

125

MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA
CENTRO TÉCNICO DE AERONÁUTICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

CORROSÃO-SOB-TENSÃO FRATURANTE DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Por: Marco Antonio G. Cecchini

Trabalho apresentado no 1º Simpósio sobre
metais não Ferrosos - CTA, dezembro de 1967

Com: 25 referências bibliográficas

1. Introdução

Corrosão-sob-tensão fraturante (stress-corrosion cracking) é o tipo de prejuízo que pode sofrer um material metálico que fratura sob a ação combinada e sinérgica de esforços mecânicos de tensão e ataque corrosivo. Embora o resultado dêste tipo de corrosão seja tão desastroso, cada fator-tensão aplicada ou residual de um lado e agressividade do meio de outro quando considerado isoladamente, pode situar-se perfeitamente dentro dos limites de segurança, o que é, aliás o caso normal. O esforço de tensão superficial ou sub-superficial, existente no material metálico, sujeito à corrosão sob-tensão fraturante, quase sempre se situa abaixo do limite de escoamento, como foi demonstrado por Dix (1), em 1940. A agressividade do meio corrosivo, de outro lado, pode ser tão baixa, que na ausência de tensões ou mesmo na presença destas, até sobrevir a fratura, não se observa ataque corrosivo algum, praticamente importante. É o caso da água destilada arejada, a temperatura ambiente, que apresenta uma baixíssima velocidade de ataque, superficial, à liga de magnésio com 5% de alumínio, quando não-tensionada, mas que conduz à fratura, quando uma peça da liga se encontra tensionada (2).

Metais puros não estão sujeitos à corrosão-sob-tensão fraturante. Ferro purificado por fusão por zona, contendo menos de 0,01 % de impurezas, sob a ação de esforços de tensão variáveis aplicados, não fratura, nem apresenta trincas superficiais, quando atacado por solução aquosa fervente de nitrato de cálcio e nitrato de amônio, solução

essa empregada nos testes acelerados de corrosão-sob-tensão fraturante de aços (3). A conceituação de metal puro é, obviamente, relativa. No alumínio, teores bem mais elevados de impurezas (0,5%), ainda são insuficientes para susceptibilizar o metal a êsse tipo de corrosão. Alumínio comercialmente puro, do tipo AA (Aluminium Association) Nº 1100 , quer recozido como trabalhado a frio, solicitado por esforços de tensão em presença de solução oxigenada de cloreto de sódio em água é imune à corrosão-sob-tensão fraturante. Essa solução salina, portadora de íons se cloreto, é particularmente agressiva para o alumínio e é, por êste motivo, recomendada nos testes acelerados de corrosão-sob-tensão-de ligas de alumínio.

A pureza metálica tem sido utilizada como critério absoluto de imunidade à corrosão-sob-tensão fraturante. Barnartt (4), por exemplo, recomenda a recíproca como critério de pureza. A fratura por corrosão-sob-tensão num metal supostamente puro é sinal de contaminação.

Ligas metálicas, as que são macroscopicamente dúteis (5), estão, em geral, sujeitas à corrosão-sob-tensão fraturante. A liga pode ser intrinsecamente susceptível ou pode ser sensibilizada pela ação de vários fatores que serão analisados no caso do alumínio.

2. Corrosão-sob-tensão nas ligas de alumínio

Ligas de alumínio trabalháveis ou fundidas, dependendo da composição química, de têmpera, das dimensões da peça e da direção e magnitude da tensão, estão sujeitas à corrosão-sob-tensão. As combinações mais adequadas dêsses fatores, visando reduzir a um mínimo o prejuízo ao metal têm sido objeto de estudo incessante (6). A quantidade de conhecimento já reunida sobre o assunto é tal a garantir uma razoável segurança na utilização dessas ligas e a reduzir os relativamente poucos casos de fratura registrados, nas ligas de alumínio de alta resistência, àqueles casos onde existem tensões residuais (ou criadas nas operações de montagem), superiores a conhecidos valores mínimos, atuando de maneira contínua na direção transversal curta do produto , em geral na condição de têmpera menos adequada.

Ligas de alumínio, susceptíveis à corrosão-sob-tensão, também podem sofrer outros tipos de corrosão, que por baixarem de forma apreciável a resistência mecânica, também podem conduzir à fratura. É a

corrosão intergranular e a corrosão lamelar ou por esfoliação, que não devem ser confundidas com a corrosão-sob-tensão.

3. Efeito da composição química e microestrutura da liga na susceptibilização à corrosão-sob-tensão fraturante

Além do alumínio comercialmente puro - e com maior razão o alumínio de alta pureza - somente são imunes à corrosão-sob-tensão as ligas onde o elemento principal é o manganês (ligas AA, Nº 3000). As demais ligas comerciais podem ser susceptibilizadas à corrosão-sob-tensão, fraturando ou desenvolvendo fissuras, em serviço ou em laboratório. É sabido que a resistência à corrosão química do alumínio, na ausência de esforços de tensão estáticos ou cíclicos, é diminuída quando são acrescentados elementos de liga, quer sejam êles mais nobres ou menos nobres do que o metal base. Exceptua-se o manganês que em certos casos pode implementar a resistência do alumínio comercialmente puro, conforme se depreende do estudo da bibliografia reunida por Whitaker (7) sobre o assunto.

