



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
ENGENHARIA METALURGICA

LUIS FERNANDO L. S. JÁCOME

**EFEITO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E DE RESISTÊNCIA A CORROSÃO DA LIGA AA 6201 PARA
UTILIZAÇÃO EM CABOS PARA CONDUÇÃO DE ELETRICIDADE**

FORTALEZA

2013

LUIS FERNANDO L. S. JÁCOME

**EFEITO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E DE RESISTÊNCIA A CORROSÃO DA LIGA AA 6201 PARA
UTILIZAÇÃO EM CABOS PARA CONDUÇÃO DE ELETRICIDADE**

Trabalho de Conclusão do Curso,
apresentado para obtenção do grau de
Engenheiro Metalurgista no Curso de
Engenharia Metalúrgica da
Universidade Federal do Ceará - UFC.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José
Gomes da Silva

FORTALEZA

2013

LUIS FERNANDO L. S. JÁCOME

**EFEITO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E DE RESISTÊNCIA A CORROSÃO DA LIGA AA 6201 PARA
UTILIZAÇÃO EM CABOS PARA CONDUÇÃO DE ELETRICIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de
Engenharia Metalúrgica da
Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: 18/01/2013

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Livre Docente. Francisco Belmino Romero

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu

Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

O mais importante, agradeço a Deus, pelo dom da vida, por me dar mais de uma chance para está aqui concluindo meu curso. A Nossa Senhora pela sua eterna intercessão e a São Miguel Arcanjo pela proteção.

Aos meus pais Fernando J. de Oliveira e Rosângela L. S. Jácome pela ótima educação, esforço que muitas vezes fizeram por mim o que não poderiam fazer, formação de caráter, incentivo, amor incondicional, carinho, dedicação, pois sou o que sou devido ao exemplo deles.

A minha avó, Rosimar L. Saboia, por todo o seu amor e pelo início da minha educação. Saudades.

A minha esposa Márcia S. Bastos, que esta comigo desde o início da minha graduação, pela paciência, amor, carinho e compreensão que muitas vezes me confortou e me deu forças para continuar essa longa caminhada.

Aos meus amigos Daniel Lucena, Jardel Belo, Yuri Negreiros, Nathanael Wagner, Giovani Gonçalves e muitos outros que sem eles essa jornada para a conclusão com toda certeza seria muito mais difícil.

Ao Todos os meus professores que com muita dedicação e respeito transferiram muito conhecimento para mim e meus amigos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva por todo o seu apoio e paciência comigo.

A Dra. Iêda Nadjá Silva Montenegro pela transferência de conhecimento, paciência e oportunidade dada para que eu pudesse trabalhar no NUTEC.

Ao Professor Belmino Romero por todo o seu apoio e ajuda nesse trabalho, pelos incentivos, oportunidades e ótimos conselhos. Um amigo.

Aos meus companheiros de trabalho Janaina e Seu Antônio que tanto me alegraram e me ajudaram.

A Universidade Federal do Ceará pelo âmbito de estudo e aprendizado.

Ao NUTEC pela estrutura e oportunidade de conhecimento.

Resumo

A liga de alumínio 6201 é utilizada na indústria de transmissão de eletricidade devido a sua boa combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e ótima condutividade elétrica. No entanto, esta liga sofre problemas de corrosão sob tensão devido ao fato de a mesma ser aplicada sob a forma de cabos com fios encordoados. Devido ao encordoamento dos cabos e dos processos de conformação mecânica anteriores, extrusão e trefilação, nota uma microestrutura com grãos deformados no sentido do encordoamento e das etapas de conformação, neste estado está mais propensa a sofrer corrosão sob tensão. Uma possível solução seria o alívio dessas tensões via tratamento térmico. O presente trabalho tem por objetivo estudar a influência de tratamentos térmicos de recozimento pleno com diferentes tempos de tratamento e diferentes taxas de resfriamento nas propriedades mecânicas e a resistência à corrosão. Foram avaliadas amostras expostas na região do Porto das Dunas - Aquiraz - Ceará, durante o período de 05 (cinco) meses, entre 04 de Fevereiro de 2012 e 07 de Julho de 2012 com retiradas mensais, buscando simular um ambiente mais próximo da realidade da aplicação da liga estudada. O material foi avaliado em três condições, solubilizado após extrusão, recozido a 350°C por 01 minuto com resfriamento lento, dentro do forno, e recozido a 350°C por 05 minutos com resfriamento moderado, ao ar. Logo após os tratamentos verificou-se a microestrutura através de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. As propriedades mecânicas foram obtidas através de microdureza e ensaios de tração. A resistência à corrosão do material foi avaliada através de ensaios de polarização potenciodinâmica linear em solução de NaCl 5%. Observou-se uma microestrutura menos tensionado, com certo crescimento granular, no entanto, não houve perda de resistência mecânica e mostrando-se mais resistente a corrosão nesse curto espaço de tempo de exposição;

Palavras-chave AA6201. Corrosão. Propriedades mecânicas.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Micrografia da camada externa da liga de Alumínio 6201 Solubilizada. 0 meses.	8
Figura 02 - Micrografias das camadas da liga de Alumínio 6201 Recozimento Pleno com resfriamento moderado. Externa. 0 meses.	10
Figura 03 - Micrografias das camadas da liga de Alumínio 6201 Recozimento Pleno com resfriamento lento. Externa. 0 meses.	11
Figura 04 - Micrografias das camadas externas da liga de Alumínio 6201 (a) Solubilizada, (b). Recozimento Pleno com resfriamento moderado e (c) Recozimento Pleno com resfriamento lento. 01 mês de exposição.	12
Figura 05 - Micrografias das camadas externas da liga de Alumínio 6201 (a) Solubilizada, (b). Recozimento Pleno com resfriamento moderado e (c) Recozimento Pleno com resfriamento lento. 02 meses de exposição.	14
Figura 06 - Micrografias das camadas externas da liga de Alumínio 6201 (a) Solubilizada, (b). Recozimento Pleno com resfriamento moderado e (c) Recozimento Pleno com resfriamento lento. 03 meses de exposição.	16
Figura 07 - Micrografias das camadas externas da liga de Alumínio 6201 (a) Solubilizada, (b). Recozimento Pleno com resfriamento moderado e (c) Recozimento Pleno com resfriamento lento. 04 meses de exposição.	18
Figura 08 - Micrografias das camadas externas da liga de Alumínio 6201 (a) Solubilizada, (b). Recozimento Pleno com resfriamento moderado e (c) Recozimento Pleno com resfriamento lento. 05 meses de exposição.	20
Figura 09 – Microscopia Eletrônica da camada externa da liga de Alumínio 6201 Solubilizadas. (a) 5.000X (b) 10.000X. 0 meses de exposição.	22
Figura 10 - Microscopia Eletrônica da camada externa da liga de Alumínio 6201 recozimento Pleno com resfriamento moderado (a)5.000X (b) 10.000X. 0 meses.	24

