

ESTUDO DA CORROSÃO SOB TENSÃO EM LIGAS DE ALUMÍNIO, COM DEFORMAÇÃO CONSTANTE

Victor Santos Serpa ^{1*}, Eduardo Miguel da Silva ¹, Alex Sander Chaves da Silva ¹ e Vinicius Augusto Diniz Silva ¹

¹ Universidade Federal de São João del-Rei - (UFSJ), Demep, Praça Frei Orlando, 170 - Centro, São João del-Rei - MG, 36307-406

*Autor correspondente: victorsantosserpa@yahoo.com.br

RESUMO

Dentre as formas de corrosão, o fenômeno de corrosão sob tensão (CST) é considerado uma das formas mais críticas com relação a deterioração dos materiais. Este fenômeno ocorre quando um material susceptível geralmente ligas que sofrem passivação estão sujeito a uma ação conjunta de tensões mecânicas (tensões trativas aplicadas ou residuais) e um meio corrosivo específico. Este fenômeno tem sido um dos grandes problemas a que estão sujeitas soldas de aços inoxidáveis austeníticos e ligas de alumínio em meios contendo cloretos quando submetidos às altas temperaturas. Percebe-se também que as ligas de ferro-fundido principalmente as camisas dos motores de combustão interna, normalmente associados a formação de ácidos, com sulfúrico e nítrico nesses ambientes também estão sujeitos a CST. Portanto este trabalho tem como objetivo de fazer um estudo da corrosão sob tensão em ligas de alumínio com deformação constante, utilizando-se de estudos recentes, gerando conhecimento atualizado através da análise do efeito de diferentes tensões aplicadas em corpos de prova de alumínio em um meio corrosivo contendo concentrações salinas em torno de 30%. Os corpos de prova foram preparados com deformação constante e mantidos em teste à temperatura ambiente e à temperatura de 106° C. Assim nota-se que a CST por sua vez, é fortemente influenciada pelos fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante a soldagem ou durante o tratamento térmico pós soldagem dos componentes importantes indústrias, com destaque para as indústrias químicas e petroquímicas. Nesse sentido, dentre os vários tipos de ensaios propostos para o estudo da CST, utilizou-se neste trabalho ensaios de deformação constante. Assim a análise dos resultados após o teste de CST com deformação constante observou-se microtrincas transgranulares e intergranulares no material além de pites de corrosão. Podendo concluir que existe uma correlação entre a tensão aplicada, tamanho das microtrincas e a suas quantidades por mm².

Palavras-chave: Corrosão sob tensão, Ligas de alumínio, Microestrutura

ABSTRACT

Among the forms of corrosion, the phenomenon of stress corrosion cracking (SCC) is considered one of the most critical forms in relation to the deterioration of materials. This phenomenon occurs when a susceptible material, generally alloys that undergo passivation, are subject to a joint action of mechanical stresses (applied or residual tensile stresses) and a specific corrosive medium. This phenomenon has been one of the major problems to which welds of austenitic stainless steels and aluminum alloys are subject in environments containing chlorides when subjected to high temperatures. It is also noted that cast iron alloys, especially the liners of internal combustion engines, normally associated with the formation of acids, with sulfuric and nitric in these environments, are also subject to SCC. Therefore, this work aims to study stress corrosion cracking in aluminum alloys with constant deformation, using recent studies, generating updated knowledge through the analysis of the effect of different stresses applied to aluminum test specimens in a corrosive medium containing salt concentration of around 30%. The test specimens were prepared with constant deformation and maintained in the test environment at a temperature of 106°C. Thus, it can be seen that the CST, in turn, is strongly influenced by the metallurgical phenomena that occur during welding or during the post-welding heat treatment of important industrial components, especially the chemical and petrochemical industries. In this sense, there are several types of tests proposed for the study of the CST, which are classified into three categories. Tests with dynamically loaded test specimens (constant deformation tests). Tests with dynamically loaded test specimens (tests with constant deformation rate) and tests with pre-cracked test specimens loaded statically. Thus, the analysis of the results after the CST test with constant deformation observed trans granular and intergranular microcracks in the material, in addition to corrosion pits. It can be concluded that there is a correlation between the applied stress, size of the microcracks and their quantity per mm².

Keywords: Stress corrosion cracking, Aluminum alloys, Microstructure

1. Introdução

Define-se corrosão como a deteriorização de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos (NUNES,2007; GENTIL, 2007). Geralmente os processos corrosivos são de natureza eletroquímica e apresentam mecanismos idênticos uns aos outros, porque sempre constituirão áreas anódicas e catódicas, entre as quais circulará uma corrente de elétron e uma corrente de íons. Entretanto, a perda de massa e modo de ataque sobre o material dar-se-a por formas e ambientes diferentes (NUNES, 2007).