Existe, no caso do alumínio, um certo paralelismo entre a resistência intrínseca da liga à corrosão química e a susceptibilização à corrosão-sob-tensão. As ligas que contém zinco (tipo AA Nº 7000) e cobre (tipo AA Nº 2000), menos resistentes à corrosão química, são as mais susceptíveis à corrosão-sob-tensão.

As Tabelas 1 a 5 anexas reúnem as ligas e as condições de tempera que as sensibilizam à corrosão-sob-tensão, segundo dados fornecidos por Jackson e Boyd (6), Sperry (8), Dix (9), Niederberger, Basil e Bedford (10) e Reinhartt e Gerhold (11). Nas Tabelas 1 e 2 foram incluídas as ligas trabalháveis e fundidas e respectivas temperaturas onde as fraturas foram observadas em serviço.

Depreende-se dessas duas Tabelas, que são intrinsecamente susceptíveis à corrosão-sob-tensão as ligas trabalháveis de alumínio contendo cobre ou zinco e as ligas de fundição que contêm êsses elementos e mais as que contêm porcentagens elevadas de magnésio (10%). Essas ligas falham também nos testes acelerados de laboratório. As condições de tempera também são importantes, observando-se que em muitas ligas a corrosão-sob-tensão decorre de envelhecimento artificial que se segue ao tratamento de solubilização (tempera T-6). É considerada, em geral, de pequena importância a incidência da corrosão-sob-tensão

entre as ligas de alumínio fundidas (12). No entanto, muitas peças fundidas em liga 220 T-4, de uso aeronáutico, falharam em serviço por corrosão-sob-tensão fraturante (13).

As Tabelas 3 a 5 incluem outras ligas assim como outras tâmporas das ligas incluídas nas Tabelas 1 e 2 que fraturaram por corrosão-sob-tensão em testes acelerados de laboratório. Êsses testes são, em geral, realizados por imersão alternada do corpo de prova tensionado no nível desejado, em solução aquosa de 57g de cloreto de sódio por litro de água, podendo ainda conter água oxigenada. Essas ligas, nas respectivas tâmporas indicadas, sòmente falham em testes de laboratório e mesmo assim, em alguns casos, sem muita concordância entre os resultados relatados pelos diversos experimentadores. Dix e col. (14) afirmam que a liga 6061 T-6 é imune à corrosão-sob-tensão.

Sòmente em casos muito especiais deve-se esperar que uma liga susceptível à corrosão-sob-tensão em laboratório venha a falhar em serviço. Ê sabido ser baixa a correlação entre os ensaios de laboratório e o comportamento prático (15).

Considerando os ensaios de laboratório verifica-se que o magnésio associado ou não a quantidades apreciáveis de silício, susceptibiliza a liga trabalhável. Foi determinado por Vance (16) que a menor porcentagem de magnésio necessária à susceptibilização é de 2%. Êste resultado contradiz a Regra de Graf (17) segundo a qual sòmente os elementos de liga mais nobres que o metal base condicionam a corrosão-sob-tensão.

Não foi ainda estabelecido um mínimo de porcentagem de cobre nas ligas AA 2000, nem na porcentagem de zinco, nas ligas AA 7000. Admite-se que seja da mesma ordem de grandeza que o magnésio,

Porcentagens pequenas dêsses elementos, como as que normalmente ocorrem nas ligas de alumínio, são incapazes de susceptibilizar a corrosão-sob-tensão. Também não tem influência alguma nêsse tipo de corrosão os demais elementos de liga, salvo o crômio nas ligas AA 7000. Ligas preparadas com alumínio e magnésio puros também fraturam - por corrosão-sob-tensão (18).

As ligas de alumínio comerciais do tipo AA 2000, 5000, ... 6000 e 7000, em certas condições de tâmpora, são, pois, susceptíveis à

corrosão-sob-tensão. Para que ocorra a fratura, porém, é preciso que ainda atuem outros fatores. Não é apenas um fator que determina a corrosão-sob-tensão, mas a ação simultânea de pelo menos quatro deles, dos quais dois já foram analisados.

4. Meio corrosivo na corrosão-sob-tensão fraturante

Em geral, nos fenômenos de corrosão-sob-tensão, existe uma especificidade do meio corrosivo (4). No caso das ligas de alumínio essa especificidade parece não existir. A própria umidade atmosférica condensada pode atuar como meio corrosivo. Já em 1913 foram registradas por Cohn (19) fraturas em ligas de alumínio e zinco expostas ao ar, devidas à corrosão-sob-tensão.

Meios capazes de destruir a apassivação do alumínio, como são os meios que contêm íons halogenetos, aceleram a corrosão-sob-tensão. Água do mar e resíduos úmidos da combustão de gasolinas etiladas, resíduos êsses que contêm brometo de chumbo, são particularmente agressivos.

5. Tensão na corrosão-sob-tensão fraturante

Obviamente é necessária a presença do esforço de tensão no material para que êle sofra êste tipo de corrosão. Nos açossinoxidáveis, qualquer tensão, por menor que seja, em certos meios específicos, conduz à fratura por corrosão-sob-tensão. Nas ligas de alumínio as tensões que levam à fratura devem superar certos valores mínimos que dependem da natureza da liga, da têmpera e da direção da tensão. Em produtos laminados ou extrudados ocorre uma deformação longitudinal dos grãos na direção trabalhada o que lhes confere caráter anisotrópico. Sob o ponto de vista da corrosão-sob-tensão as tensões na direção transversal curta são as mais prejudiciais; as tensões na direção longitudinal são as menos prejudiciais (15).

