



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO PARA USO EM TUBOS
DE CALOR EM ALUMÍNIO CONTENDO ÁGUA**

Marco Antonio Redi Gonçalves

Relatório Final de Iniciação científica do
Programa PIBIC, orientado pelo
Dr. José Eduardo May e
Dr. Rafael Lopes Costa

URL do documento original:

INPE

São José dos Campos

2023



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO PARA USO EM TUBOS
DE CALOR EM ALUMINIO CONTENDO ÁGUA**

Marco Antonio Redi Gonçalves

Relatório Final de Iniciação científica do
Programa PIBIC, orientado pelo
Dr. José Eduardo May e
Dr. Rafael Lopes Costa

URL do documento original:

INPE
São José dos Campos
2023

RESUMO

O Grupo de Controle Térmico da Divisão de Mecânica Espacial e Controle (DIMEC) do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE) possui uma linha de pesquisa em tubos de calor de baixa pressão na qual foram estudadas combinações de tubos de calor fabricados em alumínio com e sem revestimentos internos carregados com fluido de trabalho acetona. Dado que a água apresenta propriedades térmicas melhores que a acetona e até superiores que amônia e um risco menor ao operador e ao ambiente, há o interesse em se estudar tubos de calor em alumínio carregado com água. Alumínio sem proteção e água é sabidamente um sistema incompatível para o uso em tubos de calor devido à rápida formação de gases não condensáveis (GNC), mas o uso de inibidores combinado a recobrimentos parece ser uma solução tecnológica a ser explorada. A revisão da literatura científica mostrou que houve um avanço no entendimento da atuação de alguns inibidores de corrosão para o uso em tubos de calor de alumínio preenchidos com água. Foram estudadas soluções aquosas inorgânicas contendo íons de cromato e de permanganato. Os resultados mostraram que, apesar destes inibidores retardarem o processo de formação de gases não condensáveis (GNC), eles não evitem no médio prazo a sua formação, sendo estudados tubos de calor com tempo de vida útil de até 72h, tempo não suficiente para aplicações espaciais. Este trabalho apresenta os resultados obtidos em estudos de corrosão por imersão de alumínio polido e/ou anodizado, em meio contendo água ou dicromato e em superfície íntegra ou com defeito. Os resultados mostram que a anodização da superfície do alumínio contribuiu para a proteção contra corrosão do alumínio em água, assim como o uso de dicromato como inibidor de corrosão, se mostrando como processos promissores para o uso em trocadores de calor contendo água. Entretanto, os estudos devem incorporar tempos prolongados dado que o dicromato é consumido no processo de proteção contra corrosão

Palavras-chave: corrosão, inibidores, alumínio, imersão, dicromato

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação esquemática da sequencia de produção e ensaios de amostras.....	2
Figura 2- Amostras após o polimento.	3
Figura 3- Amostras após a anodização.	3
Figura 4 - Amostras após a anodização e com defeito superficial: a) antes do ensaio; b)após ensaio de imersão.....	4
Figura 5 - Representação esquemática do sistema de imersão utilizado. A superfície aberta foi lacrada com filme de polietileno e uma tampa para proporcionar um ambiente hermeticamente fechado.	4
Figura 6 - Amostras anodizadas: a) sem lixamento; b) lixas #220 e #600; c) lixas #220, #400, #600 e #1200.	6
Figura 7 - Amostras decapadas após o processo de lixamento: a) fosco 30s; b) fosco 2min; c) tech all 30s; tech all 2 min.	8
Figura 8 - Superfície das amostras anodizadas, coloridas e seladas.....	10
Figura 9- Taxas de corrosão em função das condições de ensaio de imersão.....	12
Figura 10- Diagrama de Pourbaix, ou diagrama de E-pH para o alumínio em água.....	13
Figura 11- Variação do pH das soluções.....	14

Lista de tabelas

Tabela 1 – Taxa de corrosão obtidas paras as diferentes condições.....	11
Tabela 2 – Variação de pH das soluções.	14
Tabela 3 – Variação da taxa de corrosão entre os intervalos de 24-72h e 72-168h	15

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Acrônimo	Significado
CGCE	Coordenação-Geral da Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais
DIMEC	Divisão de Mecânica Espacial e Controle

Sumário

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo	1
2. Revisão Bibliográfica	1
3. Metodologia.....	1
3.1. Polimento.....	3
3.2. Anodização	3
3.3. Produção do defeito	4
3.4. Ensaio de imersão	4
4.1. Lixamento em diferentes #granás	5
4.2. Decapagem em Fosco e Tech All	5
4.3. Amostras Anodizadas	5
5. Resultados e Discussões	5
5.1. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	5
5.1.1. Lixamento em diferentes #granás.....	5
5.1.3. Amostras Anodizadas	10
5.1.3. Ensaios de Corrosão	11
6. Conclusões.....	16
7. Trabalhos futuros.....	16
8. Referências	16

1. Introdução

O Grupo de Controle Térmico da Divisão de Mecânica Espacial e Controle (DIMEC) do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE) possui uma linha de pesquisa em tubos de calor de baixa pressão na qual foram estudadas combinações de tubos de calor fabricados em alumínio com e sem revestimentos internos carregados com fluido de trabalho acetona. Dado que a água apresenta propriedades térmicas melhores que a acetona e até superiores que amônia e um risco menor ao operador e ao ambiente, há o interesse em se estudar tubos de calor em alumínio carregado com água. Alumínio sem proteção e água é sabidamente um sistema incompatível para o uso em tubos de calor devido à rápida formação de gases não condensáveis (GNC), mas o uso de inibidores combinado a recobrimentos parece ser uma solução tecnológica a ser explorada. Assim, este documento apresenta os resultados obtidos em estudos de corrosão por imersão em alumínio polido ou anodizado, em meio contendo água e/ou dicromato e em superfície integra ou com defeito. Os resultados se mostraram promissores quanto à combinação da anodização e do inibidor na proteção contra corrosão do alumínio em água.

1.1. Objetivo

O objetivo deste relatório é apresentar os resultados obtidos em estudos de corrosão por imersão em alumínio polido ou anodizado, em meio contendo água e/ou dicromato e em superfície integra ou com defeito

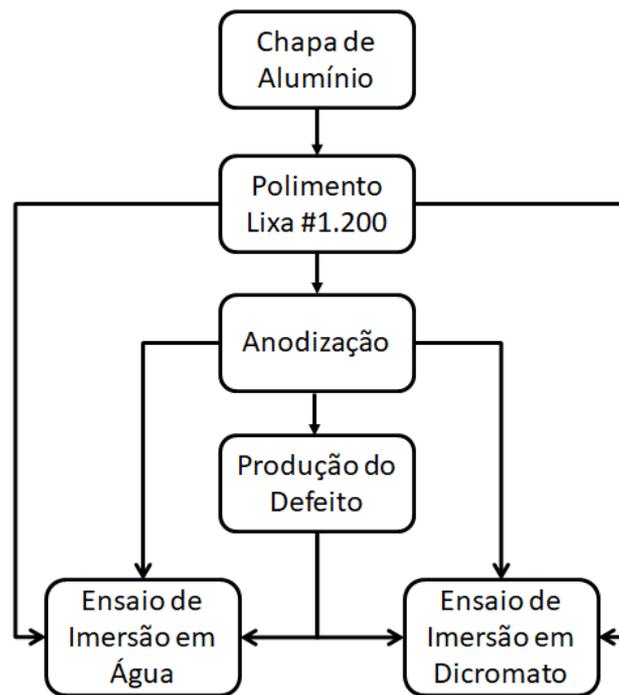
2. Revisão Bibliográfica

A análise da literatura foi realizada no trabalho da Engenharia do Produto “DIMEC-PE-TRP-0003 v00 - Estudo Preliminar sobre Sistemas de Proteção contra Corrosão para uso em Tubos de Calor em Alumínio Carregado com Água”.