Figura 11 - Microscopia Eletrônica das camadas da liga de Alumínio 6201 recozimento Pleno com resfriamento lento. (a) bastonete branco 10.000X (b) 10.000X. 0 meses.....	25
Figura 12 - EDX do bastonete branco da amostra da liga de alumínio 6201 tratada termicamente na condição de recozimento pleno com resfriamento lento. Bastonete também visualizado nas amostras com condição de recozida com resfriamento moderado.	27
Figura 13 - Microscopia Eletrônica das camadas da liga de Alumínio 6201 recozimento Pleno com resfriamento lento. (a) Como Recebido 10.000X (b) Recozido Moderado 10.000X. (c) Recozido Lento 5.000X. 05 meses.	28
Figura 14 - Comparativo da resistência mecânica a tração da camada externa da liga de alumínio 6201 e dos tratamentos térmicos propostos. Tensão Máxima (Mpa) durante os cinco meses de exposição na região do Porto das Dunas – Aquiraz – CE.	30
Figura 15 - Comparativo da resistência mecânica a tração da camada externa da liga de alumínio 6201 e dos tratamentos térmicos propostos. Limite de escoamento (Mpa) durante os cinco meses de exposição na região do Porto das Dunas – Aquiraz – CE.	31
Figura 16 - Resultado comparativo da curva de polarização da camada externa da liga de alumínio na condição solubilizada, como recebido, com 0 e 5 meses de exposição.	33
Figura 17 - Resultado comparativo da curva de polarização da camada externa da liga de alumínio na condição de recozimento pleno com resfriamento moderado, com 0 e 5 meses de exposição.	34
Figura 18 - Resultado comparativo da curva de polarização da camada externa da liga de alumínio na condição de recozimento pleno com resfriamento lento, com 0 e 5 meses de exposição.	35
Figura 19 - Comparativo das curvas de polarização das camadas externas da liga estudada nas condições de tratamento térmico proposto pelo trabalho.	

Amostras com 05 meses de exposição na região do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará. 36

Figura 20 - Comparativo das curvas de polarização das camadas externas da liga estudada nas condições de tratamento térmico proposto pelo trabalho. Amostras com 05 meses de exposição na região do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará. 37

Figura 21 - Comparativo das variações de passivação (ΔE_{pas}), em mV, dos fios das camadas externas das três condições estudadas com 0 e 5 meses de exposição. 38

Figura 22 - Média das medidas dos comparativos de microdureza Vickers das camadas externas da liga de alumínio 6201 nas condições de tratamentos térmicos propostas em um período de 0 e 5 Meses de exposição. 39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	<i>Aluminum Alloy;</i>
NUTEC	Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará;
COELCE	Companhia Energética do Ceará;
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico;
mm	Milímetros (10 ⁻³ m);
GPa	Giga Pascal (10 ⁹ Pa);
Mpa	Mega Pascal (10 ⁶ Pa);
°C	Graus Célsius;
HV	Hardness Vickers;
CR	Condição de tratamento térmico como recebida, solubilizada;
RM	Condição de tratamento térmico de recozimento pleno com resfriamento moderado;
RL	Condição de tratamento térmico de recozimento pleno com resfriamento lento.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Justificativa	2
3. Objetivos	4
3.1. Objetivos Gerais	4
3.2. Objetivos Específicos	4
4. Revisão Bibliográfica	5
4.1. Alumínio	5
4.2. Solubilização	5
4.3. Recozimento Pleno	5
5. Materiais e Métodos	6
6. Resultados e Discussão	8
6.1. Microscopia Ótica	8
6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura	22
6.3. Resistência Mecânica a Tração	30
6.4. Curvas de Polarização Potenciodinâmica Linear	32
6.5. Microdureza Vickers	38
7. Conclusão	40
8. Referências Bibliográficas	41

1. Introdução

Um dos grandes problemas enfrentados por todos os setores da indústria é o da corrosão, exigindo uma grande preocupação, pois, este problema está diretamente relacionado com os custos do projeto, incluindo o da escolha do material.

Para uma determinada atividade, ao selecionar um material, é necessário que todos os parâmetros que contribuam para uma diminuição da vida útil sejam devidamente estudados. No caso dos cabos de transmissão de energia elétrica para utilização na região costeira do estado do Ceará além, de uma alta condutividade elétrica, uma das variáveis que deve ser analisada com um maior cuidado é a resistência à corrosão.

O cobre eletrolítico, 99,99% de pureza, desde muito tempo vem sendo empregado na indústria de transmissão de energia elétrica, pois, atende todos os requisitos, como ótima condutividade elétrica, boa resistência à corrosão, boa resistência mecânica. No entanto, este possui um valor de mercado alto e ainda esse setor enfrenta um grande problema com os roubos dos cabos. Levando a preocupação de sua substituição. O alumínio, mesmo com uma condutividade elétrica menor, cerca de 60 – 65% da do cobre ^[1], vem sendo utilizado no setor de transmissão de energia elétrica em regiões mais afastadas da costa cearense, inclusive em outros países essa substituição já foi completamente realizada.

A região do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará, como concluído nos projetos anteriores de Cabo Liga e Corrosão e Degradação Atmosférica dos Materiais Elétricos ^[2], possui uma atmosfera bastante agressiva sejam por concentrações de cloretos, transportados pelos ventos que atingem a água do mar e sulfatos, reduzindo a vida útil dos cabos de transmissão de energia elétrica.

No projeto Cabo Liga executado pela Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará - NUTEC em parceria com a Companhia Energética do Ceará - COELCE, foram estudados cinco tipos de materiais, um deles era a liga proposta neste trabalho em duas condições, com e sem graxa. Após análise das ligas, tanto com graxa como sem, conclui-se que a liga sem graxa

obteve um melhor desempenho. Foi então decidido focar o estudo na condição de melhor resultado. [3]

O cabo a ser estudado, liga de alumínio 6201 sem graxa, é composto por 19 fios divididos em três camadas, sendo a primeira com 12 fios, a segunda com 06 fios e a terceira com apenas 01 fio cada um deles com uma bitola de aproximadamente 3.2 mm e o cabo na sua totalidade com 16,5 mm de diâmetro.