Entre as ligas trabalháveis incluídas na Tabela 1, o valor mínimo de tensão é de pelo menos dois terços do limite de escoamento, quando considerada a direção longitudinal; êsse mínimo se reduz a apenas dez por cento do limite de escoamento, quando considerada a direção transversal curta. Tensões, portanto, da ordem de 5kg/mm^2 , na direção transversal curta de um laminado de 7178 T-6 pode levar à fratura. Tensões residuais superficiais, resultantes de operações de monta-

gem ou de tratamentos térmicos podem superar de muito a êsse limiar.

6. A. importância do fator eletroquímico na corrosão-sob-tensão

O fator eletroquímico deve ser analisado quer sob o ponto de vista microscópico, ou seja, da microestrutura da liga, como sob o ponto de vista macroscópico, isto é, dos contactos galvânicos da liga com outro ou outros materiais metálicos.

Nas ligas de alumínio a susceptibilidade à corrosão-sob-tensão está associada a uma heterogeneidade eletroquímica da microestrutura. Devido a fenômenos de precipitação de compostos intermetálicos na região intergranular, que ocorrem no envelhecimento natural ou artificial da liga, a região intergranular se torna anódica em relação ao corpo do grão (20). A corrosão eletroquímica começa, portanto, pela região intergranular; a tensão se concentra na base de um dos alvéolos formados (efeito de entalhe) e impede que o produto da corrosão, como é normal, se interponha, entre o metal e o meio, protegendo aquêle. Películas de produtos de corrosão sob a ação da tensão se rompem; a corrosão penetra pela região intergranular e abre uma fissura no metal, reduzindo de forma desastrosa a seção da peça, que sob a ação do próprio peso pode se romper. A fratura nas ligas de alumínio, resultantes da corrosão-sob-tensão, são tipicamente intergranulares. A natureza anódica da região intergranular foi provada experimentalmente por Dix e col. (21) e por Colner e Francis (22); as medidas de Dix, realizadas em 1940, deram a base experimental para a teoria eletroquímica da corrosão-sob-tensão, formulada por êsse pesquisador.

Em certas condições, o mecanismo de fratura, resulta de um processo cíclico de desgaste eletroquímico e fratura mecânica, comprovado experimentalmente por Gilbert e Hadden (23) no caso da liga com 7% de magnésio e por Rooyen (24) no caso da liga com 4% de cobre.

A Tabela 6 (anexa) contém reunidos, para efeito de comparação, os potenciais de algumas soluções sólidas e compostos intermetálicos, constituintes de ligas de alumínio. As medidas, feitas nos laboratórios da ALCOA, se referem a soluções aquosas de 53g de cloreto de sódio e 3g de água oxigenada por litro de água, a 25°C, e na escala do eletrôdo de calomelano decinormal (14).

O mecanismo eletroquímico sugere que contactos galvânicos de ligas de alumínio com outros materiais metálicos possam ter efeito

acelerador ou retardador da corrosão-sob-tensão. A Tabela 7 (anexa) reúne valores de potenciais de algumas ligas de alumínio ao lado de outros materiais metálicos, medidos nas condições mencionadas na Tabela 6. Contactos galvânicos com materiais metálicos menos nobres oferecem proteção catódica. A corrosão-sob-tensão pode ser evitada, ou, se iniciada, pode ser sustada (25). Nas ligas tipo alclad o alumínio fornece proteção catódica às ligas de maior resistência mecânica que se encontram cladizadas. A resistência à corrosão-sob-tensão dos alclad é muito elevada e, sob o ponto de vista da aplicação, estes materiais devem ser considerados imunes à corrosão-sob-tensão (15).

Contactos galvânicos com materiais metálicos mais nobres, de outro lado, devem acelerar o processo de corrosão-sob-tensão. Muito pouca experiência foi acumulada nesse assunto, ou pelo menos, muito pouco se tem publicado, sobre ele. Por isso iniciamos nos laboratórios do ITA um estudo sistemático do efeito dos contactos galvânicos com materiais mais nobres (cobre e aço inoxidável) com ligas de alumínio intrinsecamente susceptíveis à corrosão-sob-tensão (ligas do tipo AA2000, 5000 e 7000). Os primeiros resultados obtidos por Egberto Vana, não publicados, mostram que o contacto galvânico não tem efeito algum acelerador da corrosão-sob-tensão, quando as ligas se encontram nas suas melhores condições de tempera. O contacto galvânico anódico é, pois, incapaz de susceptibilizar a liga.