3. Metodologia

A Figura 1 mostra as atividades realizadas visando a avaliação das superfícies de alumínio quanto à sua resistência à corrosão por imersão.

Figura 1- Representação esquemática da sequência de produção e ensaios de amostras.



Foram anodizadas amostras de alumínio polido com lixa grana #1.200, visando eliminar as imperfeições superficiais e decapados para eliminar sujidades. Algumas destas amostras foram medidas e pesadas e usadas para avaliar a taxa de corrosão em meio de água deionizada e em solução aquosa de dicromato a 12 g/l.

Outras amostras, após serem submetidas ao polimento, foram anodizadas de acordo com o procedimento “DIMEC-PE-PRC-0010 - Procedimento de Anodização e Coloração em Ácido Sulfúrico para Ligas de Alumínio do INPE”. Na sequência, estas amostras foram medidas e pesadas e usadas para avaliar a taxa de corrosão em meio de água deionizada e em solução aquosa de dicromato a 12 g/l.

E por fim, outras amostras anodizadas foram submetidas à criação de um defeito retilíneo em sua superfície de maneira a expor o metal base. Estas amostras também foram medidas e pesadas e usadas para avaliar a taxa de corrosão em meio de água deionizada e em solução aquosa de dicromato a 12 g/l. O pH inicial das soluções foi ajustado para 6 e também foi controlado durante todo o ensaio.

Adicionalmente, foram realizadas avaliações por microscopia eletrônica de varredura e, amostras de alumínio decapadas em diferentes soluções, notadamente as soluções comerciais Fosco e Tech All. Este estudo visou padronizar a superfície pré anodização, mantendo a morfologia da superfície obtida com o Tech All similar à superfície obtida com o Fosco. Imagens por microscopia eletrônica de varredura das superfícies anodizadas também foram obtidas.

3.1. Polimento

As amostras em alumínio 6061 foram polidas com lixa grana #1.200 visando obter uma superfície isenta de riscos ou arranhões, padronizando-a para o processo seguinte de anodização. Na sequência, a superfície foi limpa por decapagem, em solução Tech All 50g/l em temperatura ambiente por 2 min, para extrair eventuais incrustações oriundas dos elementos da lixa. A Figura X mostra as amostras utilizadas após o polimento e decapagem.

Figura 2- Amostras após o polimento



3.2. Anodização

As amostras foram anodizadas em solução de ácido sulfúrico a 90g/l, 1,2A/dm², por 40 minutos, seguindo o procedimento “DIMEC-PE-DDD-0010 - Procedimento de Anodização e Coloração em Ácido Sulfúrico para Ligas de Alumínio do INPE”. A Figura X mostra o sistema de anodização utilizado e sua fonte de corrente.

Figura 3- Amostras após a anodização



3.3. Produção do defeito

As amostras anodizadas, Figura 4, foram riscadas utilizando um estilete de maneira a expor longitudinalmente o seu metal base.

Figura 4 - Amostras após a anodização e com defeito superficial

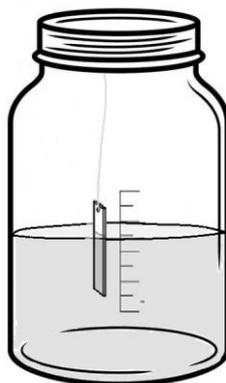


a) antes do ensaio; b) após ensaio de imersão

3.4. Ensaio de imersão

As amostras foram submetidas a ensaio de imersão parcial em água ou em solução aquosa de dicromato a 12 g/l. A temperatura da solução foi mantida por meio do uso de uma chapa de aquecimento próximo à ebulição ($96^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$). A temperatura foi controlada por meio de um termômetro em banho adjacente. Todas as soluções tiveram seu pH ajustado para 6, de maneira a padronizar o início do ensaio, mantendo as condições da solução em uma região de passivação para o alumínio. A Figura 5 mostra uma representação esquemática do sistema utilizado.

Figura 5 - Representação esquemática do sistema de imersão utilizado.



A superfície aberta foi lacrada com filme de polietileno e uma tampa para proporcionar um ambiente hermeticamente fechado.

Foram controlados os pesos iniciais, parciais e finais das amostras, bem com as suas dimensões de maneira a prover a taxa de corrosão nos meios avaliados em 24, 72 e 168h. Adicionalmente, foi controlado o pH das soluções.

4. Microscopia Eletrônica de Varredura

4.1. Lixamento em diferentes #granas

Foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura amostras lixadas com diferentes gramaturas e sem lixamento prévio, e posteriormente anodizadas, visando identificar o impacto do lixamento na camada anodizada.

4.2. Decapagem em Fosco e Tech All

Foram avaliadas as superfícies das amostras de alumínio visando verificar os efeitos de diferentes soluções e condições de decapagem. O decapante Fosco é um produto comercial a base de NaOH com aditivos, assim como o Tech All. A indisponibilidade do Fosco exigiu que novos ensaios fossem realizados.

4.3. Amostras Anodizadas

Foram analisadas as superfícies das amostras anodizadas, coloridas e seladas, observadas por microscopia eletrônica de varredura, após a escolha dos melhores processos acima descritos.