As formas de corrosão podem ser divididas em dois tipos: corrosão uniforme e corrosão localizada. A corrosão uniforme consiste no ataque de toda a superfície metálica em contato com o meio corrosivo levando a diminuição da espessura. Este tipo de corrosão ocorre em geral devido à micro pilhas de ação local, sendo o tipo de corrosão mais comum que ocorre principalmente nos processos corrosivos de estruturas expostas a atmosfera (GENTIL,2007).

A corrosão uniforme é uma forma de desgaste de mais fácil acompanhamento, em especial quando se trata de corrosão interna em equipamentos ou instalações, tendo em vista que a perda de espessura é aproximadamente a mesma em toda a superfície metálica. Por outro lado, a corrosão localizada é aquela que ocorre em determinadas regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, resultando na formação de trincas e falhas nos produtos (JONES, 1992). As formas localizadas de corrosão são mais insidiosas e difíceis de prever e controlar, principalmente porque existem vários tipos de corrosão, como a corrosão por pite, corrosão galvânica, trincamento induzido pelo hidrogênio, corrosão por fadiga, corrosão intergranular e corrosão sob tensão.

A corrosão sob tensão (CST) é um processo resultante da interação simultânea entre um material metálico submetido a determinados níveis de tensão e um meio de agressividade relativa, que promoverá o aparecimento de micro trincas levando o material à fratura precoce (LOGAN,1993).

A corrosão sob tensão pode ser influenciada por diversos fatores como a intensidade de tensão, composição da liga, condições metalúrgicas (presença de segunda fase na matriz e nos contornos de grão, composição das fases, tamanho do grão, tensão residual), geometria da trinca e as condições do meio corrosivo (pH, potencial, temperatura (MARIANO,

2002).

Assim, segundo a Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO) estima que a corrosão seja responsável por um custo anual de 3 % do PIB (2018) aproximadamente R\$280 Bilhões, relacionado esse percentual ao estudo norte americano. Segundo a mesma instituição, se as medidas de proteção contra corrosão fossem devidamente aplicadas, depois de deduzidos os custos de aplicação destas medidas, a economia poderia ser de pelo menos R\$ 112 Bilhões.

Nesse sentido nota-se que com a utilização de técnicas atuais de proteção contra corrosão, estima-se que poderiam ser economizados 25% valor, cerca de R\$48 bilhões. Nota-se que Extensão litorânea: do Brasil é de 7.408 km (até 9.198 km), ou seja, a Concentração PIB: 95% da economia brasileira depende da região costeira, ou seja, a concentração populacional: 70% dos brasileiros vivem na faixa situada até 200 Km do litoral, onde as taxas de corrosão do aço no litoral: 3,2 a 153 vezes superior à de uma área rural.

A principal motivação para o presente trabalho é justificada pelo desenvolvimento de vários setores industriais, dentre os quais se destaca o setor petroquímico e a necessidade de dispor de técnicas e procedimentos que conduzam, em suas operações específicas, a uma baixa susceptibilidade, dos materiais utilizados, à corrosão sob tensão.

Este tipo de falha grave continuamente ocorre em importantes indústrias, com destaque para as indústrias químicas e petroquímicas (CHEN et al., 2005; GERTSMAN & BRUEMMER, 2001; KRISHNAN & RAO, 1991. Entretanto, pesquisas recentes realizadas por Klakurková et al (2015), os quais estudaram sobre defeitos na superfície em peças de alumínio anodizado e assim verificaram a influência do substrato, processo de fabricação da peça, tratamento térmico e anodização. As análises químicas realizadas constataram a existência de defeitos antes do crescimento do filme, que foram provenientes dos processos de fundição das amostras. O tipo de grão revela uma influência no processo de formação da camada anódica.

Em geral, a formação de trincas de CST ocorre em valores de tensão abaixo da tensão de escoamento do material e, tipicamente, abaixo da tensão de projeto e limite de fadiga de um componente estrutural (BOVEN et al.2007). Devido a isto, a resistência à CST é um dos requisitos mais importantes a serem considerados na realização de soldas de aços inoxidáveis austeníticos e ligas de alumínio. Nota-se

que a CST por sua vez, é fortemente influenciada pelos fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante a soldagem ou durante o tratamento térmico pós-soldagem dos componentes (SUI *et al.*, 1996, GORETTI *et al.*, 2019).

Nota-se que várias pesquisas sobre o tema estão sendo desenvolvidas em ligas de aços inoxidável porém o estudo em ligas de alumínio ainda está em desenvolvimento no sentido conhecer a morfologia e o comportamento dessas em vários meios procurando entender mais as trincas por corrosão sob tensão em soldas de liga de alumínio e assim verificar a influência da corrosão sob tensão no mecanismo de fratura é o principal objetivo para determinar o limiar e a taxa de crescimento da trinca assim podemos destacar .