7. Bibliografia

- (1) - E.H.Dix, Jr., Transactions Inst. of Metals Div., Am.Inst.Mining and Metallurgical Engns., Vol. 137, p.11, 1940.
- (2) - E.C.W.Perryman, J.Inst.Metals, Vol.78, p.621, 1951.
- (3) - R.N.Parkins, J.Iron Steel Inst., Vol.172, p.149, 1952.
- (4) - S.Barnartt, Corrosion, Vol. 18, p.323t, 1962
- (5) - T.P.Hoar, Corrosion, Vol. 19, p. 337t, 1963.
- (6) - J.D.Jackson e W.K.Boyd, Defense Metals Information Center - Memorando 202/1965.
- (7) - M.Whitaker, Metal Industry, Vol. 80, p.185, 7 de março, 1952.
- (8) - P.R.Sperry, Olin Mathieson Chemical Corp., Report nº MRL-60-PR - 17, outubro de 1960; ASTIA - AD - 24410.
- (9) - E.H.Dix, Jr., Metal Progress, Vol.56, p.803-806, dezembro, 1949.
- (10) - R.B.Niedelberger, J.L.Basil e G.T.Bedford, Corrosion, Vol.22, p.68-63, 1966.
- (11) - Fred M.Reinhartt e William F.Gerhold, Corrosion, Vol.18,p.158-162t 1962.
- (12) - E.H.Dix,Jr., Corrosion of Metals, ASM, 1946, p.148.
- (13) - Fred M.Reinhart, Corrosion, Vol. 13, p.1-2t, 1957.
- (14) - E.H.Dix, Jr., R.H.Brown e W.W.Binger, Metals Handbook,Vol.1,ASM, 1962, p.919.
- (15) - D.O.Sprows e R.H.Brown,Metal Progress, Vol.81,p.81, abril,1962.
- (16) - W.J.Vance, J.appl.Chem., Vol.8, p.18-23, 1958.
- (17) - L.Graf, p.53 em W.D.Robertson, Stress Corrosion Cracking and Embrittlement, John Wiley, New York, 1956.
- (18) - P.Brenner e W.Roth, J.Inst.Metals, Vol.74,p.159, 1948.

- (19) - Cohn, Elettrotechnik u. Maschinenbau, Vol.31, p.430-433, 1913; R.B. Mears, R.H. Brown e E.H. Dix, Jr., Symposium on Stress Corrosion Cracking, ASTM-AIME, 1945.
- (20) - E.C.W. Perryman, p.61-80, em W.D. Robertson "Stress Corrosion Cracking and Embrittlement", John Wiley e Sons, New York, 1956.
- (21) - R.B. Mears, R.H. Brown e E.H. Dix, Jr., Symposium on Stress Corrosion Cracking of Metals, ASTM-AIME, p.325, 1945.
- (22) - W.H. Colner e H.T. Francis, J. Electrochem. Soc., Vol.105, p.377, 1958.
- (23) - P.T. Gilbert e S.E. Hadden, J. Inst. Metals, Vol.77, p.237, 1950.
- (24) - D. van Rooyen. Corrosion Vol.16, p.421-429t, 1960.
- (25) - C. Edeleanu, J. Inst. Metals, Vol.80, p.187, 1951-1952.

T A B E L A 1 : CORROSÃO SOB-TENSÃO-FRATURANTE

EM SERVIÇO

LIGAS TRABALHÁVEIS DE ALUMÍNIO

LIGA Nº AA	COMPOSIÇÃO % principais elementos	TÊMPERA (ASTM)	RES. TRACÇÃO Kg/mm ²
2014	3,9-5,0 [Cu]; 1,0 Fe; 0,5-1,2 Si	T-4	43 (*)
	0,4-1,2 Mn; 0,2-0,8 Mg; 0,25 Zn	T-6	49 (*)
	0,10 Cr; 0,15 Ti		
2024	3,8-4,9 [Cu]; 0,5 Fe; 0,5 Si	T-3	49 (*)
	0,3-0,9 Mn; 1,2-1,8 Mg; 0,25 Zn	T-4	47,5 (*)
	0,1 Cr	T-6	47,5
2219	5,6-6,8 [Cu]; 0,3 Fe; 0,20 Si	T-3	-
	0,20-0,40 Mn; 0,02 Mg; 0,1 Zn	T-4	-
	0,02-0,10 Ti; 0,10-0,25 Zr		
	0,05-0,15 V		

LIGAS TRABALHÁVEIS NA FORJA

7075	5,1-6,1 [Zn]; 1,2-2,0 Cu	T-6	58 (*)
	0,7 Fe; 0,50 Si; 0,30 Mn		
	2,1-2,9 [Mg]; 0,18-0,40 Cr		
	0,20 Ti		
7079	3,4-4,8 [Zn]; 0,4-0,8 Cu; 0,4 Fe	T-6	54,5 (*)
	0,3 Si; 0,10-0,30 Mn; 2,9-3,7 [Mg]		
	0,10-0,25 [Cr]; 0,10 Ti		
7178	6,3-7,3 [Zn]; 1,6-2,4 Cu; 0,7 Fe	T-6	61,5 (*)
	0,50 Si; 0,30 Mn; 2,4-3,1 [Mg]		
	0,18-0,40 [Cr]; 0,20 Ti		

(*) Metals Handbook, ASM, 8th Edition, 1961.

