

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Engenharia Metalúrgica
1996

TRABALHO DE FORMATURA II

**Parafusos: Coeficientes de atrito de diferentes camadas
superficiais e influência do hidrogênio na resistência a fadiga**

Aluna: Penélope Cotrim Barboza

Prof.: Paulo Sérgio Carvalho Pereira da Silva

Data: 28/11/96

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Sérgio Carvalho Pereira da Silva, agradeço, sobretudo pelo incentivo e dedicação para a realização desse trabalho.

Agradeço à minha família a compreensão e o apoio que me foi dado, e especialmente ao Leandro a paciência e auxílio durante a execução do trabalho.

Agradeço à minha colega Karla toda a disposição oferecida para a conclusão desse trabalho.

Aos colegas da General Motors do Brasil, em especial ao Carlito, Eduardo e amigos do RIPC, pela dedicação, interesse e amizade.

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Coeficientes de torque em parafusos.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 2 - Dados relevantes para cálculo do coeficiente de torque.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 3 - Coeficiente de torque encontrado nos acabamentos.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 4 - Número de ciclos dos parafusos com hidrogênio:.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 5 - Número de ciclos dos parafusos sem hidrogênio:.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 6 - Carga média obtida no ensaio e tração para diferentes acabamentos.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 7 - Coeficiente de atrito μ_g para diversas condições de superfície e lubrificação.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 8 - Coeficiente de atrito μ_k para diversas condições de superfície e lubrificação.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 9 - Coeficiente de torque K.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 10 - Composição química do Aço SAE 4140 da parafuso.....</i>	<i>50</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Junta com carga de cisalhamento simples.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2 - Junta com carga de cisalhamento dupla.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 3 - Diagrama $F \times \delta$.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 4 - Diagrama $F \times \delta$ com uma carga externa.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 5 - Diferentes parafusos apertando uma biela.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 6 - Gráfico $F_M \times M_A$.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 7 - Gráfico $F_M \times M_A$ para variação de M_A nula.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 8 - Distribuição do torque de aperto.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 9 - Tipos de carregamento em fadiga.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura10 - Estágios de uma ruptura de fadiga.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura11 - Visor do equipamento.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 12 - análise dos elementos - camada fosfatizada.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13 - análise dos elementos - camada de zinco brilhante.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 14 - análise dos elementos - camada de dacromet.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 15 - análise dos elementos - camada de zinco preto.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 16a - análise dos elementos - camada de zinco dicrometizada.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 16b - análise dos elementos - camada de zinco dicrometizada - região escura.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 16c - análise dos elementos - camada de zinco dicrometizada - região clara.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 17 - Ciclo de fadiga ao qual os parafusos foram submetidos.....</i>	<i>37</i>

LISTA DE FOTOS

<i>Foto 1 - Parafuso fosfatizado (fosfato de zinco).....</i>	<i>24</i>
<i>Foto 2 - Parafuso com camada de zinco brilhante.....</i>	<i>26</i>
<i>Foto 3 - Parafuso com camada de “dacromet”.....</i>	<i>28</i>
<i>Foto 4 - Parafuso com camada de zinco preto.....</i>	<i>30</i>
<i>Foto 5a - Parafuso com camada de zinco dicrometizada - imagem SEI.....</i>	<i>32</i>
<i>Foto 5b - Parafuso com camada de zinco dicrometizada - imagem BEI.....</i>	<i>32</i>
<i>Foto 6 - Máquina de fadiga.....</i>	<i>36</i>
<i>Foto 7 - Fratura do parafuso 2 (com hidrogênio).....</i>	<i>38</i>
<i>Foto 8 - Fratura do parafuso 2 (com hidrogênio).....</i>	<i>38</i>
<i>Foto 9 - Fratura do parafuso 2 (com hidrogênio).....</i>	<i>39</i>
<i>Foto 10 - Fratura do parafuso 2 (com hidrogênio).....</i>	<i>39</i>
<i>Foto 11 - Fratura do parafuso 1 (com hidrogênio).....</i>	<i>40</i>
<i>Foto 12 - Fratura do parafuso 1 (com hidrogênio).....</i>	<i>40</i>
<i>Foto 13 - Fratura do parafuso 1 (com hidrogênio).....</i>	<i>41</i>
<i>Foto 14 - Fratura do parafuso 3 (com hidrogênio).....</i>	<i>41</i>
<i>Foto 15 - Fratura do parafuso 3 (com hidrogênio).....</i>	<i>42</i>
<i>Foto 16 - Fratura do parafuso 5 (sem hidrogênio).....</i>	<i>42</i>
<i>Foto 17 - Máquina de tração.....</i>	<i>44</i>
<i>Foto 18 - Inclusões presentes no parafuso com hidrogênio (75 X).....</i>	<i>49</i>
<i>Foto 19 - Inclusões presentes no parafuso sem hidrogênio (75 X).....</i>	<i>49</i>

RESUMO

Uma das causas principais para a ocorrência de quebra em parafusos é o afrouxamento de parafusos durante serviço. Isto pode ser evitado aplicando-se o correto valor de torque de aperto, que está diretamente relacionado ao coeficiente de torque. Neste trabalho, foram realizados ensaios para a determinação do coeficiente de torque dos seguintes acabamentos: zincado brilhante, zincado dicromatizado, "dacromet", zincado preto e fosfatizado. Além disso foi estudada a influência do hidrogênio na fadiga de parafusos. Para tal, realizou-se ensaios de fadiga com parafusos não desidrogenados (sem "baking") após o processo de zincagem dos parafusos.

1. SUMÁRIO

1. SUMÁRIO	1
2. INTRODUÇÃO TEÓRICA	2
2.1 Coeficiente de torque	2
2.1.1 Introdução	2
2.1.2 Tipos de juntas	2
2.1.3 O comportamento mecânico da junta	3
2.1.4 Torque e Momento de aperto	5
2.1.5 Análise de juntas - Determinação da força tensora	6
2.1.6 Geração da força tensora - Efeito dos diversos processos de aparafusamento	6
2.2 Fadiga sob influência do hidrogênio	13
2.2.1 Introdução	14
2.2.2 Tipos de carregamento cíclico	14
2.2.3 Aspectos estruturais da fadiga	16
2.2.4 Curvas S - N	17
2.2.5 Mecanismos de fragilização por hidrogênio	17
3. OBJETIVOS	21
4. PARTE EXPERIMENTAL	21
4.1 Coeficiente de torque	21
4.2 Fragilização por hidrogênio	36
4.3 Ensaio de Tração	43
5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	44
5.1 Coeficiente de torque	44
5.2 Fragilização por hidrogênio	48
5.3 Ensaio de Tração	50
6. ANEXOS	51
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

2. INTRODUÇÃO TEÓRICA

2.1 Coeficiente de torque

2.1.1 Introdução

O aumento dos requisitos de segurança e confiabilidade na indústria automobilística, aeroespacial e de equipamentos, tem levado nos últimos anos, o estudo das juntas aparafusadas a um grau de interesse sem paralelo em qualquer outra época na história, desde o início da revolução industrial.

A confiabilidade numa fixação aparafusada depende intrinsecamente do parafuso e das juntas, além da precisão do cálculo da força tensora necessária e do processo de montagem, que leva a alcançar a força de fixação calculada. O coeficiente de atrito tem papel importante na montagem já que propicia a obtenção de uma força tensora suficiente e uniforme⁽¹⁾. Em parafusos com diferentes acabamentos (e consequentemente diferentes coeficientes de atrito) necessita-se de diferentes torques aplicados para a obtenção da mesma força tensora. O valor do coeficiente de atrito dependerá do tipo de acabamento utilizado, podendo-se citar entre eles: zincado, cadmiado, dacromet, entre outros.

Somente após a 2ª Guerra é que um grande desenvolvimento tem se realizado nesta área, inicialmente nos U.S.A., com modificações básicas nos parafusos, na qualidade dos materiais, processos de tratamento térmico, introdução da rosca rolada após tratamento térmico e raio de transição rolado.

2.1.2 Tipos de juntas

A partir da maneira que a carga é aplicada à junta, podemos classificar dois tipos:

I - Juntas com carga de cisalhamento - vide figura. 1 - A junta normalmente é calculada para poder absorver carga, como força de atrito, entre as peças.

II - Juntas com carga de tensão - vide figura 2 - Em juntas com carga de tensão, a direção da força é paralela à linha central do parafuso.

Em ambos os casos pode ser utilizada uma vedação. A combinação entre esses dois tipos de carga pode ocorrer.

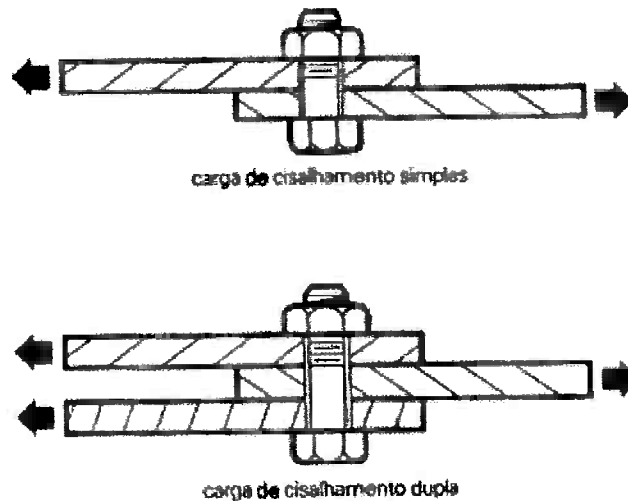


Figura 1 - Junta com carga de cisalhamento simples

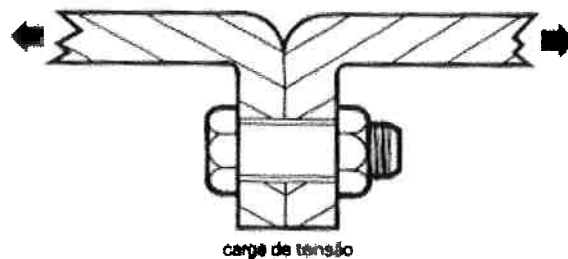


Figura 2 - Junta com carga de cisalhamento dupla

2.1.3 O comportamento mecânico da junta

Quando a junta é apertada o giro do parafuso ou porca cria uma força de tensão no parafuso F_s e uma força de união F_u nas peças unidas⁽²⁾, veja figura 3.

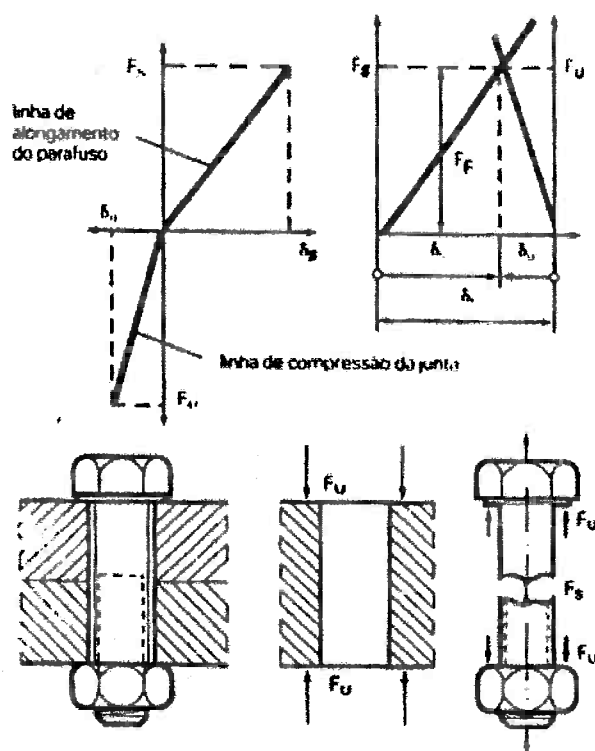


Figura 3 - Diagrama $F \times \delta$

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

A figura 3 mostra como a compressão δ_u (negativa) pode ser unida ao o alongamento δ_s na forma triangular, a qual é muito útil na discussão do mecanismo da junta.

Quando a junta não está sujeita a uma carga externa, a força de tensão F_s no parafuso é obviamente igual à força de união nas peças unidas F_u . Na situação sem carga a força de compressão F_F instalada (a força que mantém as peças unidas) é igual a F_u e F_s . Quando uma carga externa é aplicada a uma junta apertada as forças no parafuso e peças unidas mudam. Isto é ilustrado com a ajuda do diagrama triangular de deformação de força demonstrado na figura 4.

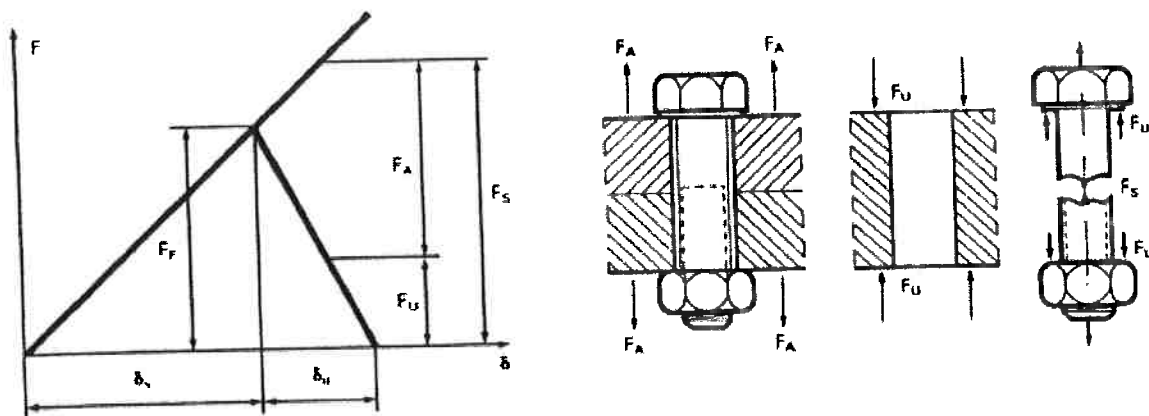


Figura 4 - Diagrama $F \times \delta$ com uma carga externa

Na figura 4 está ilustrado o que ocorre na junta quando é aplicada uma carga externa F_A paralela ao eixo do parafuso. A força de tensão no parafuso aumenta de F_F (a compressão instalada) para F_S e a força de união é diminuída de F_F para F_U . F_U é agora a força de união remanescente na junta. Na figura 4 está claro que, se a carga externa F_A aumenta, F_U finalmente diminui para zero.

2.1.4 Torque e Momento de aperto

2.1.4.1 Definição

É um esforço de torsão aplicado ao parafuso. Esta torsão irá criar uma força de aperto, que unirá os componentes da junta rosqueada³.

O torque deve ser adequado para produzir a força de aperto correta. Se o torque for muito alto, o parafuso poderá alongar. Se o torque for muito baixo, a força de aperto gerada não será capaz de manter os componentes da junta unidos durante o trabalho, ocasionando falhas por afrouxamento do parafuso ou quebra dos componentes.

Em geral, as tabelas de torque para apertos normais com parafusadeiras elétricas ou pneumáticas, com controle de torque por embreagem, são calculadas para que a força de aperto gerada no parafuso (também chamada de pré-carga) se situe entre 65% a 90% do limite elástico do parafuso.

2.1.5 Análise de juntas - Determinação da força tensora

Uma junta aparafusada é uma união desmontável de duas ou mais partes, por intermédio de parafusos.

Os parafusos e suas forças tensoras têm por objetivo manter a peça composta, atendendo funções a ela destinadas, suportando as forças de trabalho que se apresentem.

Exemplificando o caso da união de uma capa de biela à biela, a magnitude da força tensora desenvolvida pelo parafuso deve ser de tal grandeza, que sob a ação de forças inerciais não ocorra um desprendimento unilateral na superfície de separação, nem movimentos axiais ou transversais. Ambos iriam causar danos progressivos, entre outras coisas, desaparafusamento e ruptura por fadiga.

O cálculo da força tensora F_M tem por base de partida a força de trabalho F_A e as deformações elásticas por elas causadas.

