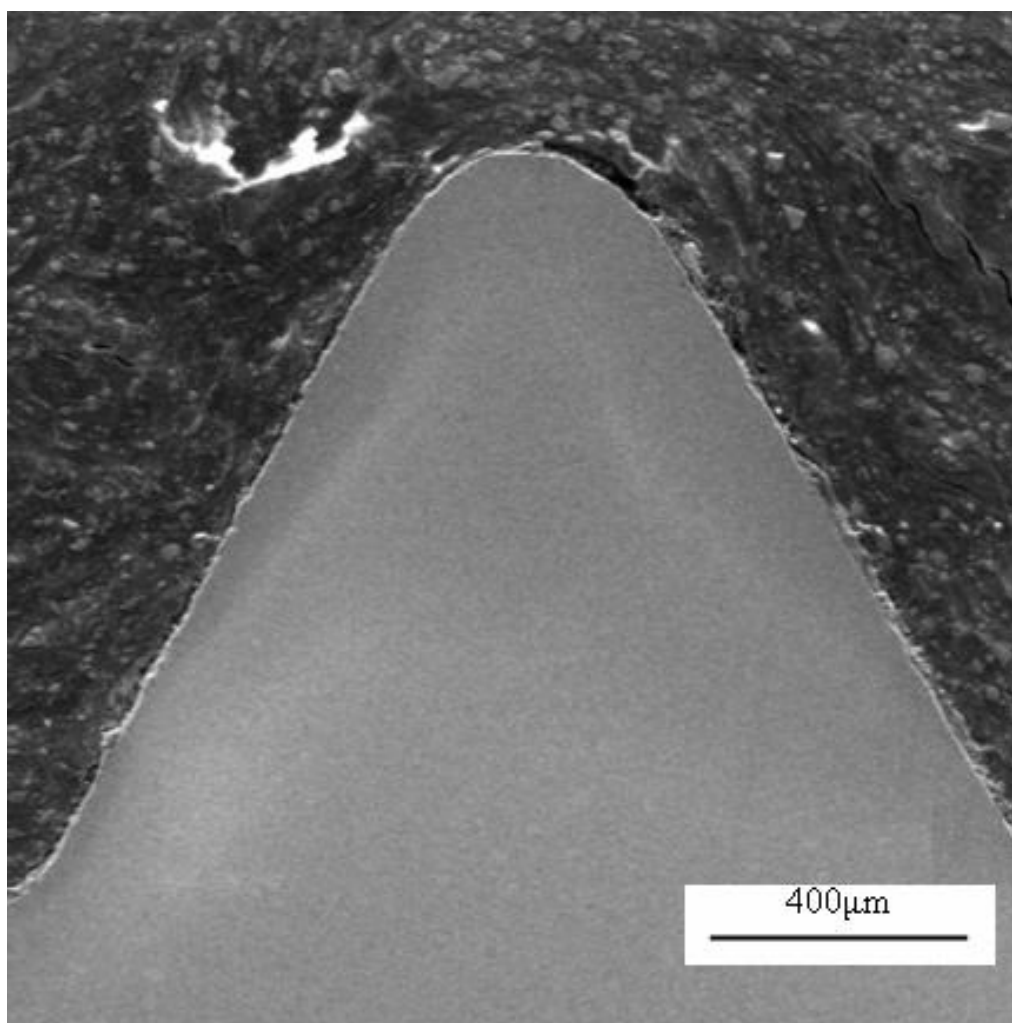


FIGURA 4.16– Revestimento de fosfato sobre um filete de um parafuso 8.8 após ensaio de rosqueamento (100x).

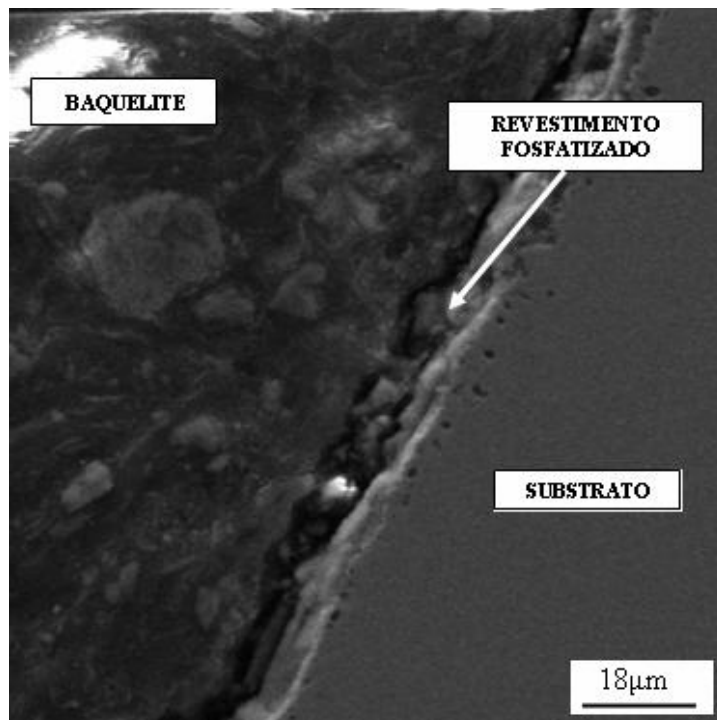


FIGURA 4.17 – Revestimento de fosfato sobre um filete resultante do esforço de torque de 10N.m e velocidade de aperto de 315rpm (aumento 1000x).

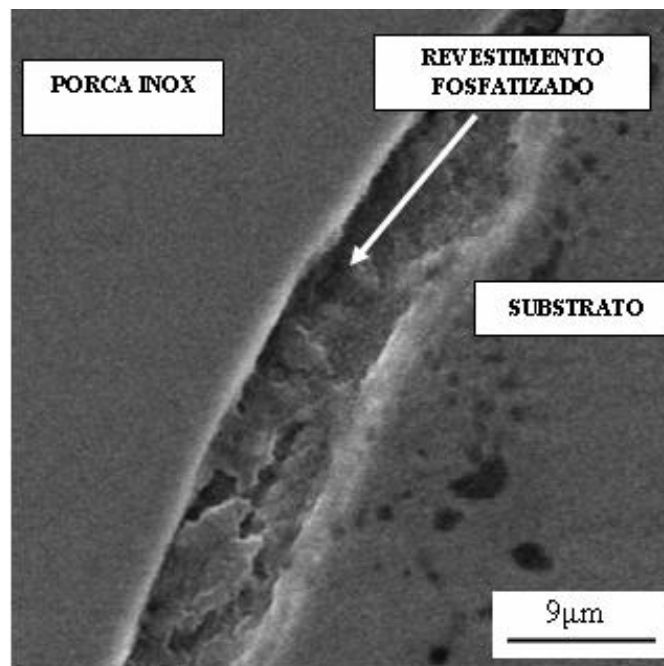


FIGURA 4.18– Revestimento de fosfato sobre um filete resultante do esforço de torque de 80N.m e velocidade de aperto de 80rpm (aumento 300x).