T A B E L A 2 : CORROSÃO SOB-TENSÃO-FRATURANTE

EM SERVIÇO

LIGAS DE FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO

LIGA Nº ALCOA	COMPOSIÇÃO % principais elementos	TÊMPERA (ASTM)	RES. TRACÇÃO Kg/mm ²
40E	5,0-7,0 Zn ; 0,50-0,65 Mg 0,4-0,6 Cr; 0,10-0,25 Ti 0,30 Cu; 1,0 Fe; 0,30 Si	F	24,5 (*)
195	4,0-5,0 Cu ; 1,0 Fe; 1,5 Si 0,35 Mn; 0,03 Mg; 0,35 Zn 0,25 Ti	T-6	25 (*)
B195	4,0-5,0 Cu ; 1,2 Fe; 2,0-3,0,0 Si 0,35 Mn; 0,05 Mg; 0,50 Zn; 0,25 Ti 0,35 Ni	T-6	28 (*)
220	9,5-10,6 Mg ; 0,20 Cu; 0,30 Fe 0,25 Si; 0,25 Ti; 0,15 Mn; 0,10 Zn	T-4	33,5 (*)

(*) Metals Handbook, ASM, 8th Edition, 1961.

T A B E L A 3 : CORROSÃO SOB-TENSÃO-FRATURANTE APENAS NO
LABORATÓRIO

LIGAS TRABALHÁVEIS DE ALUMÍNIO - endurecidas por deformação a frio

LIGA Nº AA	COMPOSIÇÃO % principais elementos	TÊMPERA (ASTM)	RES. TRACÇÃO Kg/mm ²
5083	4,0-4,9 Mg ; 0,30-1,0 Mn 0,40 Si; 0,40 Fe; 0,10 Cu 0,05-0,25 Cr; 0,25 Zn 0,15 Ti	especial- mente pro- vocada	29-30 (*)
5086	3,5-4,5 Mg ; 0,20-0,7 Mn 0,40 Si; 0,50 Fe; 0,10 Cu 0,05-0,25 Cr; 0,25 Zn 0,15 Ti	O; H-32; H-34; H-112	26,5 - - 29 (*)
5356	5,0 Mg ; 0,12 Mn; 0,1 Cu 0,50 Fe+Si; 0,12 Cr; 0,10 Zn 0,15 Ti	especial- mente pro- vocada	-
5456	4,7-5,5 Mg ; 0,50-1,0 Mn 0,10 Cu; 0,05-0,20 Cr 0,40 Fe+Si; 0,25 Zn; 0,20 Ti		31,5 - - 35,5 (*)

(*) Metals Handbook, ASM, 8th Edition, 1961.

TABELA 4 : CORROSÃO SOB-TENSÃO-FRATURANTE APENAS NO
LABORATÓRIO

LIGAS TRABALHÁVEIS DE ALUMÍNIO - tratáveis termicamente

LIGA Nº AA	COMPOSIÇÃO % principais elementos	TÊMPERA (ASTM)	RES. TRACÇÃO Kg/mm ²
2024	3,8-4,9 Cu ; 0,5 Fe; 0,5 Si 0,3-0,9 Mn; 1,2-1,8 Mg; 0,25 Zn 0,1 Cr (TAB.1)	T-8 (T-81 e T-86)	45,5- 49 (*)
2219	5,6-6,8 Cu ; 0,3 Fe; 0,20 Si 0,20-0,40 Mn; 0,02 Mg; 0,1 Zn 0,02-0,10 Ti; 0,10-0,25 Zr 0,05-0,15 V (TAB.1)	T-6 T-8	48,5 -
LIGAS DE FORJA			
6061	0,8-1,2 Mg ; 0,4-0,8 Si ; 0,15-0,40 Cu; 0,7 Fe; 0,15 Mn 0,25 Zn; 0,15-0,35 Cr; 0,15 Ti	0; T-4 T-6; T-7	12,5- 31,5 (*)
6066	0,8-1,4 Mg ; 0,9-1,8 Si ; 0,7-1,2 Cu; 0,50 Fe; 0,6-1,1 Mn 0,4 Cr ; 0,20 Ti	T-6	42
6151	0,6-1,2 Si ; 0,45-0,8 Mg ; 0,15-0,35 Cr ; 1 Fe; 0,35 Cu; 0,20 Mn; 0,25 Zn; 0,15 Ti	0; T-4 T-6	33,5 (*) (T-6)
6351	0,4-0,8 Mg ; 0,7-1,3 Si ; 0,10 Cu; 0,50 Fe; 0,4-0,8 Mn 0,20 Ti	T-4 T-6	24,5 29
7075	5,1-6,1 Zn ; 1,2-2,0 Cu; 0,7 Fe 0,50 Si; 0,30 Mn; 2,1-2,9 Mg ; 0,18-0,40 Cr; 0,20 Ti (TAB.1)	T-73	49,5

(*) Metals Handbook, ASM, 8th Edition, 1961.

T A B E L A 5 : CORROSÃO SOB-TENSÃO-FRATURANTE APENAS NO
LABORATÓRIO

LIGAS DE FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO

LIGA Nº (ALCOA)	COMPOSIÇÃO % principais elementos	TÊMPERA (ASTM)	RES. TRACÇÃO Kg/mm ²
319	3,0-4,5 [Cu] ; 5,5-7,0 [Si] ; 1,20 Fe; 0,50 Mg; 0,80 Mn 1,0 Zn ; 0,50 Ni; 0,20 Ti	F	19 (*)
333	1,25 [Cu] ; 5,0 [Si] ; 0,2 Fe 0,5 Mg; 0,1 Zn; 0,5 Ni	F	23,5
355	4,5-5,5 [Si] ; 1,0-1,5 [Cu] ; 0,4-0,6 [Mg] ; 0,6 Fe; 0,50 Mn 0,3 Zn; 0,25 Cr; 0,25 Ti	T-6 T-61	24,5- - 29 (*) 27 (*)
C355	4,5-5,5 [Si] ; 1,0-1,5 [Cu] ; 0,4-0,6 [Mg] ; 0,6 Fe; 0,50 Mn 0,3 Zn ; 0,25 Cr; 0,25 Ti	T-6 T-61	24,5 - - 29 (*) 27 (*)

(*) Metals Handbook, ASM, 8th Edition, 1961.