Fujii *et al* (2023) ,fizeram um estudo sobre a nucleação de trincas por corrosão sob tensão em liga de alumínio 6061 em solução de cloreto de sódio: Aspectos mecânicos e microestruturais e observaram que as trincas tendiam a ocorrer em pites de corrosão profundos, que se comportavam como pontos de concentração de tensão

Seikh et al (2021) estudaram o comportamento de fissuração por corrosão sob tensão de ligas Al5083 de granulação fina processadas por prensagem angular de canal igual (ECAP) foi investigado no ar e em solução de NaCl a 3,5% usando o teste de tração de baixa taxa de deformação (SSRT). As características dos precipitados de contorno de grão (GBPs), especificamente a microquímica do comportamento do CST em ligas de Al5083.

Ujjwal *et al* (2023), fizeram um estudo sobre as características de corrosão e corrosão sob tensão do alumínio 4043 liga fabricada através do processo de deposição de energia direcionada em arco aberto (Dedarc) quanto ao seu comportamento de corrosão e trincamento por corrosão sob tensão (CST) em solução de NaCl 0,6 M à temperatura ambiente. As características eletroquímicas em solução de NaCl 0,6 M foram investigadas usando potencial de circuito aberto (OCP), polarização potenciodinâmica (PDP) e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). Os resultados eletroquímicos revelaram que as amostras de DED fabricadas usando um soldador de gás inerte de tungstênio (TIG) como energia demonstrou melhor resistência à corrosão quando comparada àquelas desenvolvidas através de metal frio.

Silva *et al* (2024) estudaram o comportamento de um aço inoxidável ferrítico AISI-409 soldado com

aramé tubular AWS E316LT1-4, assim observou que a CST iniciou na zona afetada pelo calor (ZTA) e se estendeu para a região ferrítica. As fotomicrografias mostraram uma transição dúctil para frágil com valores de alongamento reduzidos. Portanto esse trabalho tem como objetivo o de fazer um estudo da corrosão sob tensão em ligas de alumínio, com deformação constante utilizando técnicas estatísticas, e a caracterização microestrutural do fenômeno de trincamento através de microscopia óptica dando continuidade ao trabalho de conclusão do defendido em 2019. Nesse sentido percebe-se que a suscetibilidade à CST é então determinada impondo valores de tensões sobre os corpos de prova e determinando o tempo que decorreu para a ocorrência da propagação de trincas num determinado meio, o tempo de falha aumenta com o decréscimo do valor de tensão imposta, assim deve-se impor valores de tensão até obter um tempo em que não mais ocorra falha, determinando assim o máximo valor da tensão que pode ser aplicada para evitar a propagação de trinca por CST.

2. Metodologia

Todas as sequências de testes foram realizadas utilizando o banco de ensaio de corrosão sob tensão desenvolvido no Laboratório de Soldagem da UFSJ-Campus Santo Antônio, o detalhamento é mostrado na Figura 1. Este dispositivo consiste de uma cuba de vidro (1), onde os corpos de prova serão mergulhados numa solução, sendo esta aquecida através de um aquecedor elétrico (2) de 110 volts e 800 W, até a temperatura de ebulição da solução. A temperatura é registrada por um sensor digital de temperatura (3) no painel de controle. O tempo de ensaio foi registrado por um cronômetro digital. Para evitar as perdas por evaporação foi utilizado um sistema de condensação (4) e uma bomba hidráulica mergulhada dentro do reservatório (5).

A matéria prima utilizada na realização deste trabalho foi fruto da sucata de peças automotivas (Trilho de alumínio) conforme mostrado na Figura 2.

Os testes de CST foram realizados a partir de corpos de prova retirados do trilho de alumínio, ou seja inicialmente o material foi fixado em uma morsa presente no laboratório e então serrada em pequenas seções. Os corpos de prova então foram cortados a partir das seções utilizando-se uma guilhotina de mesa nas dimensões 138x18mm e posteriormente dobrados e mergulhados numa solução de NaCl 30%.

A tabela 1 mostra as propriedades mecânicas

da liga AA60661 enquanto a tabela 2 mostra a composição química da liga em estudo.

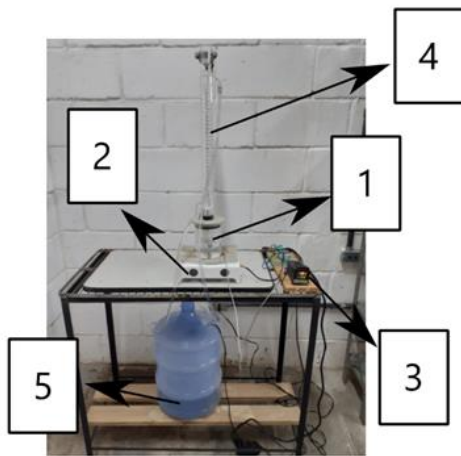


Figura 1. Banco de testes
Fonte: Próprio autor



Figura 2. Trilho de alumínio AA6061
Fonte: Coopermetal (2024)