5. Resultados e Discussões

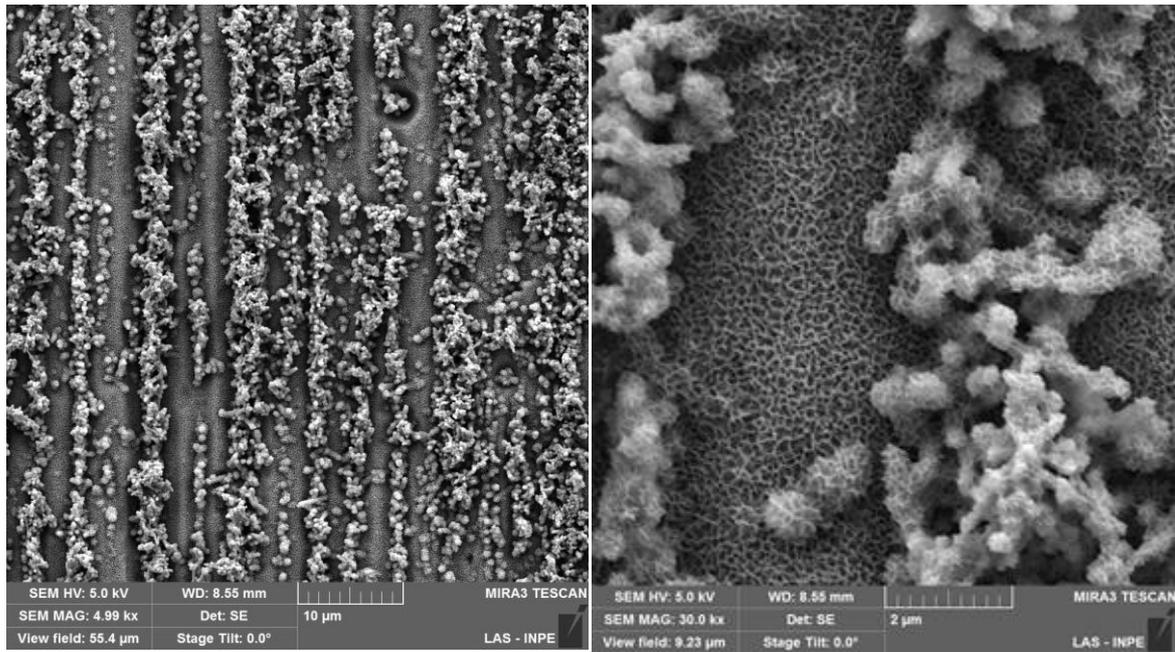
5.1. Microscopia Eletrônica de Varredura

5.1.1. Lixamento em diferentes #granas

Foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura amostras lixadas com diferentes gramaturas e sem lixamento prévio. A Figura de 6 mostra as superfícies anodizadas após estes procedimentos.

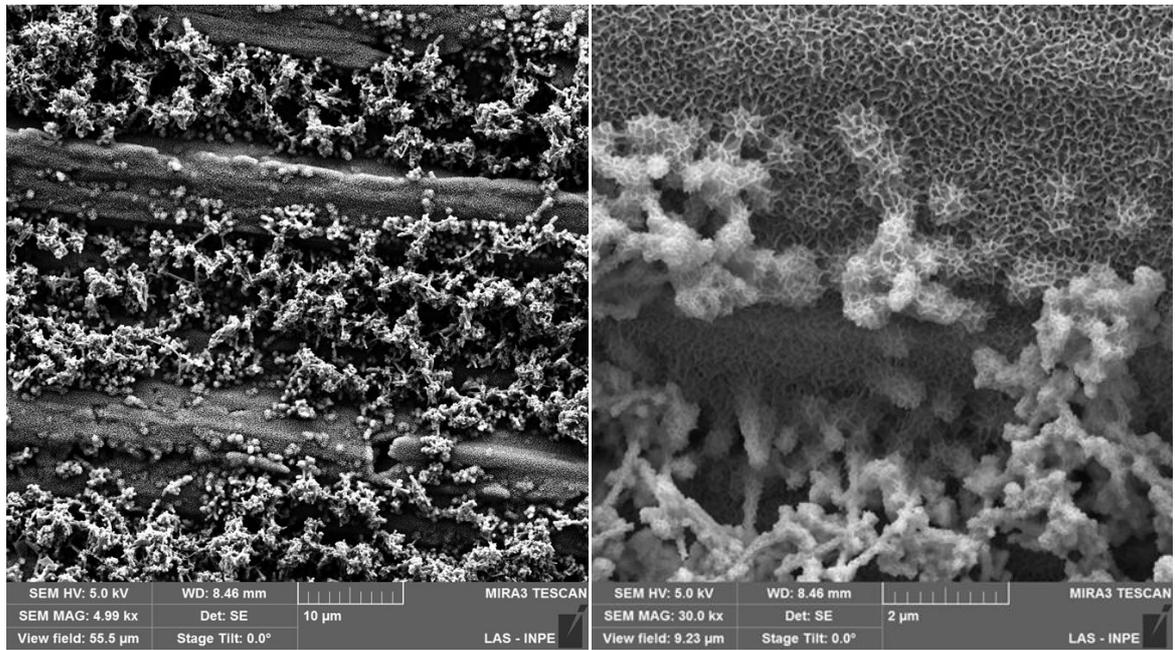
Figura 6 – Microscopia eletrônica de varredura das amostras anodizadas

a) Amostras anodizadas sem lixamento



5kx

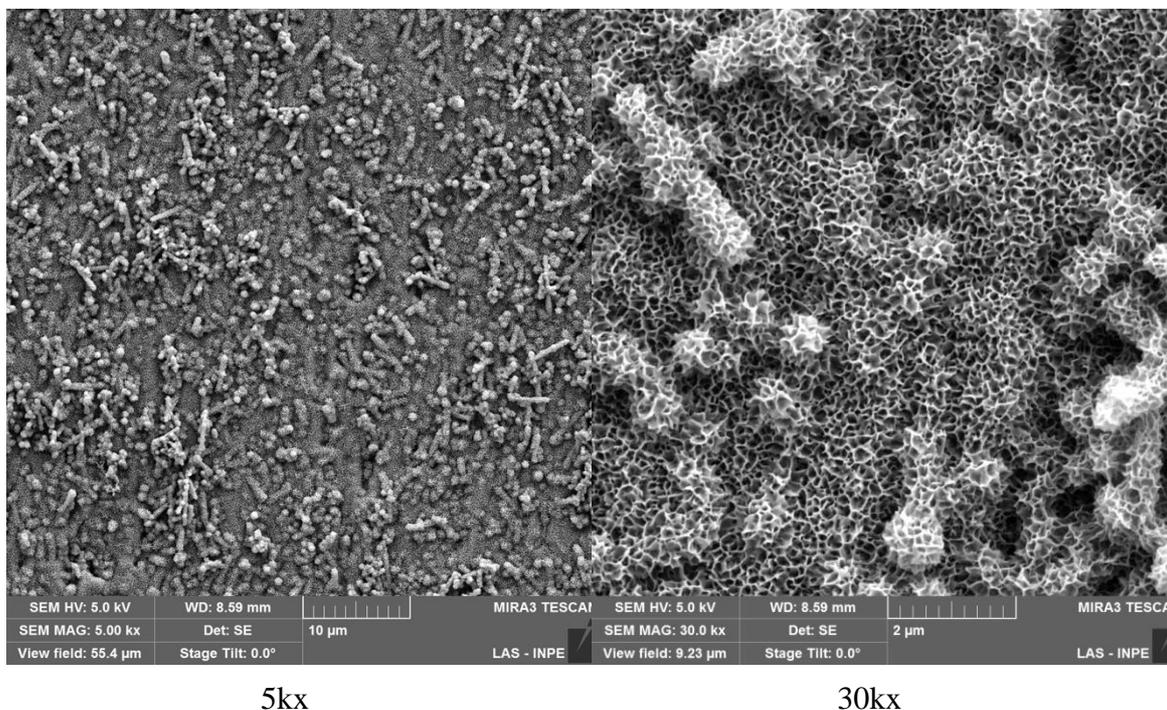
30kx



5kx

30kx

c) Amostras anodizadas após lixamento em lixas #220, #400, #600 e #1200.