T A B E L A 6 : POTENCIAIS DAS SOLUÇÕES SÓLIDAS E COMPOSTOS INTERMETÁLICOS PRESENTES NAS LIGAS DE ALUMÍNIO.

<u>Solução sólida ou</u> <u>Componente da liga</u>	<u>Potencial</u> <u>em volt</u>	
Mg ₅ Al ₈	-1,24	ANÓDICOS ↑ ↓ CATÓDICOS
Al + 4% Zn em solução sólida	-1,05	
MgZn ₂	-1,05	
Al + 1% Zn em solução sólida	-0,96	
Al + 7% Mg em solução sólida	-0,89	
Al + 5% Mg em solução sólida	-0,88	
Al + 3% Mg em solução sólida	-0,87	
MnAl ₆	-0,85	
Alumínio (99,95%)	-0,85	
Al + 1% Mg ₂ Si	-0,83	
Al + 2% Cu em solução sólida	-0,75	
CuAl ₂	-0,73	
Al + 4% Cu em solução sólida	-0,69	

T A B E L A 7 : POTENCIAIS DE LIGAS DE ALUMÍNIO E ALGUNS
OUTROS METAIS T4 T6 .

<u>Material metálico</u>	<u>Potencial, em volt</u>		
Magnésio	-1,73	↑ ANÓDICO	
Zinco	-1,10		
3003 Alclad; 6061 Alclad;			
7075 Alclad	-0,96		
220-T4	-0,92		
7079-T6; 5456; 5083	-0,87		
5086	-0,85		
Alumínio (99,95%)	-0,85		
1100; 3003; 6061-T6; 2014 Alclad; 2024 Alclad	-0,83		↓ CATÓDICO
Cádmio	-0,82		
7075-T6; 356-T6	-0,81		
2024-T81; 6061-T4	-0,80		
355-T6	-0,79		
2014-T6	-0,78		
333-F	-0,75		
195-T6	-0,73		
B195-T6	-0,72		
2014-T4; 2024-T3 e T4	-0,68 a -0,70		
Aço-doce	-0,58		
Estanho	-0,49		
Cobre	-0,20		
Aços inoxidáveis			
AISI série 300 e 430	-0,09		
Níquel	-0,07		
Crômio	-0,49 a + 0,018		

CORROSÃO SOB TENSÃO FRATURANTE DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Marco Antônio G. Cecchini (1)

DEBATE:

Stênio (2)

- Em primeiro lugar, quero me congratular com o Prof Cecchini pelo brilhante trabalho com que êle acabou de nos brindar, no qual aborda problemas de Corrosão sob Tensão, assunto que para nós, da Fôrça Aérea, tem uma importância muito grande, uma vez que utilizamos justamente as críticas ligas à base de Cu e de Zn da classe 20XX e da classe 70XX. Gostaria de perguntar, inicialmente, se a corrosão sob tensão, pode ser, nessas ligas, transgranular, isto é se ela pode desenvolver através dos planos cristalinos.

Cecchini

- A sua pergunta se refere à classe 20XX ou ... 70XX?

Stênio

- Gostaria inicialmente, de saber a respeito das ligas da classe 70XX.

Cecchini

- Não se conhece nenhum caso de corrosão transgranular nessas ligas de alumínio. Em outras ligas, como os aços inoxidáveis, por exemplo, a corrosão é tipicamente, transgranular; excepcionalmente intergranular. .

Stênio

- Outra pergunta: A corrosão sob tensão se desenvolve sempre da superfície para o núcleo ?

Cecchini

- Ela se desenvolve da superfície para o núcleo, porque é preciso estabelecer um contato entre a liga e o meio de ataque químico o qual atua na nucleação da fratura que começa, então, da superfície.

Stênio

- Isto então significa que, por exemplo, um perfil extrudado, quando protegido por uma pintura ou um anti-corrosivo qualquer, poderia impedir o processo de corrosão sob tensão?

Cecchini

- Exatamente. Qualquer proteção que se dê ao material metálico no sentido de se impedir o ataque químico, significa eliminação de um dos fatores da corrosão sob tensão. E se nós cortarmos um deles, nós eliminamos o problema. Uma das formas de eliminação é a pintura à base de cromato de zinco que é muito eficiente.

Stênio

- Temos tido muitos problemas de corrosão sob tensão em estruturas, principalmente em asas, onde elas se desenvolvem sob a pintura e sob a camada de cromato de zinco. Esse processo poderia ser atribuído a uma proteção inadequada, uma pintura mal conduzida, mal feita ou mal executada?