A força tensora F_M é composta pelas forças:

F_A - força de trabalho,

F_z - força de assentamento

F_{kerf} - força de junção (para evitar o desprendimento da junta)

2.1.6 Geração da força tensora - Efeito dos diversos processos de aparafusamento

2.1.6.1 Fator de Aperto α_A

Observamos numa junta aparafusada a presença de uma força F_M min e de uma F_M max. A existência destas duas forças é função principalmente das grandes variações dos coeficientes de atrito que ocorrem na cabeça e na rosca e também das dispersões do torque. A relação entre as forças máximas e mínimas é chamada α_A .

$$\alpha_A = \frac{F_M \text{ max}}{F_M \text{ min}} \quad (1)$$

α_A varia dependendo do sistema de aperto utilizado, podendo estar entre 1 e 4. O exemplo a seguir demonstra claramente a influência do processo de aparafusamento na escolha do diâmetro do fixador. Imaginando uma junta que necessita de uma força de fechamento F_M , sendo utilizados dois processos distintos de aperto dos parafusos: um preciso com $\alpha_A = 1$ e outro com $\alpha_A = 2,5$, que poderia ser uma aparafusadeira de controle de torque pré-regulado.

$$F_{Mmax_1} = \alpha_{A_1} \cdot F_{Mmin} = 0,75 \cdot \sigma_{0,2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 (\alpha_{A_1} = 2,5)$$

$$F_{Mmax_2} = \alpha_{A_2} \cdot F_{Mmin} = \frac{0,75}{0,90} \cdot \sigma_{0,2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_2^2 (\alpha_{A_2} = 1,0)$$

Foi suposto um rendimento de tensões de 0,75 da força axial do parafuso e assumido também somente o diâmetro da rosca para cálculo da área de secção transversal por razões de simplificação. Dividindo-se as expressões resulta:

$$\frac{\alpha_{A_1}}{\alpha_{A_2}} = 0,9 \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad \text{ou}$$

$$\frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{\alpha_{A_1}}{0,9 \cdot \alpha_{A_2}}} = \sqrt{\frac{2,5}{0,9 \cdot 1}} = \frac{1,67}{1}$$

Pode-se concluir pelo resultado que se a junta fosse fechada através de um parafuso M10 por um método preciso, seria necessário um parafuso superior a M16, caso o processo fosse através de uma aparafusadeira de controle de torque pré-regulado. Isto está ilustrado na figura 5.

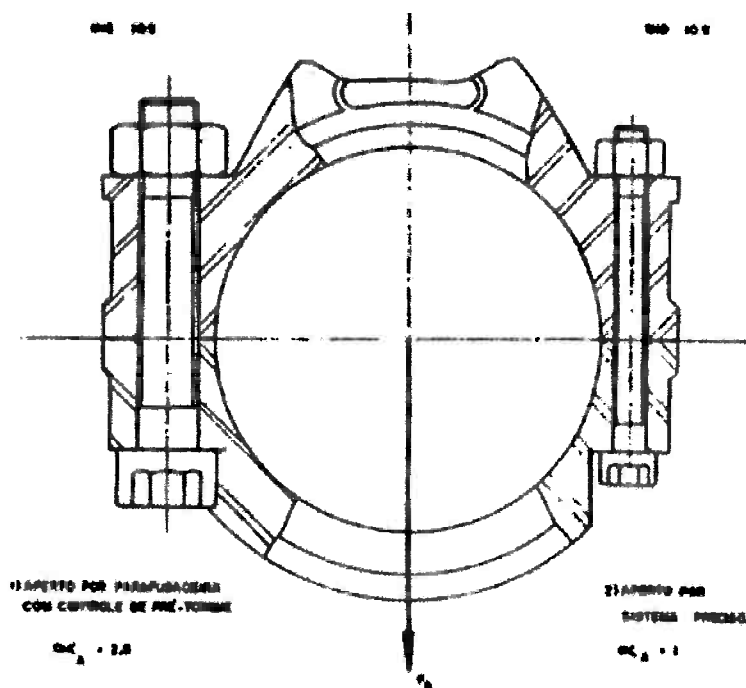


Figura 5 - Diferentes parafusos apertando uma biela

2.1.6.2 Fator de torque k

No aparafusamento por controle de torque, a força F_M desejada é alcançada com grande grau de incerteza, devido às inevitáveis variações dos coeficientes de atrito nas zonas de contato cabeça / junta, porca / barra, junta e rosca internas e externas. Além dos desvios do controle de torque, assim como das ferramentas.

O torque é uma função linear da pré-carga $F_M^{(3)}$. Os demais fatores que são os coeficientes de atrito da cabeça / rosca, o diâmetro de atrito médio e o passo são constantes para uma aplicação. No entanto, existe uma grande variação de um parafuso para outro.

O torque total de aperto consiste no torque efetivo para a geração de força axial e dos momentos de atrito da cabeça e rosca.

A variação do fator k como mostra a tabela 1 é bastante grande, influenciando decisivamente na geração da força tensora quando se aperta o parafuso com um torque pré-determinado.

Tabela 1 - Coeficientes de torque em parafusos

	SUPERFÍCIE I					SUPERFÍCIE II Junta
	a) μK = Cabeça e Porca			b) μG = Rosca		
	AÇO OXIDADO OU FOSFATIZADO			AÇO CADMIADO 6 μm	AÇO ZINCADO 6 μm	
	ESTAMPADO LAMINADO	TORNEADO CORTADO	RETIFICADO			
LEVEMENTE OLEADO	0,13 - 0,19 0,10 - 0,18 0,16 - 0,22	0,10 - 0,18 0,10 - 0,18	0,16 - 0,22 0,10 - 0,18 0,16 - 0,22	0,08 - 0,16 0,10 - 0,16 0,08 - 0,16	0,10 - 0,18 0,17 - 0,18 0,10 - 0,18	AÇO LAMINADO PLAIN, FRES., TORN., CORTADO RETIFICADO
	0,10 - 0,18 0,16 - 0,22	0,10 - 0,18 0,10 - 0,18	0,10 - 0,18 0,16 - 0,22	0,08 - 0,16 0,08 - 0,16	0,10 - 0,18 0,10 - 0,18	FOFO PLAIN, FRES., TORN., CORTADO FOFO RETIFICADO
	0,08 - 0,16	0,10 - 0,18	0,08 - 0,16	0,12 - 0,10 0,12 - 0,16		AÇO CADMIADO 6 μm PORCA CADMIADA
	0,10 - 0,18	0,10 - 0,18	0,10 - 0,20		0,16 - 0,20 0,10 - 0,18	ZINCADO 6 μm PORCA ZINCADA
	0,12 - 0,20 0,10 - 0,18		0,10 - 0,20			(LAMINADO) FOSFATIZADO (USINADO) FOSFATIZADO
	0,08 - 0,20		0,08 - 0,20			Al - Mg - LIGA
SEM LUBRIFICAÇÃO	0,08 - 0,16 0,08 - 0,14 0,10 - 0,18 0,08 - 0,16		0,08 - 0,16 0,08 - 0,14 0,10 - 0,18 0,08 - 0,16	0,16 - 0,24 0,12 - 0,16	0,20 - 0,30 0,12 - 0,20	AÇO CADMIADO 6 μm PORCA CADMIADA ZINCADO 6 μm (ROSCA) PORCA ZINCADA
C/ ADESIVO TIPO LOCTITE	0,18 - 0,30 ..					AÇO FOFO CORTADO

O problema fica mais claro na análise do diagrama mostrado na figura 6. A figura mostra as condições, durante o aperto da força de montagem sob considerações do coeficiente de torque k e da variação do momento M_A induzido.

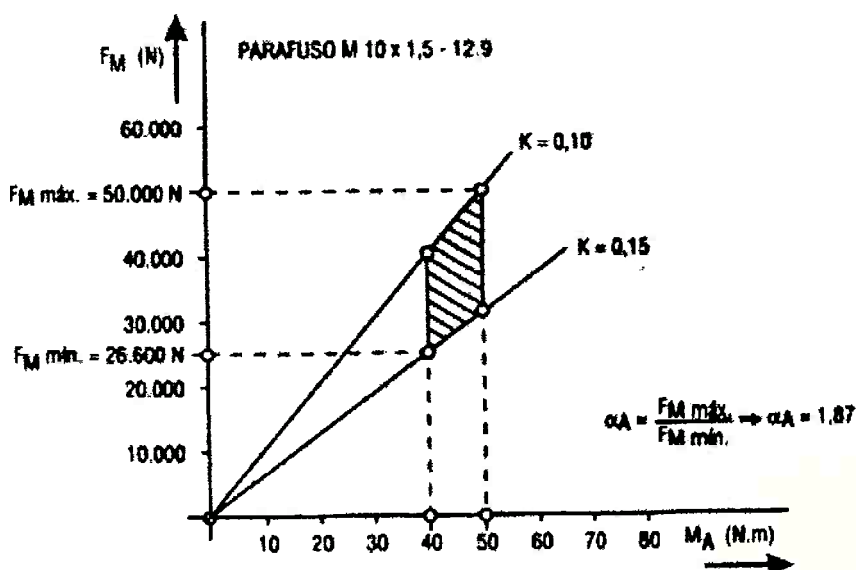
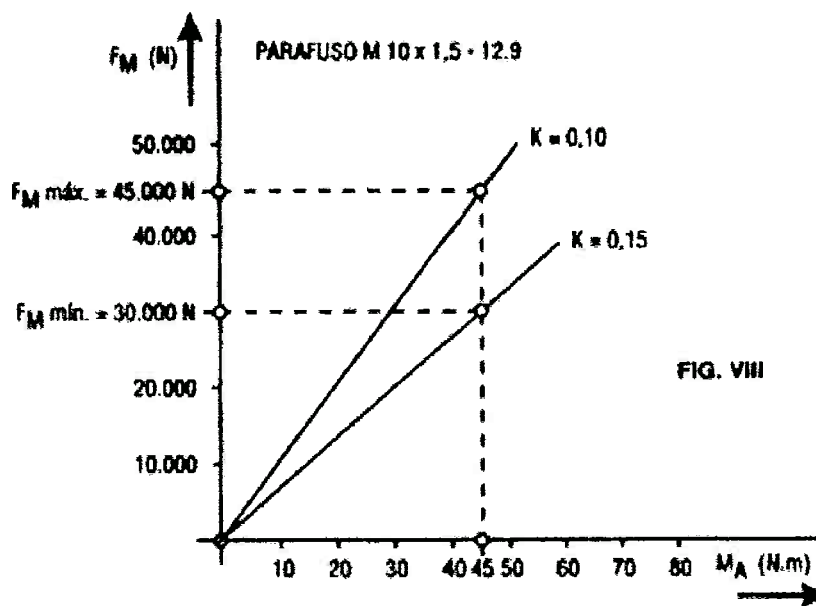


Figura 6 - Gráfico $F_M \times M_A$

A análise detalhada da questão leva a conclusão de que o processo de obtenção de força no aparafusamento através da medição de um torque, não é preciso, e claramente não atende as necessidades de se obter força dentro de níveis rígidos de controle. Verifica-se pela figura 7 que mesmo considerando a hipotética condição de variação zero na aplicação de M_A , levando novamente a concluir que investir em medir torques com grande precisão, não conduz a obter forças de pequenas dispersões.



$$\alpha_A = \frac{F_M \text{ max.}}{F_M \text{ min.}} = \alpha_A = 1,5$$

Figura 7 - Gráfico $F_M \times M_A$ para variação de M_A nula

Numa fixação através de um momento tursor cerca de aproximadamente 90% do torque é perdido para vencer as resistências de atrito. Somente aproximadamente 10% do total do torque dispendido é utilizado para se obter a pré-carga necessária no parafuso⁽⁴⁾, como ilustra a figura 8 abaixo:

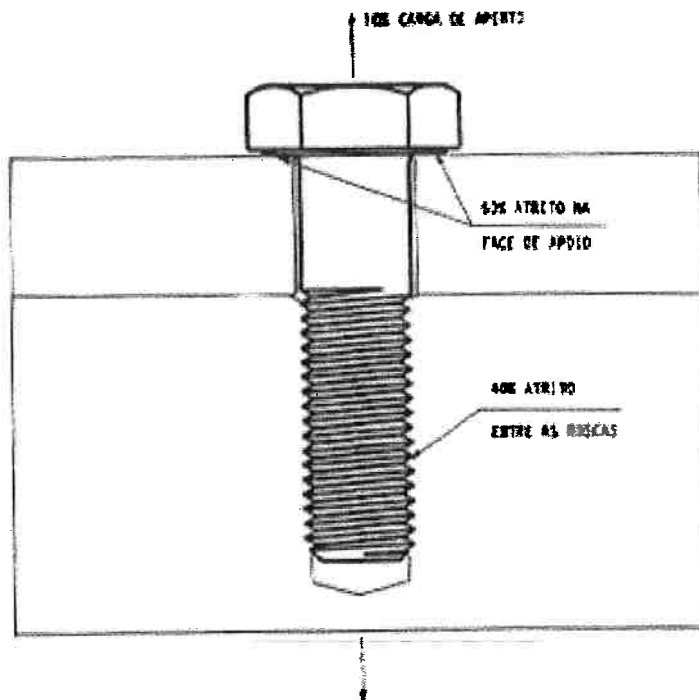


Figura 8 - Distribuição do torque de aperto

As perdas ocorrem em função dos coeficientes de atrito μ_g na rosca e μ_k na cabeça ou porca. O fator de torque k será a combinação dos coeficientes de atrito μ_g e μ_k .

O torque de montagem M_A total pode ser escrito segundo a equação:

$$M_A = M_{GA} + M_K \quad (2)$$

onde: M_A = torque na montagem

M_{GA} = torque agindo na rosca

M_K = torque na cabeça

Pode-se ainda dizer que:

$$MA = F_M \left[0,16P + \mu_G 0,58d_2 + \left(\frac{D_{KM}\mu_K}{2} \right) \right] \quad (3)$$

$$M_{GA} = F_M (0,16P + \mu_G 0,58d_2) \quad (4)$$

$$M_K = \left(\frac{D_{KM} \mu_K}{2} \right) \cdot F_M \quad (5)$$

$$D_{KM} = \frac{2}{3} \left[\frac{(d_K^3 - D_B^3)}{(d_K^2 - D_B^2)} \right] \quad (6)$$

onde temos:

μ_g = atrito na rosca

μ_k = atrito na cabeça

D_{km} = diâmetro efetivo de atrito na cabeça

d_k = diâmetro externo da superfície de apoio da cabeça do parafuso

D_b = diâmetro de passagem do parafuso nas juntas

d_2 = diâmetro primitivo da rosca

p = passo da rosca.

Simplificando a equação (5) temos:

$$M_A = F_M \cdot K \cdot d \quad (7)$$

ou

$$K = \frac{M_A}{F_M \cdot d} \quad (8)$$

sendo K = coeficiente de torque

d = diâmetro nominal

F_M = Força tensora de montagem

Portanto K pode ser escrito como:

$$K = \frac{\left[0,169 P + 0,58 d_2 \mu_G + \left(\frac{D_{KM} \mu_K}{2} \right) \right]}{d} \quad (9)$$

2.1.6.3 Torque de aperto

O torque de aperto pode ser escrito como uma fórmula simplificada:

$$T = \frac{D K W}{1000} \quad (10)$$

[newton x metro]

T = torque de aperto [Newton x metro]

D = diâmetro nominal do parafuso [milímetro]

W = força de aperto ou pré-carga (75% da carga de prova) [Newtons]

K = coeficiente de torque [adimensional]

Portanto, obtendo-se o coeficiente K pode-se estimar o valor do torque de aperto para determinada montagem, sem grandes riscos de perda de pré-carga.

2.2 Fadiga sob influência do hidrogênio

2.2.1 Introdução

Wöhler, engenheiro ferroviário alemão do século passado foi o primeiro pesquisador a fazer estudos práticos e sistemáticos sobre fadiga⁽⁵⁾.

Uma de suas leis diz que não se verificará a ruptura de uma peça, em qualquer que seja o número de solicitações, caso a diferença entre os esforços máximo e mínimo seja inferior a um certo limite.

Este limite é chamado de limite de fadiga ou “ endurance limit “, que é a máxima tensão alternada que o corpo de prova pode suportar indefinidamente.

De acordo com Cioto⁽⁶⁾, Kloos e Thomala, após inúmeros trabalhos apresentaram em 1979 uma equação que define os limites da fadiga para parafusos:

$$\pm \sigma_A = \left(\frac{180}{d} + 52 \right) 0,75 \quad (11)$$

onde: σ_A = tensão limite de fadiga (N / mm²)

d = diâmetro nominal do parafuso

Chamamos σ_A o “endurance limit” ou tensão limite de fadiga, sendo portanto a máxima tensão pulsatória admissível.