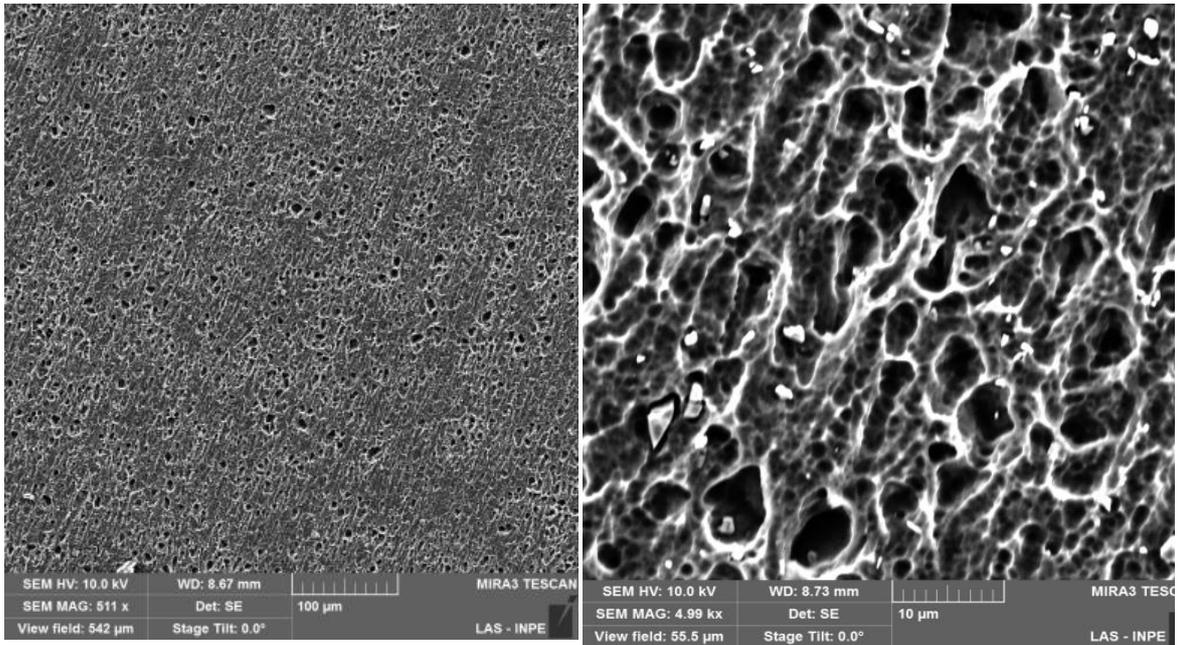


Observa-se na Figura 6a) que as amostras não lixadas apresentam uma direção preferencial de crescimento do óxido, sendo alinhado com a direção de laminação do material. Isso pode estar associado a uma laminação superficial a frio no último estágio de laminação, o que normalmente é realizado para melhorar as características mecânicas do material. Observa-se na Figura 6b) que mesmo lixando a superfície, com duas lixas diferentes, ainda há esta formação direcional do óxido. Contudo, na Figura 6c), na qual foram utilizadas diversas lixas, há uma maior homogeneidade na superfície anodizada. De forma que o processo de eleição na construção dos corpos de prova a serem avaliados levou em conta este procedimento.

5.1.2. . Decapagem em Fosco e Tech All

Foram avaliadas as superfícies das amostras em alumínio visando verificar os efeitos de diferentes soluções e condições de decapagem. O decapante Fosco é um produto comercial a base de NaOH com aditivos, assim como o Tech All. A indisponibilidade do Fosco exigiu que novos ensaios fossem realizados.

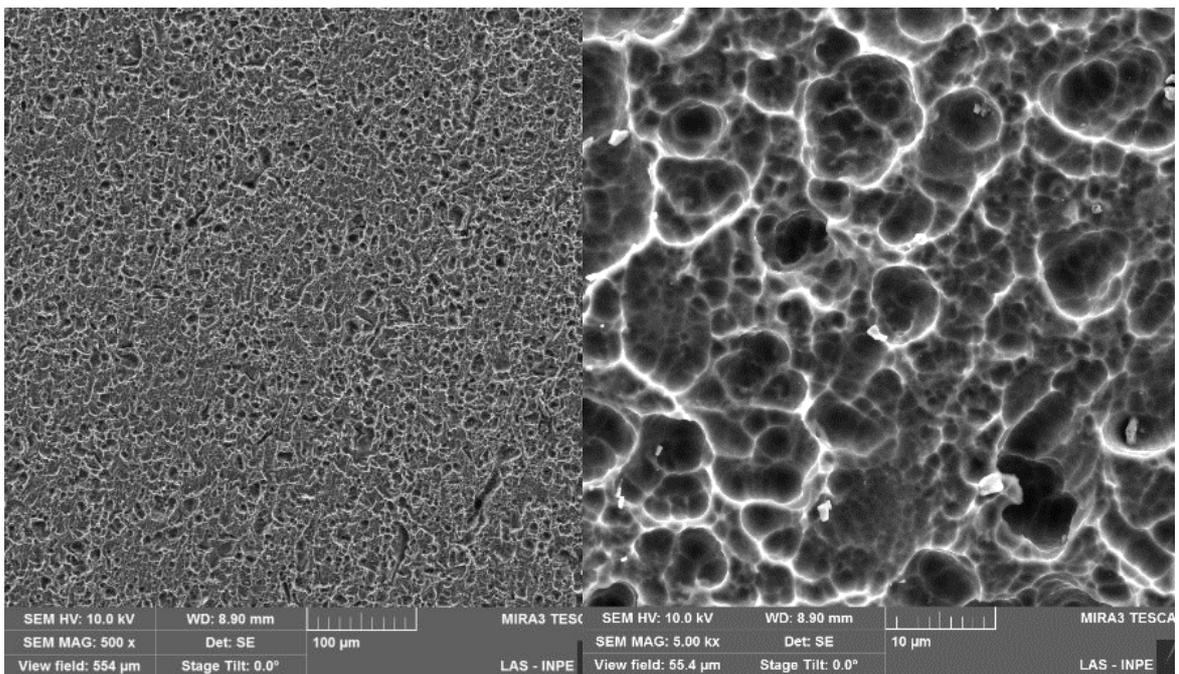
Figura 7 - Amostras decapadas após o processo de lixamento: a) fosco 30s; b) fosco 2min; c) tech all 30s; tech all 2 min.