Cecchini

- Exato. Todas as películas de pintura são mais ou menos permeáveis à umidade sobretudo se mal aplicadas ou mal conservadas. A pintura à base de cromato de zinco acaba deixando penetrar umidade durante um armazenamento prolongado. O tipo de corrosão que se encontra poderá ser corrosão sob tensão mas, normalmente é uma corrosão intergranular. De qualquer forma, a película de cromato de zinco, deve atuar como um inibidor de corrosão e pode deixar a desejar isto em alguns casos raros deixando penetrar a umidade.

Stênio

- Outro ponto é o seguinte: em experiências conduzidas por nós foram controlados os efeitos de corrosão, por perda de peso, obtendo perdas insignificantes. A Norma MIL 6088 recomenda um procedimento no qual o controle, podemos dizer metalográfico. O Metals Handbook apresenta, por exemplo, uns 4 tipos diferentes, que são classificados como A, B, C, D, etc....

Esse processo é difícil de se avaliar, aqui, nos ensaios comparativos entre dois materiais, duas ligas qual a mais susceptível à corrosão e qual a menos, isto é, como avaliar, como se pode atribuir um grau de susceptibilidade à corrosão, tomando por base essa norma. O Sr por acaso considerou essa hipótese?

Cecchini

- Não. São dois ensaios diferentes a que nós estamos nos referindo. O que eu menciono no trabalho se refere a um ataque eletroquímico do material que é colocado dentro do agente corrosivo, por exemplo, um sal, ou um ácido. Há um ataque do metal. A perda de peso, aí tem realmente, sentido. Agora, numa corrosão intergranular, a que se refere a norma MIL-H... 6088, a variação de massa não é significativa, e qualquer medida baseada na variação de massa seria completamente, vamos dizer inadequada para o fim. Nessa norma o importante é a análise da micro estrutura e a verificação de penetração da corrosão, dentro da micro estrutura.

Stênio

- O difícil é fazer uma comparação, uma avaliação dos efeitos por esse processo.

Airton (3)

- Como o conferencista citou, o que é de nosso conhecimento, a chapa 2024 -alclad não é susceptível à corrosão sob tensão. No entanto, motivado pelo tratamento térmico mal feito há possibilidade de difusão do Cu-Si do núcleo pa

ra a camada de alumínio. Até que ponto ou até que nível essa difusão pode susceptibilizar o material à corrosão sob tensão?

Cecchini

- Existe uma norma que estabelece que os tratamentos térmicos nas 2024-alclad não podem ser feitos mais do que duas vezes, por causa desse problema da difusão do Cu. Um tratamento térmico adequado, vai depender também da espessura do laminado. Em geral pode ser repetido duas ou três vezes em condições tais a evitar que o Cu atinja a superfície, ou seja, di funda pela camada de alumínio e por consequente prejudique a eficiência protetora dessa ca mada. Acredito que a corrosão sob tensão no alclad nunca chegará a ser grave pois será pre ciso que o alumínio por difusão apresente uma porcentagem bastante elevada de Cu; mais do que 2%. Uma porcentagem tão elevada somente po deria ser alcançada por um aquecimento muito forte, exagerado, durante muito tempo.

Tibor Vass (4)

- Uma vez que sabemos que nos EEUU existe experiência a respeito da corrosão provocada por vibrações em pistas de rolamento, gostaria de saber se experiências semelhantes com Alumínio, ou melhor, com ligas de Alumínio existem no país.

Cecchini

- Não, ainda, Nesse caso, estamos diante de um outro problema que se chama "corrosão sob fadiga", um problema que envolve um esforço de tensão cíclico. Nós estamos restringindo os nossos estudos a esforços de tensão estáticos. Esforços cíclicos também conduzem a fraturas. Na aeronáutica, o problema é ainda mais grave. É corrosão sob fadiga. Não é do meu conhecimento a existência de estudos de corrosão sob fadiga em ligas de alumínio no país. Não quero dizer com isto que não existam mas, simples mente que eu não sei de sua realização no Bra

sil.

Mannheimer (5)

- Queria perguntar ao Prof Cecchini, se há algum projeto de continuação dos seus trabalhos no sentido de estudar o nível do conteúdo de oxigênio nas soluções que estão atuando na corrosão das ligas de alumínio. Estou particularmente, interessado nisto, porque o meu trabalho, é em aço inoxidável, e lá naturalmente, o oxigênio tem uma importância muito grande. Aliás, eu pergunto se nós quando tratamos de alumínio e aços inoxidáveis, principalmente o austenítico, se nós não temos dois fenômenos de corrosão sob tensão, inteiramente diferentes. Por isso eu me interessaria particularmente saber se há algum projeto de trabalhar nesse sentido, se o Sr conhece uma referência de literatura de alguém que já tenha avaliado a influência decisiva do nível de oxigênio em relação ao alumínio.

Cecchini

- Não, eu não conheço nenhum trabalho em que tenha sido pesquisada a influência do oxigênio-dissolvido. Eu sei que no caso do Aço Inoxidável, o oxigênio tem papel fundamental; no caso do alumínio, aparentemente, não tem importância a presença do oxigênio. O oxigênio é conduzido nos casos de testes acelerados para ligas de alumínio através da água oxigenada. Há, inclusive, uns testes que usam água oxigenada, outros que não usam água oxigenada, e os resultados são praticamente equivalentes. Em nenhum deles houve o cuidado de eliminar completamente o oxigênio, borbulhando, por exemplo, o hidrogênio. Não conheço nenhum trabalho nesse sentido. Pode ser que nós nos orientemos nesse sentido, mas por ora, não está dentro das nossas cogitações.