A análise do revestimento dos filetes na região A e E, conforme pode-se observar nas Figura 4.19, demonstra que não houve uma interface diluída entre o revestimento de fosfatos e o substrato. No entanto nas Figuras 4.1,6 4.17 e 4.18, pode-se observar a existência de “pits”. Esses “pits” são decorrentes dos tratamentos ácidos realizados na preparação da superfície para receber a fosfatização e permitem a ocorrência de uma ancoragem mecânica do revestimento de cristais de fosfato sobre o substrato de ferro.

Os espectros de EDX obtidos para os diferentes revestimentos analisados são apresentados na Figura 4.19. Observa-se a presença de vários elementos químicos que não são componentes dos revestimentos ou do substrato como: carbono (proveniente do baquelite usado no embutimento da amostra e/ou solventes orgânicos utilizados na limpeza da amostra), cálcio (proveniente da manipulação da amostra) e alumínio (proveniente do abrasivo utilizado no polimento da superfície da amostra).

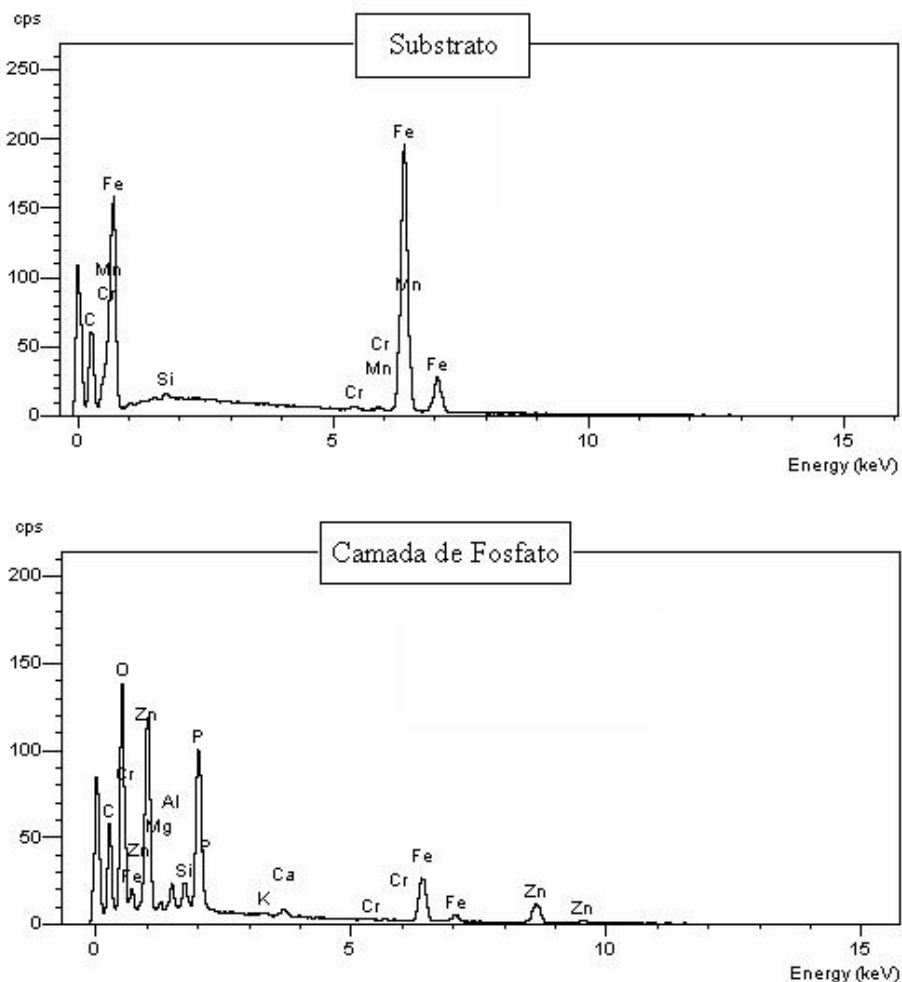


FIGURA 4.19 – Análise por EDX do revestimento tipo fosfatizado região A (fosfatizado exposto a 81N.m e velocidade de 90rpm).

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados das análises químicas semi-quantitativas obtidas por EDX pontual. Observa-se a presença átomos de ferro na camada de fosfatos do revestimento. No entanto, não foi possível evidenciar a difusão de fósforo, zinco ou outro componente do revestimento no aço, apresentando que houve uma baixa difusão. Indica-se, portanto, que não há a formação de interface diluída entre o revestimento e o substrato em contacto físico, resultando em uma aderência comparativamente baixa em relação aos revestimentos que possuem essa característica.

TABELA 4.9 - Resultados das análises pontuais por EDX na seção transversal da região E do terceiro filete do parafuso com revestimento do tipo Fostatizado.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	Si (% at.)	Fe (% at.)	Cr (% at.)	Mn (% at.)	O (% at.)	P (% at.)	Al (% at.)	Zn (% at.)
Camada externa	4,05	8,32	0,86	-	25,88	13,43	0,96	46,5
Substrato	0,96	97,68	0,66	0,69	-	-	-	-

C = proveniente da baquelite, incorporado durante a etapa de polimento superficial (maior parte) e componente da composição química do aço

Si = contaminação resultante do manuseio da amostra

Mn = deve fazer parte da composição química do aço, mas em pequenas quantidades.

4.4 Elementos Roscados Revestidos com Zinco Negro.

4.4.1 Parâmetros Mecânicos de Montagem.

Foram realizados ensaios de mecânicos de montagem em parafusos M6X14 zinco negro.

Na primeira etapa de ensaios foram testados os comportamentos dos parafusos em diversas velocidades e diferentes níveis de torque de forma a se determinar os seus limites de resistência dos mesmos a esses esforços. A tabela 4.10 apresenta os parâmetros e os resultados dos ensaios realizados.

TABELA 4.10 - Ensaios de determinação de nível crítico do zinco negro.(continua)

Nº	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)	Observação
1	45	80	20	436	109	Espanou.
2	40	80	20	436	109	Quebrou na região A
3	40	60	20	327	109	Quebrou na região A
4	20	80	20	436	109	
5	10	80	20	436	109	
6	10	80	20	436	109	
7	10	70	20	381,5	109	

Tabela 4.10 -conclusão

Nº	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)	Observação
8	10	60	20	327	109	Espanou.
9	10	50	20	272,5	109	
10	10	50	10	272,5	54,5	
11	10	60	10	327	54,5	
12	10	70	10	381,5	54,5	
13	10	50	10	272,5	54,5	
14	10	90	10	490,5	54,5	
15	10	100	10	545	54,5	
16	15	100	10	545	54,5	
17	15	90	10	490,5	54,5	
18	15	80	10	436	54,5	
19	17	100	10	545	54,5	
20	17	90	10	490,5	54,5	
21	17	80	10	436	54,5	
22	18	70	10	381,5	54,5	
23	17	60	10	327	54,5	
24	17	100	10	545	54,5	Quebrou na região A
25	17	100	20	545	109	
26	17	80	20	436	109	
27	17	70	20	381,5	109	
28	16	100	20	545	109	
29	16	90	20	490,5	109	
30	16	80	20	436	109	
31	14	100	20	545	109	
32	14	90	20	490,5	109	
33	14	80	20	436	109	

Nestes elementos não foi detectada a elevação de temperatura como ocorreu com os conjuntos anteriores, por ser um conjunto pequeno em relação às dimensões dos equipamentos utilizados para aplicar o torque. O calor gerado foi dissipado para os equipamentos antes que fosse possível tomar medidas.