A resistência limite σ_A independe da classe de resistência do parafuso para parafusos com classe acima da 8.8.

2.2.2 Tipos de carregamento cíclico

Os tipos de carregamento que causam fadiga podem, de uma maneira geral, ser ilustrado pela figura 9. A figura 9-a ilustra uma tensão cíclica completamente reversa com forma senoidal. A figura 9-b ilustra uma tensão cíclica repetida com valores de $\sigma_{\max}$ e $\sigma_{\min}$ diferentes. A figura 9-c ilustra uma tensão cíclica aleatória.

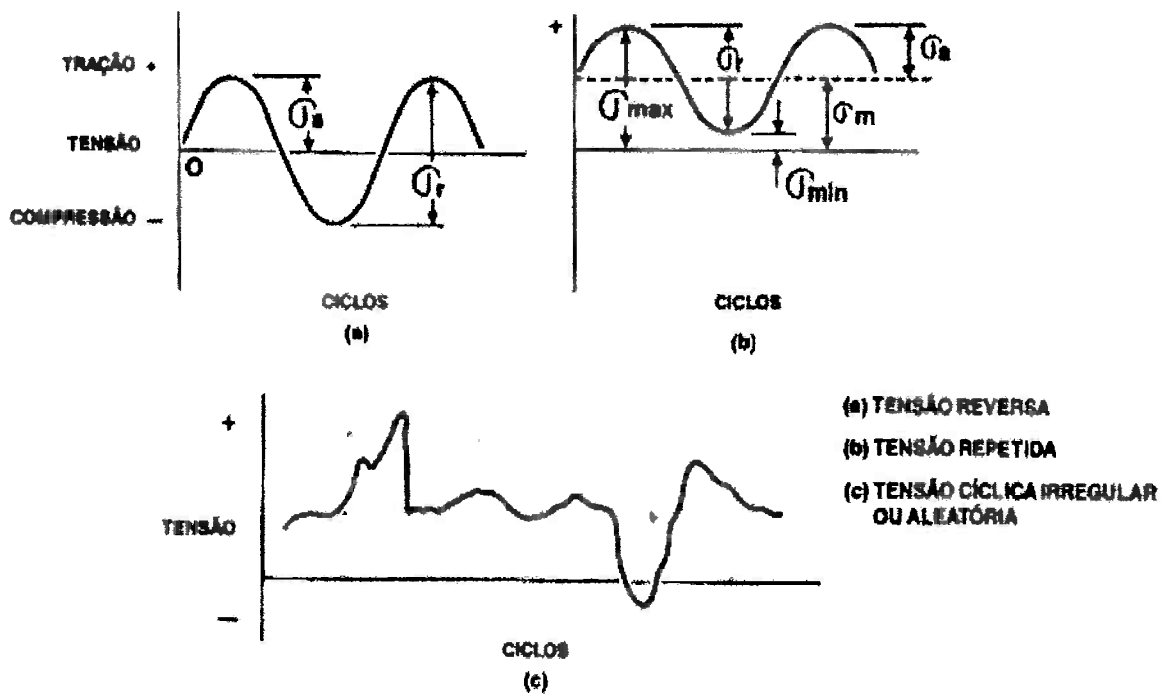


Figura 9 - Tipos de carregamento em fadiga

Uma tensão flutuante pode ser considerada como sendo composta de dois componentes: uma tensão média σ_m e uma tensão alternada, σ_a ⁽⁷⁾.

Deve-se considerar também uma faixa de tensão σ_R . σ_a , σ_m e σ_R podem ser observados esquematicamente na figura 9

Algebricamente:

$$\sigma_R = \sigma_{MAX} - \sigma_{MIN} \quad (12)$$

$$\sigma_A = \frac{\sigma_R}{2} \quad (13)$$

$$\sigma_M = \frac{(\sigma_{MAX} + \sigma_{MIN})}{2} \quad (14)$$

2.2.3 Aspectos estruturais da fadiga

As mudanças estruturais que ocorrem nos metais quando estes são sujeitos a tensões cíclicas subdividem o processo de fadiga nos seguintes estágios,

- primeiro estágio: alterações estruturais no arranjo de defeitos cristalinos, particularmente discordâncias;
- segundo estágio: nucleação ou início de propagação da trinca;
- terceiro estágio: propagação da trinca;
- quarto estágio: ruptura final.

Os estágios são indicados na figura 10.

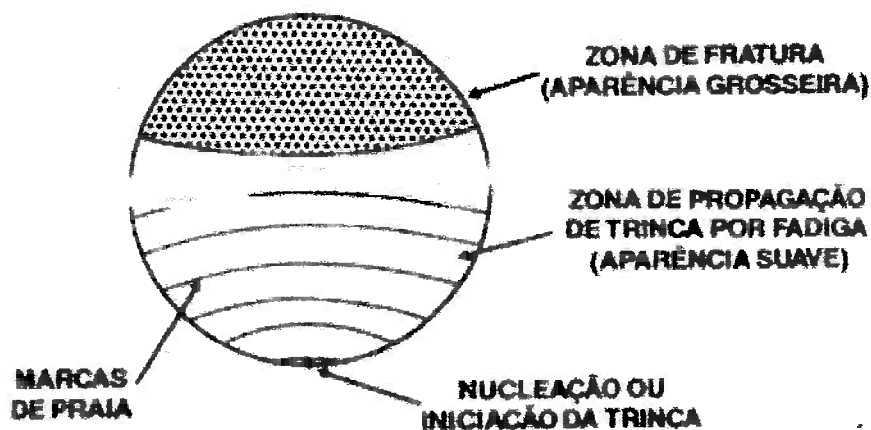


Figura10 - Estágios de uma ruptura de fadiga.

No caso de fadiga de alto ciclo, predominam deformações elásticas e, para aços temperados e revenidos o número de ciclos é maior que 1000; a nucleação da trinca é a etapa que determina a vida sendo fortemente influenciada por concentração de tensões. A propagação ocorre da seguinte maneira: a trinca inicia a nucleação e se propaga até atingir um determinado tamanho a , tal que:

$$\sigma_{max} Y \sqrt{a} = K_{IC} \quad (15)$$

onde Y é uma constante que depende da geometria do componente e da trinca, alcança-se o K_{IC} do material (tenacidade) ocorrendo a propagação instável da trinca.

2.2.4 Curvas S - N

O método clássico de apresentar os dados de fadiga é através das curvas S-N, um gráfico de tensão, S , em função do número de ciclos até a fratura, N . Normalmente se utiliza uma escala logarítmica para N . Na maioria dos casos as propriedades de fadiga dos materiais tem sido obtidas em tensão completamente reversa, onde a tensão média é igual a zero⁽⁷⁾.

Os estudos de fadiga em parafusos foram iniciados de forma sistemática por Thum com os resultados de suas investigações publicado em 1940 no livro de Wiegand e Hass, de acordo com Cioto⁽⁵⁾.

A partir da segunda guerra mundial, até os dias de hoje, por exigência da confiabilidade e segurança na indústria aero-espacial e mais recentemente na indústria automobilística estas investigações se tornaram mais intensas.

Os parafusos quando montados estão carregados por carga axial e torsional, caracterizando uma solicitação no estado combinado de tensões.

Quando em trabalho, devido a solicitação de uma força externa, surge a tensão de fadiga oriunda da força axial, com esforços máximos quase sempre ocorrendo na fibra tracionada sujeita a esforços máximos na seção transversal do núcleo do primeiro filete útil da rosca engajada⁽⁵⁾.

2.2.5 Mecanismos de fragilização por hidrogênio

A Fragilização por hidrogênio é um processo que resulta da presença inicial ou absorção de excessivas quantidades de hidrogênio em metais, usualmente em combinação com tensões aplicadas ou residuais. Ela ocorre mais frequentemente em aços de alta resistência. O trincamento causado por este processo é usualmente chamado na literatura inglesa de "hydrogen-stress cracking" e "hydrogen induced cracking".

A fragilização por hidrogênio causa um decréscimo na ductilidade, um decréscimo no limite de resistência a tração, e falha após algum tempo sob carga estática. O limite de escoamento não é significativamente afetado.

Na falta de uma trinca inicial, a fratura induzida por hidrogênio causada pela difusão do hidrogênio no metal, frequentemente inicia-se em sítios subsuperficiais onde a tensão triaxial é maior. Quando a tensão crítica é excedida, a trinca inicia-se e propaga-se através da região de maior concentração de hidrogênio.

Se já existe uma trinca presente, como por exemplo, provocada por fadiga ou corrosão sob tensão, o processo de trincamento por hidrogênio pode iniciar-se na ponta da trinca pré-existente. Em aços temperados e revenidos, trincas por hidrogênio geralmente seguem os contornos dos grãos austeníticos.

Em alguns tipos de danos causados pelo hidrogênio, o trincamento é promovido por uma pressão interna causada pela precipitação de hidrogênio atômico dissolvido na forma de H_2 , hidrogênio molecular; nas descontinuidades internas como contornos de grão ou na interface de inclusões. Supõe-se que o hidrogênio provoca o trincamento devido a diminuição da coesão interfacial em consequência da absorção do hidrogênio ou devido a diminuição da energia de superfície que deve ser fornecida para a trinca crescer.

Metals Handbook⁽⁸⁾, classifica os tipos específicos de danos por hidrogênio em:

- fratura retardada ("delayed fracture")
- trincamento por precipitação de hidrogênio (" flakes")
- empolamento por hidrogênio ("blistering")
- metanização ("hydrogen attack")
- trincamento devido a formação de hidretos (particularmente em ligas de Ti)

Os dois primeiros tipos normalmente são observados a temperaturas ambientes. Geralmente os danos causados por hidrogênio se manifesta como trincamento interno em aços de alta resistência e como empolamento por hidrogênio em aços de baixa resistência. A solubilidade e difusibilidade do hidrogênio em aços diminui rapidamente com o abaixamento da temperatura; entretanto, quando uma grande seção de aço contendo hidrogênio a elevadas

temperaturas é rapidamente resfriada a temperatura ambiente, o hidrogênio remanescente no aço precipita como hidrogênio molecular. A pressão do hidrogênio precipitado é frequentemente grande o bastante para produzir trincas internas.

A metanização é um fenômeno de elevada temperatura, no qual o hidrogênio reage com carbonetos, produzindo metano que, com o aumento da pressão, causa trincamento no material.

Elementos como titânio, zircônio e háfnio (grupo IV), e metais terras-raras formam hidretos, e a formação de hidretos no metal pode resultar em trincamento.

2.2.5.1 Fragilização por hidrogênio

Quando um aço de alta resistência contendo hidrogênio é tensionado, mesmo se a tensão aplicada é menor que o limite de escoamento, ele pode falhar prematuramente de uma maneira frágil. Este tipo de dano causado pelo hidrogênio ocorre mais frequentemente em aços de alta resistência, temperados e revenidos e endurecíveis por precipitação. A presença de hidrogênio em aços reduz a ductilidade e causa falha prematura sob carga estática que depende da tensão aplicada e do tempo. Este fenômeno é conhecido como fratura retardada ou fadiga estática.

Aços podem ser fragilizados por baixas concentrações de hidrogênio, como de 2 a 6 ppm, que podem se originar de várias fontes. Diferentemente de trincamento por corrosão sob tensão, trincas causadas por fratura retardada usualmente não se ramificam, e a trajetória da trinca pode ser tanto transgranular como intergranular, esta predominando em aços temperados e revenidos. A susceptibilidade de um material a fratura retardada geralmente aumenta com o aumento do nível de resistência. Para uma dada concentração de hidrogênio, a tendência a fragilização aumenta com o decréscimo da taxa de deformação. A tendência ao trincamento diminui com o aumento da temperatura, e acima de 200 °C, o fenômeno não é observado.

Bernstein e Thompson⁽⁹⁾ apresentaram uma revisão dos mecanismos de fragilização pelo hidrogênio. A fragilização foi observada em ligas ferrosas^(10,11) ligas de titânio^(12,13), ligas de níquel^(14,15) e ligas de alumínio^(16,17). Estes efeitos ocorrem em ligas acima de uma larga faixa de resistência e nível de pureza, materiais que na ausência de hidrogênio podem exibir modos de fratura tanto dúteis quanto frágeis.

Segundo Bernstein e Thompson⁽⁹⁾ para o hidrogênio efetivamente fragilizar o material ele necessita estar presente no reticulado^(18,19), pois não há nenhuma evidência que as superfícies que adsorveram hidrogênio são agentes fragilizantes. Uma vez o hidrogênio dentro do material, ele precisa transportar-se para as regiões mais críticas. Ele se move por difusão no reticulado ou como as atmosferas de Cottrell, em discordâncias^(20,21). Este último meio de transporte é mais acelerado em materiais que apresentam escorregamento planar^(21,22).

Embora muitos mecanismos de fratura retardada tenham sido propostos, todos eles podem ser classificados de acordo com uma das três teorias: a teoria da pressão, a teoria da redução da energia de superfície, e a teoria da decoesão⁽⁸⁾. A teoria da pressão assume que a fragilização é causada pela pressão exercida pelo hidrogênio gasoso numa "trinca de Griffith", isto é, trinca pré-existente. Quando o aço saturado de hidrogênio a elevada temperatura é resfriado, hidrogênio gasoso irá precipitar-se em microcavidades, e alta pressão de gás pode ser desenvolvida. Hidrogênio carregado no aço durante corrosão em meio aquoso ou eletrodeposição pode também produzir uma alta pressão interna nas cavidades.

A teoria da redução de superfície afirma que a absorção de hidrogênio diminui a energia livre de superfície e realça a propagação da "trinca de Griffith". Esta teoria pode explicar a propagação da trinca em aços de alta resistência com hidrogênio gasoso a baixa pressão.

A teoria da decoesão afirma que hidrogênio dissolvido migra para as regiões tensionadas e fragiliza o reticulado diminuindo a coesão entre os átomos do metal.

No presente trabalho será estudada a influência do hidrogênio na fadiga de parafusos de alta resistência da classe 10.9 em concentrações que

provocariam fratura retardada. Espera-se verificar se a medida que o ciclo de fadiga é aplicado, o hidrogênio presente no material se difunde para as zonas de maior tensão causando separação intergranular e se este mecanismo reduz a vida em fadiga.

A zincagem eletrolítica pode provocar o carregamento de hidrogênio no aço, tanto durante os processos de preparação das superfícies, que incluem decapagem, como durante o processo eletrolítico propriamente dito⁽¹⁾.

Segundo trabalho de Stewart ⁽²³⁾ referente a influência do hidrogênio na propagação de trincas de fadiga, as variáveis mais relevantes são: a frequência do ensaio, a forma da onda (senoidal, quadrada), a temperatura e a quantidade de hidrogênio no meio (já que o ensaio foi realizado numa câmara contendo hidrogênio, ar ou vácuo).

3. OBJETIVOS

Serão estudados parafusos zincados com e sem tratamento de desidrogenação (" baking").

Para os parafusos desidrogenados serão estudados os coeficientes de torque para diferentes acabamentos superficiais.

Nos parafusos não-desidrogenados será estudada a resistência a fadiga.

4. PARTE EXPERIMENTAL

4.1 Coeficiente de torque

Para a medida do coeficiente de torque, utilizou-se um equipamento já existente na empresa General Motors do Brasil, que consiste da aplicação de uma força pré-determinada no parafuso. O aparelho automaticamente calcula o

torque na cabeça e na rosca, o que nos permite o cálculo dos coeficientes de atrito na cabeça e na rosca, e como combinação destes o coeficiente de atrito.

A figura abaixo ilustra o visor de obtenção dos dados.



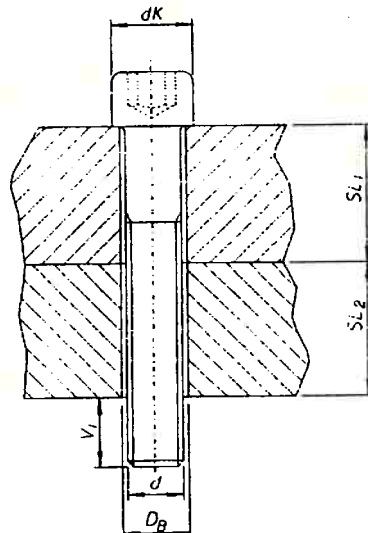
Figura 11 - Visor do equipamento

Para os ensaios foram utilizadas três amostras de cada tipo de acabamento, conhecidos como: fosfatizado, zinco brilhante, "dacrometizado", zinco preto e zincado dicromatizado.