Manheimer

- Há pouco nós desenvolvemos um trabalho nesse campo e observamos durante as medidas dos cor

pos de prova variações ou flutuações de pêsos, de tal modo que tínhamos aumento de pêsos e perda de pêsos; naturalmente, a longo prazo nós notaríamos um certo comportamento. Isso foi observado nas amostras de seus ensaios?

Cecchini

- Isso é observado, quando o fenômeno corrosivo se desvia e aparece outro fenômeno de corrosão, não do tipo sob tensão. Nos corpos de prova que foram ensaiados pelo Eng^o Vana, não se constatou corrosão sob tensão naqueles contatos com materiais mais nobres, mas se observou uma corrosão generalizada muito violenta mais do que a apresentada pela intergranular. Acompanhando a variação de pêsos, observamos um crescimento durante um certo tempo e depois um decréscimo. Esse problema da variação de pêsos, é um assunto ligado ao do produto da corrosão que naturalmente é mais pesado porque absorve o oxigênio na água do que o metal que lhe deu origem. Se esse produto da corrosão adere, ou é difícil de ser eliminado, o corpo de prova aumenta de pêsos; mas se ele for adequadamente eliminado, o corpo de prova irá fatalmente diminuir de pêsos. Se ele se desenvolve intergranularmente, então não temos meios de eliminá-lo e o corpo de prova aumentará de pêsos.

Aparteante

- Os requisitos de secagem foram estabelecidos pelas normas?

Cecchini

- Sim, o problema do tratamento do corpo de prova antes de sujeitá-lo a um ensaio foi todorealizado de acôrdo com a norma MIL-H6088C.

Mannheimer

- Fraturas podem ser observadas microscòpicamente nas superfícies sob compressão ou sob tração dos corpos de prova?

Cecchini

- Nos nossos exemplos, não houve uma corrosão sob tensão, mas houve uma corrosão intergra-

nular ou uma corrosão superficial generalizada. Não ocorreu fratura por corrosão sob tensão. É conhecido que esforços de compressão não conduzem à fratura. É uma das formas, aliás, de se proteger metais contra a corrosão sob tensão.

Lino Rodighiero (6)

- O Sr falou das ligas de Alumínio-Magnésio com conteúdo de Magnésio além de 10%. Eu estou interessado nas ligas com Mg a menos de 10%, quer dizer com 2 a 5-6%. Eu queria saber se a corrosão sob tensão aumenta, aumentando o conteúdo do Magnésio.

Cecchini

- A pergunta diz respeito à proporcionalidade entre o conteúdo de Magnésio e a resistência à corrosão sob tensão. O tempo é necessário para que sobrevenha a fratura em testes de laboratórios. Foram trocadas as curvas em que se relaciona o tempo necessário para ocorrer a fratura e a porcentagem de Mg. Verificou-se então, o seguinte: até 2% de Mg, não há fratura por mais que se prolongue o tempo de ataque químico. Para ligas entre 2 e 10% êste 10% não é rigoroso só se observaria a fratura em testes de laboratórios e acima de 10% a liga é insegura em serviço.

Rodighiero

- Fiz esta pergunta, porque em geral, nossa liga de Al-Mg, escolhida para construção na Light, é liga com 3, 4, 5 e 5,5% quer dizer liga que tenha valor de Mg além de 2%. O Sr acredita que isso foi sòmente, um problema de características mecânica, ou foi porque estas ligas, como estava dizendo, ligas com 4,5% tem um problema de corrosão sob tensão aceitável?

Cecchini

- Projetei umas tabelas que incluíam dados disponíveis sòbre a susceptibilidade das ligas de alumínio à corrosão sob tensão. Para as ligas

que contém por exemplo, êsse nível de porcentagem de Mg não existe nenhum caso relatado de corrosão sob tensão. Abaixo, portanto de 10%, não existe nenhum caso relatado de corrosão sob tensão em serviço. De forma que isso é uma garantia para o uso das ligas com cêrca de 5% de magnésio.

Aparteante

- De acôrdo com a norma e o prof. Douillet, o ponto de tensão máximo se dá não na superfície e sim um pouco abaixo da superfície, quer dizer, foge um pouco dos efeitos iniciais na corrosão, mas mesmo assim pode ser provocada a corrosão?

Cecchini

- Pode ser provocada. Tem que ser lembrado também o seguinte: Nas operações de usinagem posteriores, as tensões podem ser colocadas na superfície. Há uma perturbação no equilíbrio de tensões que o Prof. Gründig explicou há pouco.

- (1) Marco Antônio G. Cecchini
Professor do Instituto Tecnológico de Aeronáutica
- (2) Oswaldo Stênio C. de Souza
Membro da ABM - Cap Av Eng Industrial e de Metalurgia;
I P D - C T A - São José dos Campos - SP
- (3) Airton Fileti
Engenheiro da ALCAN
- (4) Tibor Vass
Pesquisador do PMR/IPD/CTA
- (5) Walter Arno Mannheimer
Engenheiro da Universidade Federal do Rio de Janeiro
- (6) Lino Rodighiero
Engenheiro do C B A