500x

5kx

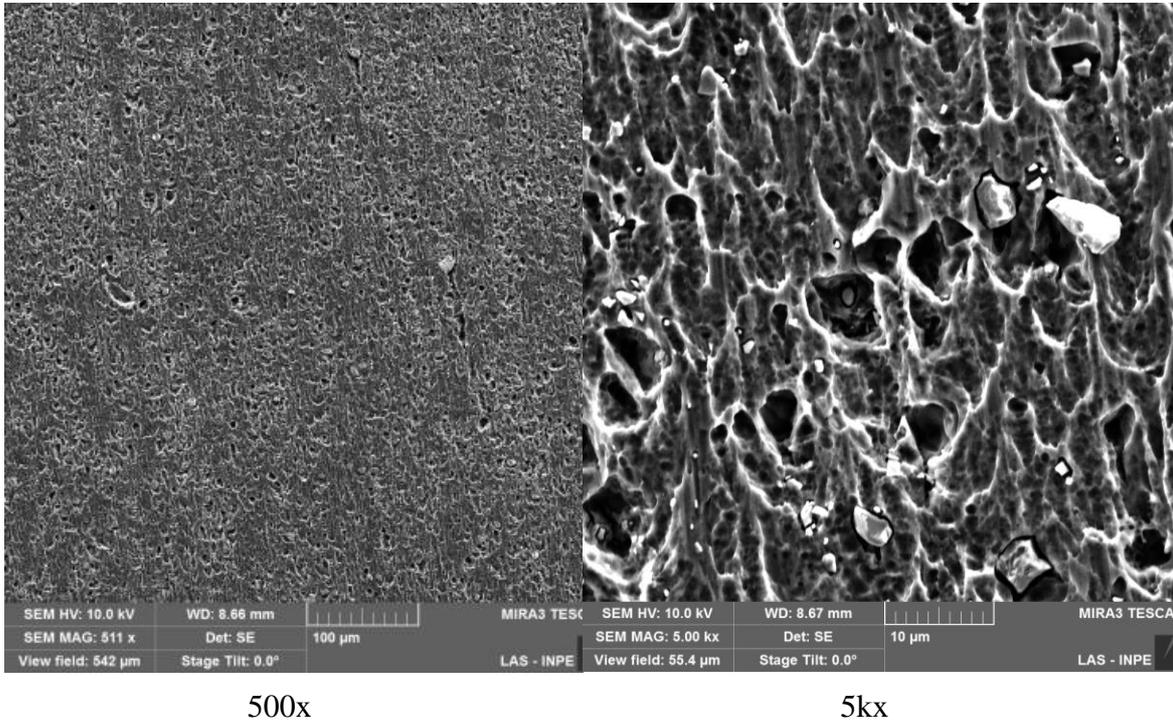
a) Fosco 30s



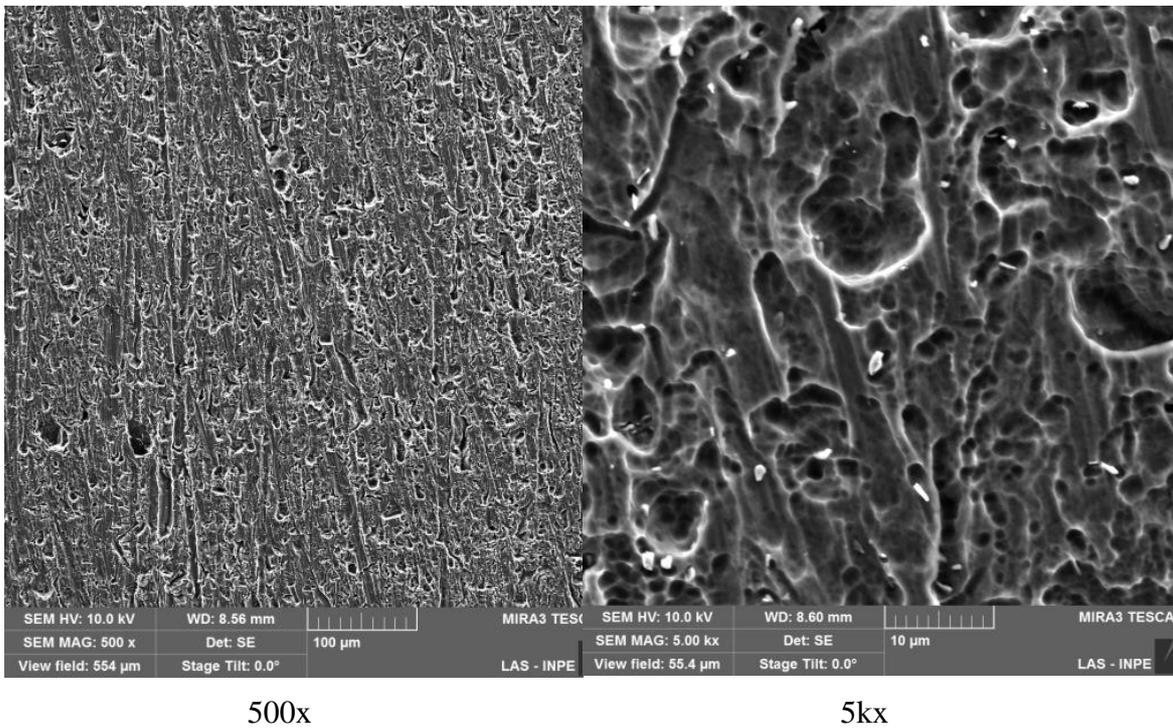
500x

5kx

b) Fosco 2 min



c) Tech All 30s



d) Tech All 2 min

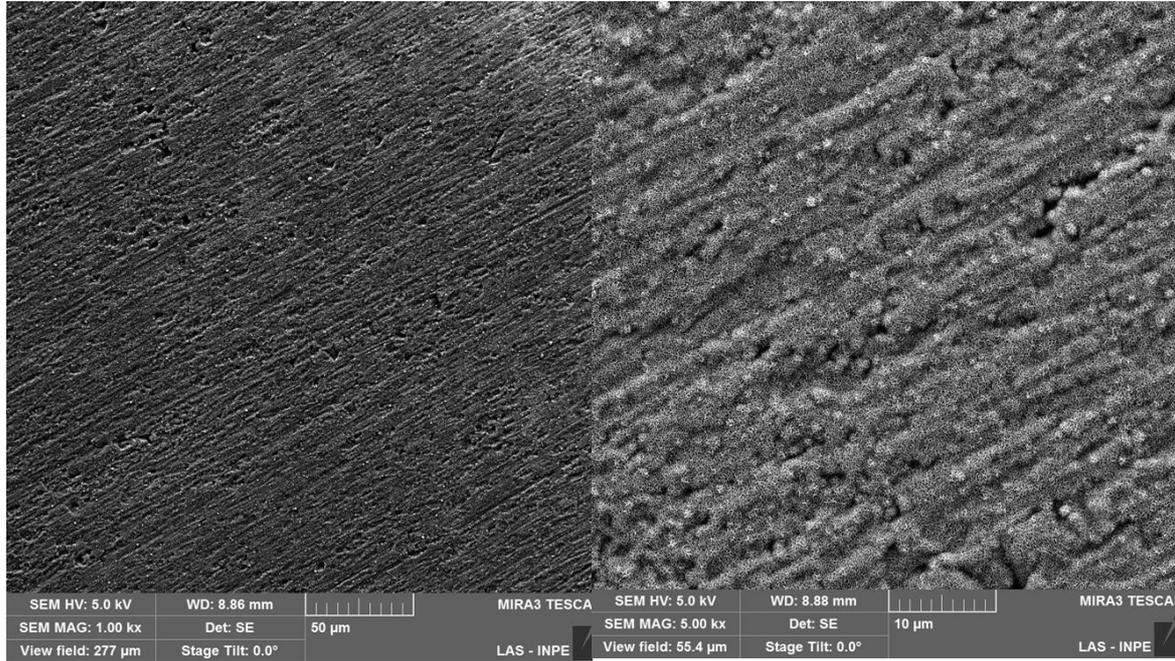
Observa-se que as amostras decapadas tanto com fosco quanto com all tech por 30 segundos, Figuras 7a) e 7c), respectivamente, apresentam uma homogeneidade quanto aos tamanhos das cavidades atacadas melhor quando comparadas as amostras decapadas

por 2 minutos de ambas as soluções, Figuras 7b) e 7d), respectivamente. Assim, adotou-se o tempo de 30 segundos para a decapagem.