Nos elementos que apresentaram ruptura foi constatado que ela ocorreu na região de contato com o primeiro filete da porca. A região de ruptura apresentou um aspecto correspondente à falha associada ao torque. Portanto, também para elementos M6 classe 8.8 se confirmou a validade dos resultados na Tabela 3.3.

Os casos descritos como espanamento consistiram em falhas dos filetes no qual o parafuso perdia a função. Em alguns casos ocorreu antes mesmo de ser aplicado o torque de aperto. Quando ocorre este tipo de falha, pode-se ter a situação de não ser mais possível dar aperto ou desmontar o conjunto e o equipamento gira sem carga. A desmontagem de conjuntos nessa condição revelou que tanto o revestimento quanto

substrato apresentavam-se fraturados, mas não forneceu informações sobre os limites procurados neste estudo.

Os danos no revestimento são fáceis de observar pois é claro o contraste da cor do zinco negro e a cor do substrato. Foram observados desde riscos leves que não alcançaram o substrato, até a remoção do revestimento, deixando o substrato exposto ao ambiente.

Após a determinação das velocidades de rosqueamento e os esforços de torque limites do ensaio, foram repetidos com diversas amostras nestas condições para verificar a consistência dos resultados (tabela 4.11). O comportamento torque X tempo destas amostras foi analisado possibilitando elaborar o gráfico da Figura 4.20.

Continuando o procedimento experimental, e pela análise das amostras anteriores ao microscópio óptico verifica-se nas diferentes regiões do parafuso os resultados dos esforços e conseqüente determinação dos parâmetros indicativos dos pontos de limite de resistência dos conjuntos e revestimentos. Os resultados dos testes nos limites encontrados foram repetidos para validação dos resultados encontrados.

TABELA 4.11 - Ensaio de análise dos níveis críticos com revestimento tipo zinco negro.

Nº	Torque (N.m)	V1 (%)	V2 (%)	V1 (rpm)	V2 (rpm)
1	17	100	20	545	109
2	17	100	20	545	109
3	17	100	20	545	109
4	17	100	20	545	109
5	17	100	20	545	109
6	16	100	20	545	109
7	16	100	20	545	109
8	16	100	20	545	109
9	16	100	20	545	109
10	16	100	20	545	109

Os resultados obtidos para o conjunto parafuso-rosca com revestimento de zinco negro apresentaram valores de aperto coerentes com a tabela 3.3 (17N.m), os valores obtido nesta investigação encontram-se na faixa entre 16 e 17N.m .

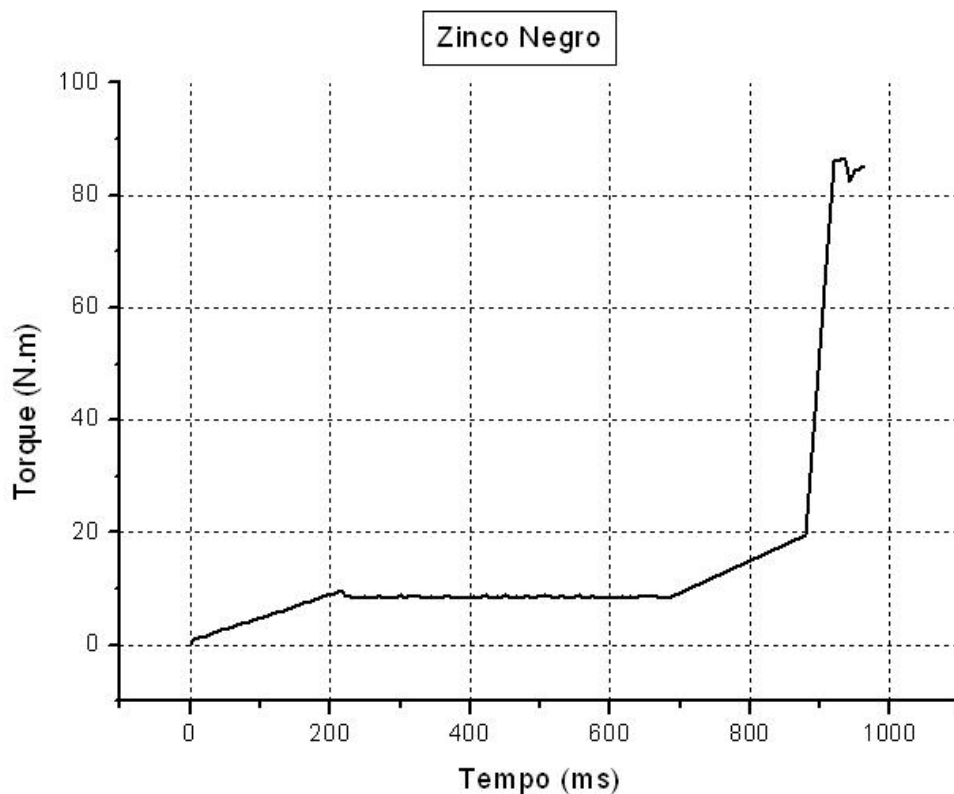


FIGURA 4.20 - Gráfico da relação torque aplicado X tempo de montagem nos parafusos M6X14 com revestimento de zinco negro.

O fato do tempo de processo ter sido maior é mais uma decorrência das dimensões da amostra, que tem o diâmetro menor M6 e um comprimento de 14mm. As demais têm a dimensão como M10X25. Fazendo a correção seu tempo é de 2800ms, em função das diferenças de dimensões para os elementos M10X25.

Como foi observado nos revestimentos anteriores, também neste caso foi utilizado rosqueamento usando duas velocidades. Portanto, a forma da curva na Figura 3.12b não tem exatamente a mesma forma da curva da Figura 4.20. As velocidades de aproximação e aperto são diferentes. Com essa prática evita-se o impacto, que no gráfico da Figura 3.12b é possível perceber pela oscilação no início do aperto.

4.4.2 Análise do Revestimento do Tipo Zinco Negro

A análise do revestimento dos filetes na região E (Figuras 4.21. e 4.22) apresenta os resultados no revestimento da utilização de um torque aplicado de cerca de 10 N.m e velocidade de aperto de 545rpm. A região A é apresentada na Figuras 48 e 49 com o resultado do esforço de 16 N.m e velocidade de aperto de 109rpm.

Pode-se observar que o revestimento de zinco negro é poroso e apresenta redução de sua espessura por desgaste. Essa redução pode ser vista nas Figuras 4.21 a 4.23, onde se observa a evolução da superfície conforme são aumentados os esforços a que são submetidas as regiões do filete, passando progressivamente de uma espessura de 22,5 μ m para 6,7 μ m e terminando em 5,6 μ m, ponto em ocorre a falha do substrato.