Inicialmente foi realizado uma análise de microestrutura da liga estudada. Observa-se uma grande deformação nos grãos devido à etapa de encordoamento dos fios na formação dos cabos, o que oferece ao material um aumento de resistência mecânica. De acordo com a empresa que fornece esses cabos após o processo de extrusão este passa por um tratamento térmico de solubilização, conferindo assim uma maior resistência à corrosão intergranular.

Outro aspecto foi à observação de como esses cabos estavam sendo empregados nos postes, é perceptível que existe certo “embarrigamento”, é denominado de catenária.

Feitas todas essas observações foi constatado que a vida útil desses cabos em uma atmosfera tão agressiva como descrita nos projetos anteriores [2], [3] eram muito pequenas o que inviabilizaria a substituição do cobre pela liga de alumínio 6201, o que o presente trabalho propõe.

2. Justificativa

Busca-se a substituição dos cabos de transmissão de energia elétrica fabricados de cobre eletrolítico pela liga de alumínio 6201. Essa substituição gera uma redução de custos, no entanto, a atmosfera agressiva descrita nos projetos anteriores não permite que os cabos de alumínio resistam por muito tempo tornando, assim, inviável a substituição.

De acordo com a literatura as propostas de mudanças na estrutura dos cabos, alívio de tensões granulares, aumento dos fios e redução dos diâmetros, talvez até uma anodização dos cabos, fariam com que o material resistisse a condições mais agressivas, pois, com isso, estariam sendo

reduzidos dois tipos de corrosão, sob tensão fraturante e corrosão em frestas. No entanto, nesse trabalho vai-se apenas estudar o comportamento dos cabos sobre a ação de tratamentos térmicos. ^[4]

Esse trabalho visa aumentar a vida útil dos cabos da liga de alumínio AA 6201 estudando o comportamento das mesmas em condições atmosféricas de alta agressividade.

3. Objetivos

3.1 Objetivos gerais

O presente trabalho tem por objetivo estudar o balanço entre propriedades mecânicas e a resistência à corrosão em cabos de transmissão de eletricidade fabricados com a liga de alumínio 6201 que serão alteradas em virtude de tratamentos térmicos.

3.2 Objetivos específicos

O estudo minucioso da atividade proposta leva em consideração o balanço de propriedades mecânicas e resistência à corrosão que serão realizados a partir de alívio de tensões via tratamento térmico sem que haja um crescimento de grãos para preservar o máximo de resistência mecânica possível e precipitados que possam existir.

- Caracterização microestrutural, microscopia ótica e eletrônica de varredura, das amostras como recebido;
- Tratamentos térmicos;
- Caracterização microestrutural, microscopia ótica e eletrônica de varredura, das amostras pós-tratamentos térmicos;
- Avaliação da resistência à corrosão das ligas AA 6201 expostas a região litorânea do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará por cinco meses;
- Caracterização microestrutural, microscopia ótica e eletrônica de varredura, das amostras como recebida e pós-tratamentos térmicos após cada retirada;
- Avaliação das propriedades mecânicas, ensaio de resistência à tração e microdureza Vickers;
- Avaliação da resistência à corrosão, curva de polarização.

4. Revisão Bibliográfica

4.1 Alumínio

O alumínio é um metal prateado branco, um dos metais mais utilizados no mundo devido a sua ótima combinação de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas, baixa densidade, variando de 2,6 - 2,8 g/cm³. Dependendo de como é conformado ou do tratamento térmico realizado este pode chegar a uma resistência tão boa quanto a de um aço estrutural. O módulo de elasticidade típico de ligas de alumínio em temperatura ambiente, 25°C, varia de 70 - 79 GPa, a resistência à tração normal varia entre 230 e 570 MPa, têm boa condutibilidade elétrica e térmica e alta refletividade a luz e ao calor, alta resistência à corrosão sob as mais altas condições de trabalho e é não-tóxico. O alumínio pode ser fundido e trabalhado em quase todas as formas e pode-se obter grande variedade de formas. ^[5]

4.2 Solubilização

O objetivo do tratamento de solubilização é por em solução sólida a maior quantidade possível de átomos de soluto, como cobre, magnésio, silício ou zinco, na matriz rica em alumínio. Sendo assim, as temperaturas de solubilização devem ser limitadas a um nível seguro no qual as consequências do superaquecimento e da fusão parcial sejam evitadas. ^[6]

4.3 Recozimento Pleno

O recozimento pleno é um tratamento térmico em que se obtém as condições de plasticidade máxima do metal (têmpera O), correspondendo a uma recristalização total do mesmo. É utilizado em todos os tipos de ligas de alumínio, tanto as endurecíveis por precipitação como as que não endurecem por precipitação, no entanto, no caso das primeiras, deve existir um controle de temperaturas mais cuidadoso, para evitar a ocorrência de precipitação durante um tratamento de recozimento para recristalização. ^[6]

O presente trabalho tomou por base, principalmente, o que foi apresentado em dois projetos anteriores realizados na NUTEC em parceria com a COELCE nos projetos Corrosão e Degradação Atmosférica dos

Materiais Elétricos e Cabo Liga que descreve a atmosfera corrosiva do estado do Ceará. Neste concluiu-se que a região do Porto das Dunas é de agressividade acima da norma, logo nosso local de estudo será nesta região. [2]

A corrosão sob tensão em ligas de alumínio de acordo com *GENTIL* [4], causa uma fratura que é intergranular está relacionada à presença de precipitados formados durante o processo de endurecimento. Corrosão por solicitações mecânicas ocorrem quando há deterioração dos materiais devido a associação simultânea dos seguintes elementos: tensões aplicadas ou residuais, meio corrosivo e susceptibilidade dos materiais.

De acordo com *SMITH* [5], as ligas de Al-Mg-Si, que é a da série da liga estudada, têm excelente resistência à corrosão em toda a atmosfera natural e na maioria das artificiais, e já é usualmente empregada como condutores elétricos de alta tensão.