Para maior facilidade de cálculo e visualização dos resultados, foram feitas planilhas de cálculo no programa Excel, que seguem anexas.

Os dados necessários foram retirados da tabela 2, observado que o parafuso em questão é da classe M8 x 1,25.

Tabela 2 - Dados relevantes para cálculo do coeficiente de torque



Bitola	Passo	Diâm. Cabeça	Conforme DIN 14			Conforme DIN 125		DIN 78
d	p	D_{Kmin}	D_B médio	D_B fino	$D_B f_{as}$	d_{sch}	d_{sch}	V_{1min}
4	0.7	6.78	4.5	4.3	Abaixo de M12 não tem chanfro	9	0.8	4.6
5	0.8	8.28	5.5	5.3		10	1	5.6
6	1	9.78	6.6	6.4		12.5	1.6	7
8	1.25	12.73	9	8.4		17	1.6	9
10	1.5	15.73	11	10.5		21	2	11
12	1.75	17.73	14	13	16	24	2.5	13.5
14	2	20.67	16	15	18	28	2.5	15
16	2	23.67	18	17	20	30	3	17
(18)	2.5	26.67	20	19	22	34	3	20
20	2.5	29.67	22	21	24	37	3	21
(22)	2.5	32.61	24	23	26	39	3	23
24	3	35.61	26	25	28	44	4	25
(27)	3	39.61	30	—	33	50	4	28
30	3.5	44.61	33	—	36	56	4	31
(33)	3.5	49.61	36	—	39	60	5	33
36	4	53.54	39	—	42	66	5	37

A tabela 3 resume os valores de coeficientes de torque obtidos no ensaio:

Tabela 3 - Coeficiente de torque encontrado nos acabamentos

Acabamentos	Coeficiente de torque K
zinco brilhante	0,201
zincado dicromatizado	0,191
zinco preto	0,192
dacromet	0,182
fosfatizado	0,150

Foi analisado também quais elementos estavam presentes em cada camada, através do uso do Microscópio Eletrônico de Varredura e do uso de micro sonda ,como mostrado abaixo:

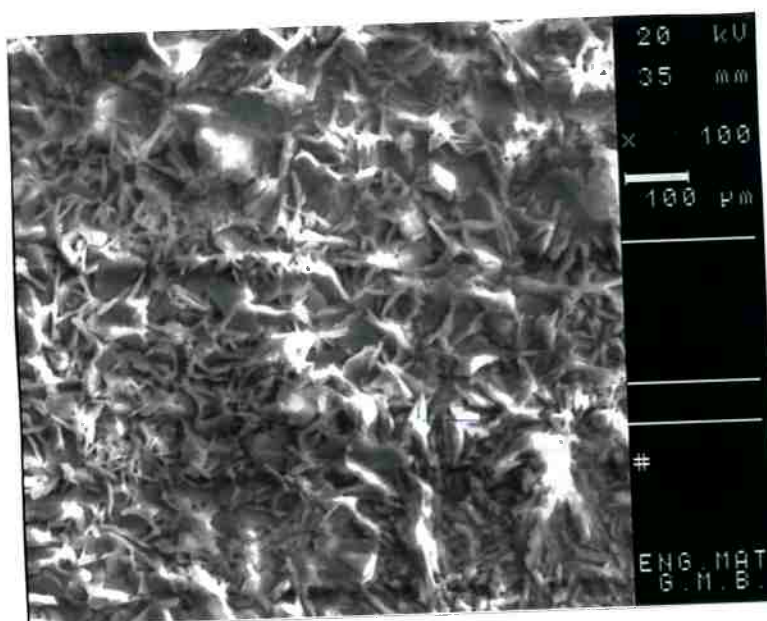


Foto 1 - Parafuso fosfatizado (fosfato de zinco)

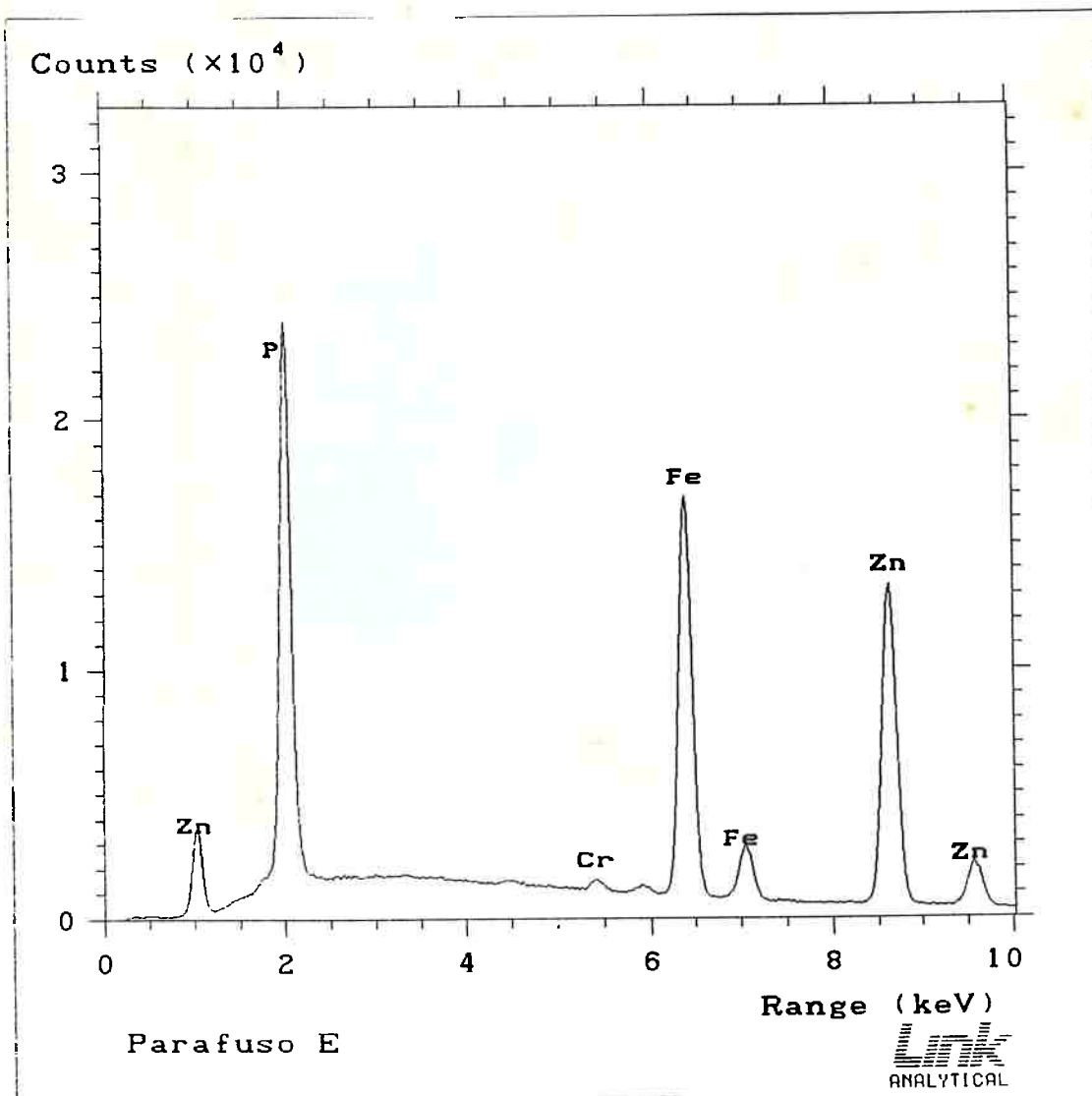


Figura 12 - análise dos elementos - camada fosfatizada

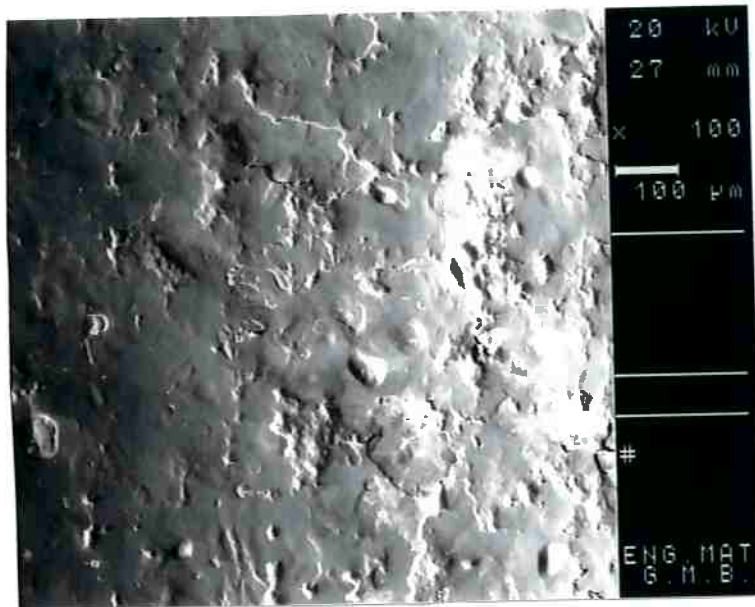


Foto 2 - Parafuso com camada de zinco brilhante

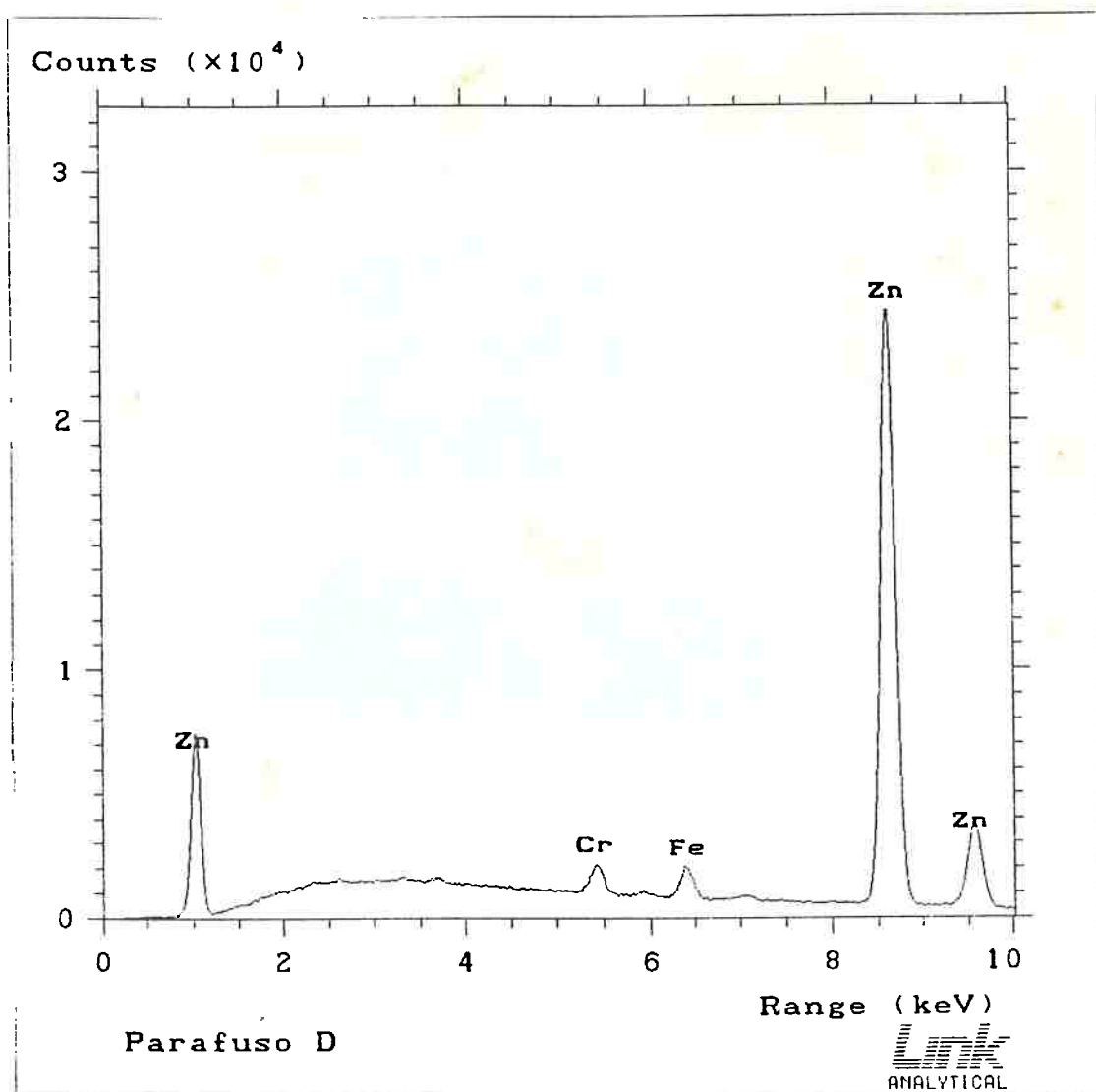


Figura 13 - análise dos elementos - camada de zinco brilhante

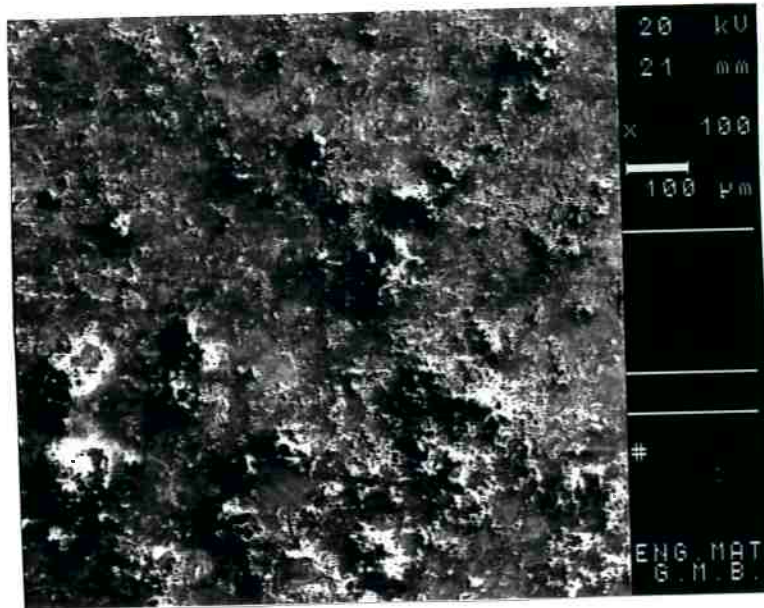


Foto 3 - Parafuso com camada de "dacromet"