Pode-se afirmar que a falha deste tipo de revestimento está ligada a esse desgaste e não a uma eventual ruptura entre revestimento e substrato durante o processo de montagem,

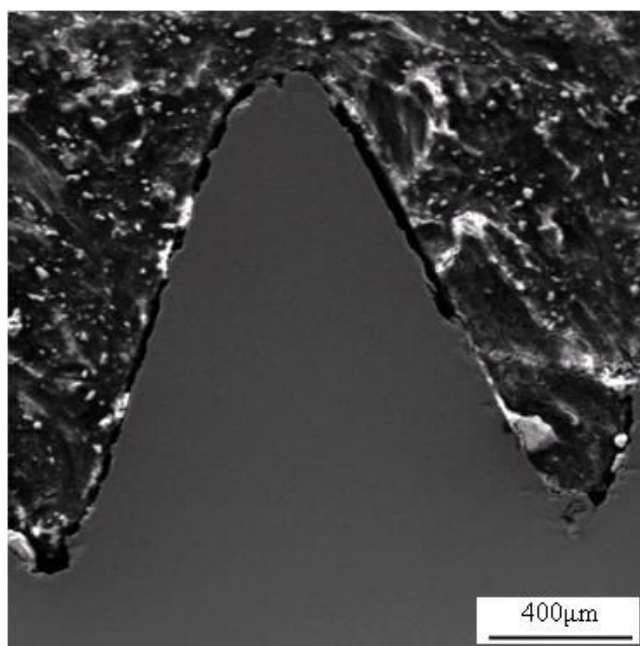


FIGURA 4.21 - Revestimento zinco negro sobre um filete após ensaio de rosqueamento (100x).

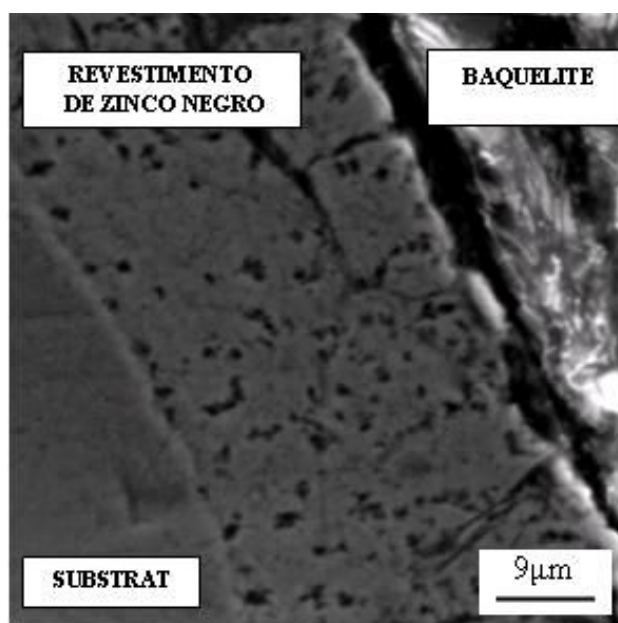


FIGURA 4.22– Revestimento de zinco negro sobre um filete na região D, onde os esforços de montagem são praticamente inexistentes.

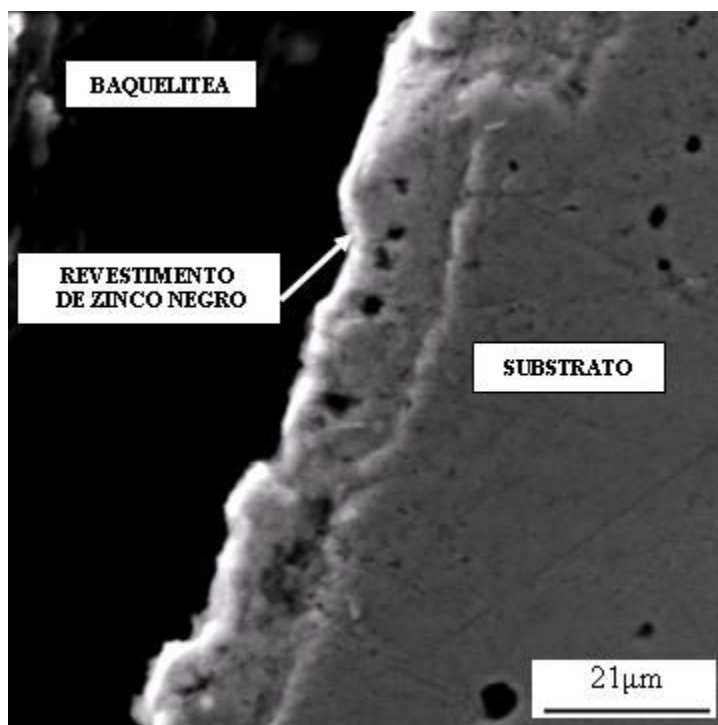


FIGURA 4.23 – Revestimento de zinco negro sobre um filete resultante do esforço de torque de 10 N.m e velocidade de aperto de 545 rpm (aumento 1500x).

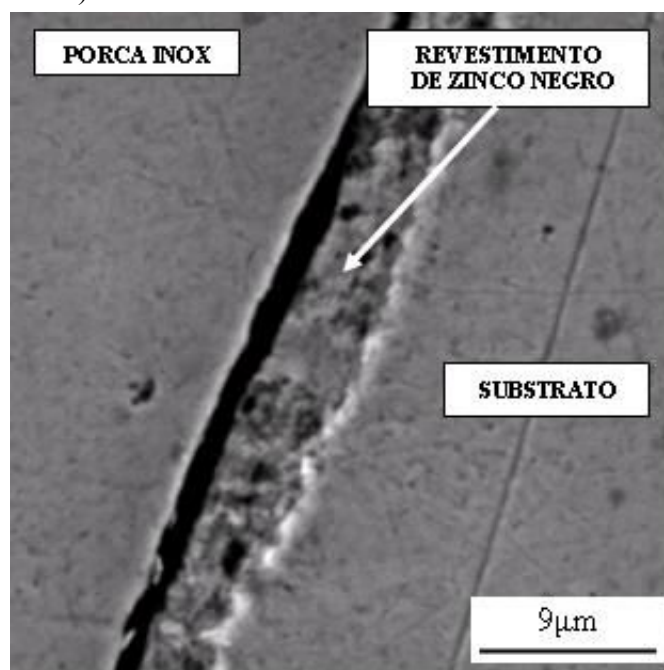


FIGURA 4.24 – Revestimento de zinco negro sobre um filete resultante do esforço de torque de 17N.m e velocidade de aperto de 109rpm (aumento 3500x).

Nas Figuras 4.23 e 4.24 é possível verificar que a superfície interna entre o revestimento do zinco negro e do substrato apresenta um relevo íngreme, o que indica a existência de um ancoramento mecânico entre o revestimento e o substrato. Apesar de apresentar desgaste, o revestimento de zinco negro manteve-se protegendo o substrato, mas nota-se que ele perde espessura conforme as solicitações se tornam mais severas.

Os espectros de EDX obtidos para os diferentes revestimentos analisados são apresentados na Figura 4.25. Observa-se a presença de vários elementos químicos que não são componentes dos revestimentos ou do substrato como, por exemplo, o carbono (proveniente do baquelite usado no embutimento da amostra e/ou solventes orgânicos utilizados na limpeza da amostra).