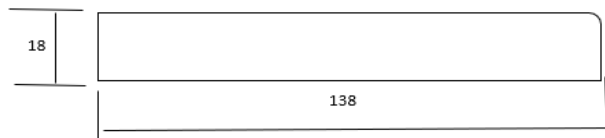


Figura 3. Dimensões dos corpos de prova
Fonte: Próprio Autor

Tabela 1. Propriedades mecânicas da liga AA6061

Características da liga EN AA 6061-T6 Normas	Limite de escoamento $R_{p0.2}$ Mpa (min)	Limite Resistência à tração R_m Mpa (min)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
Liga Equivalentes AA 6061 ou DIN AlMgSi1Cu Têmpera laminado	240	275	8	2,5/62,5 95-110

Fonte: <https://metalthaga.com.br/wp-content/uploads/2019/09/liga-de-aluminio-6061-t6.pdf>

Tabela 2. Composição Química

Elementos Químicos	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %	Outro %	Al %
Min	0,40	--	0,15	--	0,80	0,04	--	--	0,05	Restantes
Máx	0,80	0,70	0,40	0,15	1,20	0,35	0,25	0,15	0,15	Restantes

Fonte: <https://metalthaga.com.br/wp-content/uploads/2019/09/liga-de-aluminio-6061-t6.pdf>

Ao passo que a preparação dos corpos de prova utilizados no ensaio de CST foram estabelecidas segundo as normas específicas American Society of Testing and Materials – ASTM G58 (1978), ASTM G30- e ASTM E8 (1979)]Os corpos de prova utilizados no ensaio de CST foram dobrados em curvas em forma de U, em de ligas de alumínio AA6061.

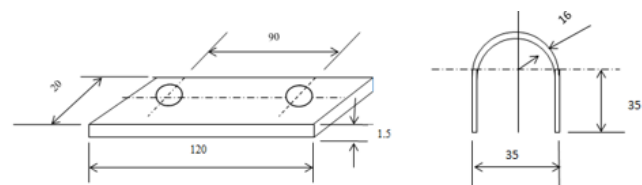


Figura 4. Corpos de prova em Forma de U
Fonte : Norma (ASTMG30)

Para o procedimento para o ensaio de CST, utilizou-se a ASM Handbook (2003), existem vários tipos de ensaios aplicáveis para verificar o fenômeno da CST nos aços inoxidáveis. Assim, conforme o tipo de solicitação distingue-se dois tipos de ensaios de CST em laboratórios dentre os quais pode-se citar o ensaio com carga ou deformação constante e o ensaio com velocidade de deformação constante.

O ensaio realizado com carga constante ou deformação constante permite caracterizar a sensibilidade de um material à CST, bem como a fragilização pelo hidrogênio. Geralmente, os corpos de provas são submetidos a esforços de tração ou flexão e logo em seguida exposto ao meio corrosivo. Mede-se então o tempo até a falha (tf) do corpo de prova. Por outro lado, o ensaio com taxa de deformação lenta (slow strain rate test) permite uma avaliação rápida da sensibilidade de um material à CST e à fragilização por hidrogênio.

Este método baseia-se na suposição de que a influência da corrosão sobre o comportamento à

ruptura depende mais da velocidade de deformação do que da intensidade de tensão residual na ponta da trinca.

Assim, neste trabalho optou-se em trabalhar com um ensaio de carga com deformação constante, assim os corpos de prova não entalhados, escolha esta justificada por ser uma técnica bastante utilizada para verificar a susceptibilidade de um material à CST, e por ser um tipo de ensaio bastante flexível quanto a escolha das dimensões dos corpos de prova.

Nesse tipo de ensaio a grandeza a ser medida é o tempo de ruptura ou tempo de falha, enquanto as grandezas como temperatura de ensaio, concentração do meio e a carga aplicada, devem permanecer constantes durante todo o ensaio. Para a execução dos ensaios de CST primeiramente Após o dobramento dos corpos de prova, foi enrolado uma fita teflon nas extremidades para manter a tensão solicitada para cada testes, posteriormente esses corpos de prova foram mergulhados numa solução de NaCl com 30% de concentração com objetivo de utilizar a mesma concentração do pré-sal, a uma temperatura de 106°C durante 03 horas de ensaio.

Para a preparação da solução utilizou -se um becker de 500ml como recipiente , assim foi colocado 300ml de água e posteriormente utilizou-se uma balança para efetuar a pesagem do cloreto de sódio, e dentro desse recipiente foi colocado 90g de NaCl.

Portanto para o planejamento dos experimentos foram realizados alguns ajuste, com o objetivo de preparação da bancada e garantir a repetibilidade das condições de um ensaio para outro, além de permitir o adequado ajuste nas variáveis do processo. Assim os testes foram realizados conforme a tabela 3 de planejamento dos experimentos abaixo.

A caracterização microestrutural foi realizada na liga de alumínio sob as condições do material antes do processo corrosivo nas amostras com e sem furo padrão e após o processo corrosivo. Com variação da força 240N, 260N e 100N.O método de preparação das amostras para análise microscópica consistiu em cortar as amostras numa guilhotina .