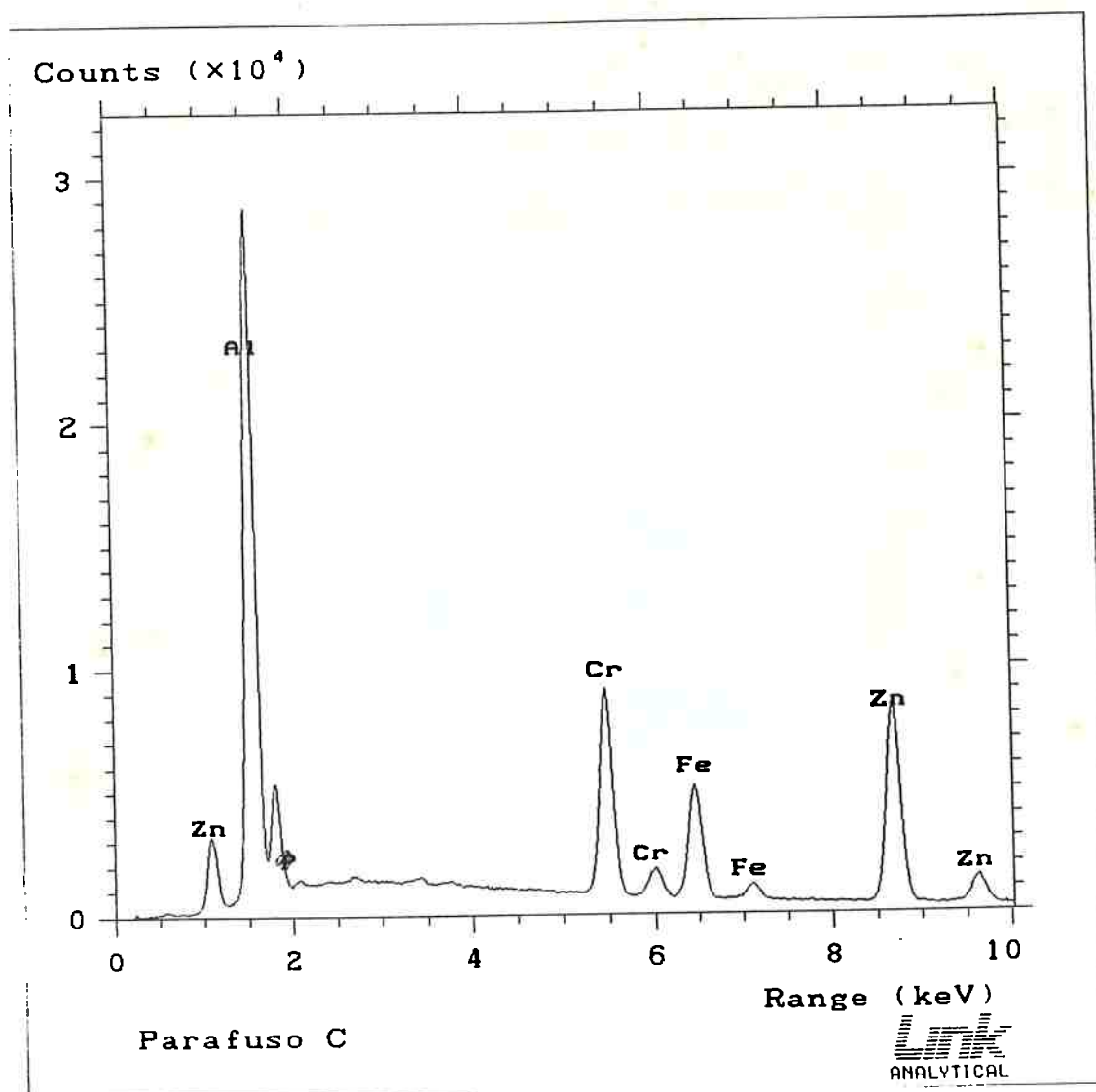


Figura 14 - análise dos elementos - camada de dacromet

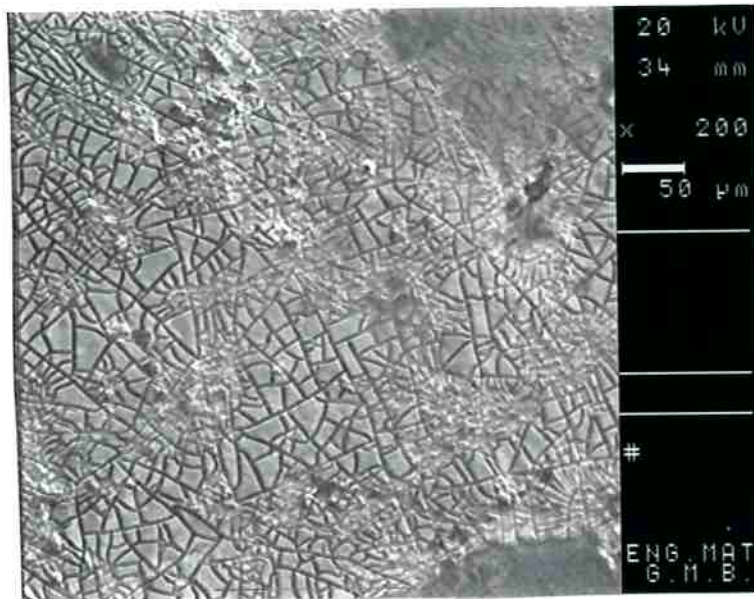


Foto 4 - Parafuso com camada de zinco preto

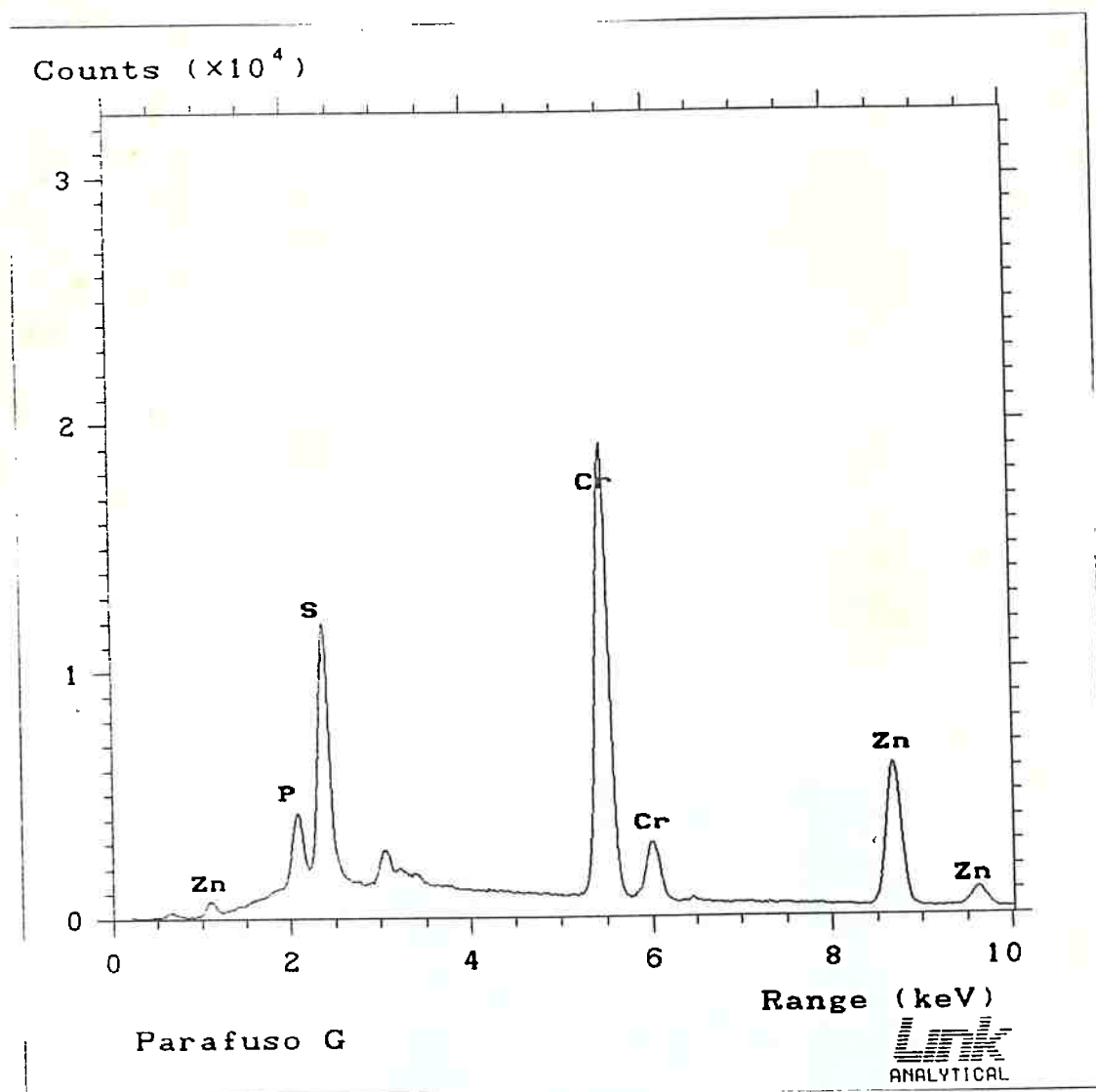


Figura 15 - análise dos elementos - camada de zinco preto

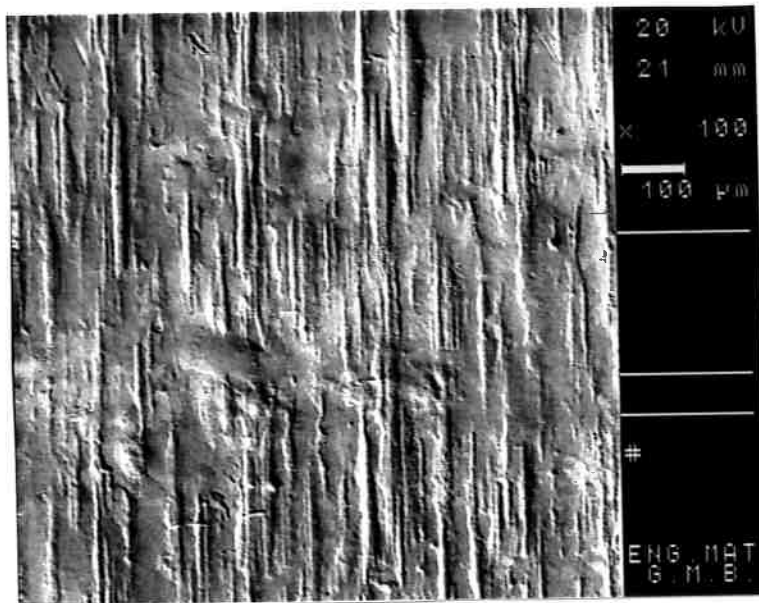


Foto 5a - Parafuso com camada de zinco dicrometizada - imagem SEI

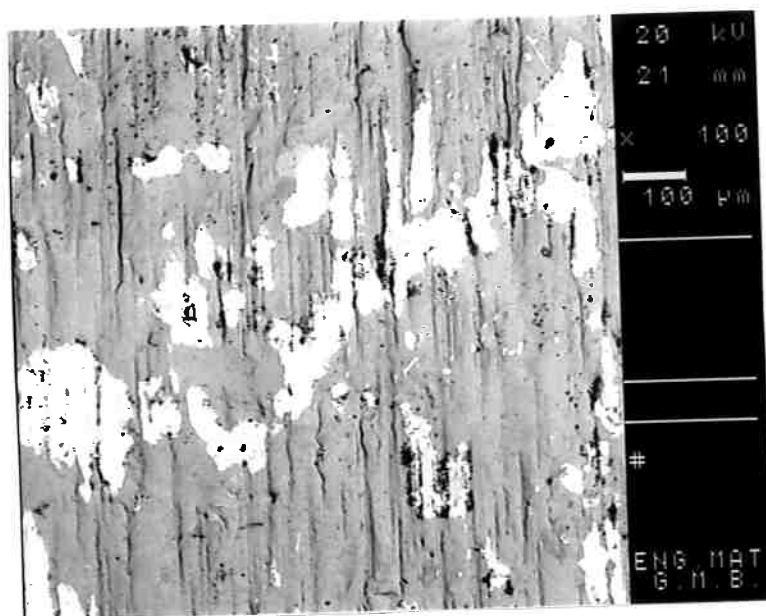


Foto 5b - Parafuso com camada de zinco dicrometizada - imagem BEI

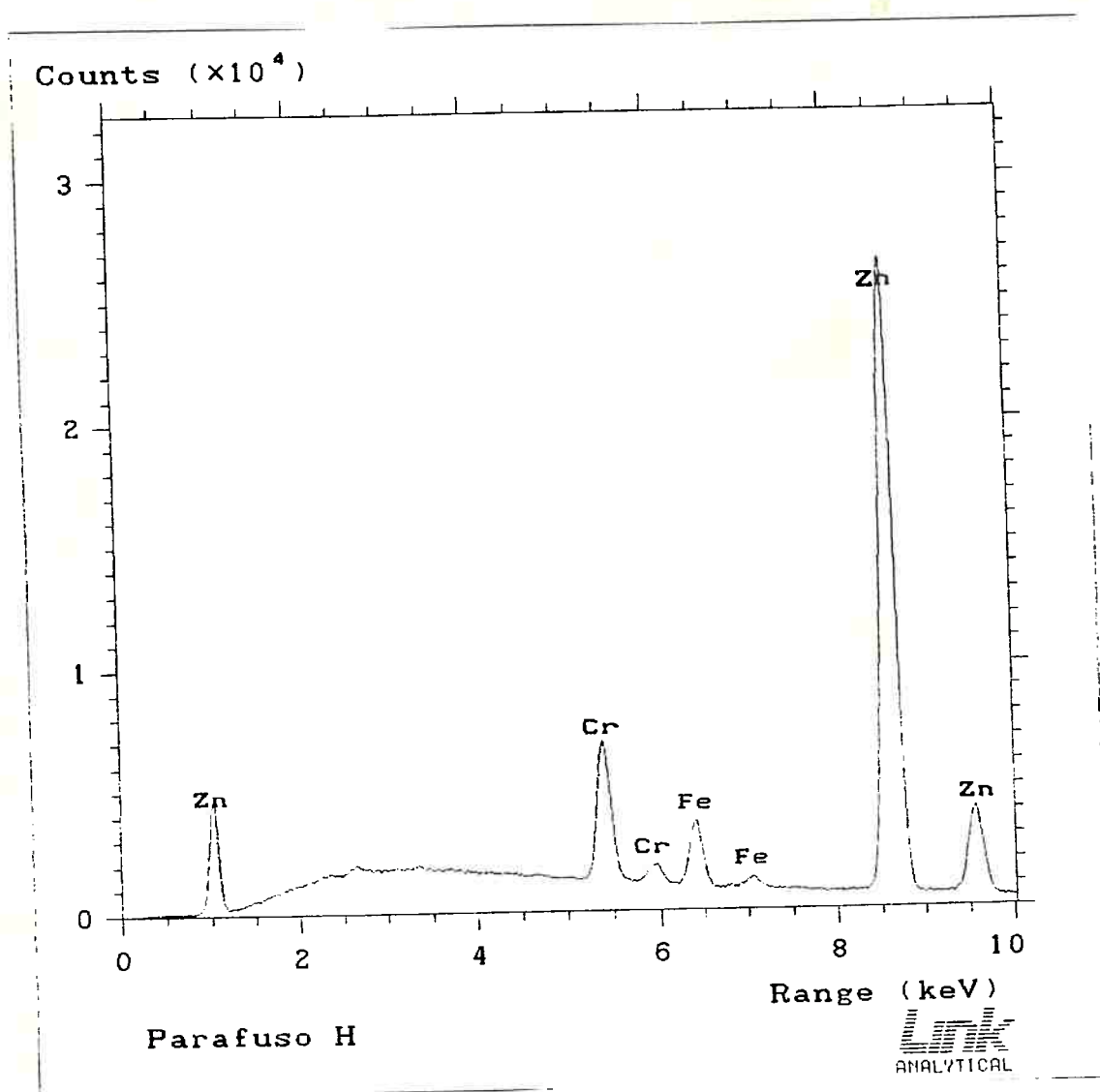


Figura 16a - análise dos elementos - camada de zinco dicrometizada

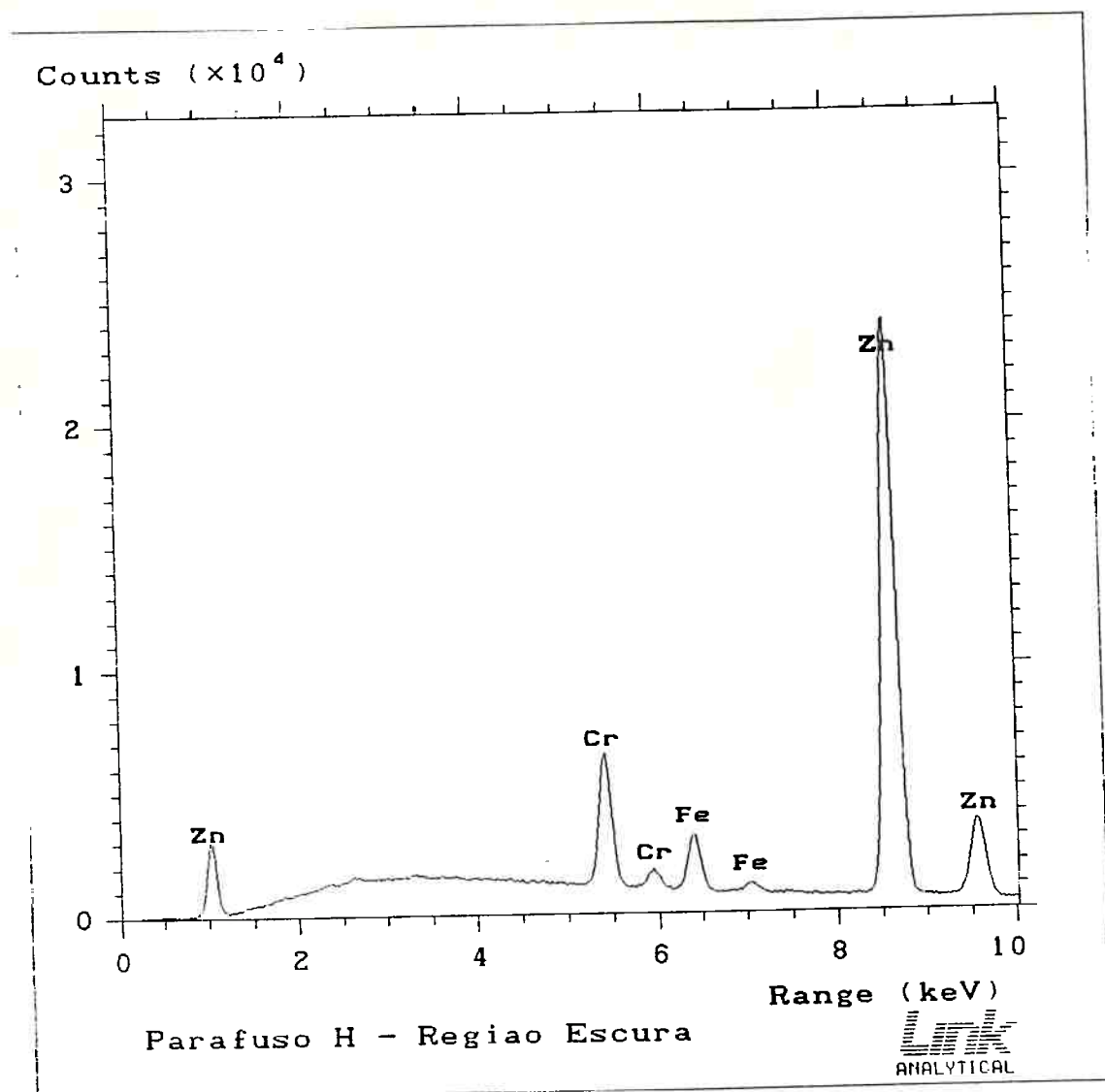


Figura 16b - análise dos elementos - camada de zinco dicrometizada - região escura da foto 5b