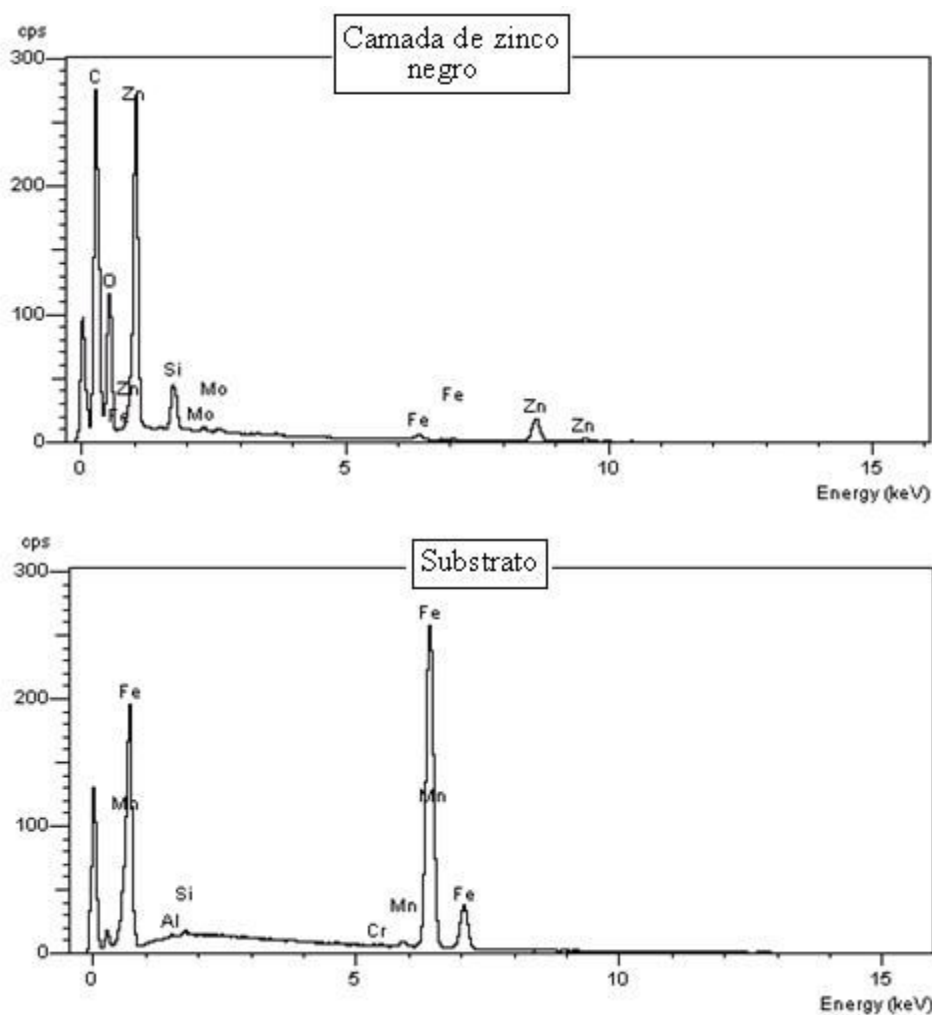


FIGURA 4.25 – EDX do substrato e da camada de zinco negro na região ABC (zinco negro exposto a 17N.m e velocidade e 545rpm).

Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados das análises químicas semi-quantitativas obtidas por EDX pontual. Não foi possível observar-se a presença de átomos de ferro no revestimento, bem como não foi possível verificar a diluição de átomos do revestimento de zinco negro no substrato de aço. Isso evidencia que não houve uma difusão que permitisse promover a diluição da interface entre os dois em contacto físico, e que não resulta em aumento da aderência entre eles. A aderência do zinco negro está mais ligada ao ancoramento mecânico sobre o substrato. Como possui uma estrutura bastante porosa tende a se desgastar rapidamente quando submetido à velocidades de montagem, explicando porque é o revestimento com comportamento menos resistente dos estudados aqui.

TABELA 4.12 – Resultados das análises pontuais por EDX na seção transversal da região E do terceiro filete do parafuso com revestimento do tipo zinco negro.

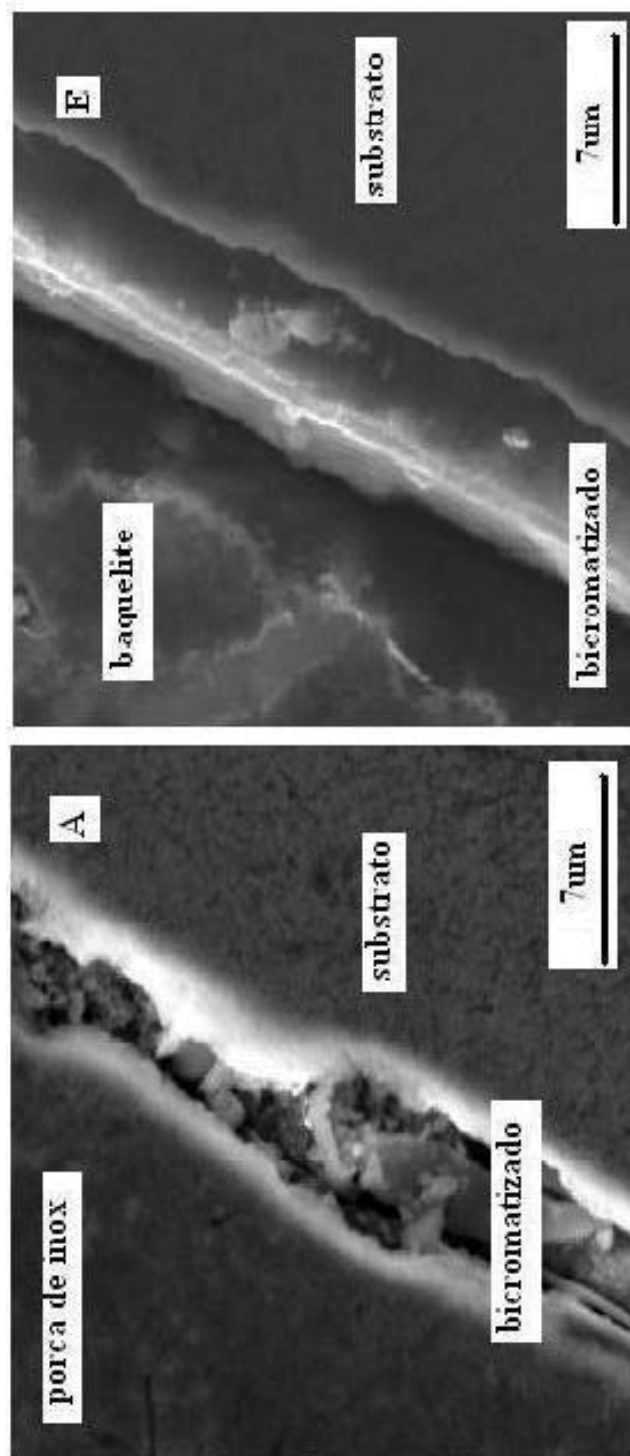
COMPOSIÇÃO QUÍMICA	Si (% at.)	Fe (% at.)	Cr (% at.)	Mn (% at.)	Mo (% at.)	Al (% at.)	Zn (% at.)
Camada externa	-	-	2,94	-	-	1,43	93,63
Substrato	0,45	96,28	-	1,25	-	-	2,02

4.5 Comparação dos Resultados

Com o objetivo de facilitar a visualização dos resultados deste trabalho foram criadas as Tabela 4.13 e Figuras de 4.26 a 4.29. Esta tabela permite uma visão mais geral dos resultados dos ensaios realizados.