Após o seccionamento transversal ,uma pequena amostra em forma de fita foi fixada numa massa de modelar e foi levada ao microscópio óptico TM-500 para verificar a superfície como trincamento, pites, etc. Após a observação das superfícies foi retirada uma fotografia e essa imagem foi trabalhada num software para a retirada das medidas do tamanho das

trincas, a quantidade de trincas por área, além do número de pites.

Tabela 3. Planejamento dos experimentos

A	F (N)	τ $t=F/A$ N/mm ²	ϵ $T=e.E$	Te (°C)	Ta (°C)	T (h)
1	240	11,50	17%	106	x	3
2	260	12,46	18%	106	x	3
3	100	4,79	7%	106	x	3
4 sem furo	240	11,50	17%	x	20	1 mês
5 com furo	240	11,50	17%	x	20	1 mês

Fonte: Próprio autor

Legenda: A= testes, F= força de dobramento (N), τ = Tensão Pascal, ϵ = deformação (%), Te= Temperatura de ebulição, t= tempo de exposição das amostras

O microscópio TM-500 da Mitutoyo (TM-5050 e TM-510) são muito fáceis de utilização de forma compacta e apresentam características de coluna vertical . Projetado para a medição e inspeção de contornos de superfícies das peças conforme a necessidade diária da indústria, os modelos da série TM-500 suporta ampla faixa de aplicações para inspeção no chão de fábrica, medição de ferramentas, peças de máquinas e medição de peças de precisão

3. Resultados

Nas últimas décadas tem crescido o uso de ligas de alumínio na fabricação de diversos componentes de automóveis. Assim fazer a análise as características microestruturais e propriedades mecânicas da liga de alumínio 6061, que pode ser utilizada na produção de vários tipos de peças e acessórios automotivos.

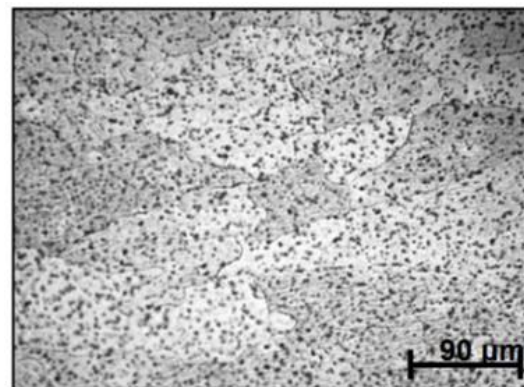


Figura 5. Microestrutura da Liga AA606

Fonte: Barbosa (2011)

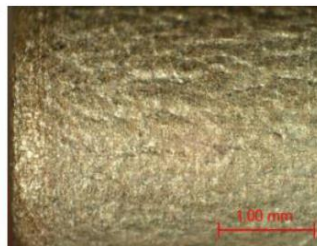
Entretanto nota-se que a maioria das falhas em serviço do tipo CST em alumínio e suas ligas ocorre por causa da água, vapor de água ou em soluções aquosas contaminadas. Entretanto nota-se que a fratura é observada não somente em água e soluções contaminadas nas também no ar e em gases inertes livres de umidade relativa abaixo de 1%. A Figura 5 mostra a microestrutura do material (seção transversal) com grãos bastante deformados (alongados).

3.1. Microestrutura dos Corpos de Prova em Temperatura Ambiente

Segundo Musulin (1992) dentre as ligas de alumínio termicamente tratáveis as da série 6XXX são aquelas que podem ser mais facilmente extrudadas e soldadas. Nas ligas da série 6XXX o magnésio e o silício combinam-se para formar o composto intermetálico Mg_2Si , que antes de atingir o equilíbrio no superenvelhecimento, é o responsável pelo endurecimento dessas ligas. Assim serão analisados os resultados dos corpos de prova de na condição de pós-teste de corrosão sob tensão onde foram deformados com a mesma força e exposto durante 1 mês numa solução de 30% de NaCl a temperatura ambiente, porém o primeiro corpo de prova sofreu um furo de 8mm de diâmetro antes da deformação e o segundo corpo de prova foi deformado sem furo. As regiões de interesse observadas nos corpos de prova foram as pontas das dobraduras dos materiais, onde a tensão é concentrada. A figura 6 e 7 abaixo refere-se ao corpo de prova que foi mergulhado numa solução de NaCl com 30% durante o período de observação de 1 mês, assim observa-se na microestrutura a formação de pite e microtrincas transversais em todo a extensão do corpo conforme figura 8.



Figura 6. Borda direita **Figura 7.** Borda esquerda
Fonte: Próprio autor



solução de NaCl com 30% durante o período de observação de 1 mês, assim nota-se uma severidade na formação de trincas nas bordas do furo, provavelmente por ser um furo um ponto de concentração de tensão, assim as trincas iniciam nas bordas do furo e caminham em direção radial do corpo de prova.