5.1.3. Amostras Anodizadas

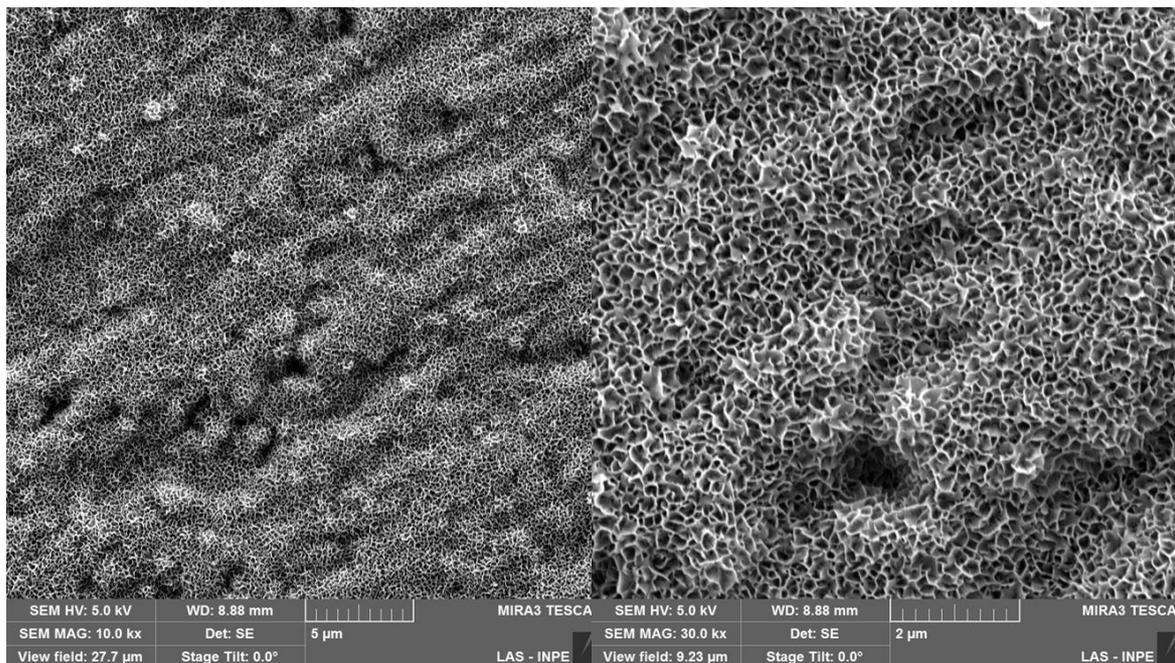
A Figura 8 mostra a superfície das amostras anodizadas, coloridas e seladas observadas por microscopia eletrônica de varredura.

Figura 8 - Superfície das amostras anodizadas, coloridas e seladas.



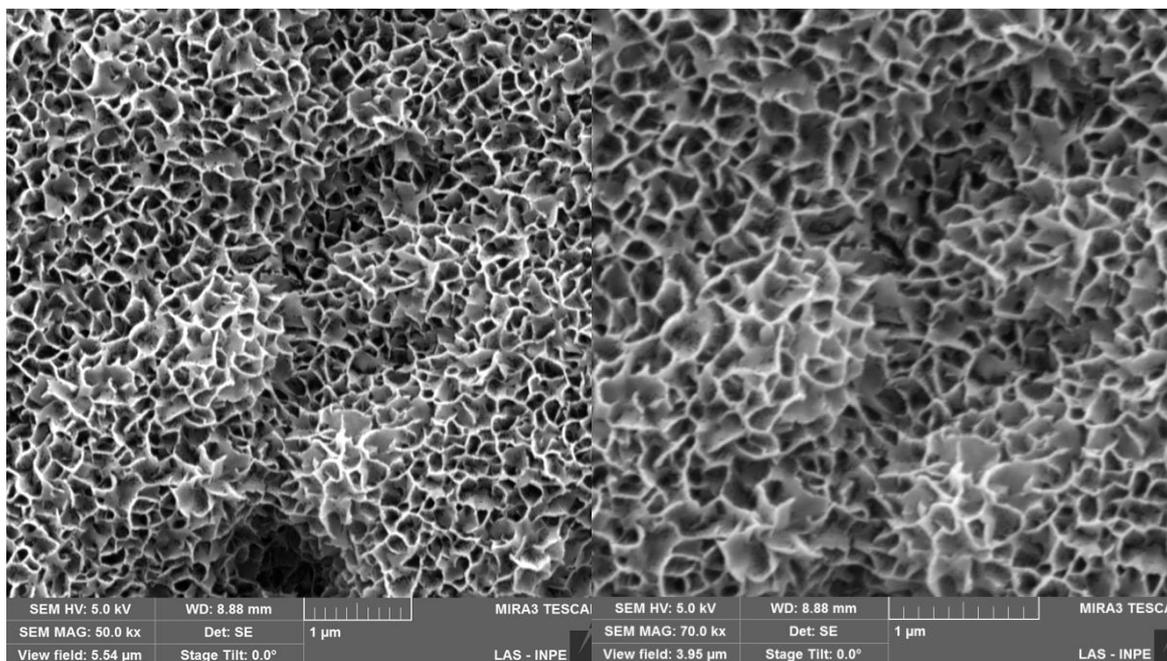
1kx

5kx



10kx

30kx



50kx

70kx

Observa-se que a superfície apresenta-se relativamente bem homogênea, com ausências de trincas, e com poros selados.

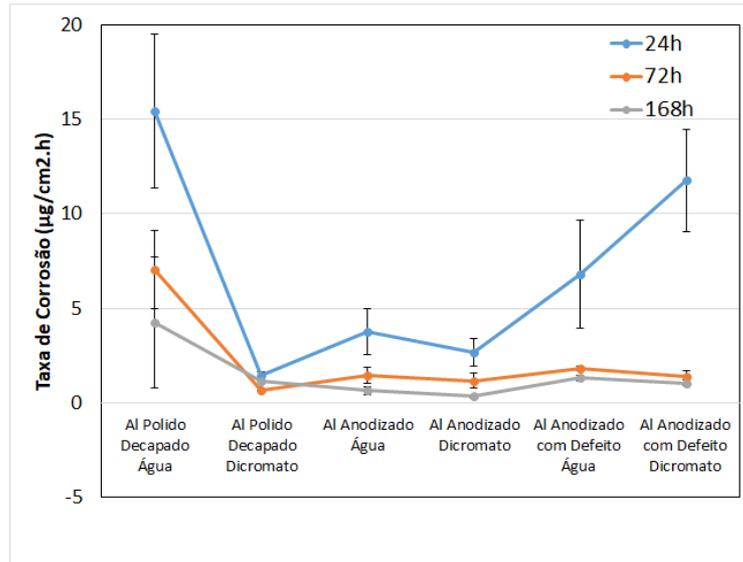
5.1.4. Ensaios de Corrosão

A Tabela 1 traz os resultados das taxas de corrosão obtidas em diferentes condições. Os mesmos resultados são reproduzidos na Figura 9. A Tabela 2 traz a variação de pH das soluções, sendo estas reproduzidas na Figura 11.