TABELA 4.13 – Comparação entre as características dos revestimentos utilizados.

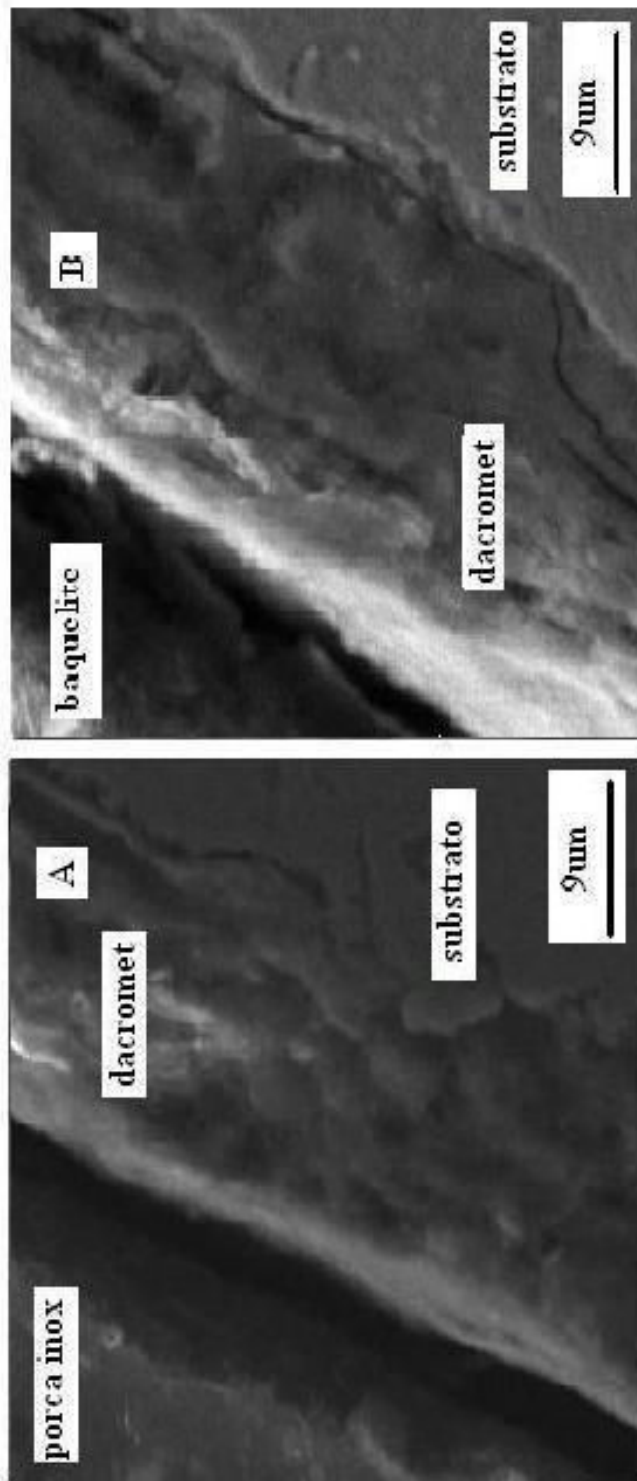
	Bicromatizado	Dacromet	Fosfatizado	Zinco Negro
Torque máximo encontrado	83 a 84 N.m	80 a 90 N.m	80 a 81 N.m	16 - 17 N.m
Tempo de montagem	600ms	950ms	1300ms	2800ms
Interface diluída	Zn – 12%	Zn – 17% Cr – 12%	não	Zn – 2%
Resistência elétrica	Baixa	Alta	Alta	Baixa
Elevação de temperatura antes da falha (no teste)	47°C	110°C	50°C	-
Coefficiente de atrito	0,10 a 0,16	0,08 a 0,16	0,12 a 0,18	0,10 a 0,16



bicromatizado

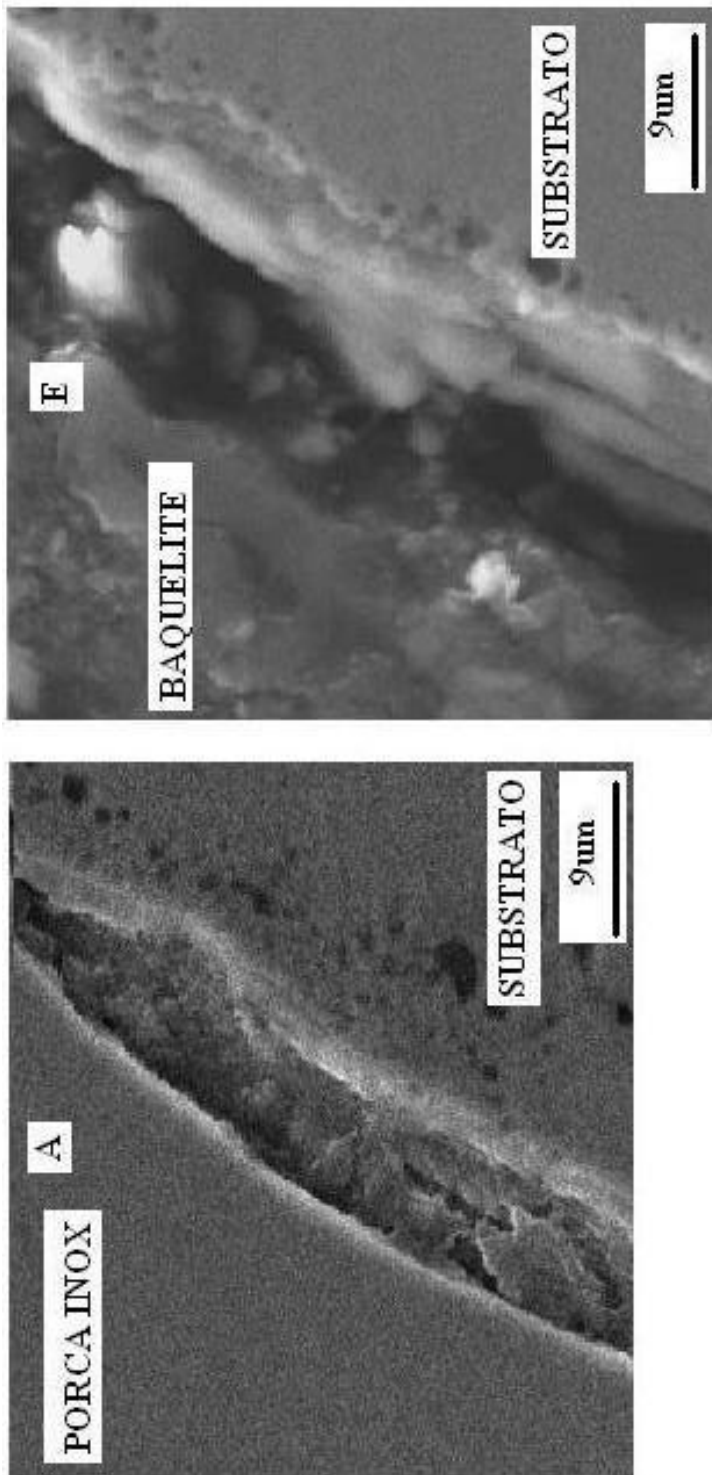
Torque máximo encontrado	83 a 84 N.m
Tempo de montagem	600ms
Interface diluída	Zn - 12%
Resistência elétrica	Baixa
Elevação de temperatura antes da falha (no teste)	47°C
Coefficiente de atrito	0,10 a 0,16