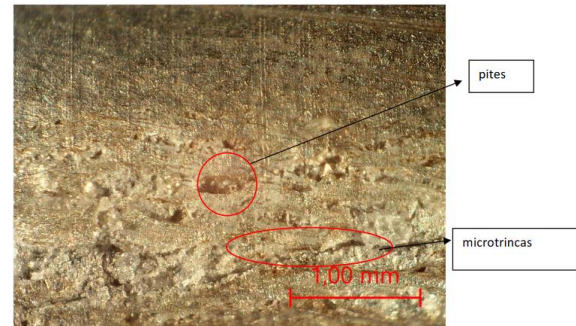


Figura 8. Corpos de prova sem furo em temperatura ambiente. Fonte: Próprio autor

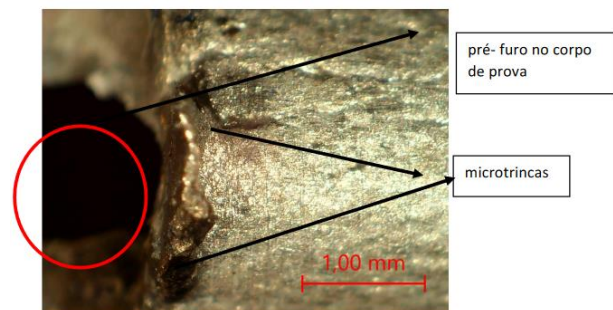


Figura 9. Corpo de prova com furo em temperatura ambiente. Fonte: Próprio autor

Assim, ao observar a microestrutura do corpo de prova, nota-se além de microtrincas de CST, também observa-se um ataque generalizado de corrosão, com pites mais alongados e profundos, formando poros na microestrutura.

3.2. Caracterização Microestrutural da Liga após o Processo de CST em meios Contendo Cloretos

Para situações em engenharia podemos considerar que a água em estado líquido causa uma fratura mais rápido que o vapor de água, então faz-se necessário projetar estruturas de tal forma que não acumule em bolsas ou fendas, evitando a coleta de sais que se concentram por evaporação e veem acelerar o processo de CST, assim deve-se evitar estes tipos de concentrações de tensão. Entretanto nota-se que em unidade tão baixa os produtos de corrosão não produzem soluções líquidas por deliquescência, no

entanto, água não é considerada uma condição essencial para a fratura. Neste caso somente os íons na fase gasosa podem vir a prejudicar a estrutura do filme passivo e iniciar o processo corrosivo. A análise da microestrutura dos corpos de prova após a CST, será descrita a partir da variação da carga de dobramento, 240, 260 e 100N para cada teste.

a) 1-Caso:

O corpo de prova dobrado com a carga de 240N e posteriormente mergulhado na solução de NaCl com 30% durante o período de observação de 3 horas.

Assim nota-se através da microestrutura do corpo de prova que aparecem microtrincas de CST em toda a extensão do corpo.

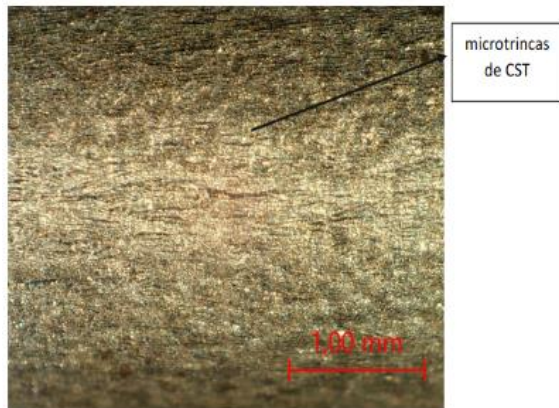


Figura 10. Microestrutura do corpo de prova com uma carga de 240N. Fonte: Próprio autor

b) 2-Caso:

O corpo de prova dobrado com a carga de 260N e posteriormente mergulhado na solução de NaCl com 30% durante o período de observação de 3 horas. Observa-se através da microestrutura um trincamento mais severo em toda a estrutura do corpo de prova

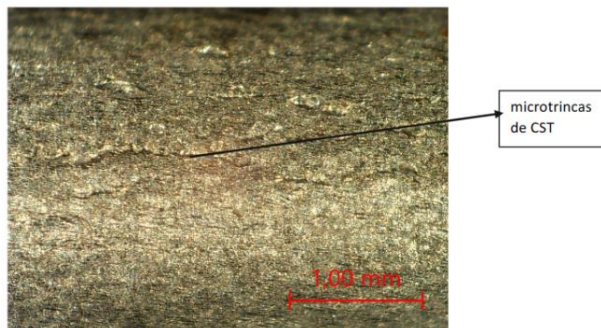


Figura 11. Microestrutura do corpo de prova com uma carga de 260N. Fonte: Próprio autor

c) 3- caso:

O corpo de prova dobrado com a carga de 100N e posteriormente mergulhado na solução de NaCl com 30% durante o período de observação de 3 horas.