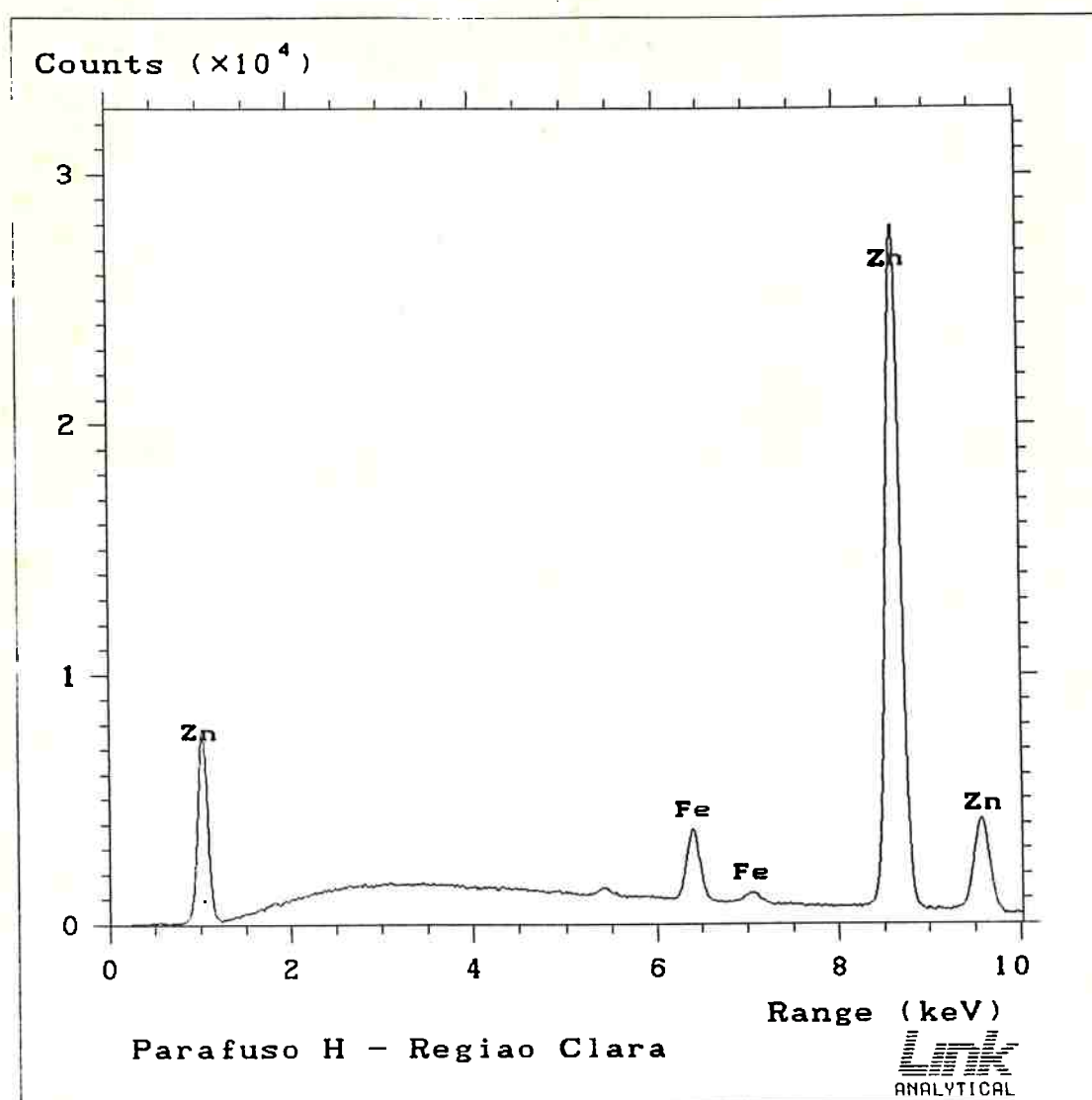


Figura 16c - análise dos elementos - camada de zinco dicrometizada - região clara da foto 5b

4.2 Fragilização por hidrogênio

Para a análise da influência do hidrogênio na fadiga foram realizados ensaios de fadiga numa máquina MTS com uma carga de 25.000 N e amplitude de 5500 N (ou seja de 19.500 a 30.500 N). A frequência utilizada foi de 100Hz. A máquina de fadiga está ilustrada abaixo na foto 6. O ciclo de fadiga está ilustrado abaixo (figura 17):



Foto 6 - Máquina de fadiga

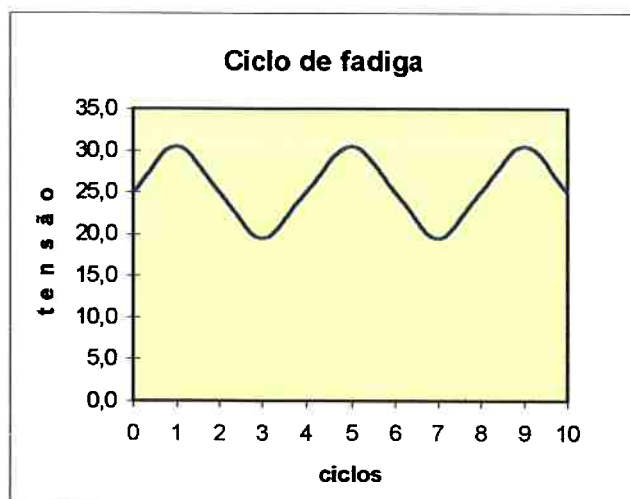


Figura 17 - Ciclo de fadiga ao qual os parafusos foram submetidos.

Para a verificação de que a quantidade de hidrogênio presente nos parafusos era o suficiente para causar fratura retardada, antes de se iniciar os ensaios de fadiga, foi torquado um parafuso hidrogenado e mantidos sob torque durante 24 horas, ocorrendo quebra deste.

Foram ensaiados três parafusos sem hidrogênio e três parafusos com hidrogênio. O ensaio foi feito dentro do regime elástico do parafuso.

O vida obtida de cada parafuso está indicada na tabela 4:

Tabela 4 - Número de ciclos dos parafusos com hidrogênio:

Peça	Número de ciclos ($\times 10^3$)
1	50
2	42
3	61
média	51

Tabela 5 - Número de ciclos dos parafusos sem hidrogênio:

Peça	Número de ciclos ($\times 10^3$)
4	38
5	46
6	62
média	49

Em seguida foram observadas as fraturas no MEV e as fotos abaixo ilustram os resultados obtidos:

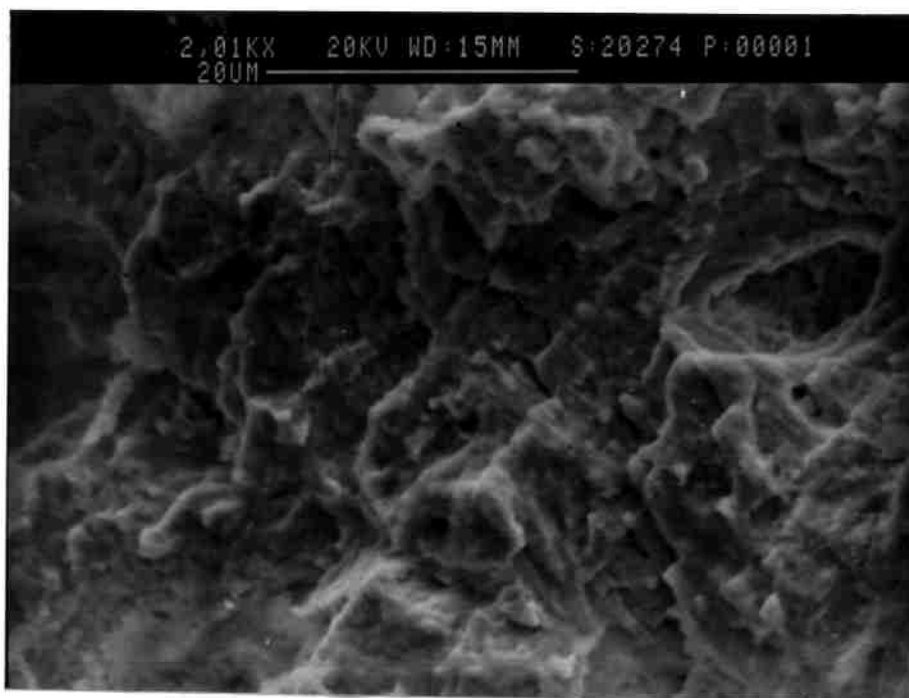


Foto 7 - Fratura do parafuso 2 (com hidrogênio).

Observam-se estrias de fadiga. Propagação normal sob fadiga.

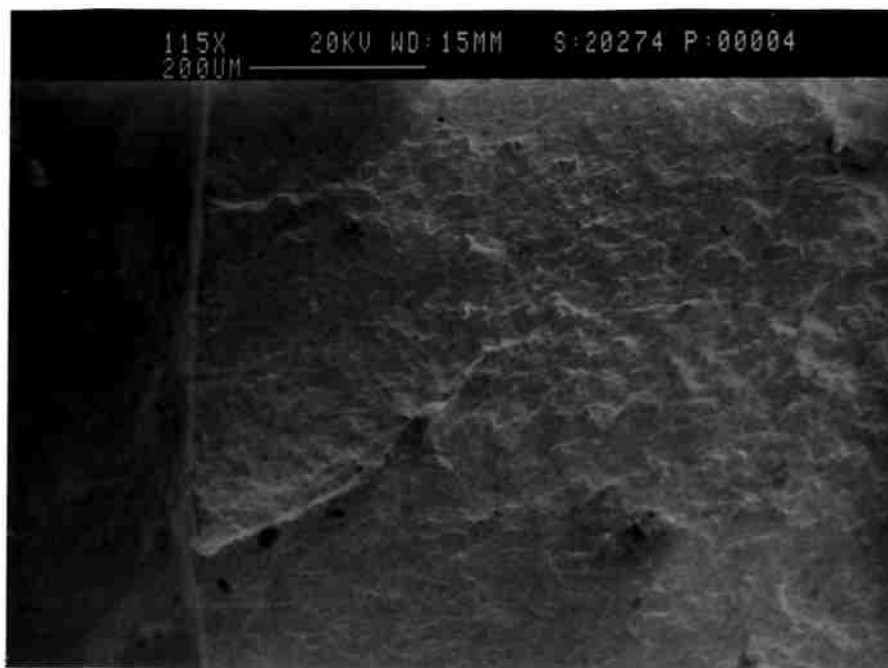


Foto 8 - Fratura do parafuso 2 (com hidrogênio).

Região de início de fratura. Degráus, nucleação múltipla.

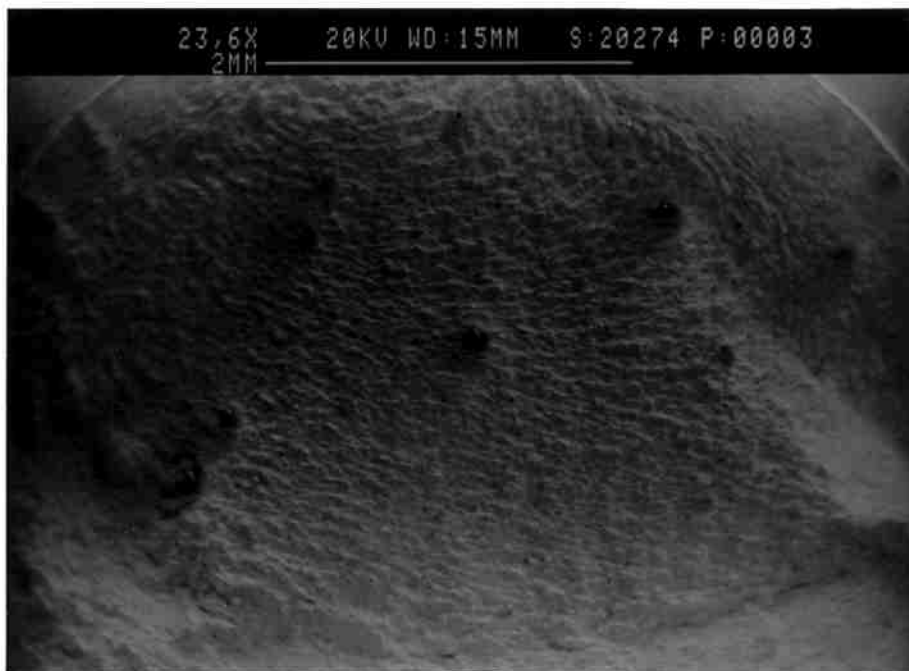


Foto 9 - Fratura do parafuso 2 (com hidrogênio).

Aspecto da região de ruptura final com menor aumento. Fratura frágil, embora o aspecto possa ser confundido com marcas de praia, observando-se com maior aumento (foto seguinte), verifica-se que se trata de uma região de fratura alveolar, portanto ruptura final.

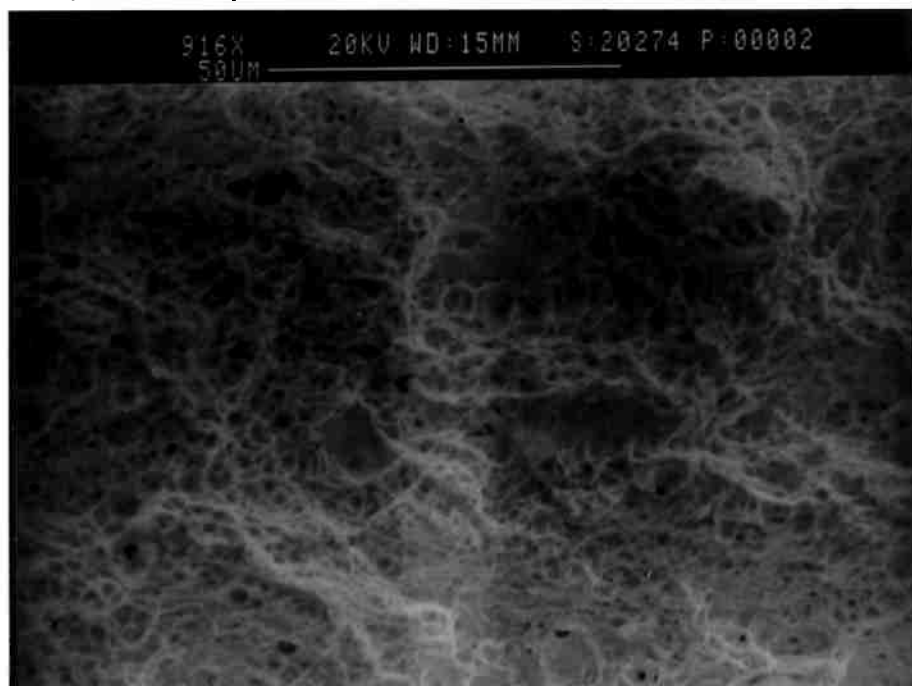


Foto 10 - Fratura do parafuso 2 (com hidrogênio).