5. Materiais e Métodos

O material passou por dois tratamentos térmicos diferentes, recozimento pleno à 350°C por 5 minutos com resfriamento moderado (ao ar) e recozimento pleno à 350°C por 1 minuto com resfriamento lento (ao forno). Cada amostra possui um comprimento de 300 mm. Após a realização desses tratamentos as amostras foram expostas na região do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará por um período de 05 (cinco) meses, do dia 04 de Fevereiro de 2012 a 07 de Julho de 2012 com retiradas mensais.

Após as retiradas cada camada dos cabos das amostras passou por análises microestruturais, no entanto, como foi apresentada uniformidade na microestrutura neste trabalho foram apenas apresentados os resultados para os fios das camadas externas. Estes foram cortados, embutidos, lixados em granulometrias na sequência 100, 220, 360, 400, 600 e 1200 mesh, polidos com alumina 0,01 μm e atacados quimicamente com o reagente Boss-Kelled [7] (10 ml de HCl + 10 ml de HF + 80 ml de H₂O, 10 ml de HNO₃ + 1 ml de HF + 1,5 ml de HCl + 87,5 ml de H₂O) para revelação da microestrutura do material estudado, analisadas em um microscópio óptico, microscópio eletrônico de

varredura, espectroscopia de energia dispersiva de raios-x e a realização de microdureza Vickers.

Foi utilizada a técnica de polarização linear potenciodinâmica para analisar a resistência à corrosão das amostras. Através dessa técnica é feita uma varredura de potencial obtendo como resposta a densidade de corrente que flui da amostra para o contra eletrodo. Com esses dois parâmetros (potencial e densidade de corrente) é possível analisar o comportamento das amostras em relação à resistência à corrosão no meio considerado. Foi utilizado uma célula de 3 eletrodos onde o eletrodo de referência utilizado foi o prata cloreto de prata (Ag/AgCl), o contra eletrodo utilizado foi uma chapa de platina 93 mm² e o eletrodo de trabalho eram as amostras. O eletrólito utilizado foi uma solução aquosa de 5% de NaCl ^[2]. A varredura de potencial foi de -1 V a -0,5 V a partir do potencial de circuito aberto. A velocidade de varredura utilizada foi de 1 mV/s. O tempo de estabilização do potencial de circuito aberto era 30 min (em média). As amostras em formas de fios rígidos tinham diâmetro médio de 0,32 cm. Foi utilizado um potenciostato modelo Autolab conectado a um PC através do software NOVA 1.8 para a obtenção das curvas de polarização. Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente do laboratório (20°C).

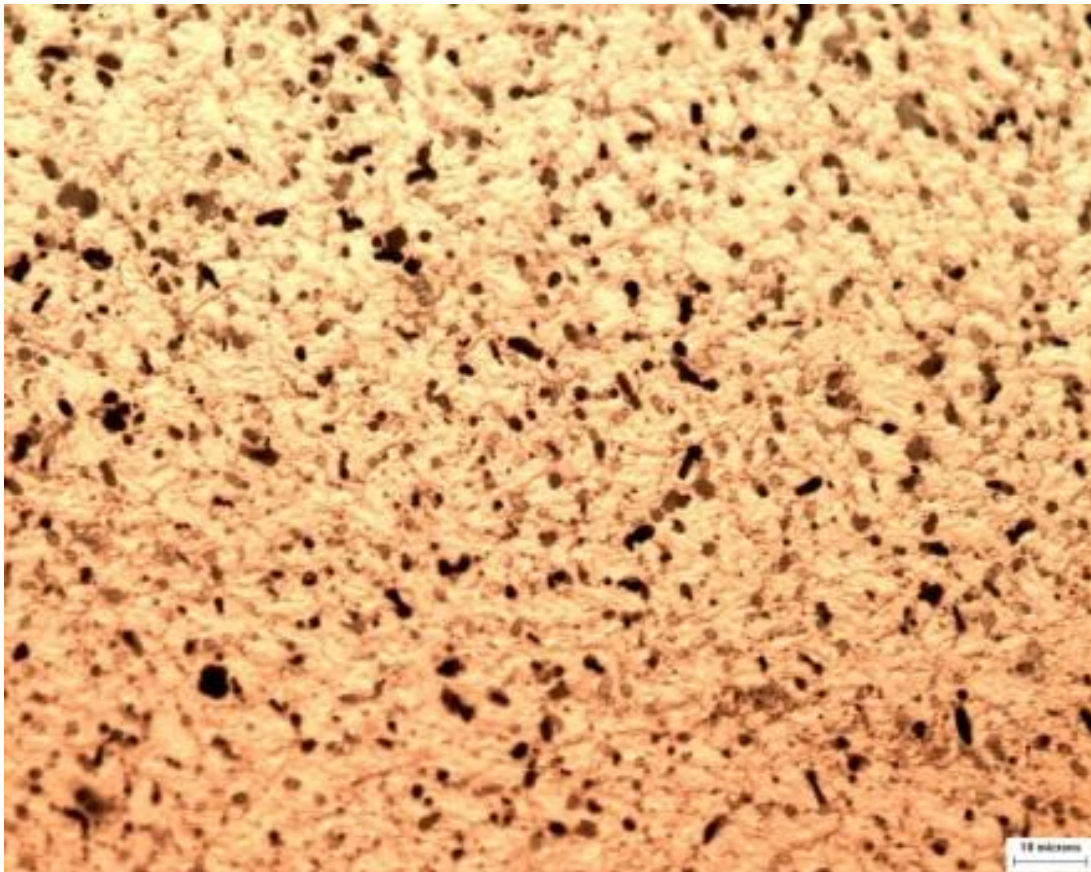
6. Resultados e Discussão

6.1 Microscopia Ótica

As micrografias abaixo são referidas apenas as camadas externas da liga de alumínio AA 6201 (Al – 0,8 Mg – 0,7 Si - impurezas) com 0 (zero) a 05 (cinco) meses de exposição com os tratamentos térmicos previstos: como recebido no estado solubilizado, recozimento pleno à 350°C por 5 minutos seguido de resfriamento moderado e recozimento pleno à 350°C por 1 minuto seguido de resfriamento lento, respectivamente. Aumento de 1000X. Ataque químico: Boss-Kelled.

A figura 01 mostra a microestrutura da camada externa da liga de alumínio estudada na condição inicial, solubilizada.