Tabela 1 – Taxa de corrosão obtidas para as diferentes condições.

Amostras	24h	± SD Taxa	72h	± SD Taxa	168h	± SD Taxa
Al Polido Decapado Água	15,42	4,05	7,04	2,07	4,25	3,48
Al Polido Decapado Dicromato	1,44	0,19	0,68	0,01	1,14	0,52
Al Anodizado Água	3,76	1,21	1,45	0,44	0,65	0,22
Al Anodizado Dicromato	2,67	0,73	1,16	0,40	0,33	0,08
Al Anodizado com Defeito Água	6,80	2,84	1,82	0,10	1,31	0,14
Al Anodizado com Defeito Dicromato	11,75	2,71	1,37	0,32	1,05	0,16

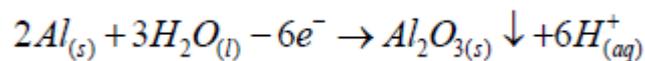
Figura 9- Taxas de corrosão em função das condições de ensaio de imersão.



Observa-se que as taxas de corrosão do alumínio polido em água são relativamente maiores que as demais, a exceção da taxa obtida para 168h de imersão. Este efeito será mais bem discutido na sequência.

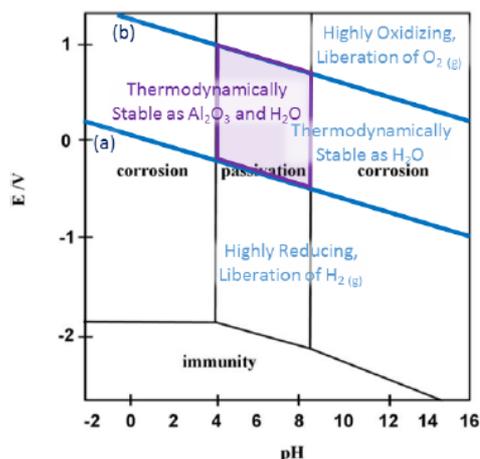
Tanto o uso do dicromato quanto da camada anodizada tem um efeito protetivo sobre o alumínio, dado que as taxas de corrosão diminuem significativamente. Contudo, uma vez que esta camada é rompida, a taxa de corrosão aumenta para o tempo de imersão de 24h e mantém-se baixa para tempos maiores.

Como evidenciado na revisão da literatura, o alumínio metálico, na presença da água, se corrói formando óxido de alumínio e H⁺. Quando em água, estes íons H⁺ se combinam para formar o H₂ gasoso, que é um GNC (gás não condensável).



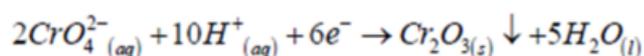
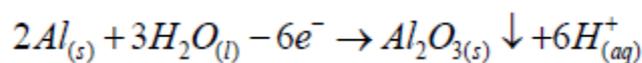
Neste caso, há um aumento do pH pela dissociação da água, e consequente presença de íons OH⁻. Isso faz com que além da formação dos gases não condensáveis, forme-se também um ambiente hostil ao alumínio, que se corrói fortemente em meio básico.

Figura 10- Diagrama de Pourbaix, ou diagrama de E-pH para o alumínio em água.



Assim, observa-se na Tabela 2 que o pH da amostra somente polida e decapada cresce continuamente com o tempo, de maneira que a condição da solução só se deteriora com o tempo. Observa-se que, apesar da taxa de corrosão se diminuir com o tempo de 168h, ainda assim ela é alta. Um estudo mais prolongado poderia evidenciar este efeito deletério à corrosão do alumínio.

Já para o alumínio polido e decapado na presença do dicromato observa-se que o pH praticamente não mudou, o que é um forte indício de que a reação de formação de H_2 não se processou. Isso é evidenciado na literatura pela reação de oxidação do cromo, eliminando o hidrogênio H^+ antes que se forme o gás H_2 .



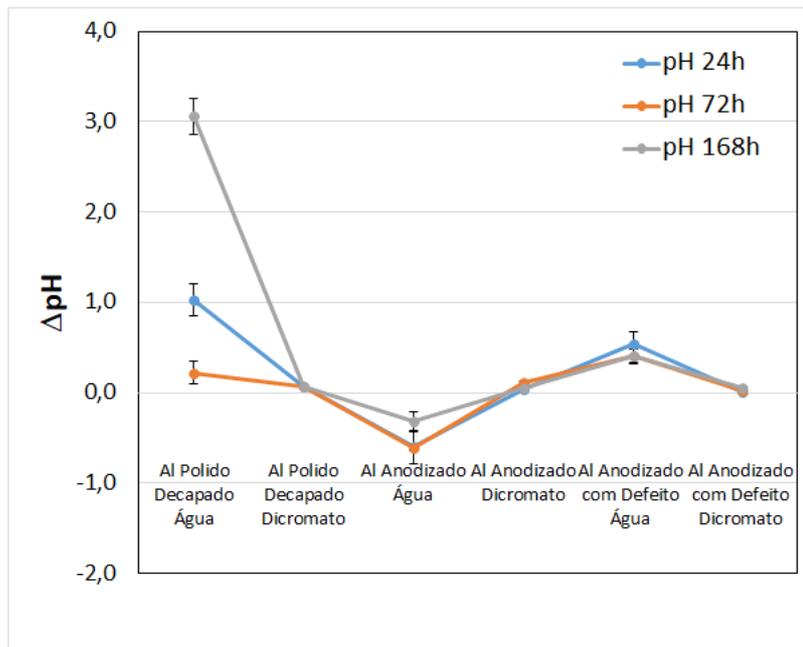
Entretanto, é de se presumir que este dicromato será consumido por um período até eu se esgote na solução, iniciando-se o processo de formação do H_2 , resultando em perda de eficiência do tubo de calor no médio prazo. O processo de corrosão do tubo não foi bloqueado, somente foi reduzida a taxa de corrosão.

O mesmo efeito de manutenção do pH das soluções foi observado para as amostras anodizadas e submetidas à imersão em solução de dicromato, o que mostra que o dicromato atua na presença de um defeito na camada anodizada. Nota-se que a menos de um aumento na taxa de corrosão para as amostras pesadas com 24h, houve uma redução da taxa de corrosão para as amostras pesadas com 72 e 168h.

Tabela 2 – Variação de pH das soluções.