Fratura alveolar correspondente a região de fratura final.

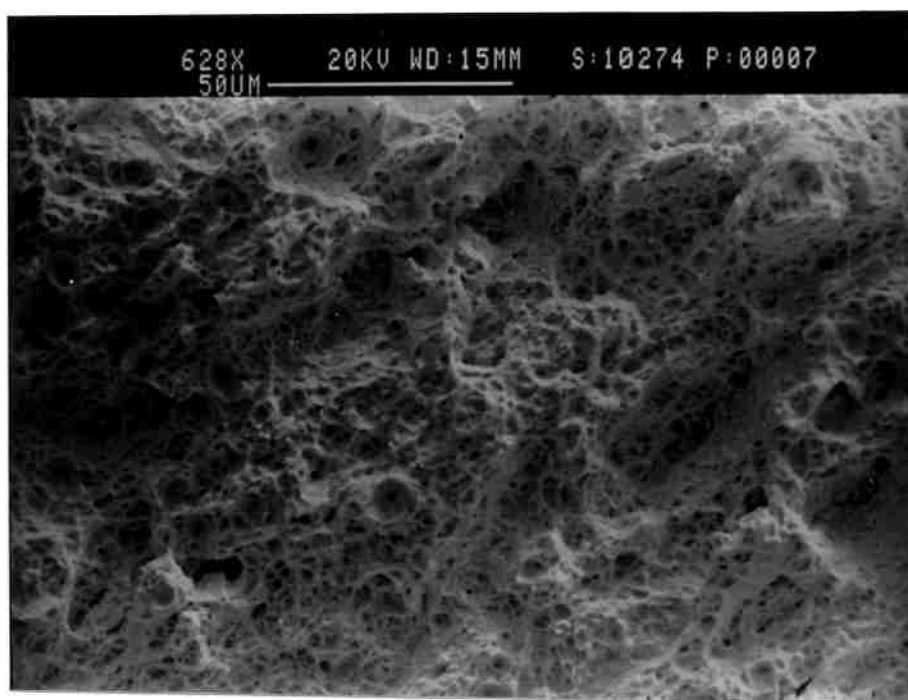


Foto 11 - Fratura do parafuso 1 (com hidrogênio).

Região de fratura final .Mecanismo totalmente alveolar.

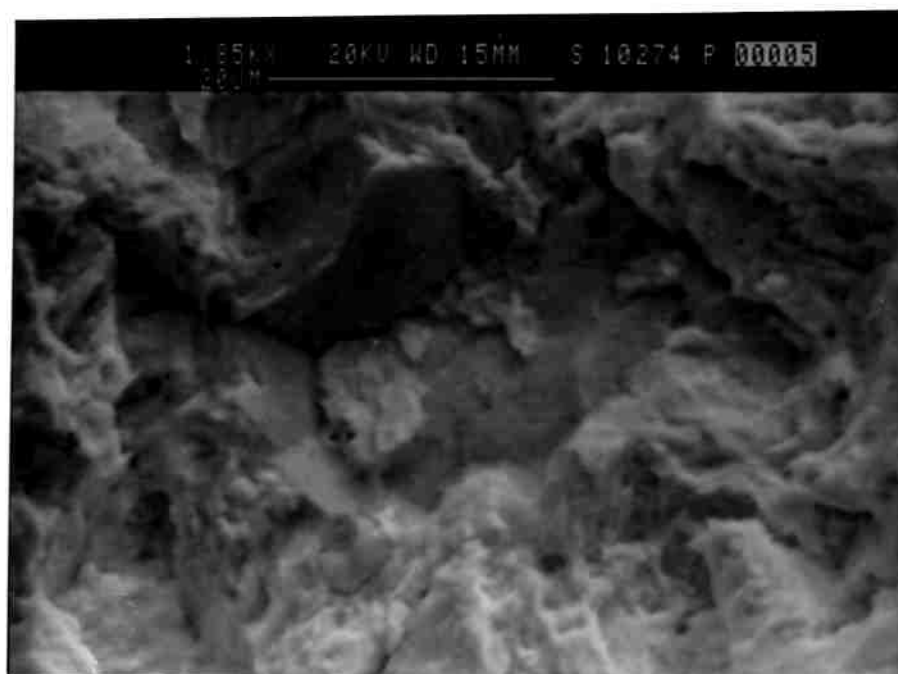


Foto 12 - Fratura do parafuso 1 (com hidrogênio).

Trinca intergranular, provavelmente causada pela presença de hidrogênio.

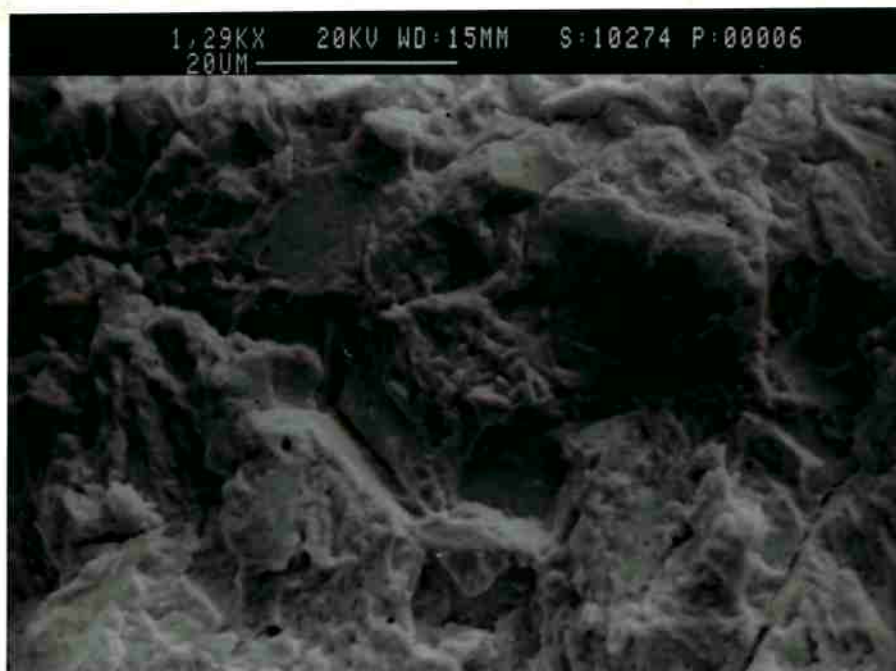


Foto 13 - Fratura do parafuso 1 (com hidrogênio).

Várias regiões de trincamento intergranular.

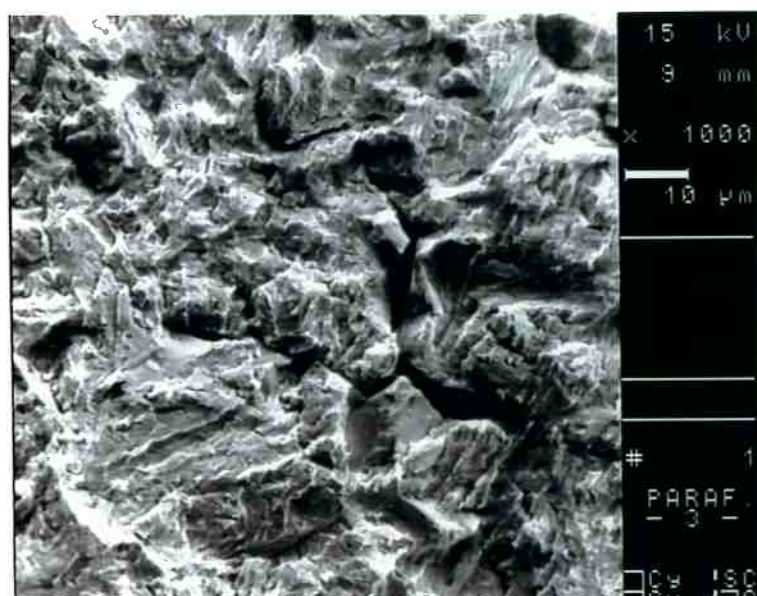


Foto 14 - Fratura do parafuso 3 (com hidrogênio).

Trincas intergranulares provavelmente causadas pelo hidrogênio.

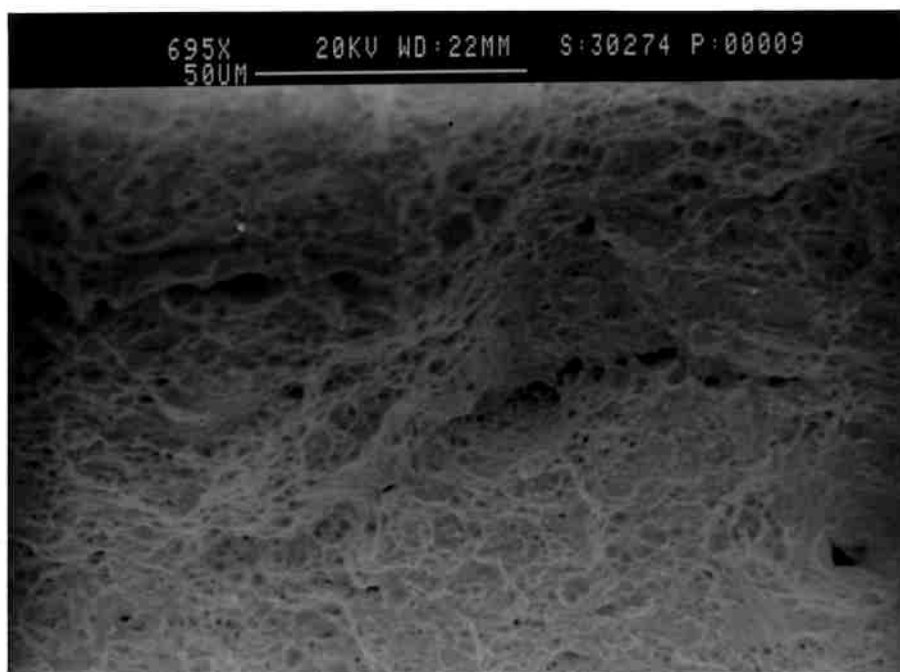


Foto 15 - Fratura do parafuso 3 (com hidrogênio).

Trincas longitudinais na região de final de fratura.

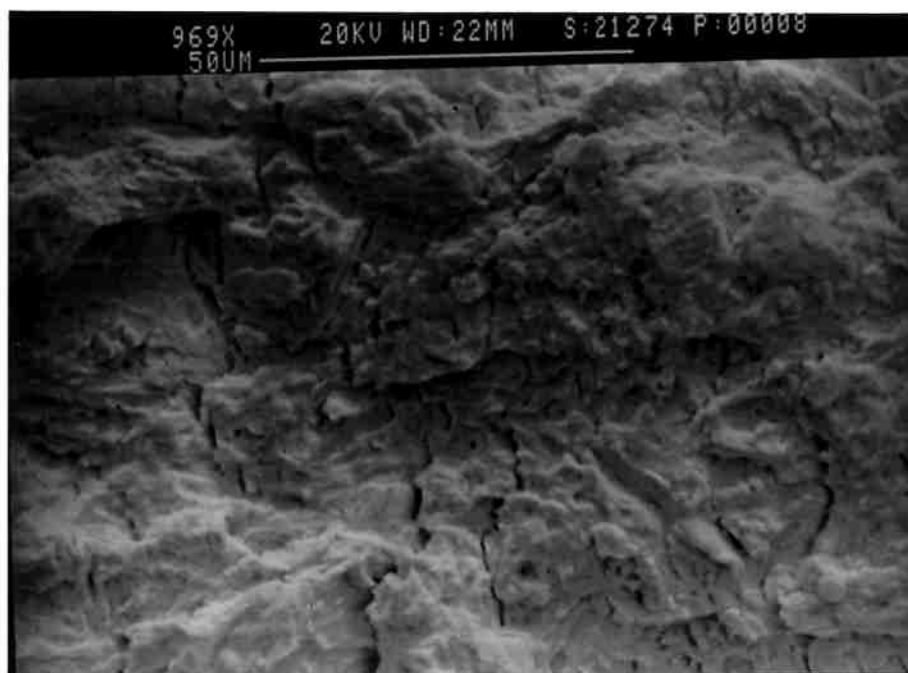


Foto 16 - Fratura do parafuso 5 (sem hidrogênio).

Trincas longitudinais em grande número. Este tipo de trinca não é caracterizado como fragilização por hidrogênio, pois também foram encontradas em parafusos sem hidrogênio.

Os parafusos sem hidrogênio possuem fratura com regiões de estrias de fadiga e com final de fratura alveolar. Possuem também grande número de trincas longitudinais, mas não ocorreu a formação de trincas intergranulares.

4.3 Ensaio de Tração

Foi realizado ainda ensaio de tração nos parafusos com diferentes acabamentos e nos parafusos não desidrogenados. Foram ensaiadas três amostras de cada acabamento.

Os resultados são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 6 - Carga média obtida no ensaio e tração para diferentes acabamentos

Acabamentos	Valor da carga média obtida (lb)
Fosfatizado	9500
Dacromet	9300
Zinco preto	9450
Zinco dicromatizado	9400
Zinco brilhante	9350
Zinco brilhante com hidrogênio	9450

A foto abaixo mostra a máquina de tração utilizada.



Foto 17 - Máquina de tração

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

5.1 Coeficiente de torque

Os coeficientes obtidos para as camadas zincadas foram próximos do esperado. Na literatura elas são classificadas apenas como camadas zincadas e seus coeficientes podem variar de 0,15 a 0,22 conforme mostra as tabelas abaixo.

Tabela 7 - Coeficiente de atrito μ_g para diversas condições de superfície e lubrificação

μ_G	Rosca				Rosca Externa (Parafuso)									
Rosca	—	Material			Aço									
	Material	—	Acabamento Superficial	Processo Fabricação	oxidado ou fosfatizado			zincado eletrolítico		cádmio		ade-sivo		
		Acaba-mento Super-ficial	Cobrea-ção		Rolada		Cor-tada	Rolada ou Cortada						
					seca	ole-ada	MoS ₂	ole-ada	seca	ole-ada	seca	ole-ada	seca	
Rosca Interna (porca)	Aço	sem trata-mento	cortada	seca	0.12 a 0.18	0.10 a 0.16	0.08 a 0.12	0.10 a 0.16	— a 0.20	0.10 a 0.18	—	0.08 a 0.18	0.16 a 0.25	
		zincado			0.10 a 0.16	—	—	—	0.12 a 0.20	0.10 a 0.18	—	—	0.14 a 0.25	
		cádmio			0.08 a 0.14	—	—	—	—	—	0.12 a 0.16	0.12 a 0.14	—	
	GG	sem trata-mento			—	0.10 a 0.18	—	0.10 a 0.18	—	0.10 a 0.18	—	0.08 a 0.16	—	
	Al Mg	sem trata-mento			—	0.08 a 0.20	—	—	—	—	—	—	—	

Tabela 8 - Coeficiente de atrito μ_k para diversas condições de superfície e lubrificação

μ_K	Superfície de Apoio				Cabeça do Parafuso									
Superfície de apoio	----- -	Material		Aço										
	Material	-----	Acabamento Superficial	Oxidado ou fosfatizado						Zinco		Cádmio		
		Acaba- mento Super- ficial	Processo	Forjado a frio			Torneado		poli- do retif.	Forjado a frio				
				Lubri- ficação	seco	ole- ado	MoS ₂	ole- ado	MoS ₂	ole- ado	seco	ole- ado	seco	ole- ado
Superfície de apoio na Junta	Aço	Blank	Polido	Seco	---	0.16 a	---	0.10 a	---	0.16 a	0.10 a	0.08 a	0.08 a	---
			Retific.		-	0.22	-	0.18	-	0.22	0.18	0.14	0.16	-
		Zinco	Usinado		0.12 a	0.10 a	0.08 a	0.10 a	0.08 a	---	0.10 a		0.08 a	0.08 a
					0.18	0.18	0.12	0.12	0.12	-	0.18		0.16	0.14
					0.10 a		---	0.10 a	---	0.10 a	0.16 a	0.10 a	---	---
					0.16		-	0.16	-	0.18	0.20	0.18	-	-
		Cádmio	0.08 a						---	---	0.12 a	0.12 a		
			0.16						-	-	0.20	0.14		
	GG/GTS	Sem Acaba- mento	Polido		---	0.10 a	---	---	---	0.10 a			0.08 a	---
			Retific.		-	0.18	-	-	-	0.18			0.16	-
		Super- ficial	Usinado		---	0.14 a	---	0.10 a	---	0.14 a	0.10 a	0.10 a	0.08 a	---
					-	0.20	-	0.18	-	0.22	0.18	0.16	0.16	-
Al Mg			0.08 a						---	---	---	---		
			0.20						-	-	-	-	-	

Tabela 9 - Coeficiente de torque K

			Coeficiente de atrito na cabeça μ_k						
			0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.20	0.24
Coeficiente de atrito na rosca μ_g	0.08	N	0.118	0.131	0.145	0.158	0.171	0.198	0.225
		F	0.112	0.125	0.139	0.152	0.166	0.192	0.219
	0.10	N	0.128	0.142	0.155	0.169	0.182	0.209	0.235
		F	0.123	0.136	0.150	0.163	0.176	0.203	0.230
	0.12	N	0.139	0.152	0.166	0.179	0.192	0.219	0.246
		F	0.134	0.147	0.161	0.174	0.187	0.214	0.241
	0.14	N	0.150	0.163	0.176	0.190	0.203	0.230	0.256
		F	0.145	0.158	0.172	0.185	0.198	0.225	0.251
	0.16	N	0.160	0.173	0.187	0.200	0.214	0.240	0.267
		F	0.156	0.169	0.182	0.196	0.209	0.234	0.263
	0.20	N	0.181	0.195	0.208	0.221	0.235	0.261	0.288
		F	0.177	0.191	0.204	0.218	0.231	0.258	0.284
	0.24	N	0.208	0.221	0.229	0.248	0.261	0.288	0.309
		F	0.205	0.218	0.226	0.245	0.258	0.285	0.306

As camadas zincadas conforme pode ser visto nas figuras 13 e 15, são basicamente compostas de zinco e cromo. A variação obtida em seus coeficientes deve ser proveniente da morfologia do acabamento, como mostrado nas fotos 2, 4 e 5.