Figura 01 - Micrografia do fio da camada externa do cabo da liga de Alumínio 6201 Solubilizada. 0 meses



Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

Analisando a figura 01 percebe-se uma microestrutura característica do alumínio, onde a parte mais clara trata-se da matriz de alumínio e essas estruturas mais escuras são compostos intermetálicos de Mg_2Si [5]. Nota-se

uma grande deformação na microestrutura do alumínio, esta deformação deve-se ao fato de que para fabricação de fios este passa por processos de conformação mecânica a frio, o alumínio devido a ser um material com uma baixa dureza permite que seja extrudado a frio, isso não ocorre na maioria dos metais que passam por esse processo. Após a extrusão a frio é dito pelo fabricante que este passa por um tratamento térmico de solubilização ^[9], esse tratamento fará com que o grão seja recristalizado, voltando a sua dureza inicial para que seja possível passar pelo processo seguinte de conformação mecânica, trefilação. Além da restauração da dureza é dito pelo fabricante que o tratamento térmico de solubilização após a extrusão confere ao material um aumento de resistência à corrosão intergranular.

O processo de trefilação também é feito a frio, isso ocorre na maioria dos metais que passam por esse processo, essa grande tensão de deformação fará com que os grãos fiquem alongados e deformados no sentido do processo de conformação mecânica, essa tensão plástica confere aos contornos de grão um acúmulo de tensões ao seu redor, podendo vir a gerar corrosão sob tensão fraturante com o tempo em uma atmosfera tão agressiva quanto o litoral do estado do Ceará. Na figura 01 não é possível verificar com clareza na magnificação de 1.000X contornos de grão ou tamanhos do grão, isso implica que o material está bastante deformado que o ataque não revelou com clareza os contornos e que o grão está muito pequeno, conferindo ao material um aumento de resistência mecânica a tração.

A figura 02 exhibe a microestrutura da camada externa da liga de alumínio estudada na condição recozimento pleno com resfriamento moderado.

Figura 02 - Micrografia do fio da camada externa do cabo da liga de Alumínio 6201 Recozimento Pleno com resfriamento moderado. 0 meses.



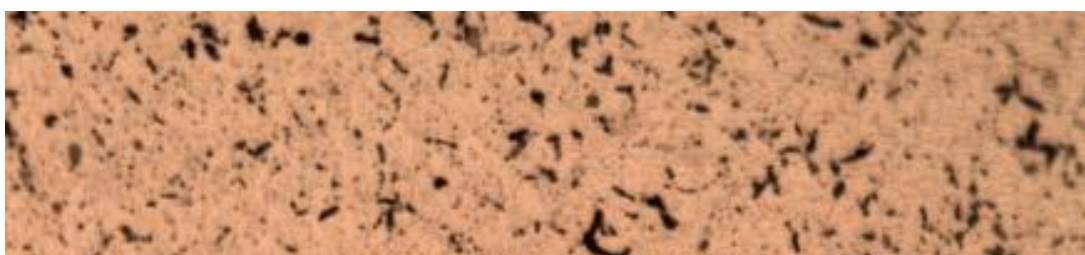


Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

Após o tratamento térmico de recozimento pleno a 350°C por 5 minutos com resfriamento moderado percebe-se, na figura 02, uma microestrutura não tão deformada quanto a inicial, no entanto, ainda não é possível ver com clareza o tamanho desses grãos.

A figura 03 exibe a microestrutura da camada externa da liga de alumínio estudada na condição recozimento pleno com resfriamento lento.

Figura 03 - Micrografia do fio da camada externa do cabo da liga de Alumínio 6201 Recozimento Pleno com resfriamento lento. 0 meses.





Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

Após o tratamento térmico de recozimento pleno à 350°C por 1 minuto com resfriamento lento percebe-se, na figura 03, uma microestrutura não tão deformada quanto a inicial, no entanto, ainda não é possível ver com clareza o tamanho desses grãos.

A figura 04 mostra o resultado da caracterização microestrutural da liga de alumínio nas três condições propostas pelo trabalho após 01 (um) mês de exposição.

Figura 04 - Micrografias dos fios das ^bcamadas externas dos cabos da liga de Alumínio 6201 (a) Solubilizada, (b). Recozimento Pleno com resfriamento moderado e (c) Recozimento Pleno com resfriamento lento. 01 mês de exposição.