FIGURA 4.26 - Comparativo entre as posições A e E do parafuso M10X25 bicromatizado.



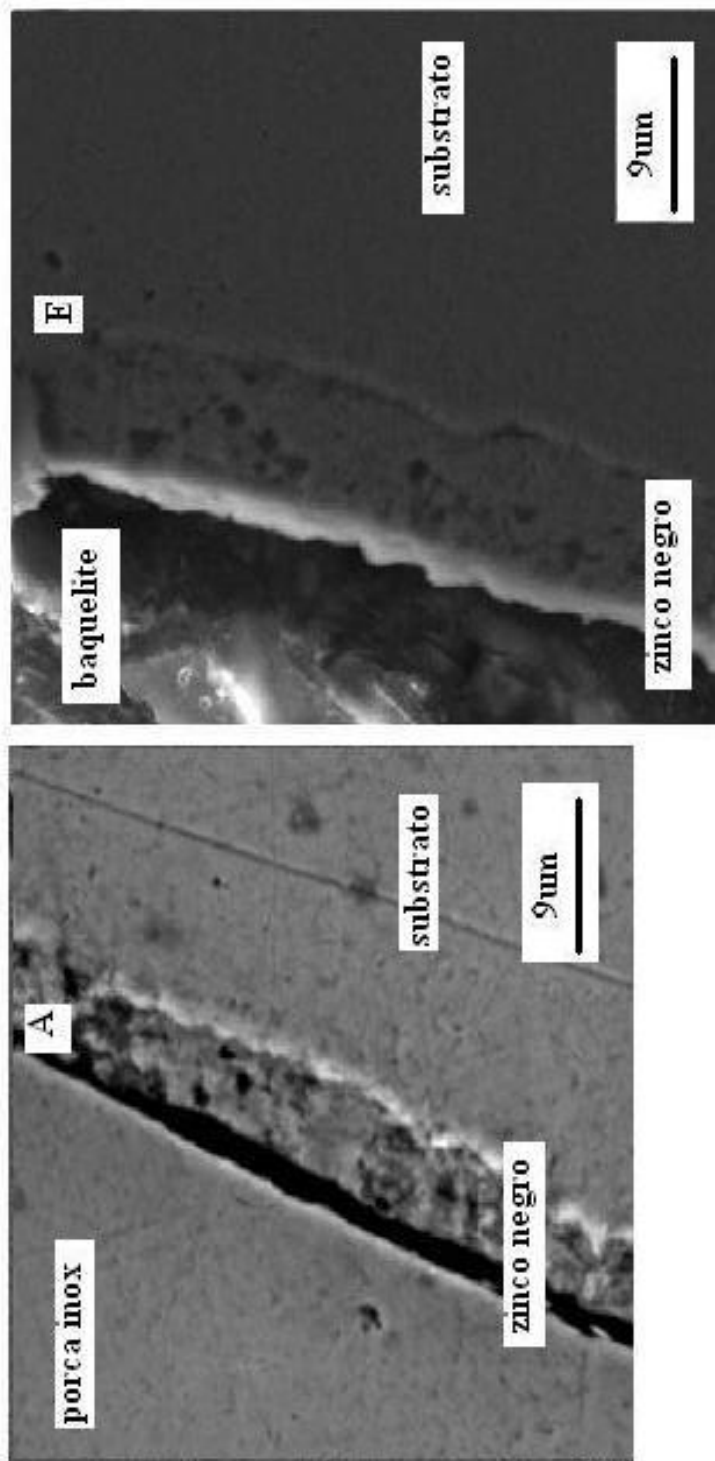
dacromet	
Torque máximo encontrado	80 a 90 N.m
Tempo de montagem	950ms
Interface diluída	Zn - 17% Cr - 12%
Resistência elétrica	Alta
Elevação de temperatura antes da falha (no teste)	110°C
Coefficiente de atrito	0,08 a 0,16

FIGURA 4.27 - Diagrama comparativo entre as posições A e E do parafuso M10X25 dacromet.



fosfatizado	
Torque máximo encontrado	80 a 81 N.m
Tempo de montagem	1300ms
Interface diluída	não
Resistência elétrica	Alta
Elevação de temperatura antes da falha (no teste)	50°C
Coefficiente de atrito	0,12 a 0,18

FIGURA 4.28 - Diagrama comparativo entre as posições A e E do parafuso M10X30 Fosfatizado.



Torque máximo encontrado	16 - 17 N.m
Tempo de montagem	2800ms
Interface diluída	Zn - 2%
Resistência elétrica	Baixa
Elevação de temperatura antes da falha (no teste)	-
Coefficiente de atrito	0,10 a 0,16

FIGURA 4.29 - Diagrama comparativo entre as posições A e E do parafuso M6X14 zinco negro.

4.6 Comparação dos Resultados

Utilizando os dados da Tabela 4.13 e dos diagramas das Figuras 4.26 a 4.29 verifica-se que:

1- O material componente do substrato determina a resistência máxima ao torque. Este estudo confirma os dados da Tabela 3.2 para as dimensões e classe de resistências estudadas.

2- Os resultados desta investigação indicam que a aderência dos revestimentos aos substratos determinam a máxima velocidade de montagem. Isto porque quando a interface é diluída, ou seja, quando ocorreu a difusão dos elementos das camadas do revestimento no substrato e/ou deste nas camadas do revestimento, obtêm-se um melhor aderência e assim podem-se utilizar velocidade de processo mais elevadas.

3- A elevação de temperatura no instante da falha do elemento podem no futuro ser utilizada, mas demandará um estudo de suas causas. Pelos dados da Tabela 4.13 não se pode concluir sua correlação com os parâmetros em estudo.

4- Para aplicações que exigem resistência mecânica elevada o revestimento do tipo dacromet apresenta, vantagem maiores em relação ao processo tradicional de fosfatização.