Na camada de zinco preto deveria ter sido encontrado prata junto ao zinco, mas isto não foi detectado pela análise de micro-sonda.

No parafuso zincado dicromatizado, foi observado duas regiões distintas com o uso da imagem BEI. As partes mais escuras vistas na foto 5b correspondem a regiões de maior porcentagem de cromo, como pode ser comprovado na figura 16b, pois as regiões mais claras correspondem aos elementos mais pesados, no caso, o zinco.

A camada de "Dacromet" apresentou coeficiente um pouco menor. O Dacromet consiste de um revestimento por imersão e centrifugação de uma dispersão aquosa de lamelas de zinco, cromo passivado e agentes aglomerantes orgânicos que após uma cura de 300°C apresenta uma proteção metálica cinza.

A camada de "Dacromet" é composta basicamente de alumínio, cromo e zinco (figura 14), sendo que o zinco e o alumínio são adicionados na forma de flocos e o cromo na forma de sais iônicos (Cr^{6+}), e é um revestimento orgânicometálico composto de resina epoxi aquosa, sendo de difícil observação na MEV por não ser condutor, como indicado na foto 3.

Embora tenha apresentado coeficiente menor, a diferença em relação ao acabamento zincado foi pequena. Nas indústrias atualmente dá-se preferência a acabamentos com "Dacromet", pois estes possuem coeficiente de atrito similar ao zincado e apresentam uma resistência à corrosão análoga as peças zincadas eletroliticamente sem o risco da fragilização por hidrogênio que ocorre nas peças zincadas.

O parafuso fosfatizado foi oleado e apresentou o menor coeficiente de torque, que está dentro do especificado, conforme tabelas 7, 8 e 9.

A camada fosfatizada compõe-se basicamente de zinco e fósforo, sendo portanto uma camada de fosfato de zinco. O ferro presente no diagrama da figura 12 deve ser proveniente da própria matéria prima do parafuso, já que a

camada fosfatizada deve ser menor que o alcance da micro-sonda. Nota-se na foto 1 que a camada de fosfato possui uma morfologia bem particular. Esta camada é a que proporciona pior assentamento do parafuso, causando afrouxamento por vibrações.

5.2 Fragilização por hidrogênio

Pelas tabelas 4 e 5 pode-se perceber que o hidrogênio não alterou a vida dos parafusos sob fadiga.

Nas fotos de 7 a 11 podemos notar características de fratura de fadiga, onde o hidrogênio não teve grande influência. Foram observadas estrias de fadiga, degraus e regiões alveolares correspondente ao final de fratura.

Nas fotos 12, 13 e 14 é que percebe-se a presença do hidrogênio já que podem ser observadas trincas intergranulares provavelmente causadas pelo hidrogênio.

Nas fotos 15 e 16 observa-se a presença de trincas longitudinais. A princípio pensou-se que estas trincas fossem provenientes de inclusões alongadas presentes no parafuso. Decidiu-se então cortar o parafuso longitudinalmente. Não foram observadas inclusões longitudinais como pode ser visto na foto 18 e 19. Além disso foi feita a análise química do material, que demonstra pequenas quantidades de impurezas, como mostra a tabela 10 abaixo:

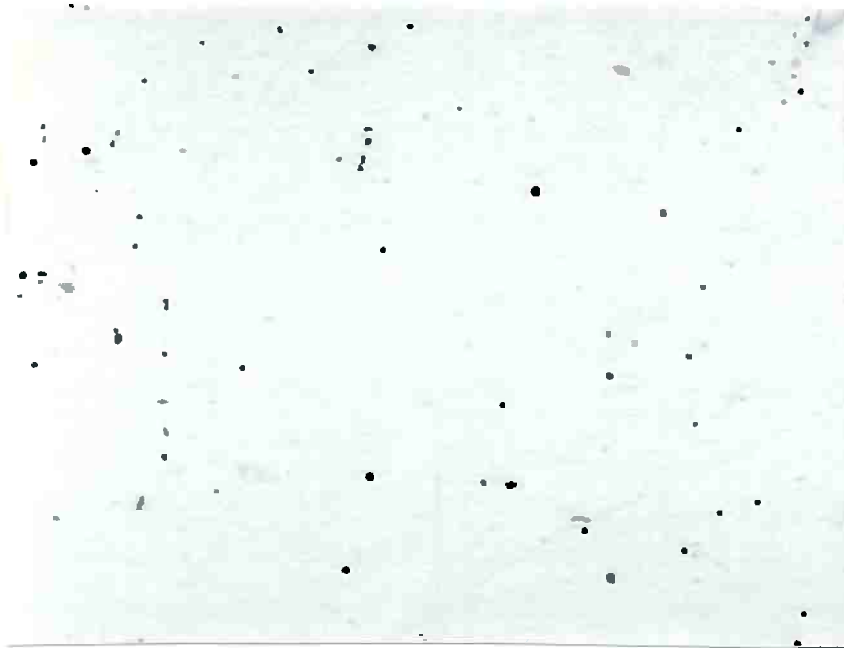


Foto 18 - Inclusões presentes no parafuso com hidrogênio (75 X)



Foto 1. - Inclusões presentes no parafuso sem hidrogênio (75 X)

Tabela 10 - Composição química do Aço SAE 4140 da parafuso

Elemento	Porcentagem encontrada (%)	Especificado(%)
C	0,43	0,36-0,44
Mn	0,65	0,70-1,00
S	0,007	0,040 máx
P	0,015	0,035 máx
Cr	0,82	0,80-1,15
Ni	0,11	-----
Mo	0,20	0,15-0,25
Si	0,18	0,15-0,35
Al	0,02	-----
N	0,007	-----
O	0,020	-----

Portanto pode-se concluir que o hidrogênio não alterou a resistência a fadiga do parafuso, apenas modificou em pontos isolados o mecanismo de fratura, porém sua quantidade não foi suficiente para causar uma fratura totalmente intergranular.

Seria interessante investigar se com frequências de ensaio menores é possível detectar uma maior influência do hidrogênio.

5.3 Ensaio de Tração

As peças com diversos acabamentos não apresentaram grandes variações de carga de tração (tabela 6). Portanto a presença dos acabamentos não influencia a resistência a tração do parafuso.

O parafuso contendo hidrogênio também encontra-se dentro da faixa dos demais, portanto podemos concluir que o hidrogênio também não influencia na resistência a tração do parafuso.

6. ANEXOS

Zn Brilh

	Acabamento:	zincado brilhante					
	Parafuso:	M8 x 1,25					
	Valor da força (kN):	20,0					
	dk=	12,7					
	Db=	9,00					
	p=	1,25					
	d ₂ =	8,00					
	Dkm=	10,97					

Zn preto

	Acabamento: zinco preto						
	Parafuso: M8 x 1,25						
	Valor da força (KN): 20,0						
	dk= 12,7						
	Db= 9,00						
	p= 1,25						
	d ₂ = 8,00						
	Dkm= 10,97						
Peça n°	Força Tensora (KN)	Torque total (Nm)	Torque na rosca (Nm)	Torque na cabeça (Nm)	Coef. de atrito na rosca (μg)	Coef. de atrito na cabeça (μk)	Coef. de torque K
1	22,8	34,5	13,2	20,8	0,082	0,166	0,189
2	23,1	35,8	13,7	21,3	0,085	0,168	0,194
3	24	37,2	14	22,6	0,083	0,172	0,194
média	23,3	35,8	13,6	21,6	0,083	0,169	0,192

Zn Dicrom

Acabamento: zincado dicromatizado							
Parafuso: M8 x 1,25							
Valor da força (kN):							
dk=							
Db=							
p=							
d ₂ =							
Dkm=							
Peça n°	Força Tensora (kN)	Torque total (Nm)	Torque na rosca (Nm)	Torque na cabeça (Nm)	Coef. de atrito na rosca (μg)	Coef. de atrito na cabeça (μk)	Coef. de torque K
1	22,9	35,1	13,7	21,4	0,086	0,170	0,192
2	22,8	34,1	14	20,2	0,089	0,161	0,187
3	23,1	35,9	13,3	22,6	0,081	0,178	0,194
média	22,9	35,0	13,7	21,4	0,085	0,170	0,191

Dacromet

	Acabamento: dacromet						
	Parafuso: M8 x 1,25						
	Valor da força (KN): 20,0						
	dk= 12,7						
	Db= 9,00						
	p= 1,25						
	d ₂ = 8,00						
	Dkm= 10,97						
Peça n°	Força Tensora (KN)	Torque total (Nm)	Torque na rosca (Nm)	Torque na cabeça (Nm)	Coef. de atrito na rosca (μg)	Coef. de atrito na cabeça (μk)	Coef. de torque K
1	23	32,5	14,1	19,6	0,089	0,155	0,177
2	23,2	34	14,3	20,1	0,090	0,158	0,183
3	20,1	30	14,8	20,3	0,116	0,184	0,187
média	22,1	32,2	14,4	20,0	0,098	0,166	0,182

Fosfat

	Acabamento:	fosfatizado					
	Parafuso:	M8 x 1,25					
	Valor da força (kN):	20,0					
	dk=	12,7					
	Db=	9,00					
	p=	1,25					
	d ₂ =	8,00					
	Dkm=	10,97					
Peça nº	Força Tensora (kN)	Torque total (Nm)	Torque na rosca (Nm)	Torque na cabeça (Nm)	Coef. de atrito na rosca (μg)	Coef. de atrito na cabeça (μk)	Coef. de torque K
1	21,3	26,3	14,9	15,1	0,108	0,129	0,154
2	21,5	28,3	14,5	14,9	0,102	0,126	0,165
3	22,1	27,9	13,9	13,5	0,092	0,111	0,158
média	21,6	27,5	14,4	14,5	0,101	0,122	0,159

Fórmulas usadas na planilha

	Acabamento: zinco brilhante			
	Parafuso: M8 x 1,25			
	Valor da força (KN): 20			
	dk= 12,73			
	Db= 9			
	p= 1,25			
	d2= 8			
	Dkm= $=((2*((C4^3)-(C5^3)))/(3*((C4^2)-(C5^2))))$			
Peça n°	Força Tensora (KN)	Torque total (Nm)	Torque na rosca (Nm)	Torque na cabeça (Nm)
1	22,1	35,4	15,6	19,7
2	20,6	35,2	13,4	21,9
3	23,4	35,6	14,9	20,7
média	=MÉDIA(B12;B13;B14)	=MÉDIA(C12;C13;C14)	=MÉDIA(D12;D13;D14)	=MÉDIA(E12;E13;E14)

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Grosstuck, H. K. Comparação de camadas protetivas depositadas eletroliticamente com revestimento a base de zinco, em parafusos. In: 2° SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA E FIXAÇÃO, São Paulo , 1997. Instituto tecnológico de fixação, p.25-42.
2. VOLVO DO BRASIL S.A. Apostila de treinamento sobre a Mecânica da junta rosqueada e técnicas de aperto, p. 03-17.
3. CIOTO, R. Sistemas de aparafusamento - Estágio atual de desenvolvimento da tecnologia de juntas rigidamente fixadas por parafusos, 1994, p.01-12.
4. METALAC S.A. Introdução a tecnologia de juntas rigidamente fixadas por parafusos - Roteiro da cálculo. Departamento da pesquisa e desenvolvimento, p.36-62.
5. CIOTO, R. Comportamento das juntas rigidamente fixadas por parafusos- Cálculos e dimensionamento, Depto de Pesquisa e Desenvolvimento da Metalac S.A., p.10-40, Janeiro 95
6. CIOTO, R.; JUNIOR, I.B. Fadiga em parafusos. In: 2° SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA E FIXAÇÃO, São Paulo , 1997. Instituto tecnológico de fixação, p.59-77.
7. DIETER, G.E. *Mechanical Metallurgy*, Mc Graw-Hill, 2°ed., 1976, p. 344-374.
8. AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Metals Handbook*, vol.11, 9°ed., p.245-251
9. BERNSTEIN, I.M. & THOMPSON, A.W.; An evaluation of hydrogen embrittlement mechanisms, p.412-425.
10. BERNSTEIN I.M., GARBER and PRESSOUYRE, G.M., Effect of hydrogen on the behavior of materials, TMS AIME, New York, 37 , 1976, citado na referência 9.
11. TELEMANN, A .S., Fund. Aspects of stress Corr. Cracking, NACE, Houston, 446 , 1969, citado na referência 9.

12. PATON, N.E. & WILLIAMS, J.C., Hydrogen in metals, ASM, Metals Park, 409, 1974, citado na referência 9.

13. WILLIAMS, D.P. & NELSON, H.G., Met. Trans., 3, 2107, 1972, citado na referência 9.

14. SMITH, G.C., Hydrogen in metals, ASM, Metals Park, 485, 1974, citado na referência 9.

15. FRANDSEN, J.D.; PATON, N.E.; MARCUS, H.L., Met. Trans. 5, 1656, 1974, citado na referência 9.

16. SPEIDEL, M.O. Hydrogen in metals, ASM, Metals park, 249, 1974, citado na referência 9.

17. GREENE, J.A.S.; HAYDEN, H.W. AND MONTAGUE, W.G., Effect of hydrogen on behavior of materials, TMS-AIME, New York, 200, 1976, citado na referência 9.

18. THOMPSON, A.W.; BERNSTEIN, I.M., Advances in corrosion science and technology, Plenum Press, New York, citado na referência 9.

19. GERBERICH, W.W.; GARRY, J.; LESSAR, J.F., Effect of hydrogen on the behavior of materials, TMS-AIME, New York, 70, 1976, citado na referência 9.

20. BASTIEN, P.; Phys. Metallurgy of stress corr. Fracture, Interscience, New York, 311, 1959, citado na referência 9.

21. TIEN, J.K., THOMPSON, A.W.; BERNSTEIN, I.M. and RICHARDS, J. Met. Trans., 7A, 821, 1976, citado na referência 9.

22. THOMPSON, A.W.; Met. Trans. 4, 2819, 1973, citado na referência 9.

23 - STEWART, A.T. The effect of hydrogen on fatigue crack propagation in steels, p.400-411.