Amostras	pH 24h	± SD pH	pH 72h	± SD pH	pH 168h	± SD pH
Al Polido Decapado Água	1,02	0,18	0,22	0,13	3,06	0,20
Al Polido Decapado Dicromato	0,06	0,02	0,07	0,02	0,07	0,02
Al Anodizado Água	-0,60	0,04	-0,61	0,17	-0,32	0,10
Al Anodizado Dicromato	0,04	0,02	0,11	0,02	0,05	0,02
Al Anodizado com Defeito Água	0,53	0,13	0,41	0,08	0,41	0,10
Al Anodizado com Defeito Dicromato	0,01	0,01	0,03	0,02	0,05	0,02

Figura 10- Variação do pH das soluções



A Tabela 3 traz a variação da taxa de corrosão entre os intervalos de 24-72h e 72-168h.

Tabela 3 – variação da taxa de corrosão entre os intervalos de 24-72h e 72-168h.

Amostras	24-72h	72-168h
Al Polido Decapado Água	2,85	2,16
Al Polido Decapado Dicromato	-0,29	0,38
Al Anodizado Água	0,29	0,13
Al Anodizado Dicromato	0,40	0,29
Al Anodizado com Defeito Água	-1,89	0,93
Al Anodizado com Defeito Dicromato	-3,46	0,81

Nota-se que a taxa de corrosão para o alumínio polido no intervalo de 24-72h é muito maior que em qualquer outra condição. Cabe aqui uma explicação. Este óxido formado no alumínio é aderente, de maneira que o que se observa é um aumento da massa da amostra dado a formação de um óxido em sua superfície. Contudo, observa-se que a variação da taxa de corrosão é menor para o intervalo de 72-168h. Ainda assim, uma taxa de corrosão alta, relativamente a outras condições.

Em outro caso, para o mesmo intervalo de 24-72h, a variação na taxa de corrosão para o alumínio somente anodizado, quer seja em água ou em dicromato é drasticamente reduzida, quando comparada ao alumínio polido. Mantendo esta taxa baixa para o intervalo de 72-168h.

Contudo, há um efeito interessante no mecanismo de formação/ dissolução do óxido formado na superfície do metal. Nota-se que tanto para a amostra de alumínio polido, bem como para as amostras de alumínio anodizado e com defeito, a variação na taxa de corrosão nos tempos de 24-72h é negativa. O que mostra que o dicromato está atuando neste mecanismo e que há dissolução do alumínio formado inicialmente e não a formação de um óxido protetor. Na sequência, há a formação de um óxido protetor e a variação na taxa passa a ser positiva. Já para as amostras anodizadas, e sem defeito, a variação na taxa em qualquer dos intervalos é positiva.

Ainda assim, há que se considerar também um eventual efeito de aclimação do óxido à solução. Ou seja, o óxido quando recebe a solução, mesmo que tenha seus poros preenchidos e selados quimicamente, vão sofrer algum tipo de embebedimento pela solução. Assim, estas taxas observadas nas 24h iniciais para as amostras anodizadas e sem defeito podem ter influência da presença das soluções. Pelo histórico da literatura, os tubos de calor em alumínio com solução aquosa de dicromato não resistiram a mais que 72h em ensaio de vida, ou seja, em menos de 72 houve a formação de gases não condensáveis suficiente para que não houvesse mais convecção do líquido pelo tubo. Entretanto, para o caso destes tubos em alumínio contendo somente água a variação de pH chegou a 2,73, bem similar a variação obtida de 3,06 por este estudo. Já variação de pH obtida para os tubos de calor em alumínio preenchidos com dicromato chegou a 0,50, enquanto que para este estudo a variação de pH ficou na casa de 0,05. Ou seja,

uma ordem de grandeza menor. E sendo o pH proporcional a concentração de H^+ , é de se inferir que o dicromato ainda estava atuando após 168h. Estudos com tempos mais prolongados podem ajudar a definir se o sistema alumínio anodizado e dicromato seria capaz de suportar a vida útil esperada para os tubos de calor.

6. Conclusões

Os resultados evidenciam que tanto o dicromato quanto a anodização contribuem positivamente na redução da taxa de corrosão por imersão. Contudo, quando o alumínio não está protegido por uma camada ou quando há um defeito na camada, o dicromato é consumido no processo, de forma que o tempo de manutenção desta proteção ainda permanece desconhecido.

7. Trabalhos futuros

Dando continuidade aos estudos, será realizada a avaliação da camada anodizada, na presença de água e dicromato, utilizando técnicas eletroquímicas como polarização potenciodinâmica e impedância. Esta avaliação visa comparar os valores de taxa de corrosão obtidos com os valores extraídos por extrapolação de Tafel, obtida nas curvas de polarização anódicas, bem como entender o comportamento das camadas na presença de ambas as soluções. Adicionalmente, será avaliada a taxa de corrosão por tempo prolongado do alumínio anodizado na presença de defeito em solução de dicromato de maneira a tentar identificar o eventual tempo de consumo do dicromato, o qual dará ideia do tempo de vida útil de um tubo de calor anodizado internamente.

8. Referências

- I Catton et al. [2015] United States Patent US 8,967.236 B2. Inorganic aqueous Solution (IAS) for Phase-Change Heat Transfer Medium.
- Q Yao and Y Catton [2016]. A designer fluid for aluminum phase change devices. Volume I - General Inorganic Aqueous Solution (IAS) Chemistry
- Q Yao and Y Catton [2016] A designer fluid for aluminum phase change devices. Volume II Aluminum Inorganic Aqueous Solutions (IAS) Chemistry and Experiments
- Q Yao and Y Catton [2016]. A designer fluid for aluminum phase change devices. Volume III Performance Enhancement in Copper Heat Pipes
- MJ Stubblebine et al. [2016] Theoretical and Experimental Investigation of the Effects and Limits of using Inorganic Aqueous Solutions to Resist NCG Generation in Aluminum Thermosiphons. PhD thesis in Mechanical Engineering. University of California, UCLA, Los Angeles.

<https://escholarship.org/uc/item/4nk859pk>

- SW Reilly, et al. [2011] “Use of Inorganic Aqueous Solutions for Passivation of Heat Transfer Devices,” Proceedings of the Tenth International Heat Pipe Symposium, Taipei, Taiwan, pp. 153–157.
- MJ Stubblebine et al. [2019] A New Method for Evaluating Heat Pipe Fluid Compatibility. *Applied Thermal Engineering*. 101: 796-803 DOI: 10.1016/J.Applthermaleng.2016.04.020
- M Kendig et al. [2003] Corrosion Inhibition of Aluminum and Aluminum Alloys by Soluble Chromates, Chromate Coatings, and Chromate-Free Coatings. *Corrosion—Vol. 59, No. 5*. DOI: 10.5006/1.3277570.
- MA Horban [2020] Caracterização Eletroquímica e Termo Óptica do Alumínio Negro Anodizado. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais do INPE.
- A Khiabani et al [2021]. Effect of heat treatment on surface characteristics and corrosion behavior of nickel plated AA2024 aluminum alloy. *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 9 (2021) 035048. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/ac19a0>.