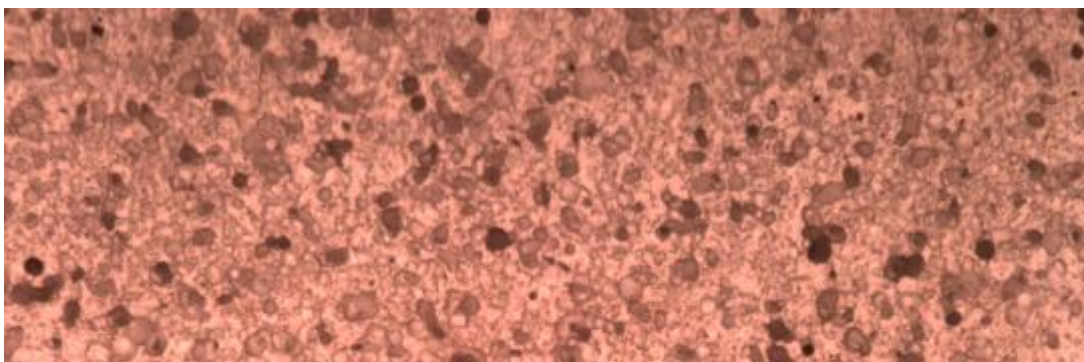


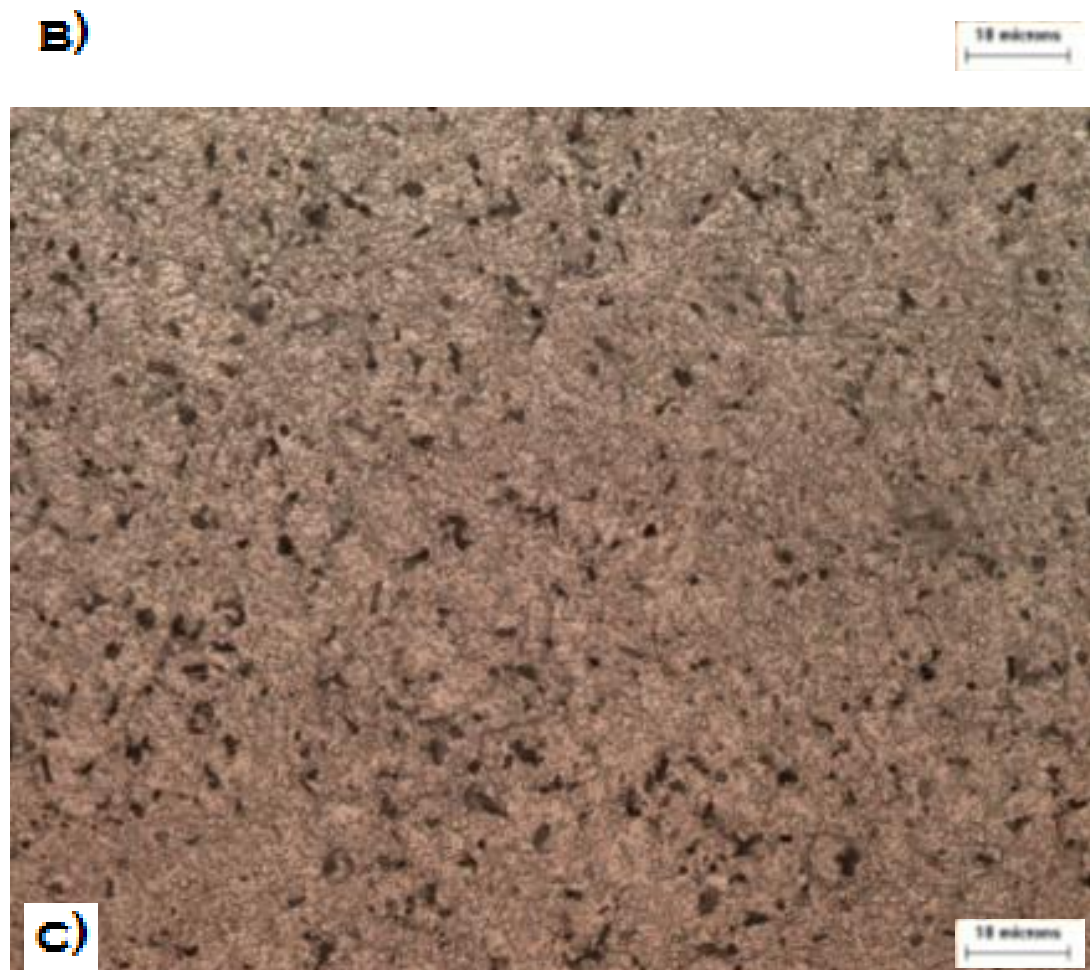
A)



Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

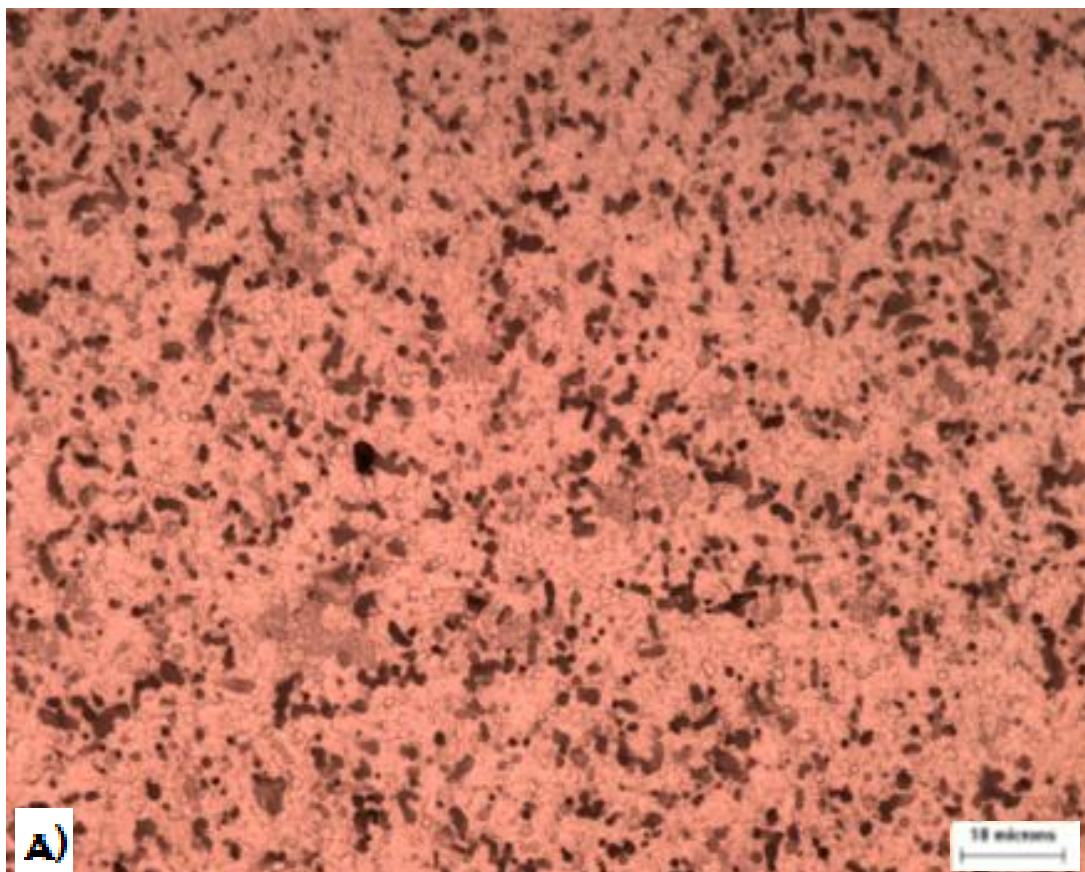
Analisando a micrografia ilustrada na figura 04.a não é possível determinar se houve de fato o aparecimento de corrosão sob tensão fraturante. O mesmo pode ser dito com relação às figuras 04.b e 04.c Não se pode afirmar qual condição de tratamento térmico é a mais resistente à corrosão apenas com 01 mês de exposição na região litorânea do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará.