Assim nota-se o aparecimento de trincas de CST porém com uma densidade bem menor quando comparada com as carga de 240N e 260N com deformação constante.

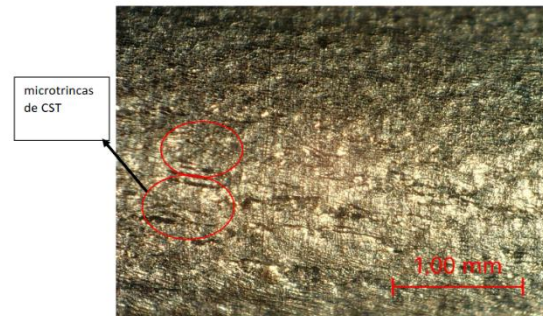


Figura 12. Microestrutura do corpo de prova com uma carga de 100N. Fonte: Próprio autor

3.3. Correlação entre a Taxa de Deformação Aplicada e o Número de Trincas de CST e a Susceptibilidade a Corrosão Sob Tensão

Para correlacionar as variáveis foram utilizadas neste trabalho o coeficiente de correlação de Pearson também chamado de "coeficiente de correlação produto-momento" ou simplesmente de "r de Pearson" que mede o grau da correlação (e a direção dessa correlação - se positiva ou negativa) entre duas variáveis. Este coeficiente, normalmente representado por r assume apenas valores entre -1 e 1, cuja interpretação pode ser feita da seguinte maneira:

- $r = 1$, significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis;
- $r = -1$, significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis - Isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui;
- $r = 0$, significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, pode existir uma dependência não linear. Assim, o resultado $r = 0$ deve ser investigado por outros meios. O coeficiente de correlação de Pearson, e o valores médios de ambas as variáveis a serem estudadas pode ser calculado segundo as equações 1, 2 e 3.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

onde $x_1, x_2, \dots, x_n$ e $y_1, y_2, \dots, y_n$ são os valores medidos de ambas as variáveis e $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias aritméticas de ambas as variáveis. A análise correlacional indica a relação entre duas variáveis lineares e os valores sempre estão entre +1 e -1. O sinal indica a direção e o valor da correlação positiva ou negativa, o tamanho da variável indica a força da correlação. Para uma melhor interpretação da correlação de Pearson valem as seguintes considerações:

- $r \geq 0,70$ (para mais ou para menos) indica uma forte correlação;
- $0,30 \leq r < 0,70$ (positivo ou negativo) indica correlação moderada;
- $0 \leq r < 0,30$ indica uma fraca correlação.

Tabela 4. Análise entre a taxa de deformação aplicada e o número e trincas de CST

Corpo de prova	Tensão (Mpa)	Nº de trincas por mm² (área observada 5mm²)	Comprimento médio de trincas (mm)	Ocorre CST Sim (1) ou não (-1)
1	11,50	37	0,387	1
2	12,46	42	0,258	1
3	9,8	26	0,324	1

Avaliando as fotos obtidas pelo microscópio foi possível avaliar uma quantidade média de trincas por área, sendo esta uma de 5mm² para cada corpo de prova. Assim foi realizado a correlação de Pearson e verificou que a tensão e o número de trincas possuem um forte correlação em torno de 99,8% ao passo o comprimento médio das trincas e tensão aplicada existe um correlação negativa moderada em torno de 34%, entretanto o comprimento médio de trincas e o número de trincas existe uma baixa correlação em torno de 19,4%

Tabela 5. Análise da correlação de Pearson P value: 0,05

	Tensão	Nº de trincas
Nº de trincas	0,989 0,096	
Com trincas	-0,340 0,779	-0,194 0,875

A corrosão sob tensão é um processo que afeta os materiais alterando suas propriedades mecânicas,

podendo contribuir significativamente para falhas em equipamentos e estruturas. As aeronaves são majoritariamente constituídas por ligas de alumínio, ligas metálicas e materiais compósitos e ambos são suscetíveis aos ataques corrosivos. Nesse sentido nota-se que apesar da engenharia utilizar-se de ligas que apresentem maior resistência à corrosão, ainda assim, elas sofrem com esse processo com maior facilidade do que os compósitos, principalmente quando seus métodos de proteção já apresentam falhas (descontinuidades). Por outro lado percebe-se que, o meio corrosivo no qual o material está submetido impacta diretamente na forma e no processo de corrosão que se dará na peça e equipamento, sendo primordial a compreensão desses fatores para desenvolver métodos mais eficazes para a prevenção da corrosão para minimizar danos causados.