5- O revestimento do tipo zinco negro, devido à sua baixa aderência e porosidade, verificou-se que a resistência mecânica ao processo está correlacionada à espessura da camada, pois essa se desgastam como resposta às solicitações do processo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos neste estudo, é possível concluir que a velocidade máxima que se pode obter numa montagem é determinada pela resistência mecânica, espessura e principalmente pela aderência do revestimento superficial. A existência de interfaces diluídas permite que se melhore a aderência destes revestimentos e, conseqüentemente, aumente a velocidade de montagem e reduza o tempo de processo.

Neste estudo foi possível se comprovar que parâmetros como a resistência mecânica do substrato têm pouca influência no tempo de montagem, mas apresenta que este parâmetro determina o limite para o torque de aperto do conjunto. Evidência também que a sua ruptura ocorre na região do primeiro filete da porca. Esta propriedade da distribuição desigual dos esforços dentro da porca pode ser comprovada pelas marcas de desgaste nos revestimentos produzidas durante os ensaios e pela análise da ruptura dos elementos.

Abre-se o estudo da utilização de variação de temperatura para se analisar o momento de falha de componentes e também o estudo do comportamento dos revestimentos na região da cabeça do parafuso, região exposta a esforços de exigências totalmente distintas da região da rosca. O mesmo se pode dizer da região da ponta do parafuso deixando a sugestão dos desenvolvimentos das análises da influência dos parâmetros nesta região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PIOVEZAN, P. P., LANDERS, R - **Parafuso de Arquimedes** – projeto para instrumentação de ensino. Campinas: IFGW – Unicamp, 2005.
- [2] RONAN, C. A., **Historia da ciência**. São Paulo: Editora Abril, 1987, v1, p.116 a 124.
- [3] LEMBRE, R. T., **Continuous process improvement: the lessons of history**, USA. SCM 494 – 2000.
- [4] COLENCI Jr., A. **Um estudo de sistematização da tecnologia de fixação por parafusos de alta resistência, no caso brasileiro**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP, 1992.
- [5] BURAKOWSKI, T.; WIERZCHÓN, T. **Surface engineering of metals**. Washington: CRC Press, 1998. p.576.
- [6] DUBBEL, E. - **Manual do engenheiro mecânico** – 13. ed. Rio de Janeiro: Hemus Livraria e Editora Ltda - 1979. v.3, p. 687– 696.
- [7] BEZERRA, A. A. **Estudo do desgaste no rosqueamento com alta velocidade em ferro fundido**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP, 2003.
- [8] EUROPEAN NORM KONZERN. **EN 26 157 – elementos de união** – defeitos de superfície, parafusos para requisitos especiais - Parte 3. Berlim, 1991. (ISO 6157-3: 1988).
- [9] VOLKSWAGEN AG. **VW 602-50 – parafusos de alta resistência e elementos roscados similares** . Berlim, 1982. Condições técnicas de fornecimento.
- [10] EUROPEAN NORM KONZERN. **EN ISO 4759-1 – tolerâncias para elementos de união**. parte 1: parafusos e porcas – Classe de produtos A, B, C. Berlim, 2001. (ISO 4759-1:2000).
- [11] VOLKSWAGEN AG. **VW 011 10 – uniões aparafusadas** - Projeto, montagem e garantia de processos. Berlim, 2001.
- [12] EUROPEAN NORM KONZERN. **EN 898-1 Propriedades mecânicas de elementos de união de aço carbono e aço liga** – Parte 1, Parafusos. Berlim, 1999. (ISO 989-1: 1999).

- [13] VOLKSWAGEN AG. **VW 601 88 – parafuso sextavado** – Com flange e ponta ressaltada para alimentação automática. Berlim, 1991.
- [14] VOLKSWAGEN AG. **VW 011 26 -1 – técnica de uniões roscadas** – Torques de aperto para uniões por parafusos. Berlim, 1999.
- [15] VOLKSWAGEN AG. Technische Leitline. **TL 217 – revestimento de zinco** – Requisitos para a proteção de superfícies. Berlim, 2002.
- [16] VOLKSWAGEN AG. **VW 137-50 – Tratamentos superficiais para peças metálicas** – Tipos de proteção, códigos de identificação e requisitos. Berlim, 1999.
- [17] EUROPEAN NORM KONZERN. **EN ISO 898-6 – propriedades mecânicas de elementos de união**. Parte 6: Porcas com forças de ensaios definidas – Rosca fina. Berlim, 1996. (EM ISO 898-6:1995).
- [18] VOLKSWAGEN AG. **VW 601 89 – parafuso sextavado** – Com flange e ponta ressaltada para alimentação automática. Berlim, 1991.
- [19] VOLKSWAGEN AG. Technische Leitline. **TL 195 – elementos mecânicos de fixação** – parafusos de aço com camada para vedação requisitos do material. Berlim, 1996.
- [20] VOLKSWAGEN AG. **VW 011 27 – torques de perfil de rosca para uniões roscadas de chapas**. Berlim, 1999.
- [21] EUROPEAN NORM KONZERN. **EN 26 157 – elementos de união** – Defeitos de superfície, parafusos para requisitos especiais - Parte 1. Berlim, 1991, (ISO 6157-3: 1988).
- [22] DEUTSCHE INSDUSTRIE NORM KONZERN. **DIN 7975 – parafusos auto-atarraxantes** - aplicação e valores de referencia por diâmetros. Berlim, 1989.
- [23] VOLKSWAGEN AG. TECHNISCHE LEITLINE. **TL 244 – revestimentos com ligas de zinco/níquel** – Requisitos para proteção de superfícies. Berlim, 2002.
- [24] J. R. N. LIMA (PG), M. A. SILVA (IC), P. LIMA-NETO (PQ)- **Monitoramento da corrosão de revestimentos de Zn-Ni em atmosfera de agressividade marinha**. Fortaleza, CE: Universidade Federal do Ceará, Departamento de Química Analítica e Físico-Química, 1999.
- [25] VOLKSWAGEN AG. TECHNISCHE LEITLINE. **TL 233 – non-electrolytically applied zinc flake coatings with top coating-requirements for surface protection** Berlim, 2003.
- [26] DEUTSCHE INSDUSTRIE NORM KONZERN. **DIN 267 – elementos mecânicos de ligação** – condições técnicas de fornecimento. Berlim, 1983.

Categorias de resistência para parafusos de aços com e sem liga. Modificação das categorias de resistência.

- [27] VOLKSWAGEN AG. TECHNISCHE LEITLINE. **TL 245 – revestimentos lamelares de zinco aplicados por processo não eletrolíticos** – Requisitos para a proteção das superfícies. Berlim, 2002.
- [28] LENZI, J. **Revestimentos metálicos**. Curitiba: Departamento de Engenharia Elétrica Universidade Federal do Paraná – Setor de Tecnologia. 2004.
- [29] Volkswagen AG. **VW 011 26 – 2 – técnica de uniões roscadas**. Berlim, 1999. Momento de torção de aperto para montagem de parafusos, além do limite de elasticidades.
- [30] VIEIRA, R. A. **Estudo de modificações de superfícies de aço inoxidável 304 com filmes poliméricos e de titânio para melhorar a aderência de filmes de diamantes CVD**. Mestrado (Engenharia de Materiais) -Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR), Faculdade de Engenharia Química de Lorena (FAENQUIL), Lorena, SP, 2002.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.