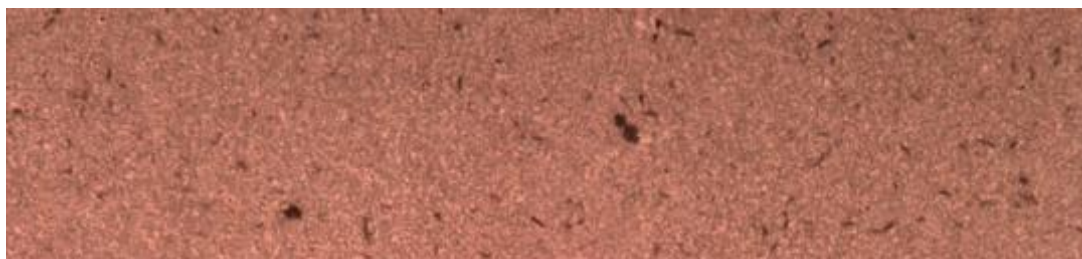
A figura 05 exibe o resultado da caracterização microestrutural da liga de alumínio nas três condições propostas pelo trabalho após 02 (dois) meses de exposição.

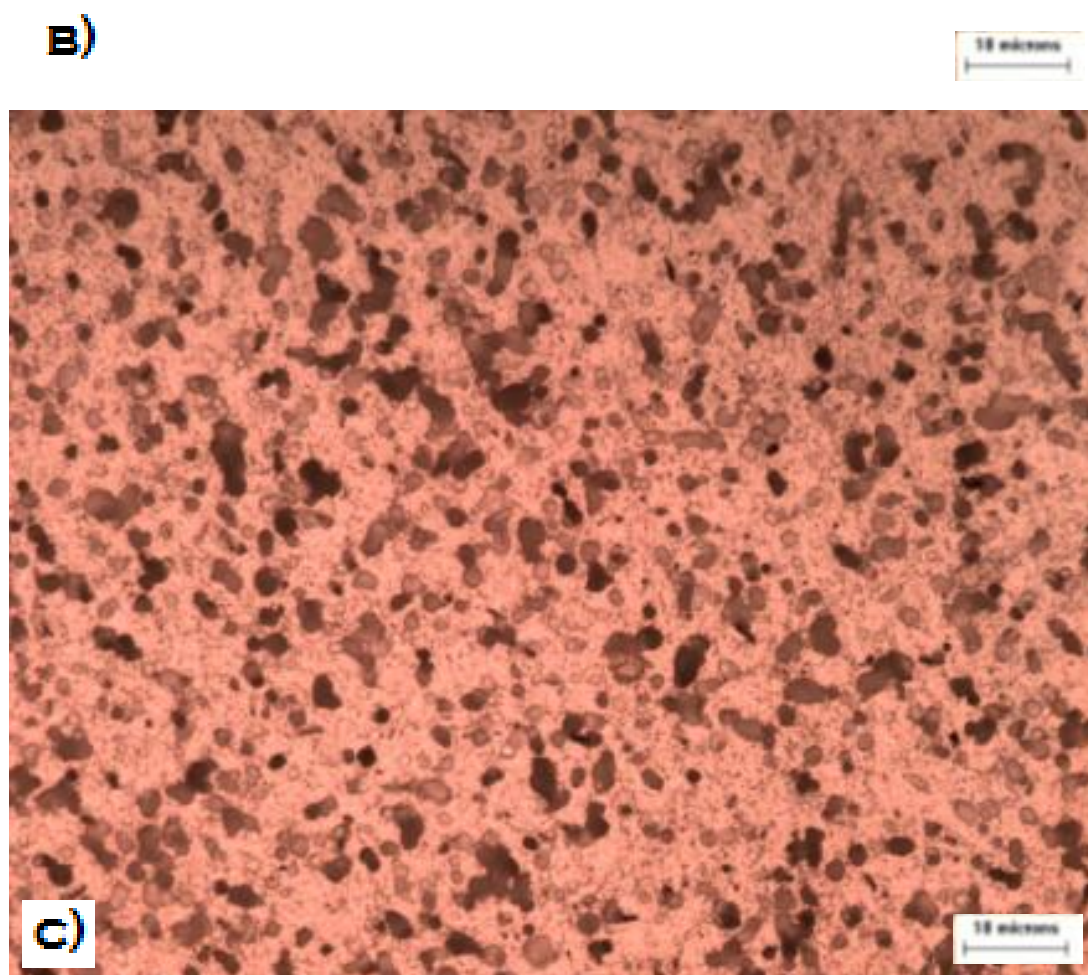
Figura 05 - Micrografias dos fios das camadas externas dos cabos da liga de Alumínio 6201 (a) Solubilizada, (b). Recozimento Pleno com resfriamento moderado e (c) Recozimento Pleno com resfriamento lento. 02 meses de exposição.



Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

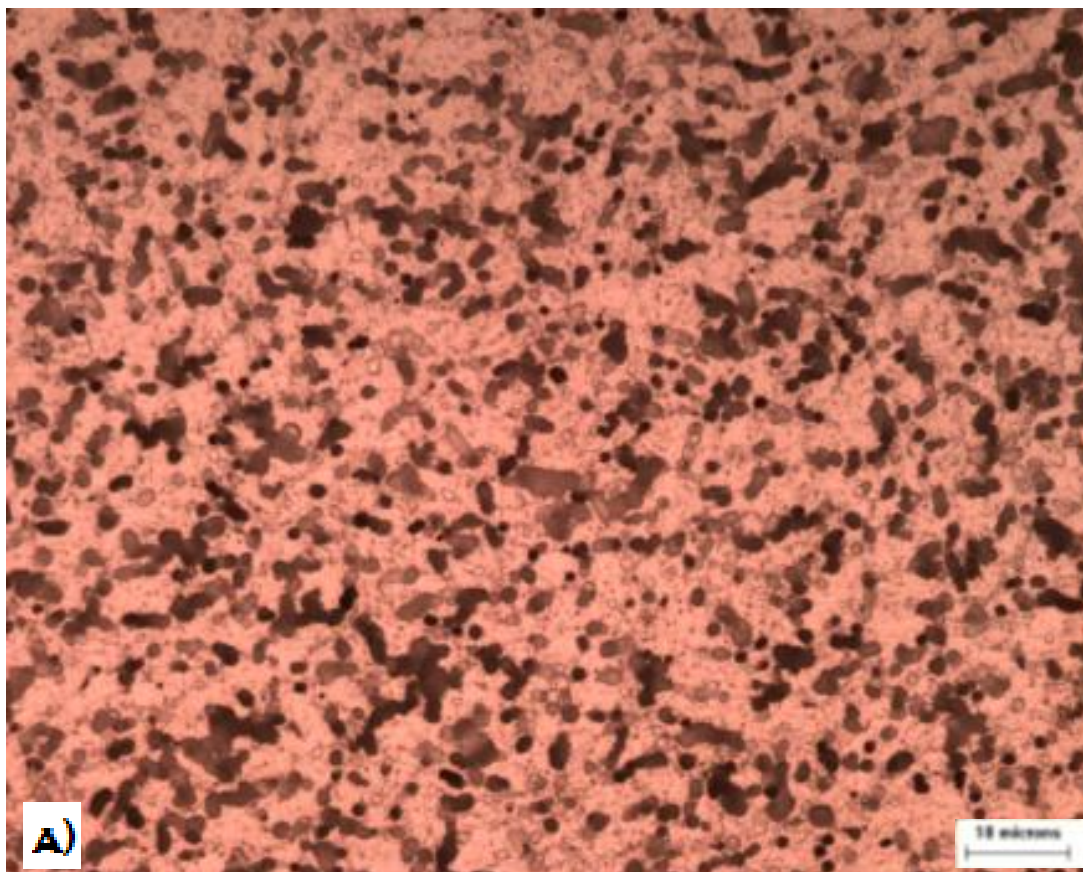
Analisando as micrografias ilustradas na figura 05 (a, b e c) não é possível determinar com clareza qual condição de tratamento térmico é a mais resistente à corrosão apenas com 02 meses de exposição na região litorânea do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará. Não foi verificado em nenhuma das micrografias o indício de corrosão sob tensão fraturante (CSTF).