4. Conclusões

O trabalho intitulado estudo da corrosão sob tensão em ligas de alumínio, com deformação constante nos permite concluir que:

- ✓ Houve o aparecimento de trincas de CST em todas as amostras deformadas com carga constante 100N, 240N e 260N e expostas durante 3 horas de testes
- ✓ Foi observado o trincamento por CST nas amostras com e sem furo submetidas ao meio NaCl a temperatura ambiente e expostas durante 1 mês.
- ✓ A Partir da correlação de Pearson, verificou que a tensão e o número de trincas percebe-se que existe um forte correlação em torno de 99,8% ao passo o comprimento médio das trincas e tensão aplicada existe um correlação negativa moderada em torno de 34%, entretanto o comprimento médio de trincas e o número de trincas existe uma baixa correlação em torno de 19,4%.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Proe pela colaboração na execução do estudo e a UFSJ.

6. Direitos Autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.

Referências

- [1] NUNES, L.P. (2007). *"Fundamentos de Resistência à Corrosão"*. ABRACO, Editora Interciência, Rio de Janeiro, v.2, 330p.
- [2] GENTIL, V. (2007). *"Corrosão"*. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 5ªed. 360 p.
- [3] JONES, D.A. (1992). "Principles and Prevention of Corrosion", Macmillan Publishing Company Englewood Cliffs, NJ.
- [4] LOGAN, H.L. (1992). *"Stress Corrosion Cracking-Materials Performance and Evolution"*. ASM International, First edition, v.1, 448p
- [5] MARIANO, N.A. (1997) Corrosão sob tensão em um aço inoxidável austenítico em Soluções aquosas contendo Cloretos. São Carlos, Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo
- [6] CHEN, Y.Y.; LIOU, Y.M.; SHIH, H.C. (2005). "Stress Corrosion Cracking of Type 321 Stainless Steels in Simulated Petrochemical Process Environments Containing Hydrogen Sulfide and Chloride". *Materials Science and Engineering: A*, v.407, pp.114-126.
- [7] GORETTI, V.; VELASCO, A.J.A.C.; LANDIM, R.V.; SORDI, V.L. (2021), "Corrosão Sob Tensão Em Solda Circunferencial De Aço API 5L X70 Em Contato Com Etanol", *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 549-557,
- [8] KRISHNAN, K.N. & RAO, K.P. (1991). *"Effect of Microstructure on Stress Corrosion Cracking Behaviour of Austenitic Stainless Steel Weld Metals"*. *Materials Science and Engineering: A*, v.142, pp.79-85.
- [9] KLAKURKOVÁ, L.; JULIŠ, M.; CELKO, L.; HORYNOVÁ, M.; HÉGR, E.; ŠVEJCAR, J. Analysis of surface defects of aluminium components with hard anodized layers. *Engineering Failure Analysis*, v. 56 p. 300–306, 2015.
- [10] BOVEN, G.V.; CHEN, W.; ROGGE, R. (2007). *"The Role of Residual Stress in Neutral pH Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steels-Part I: Pitting and Cracking Occurrence"*. *Acta Materialia*, v.55, pp.29-42.
- [11] SUI, G.; CHARLES, E.A.; CONGLETON, J. (1996). "The Effect of Delta-Ferrite Content on the Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in a Sulphate Solution". *Corrosion Science*, v.38, n°5, pp.687-703
- [12] GORETTI, V.; VELASCO, A.J.A.C.; LANDIM, R.V.; SORDI, V.L. (2021), "Corrosão Sob Tensão Em Solda Circunferencial De Aço API 5L X70 Em Contato Com Etanol", *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 549-557,
- [13] FUJII, T.; SAWADA, T.; SHIMAMURA, Y. (2023) "Nucleation of stress corrosion cracking in aluminum alloy 6061 in sodium chloride solution: Mechanical and microstructural aspects" *Journal of Alloys and Compounds*, Vol 938.
- [14] SEIKTH, H.A.; BAIAG, M.; REHMAN, U.R.A.; HASHMI, H.F.; Mohammed, A.J.; (2021) "Stress Corrosion Cracking Behavior of Fine-Grained Al5083 Alloys Processed by Equal-Channel Angular Pressing (ECAP)", *Molecules* 2021, 26, 7608. <https://doi.org/10.3390/molecules26247608>
- [15] UJJWAL, K.; AL-SAAD, S.; ALOK KUMAR DAS, A.; R.K. SINGH RAMAN (2023), "Corrosion and stress corrosion cracking characteristics of 4043 aluminium alloy fabricated through directed energy deposition process", *Journal of Alloys and Compounds*; pp, 1-10
- [16] SILVA, E. M. DA, TEIXEIRA, R. L. P., COSTA, S. C. DA, CORRÊA, E. O., & RIBEIRO, R. B. (2024). Stress-corrosion cracking behavior of AISI-409 welded with a filler metal flux cored AWS E316LT1-4. *Materials Research*, 27, e20230418. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2023-0418>
- [17] ASTM G 30-97, Standard Practice for Making and Using U-Bend Stress-Corrosion Test Specimens, 1970
- [18] ASTM G 38-73, Standard Practice for Making and Using C-ring Stress Corrosion Test Specimens, 1984.
- [19] ASM International handbook, V. 4. ASM Handbook: Heat Treating. Technology, v. 4, p. 3470, 2001.