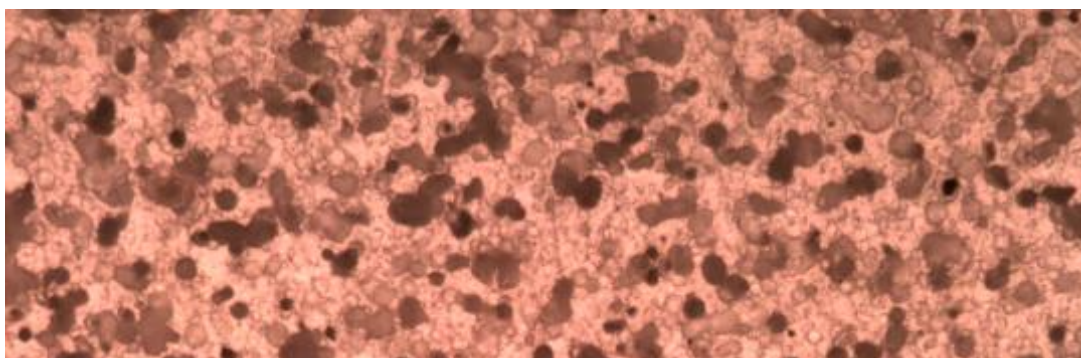
A figura 06 exibe o resultado da caracterização microestrutural da liga de alumínio nas três condições propostas pelo trabalho após 03 (três) meses de exposição.

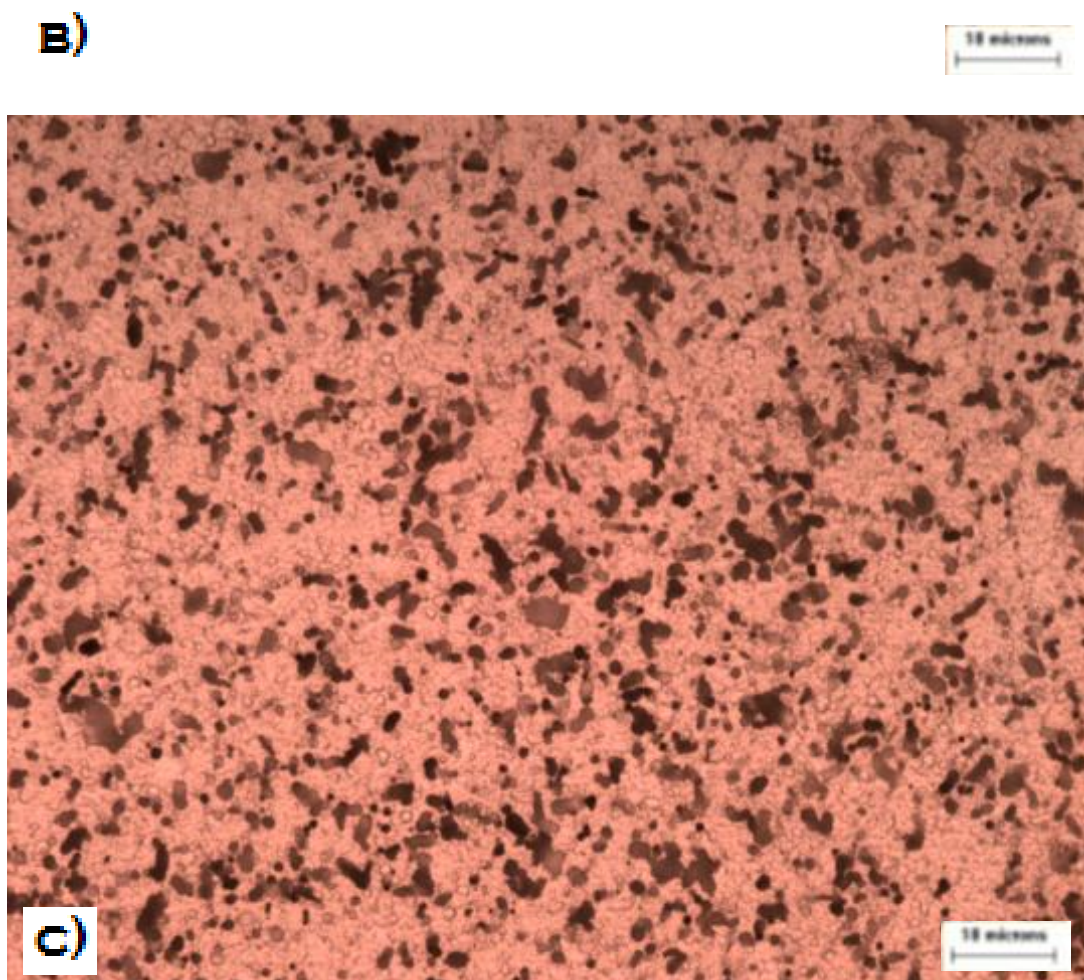
Figura 06 - Micrografias dos fios das camadas externas dos cabos da liga de Alumínio 6201 (a) Solubilizada, (b). Recozimento Pleno com resfriamento moderado e (c) Recozimento Pleno com resfriamento lento. 03 meses de exposição.



Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

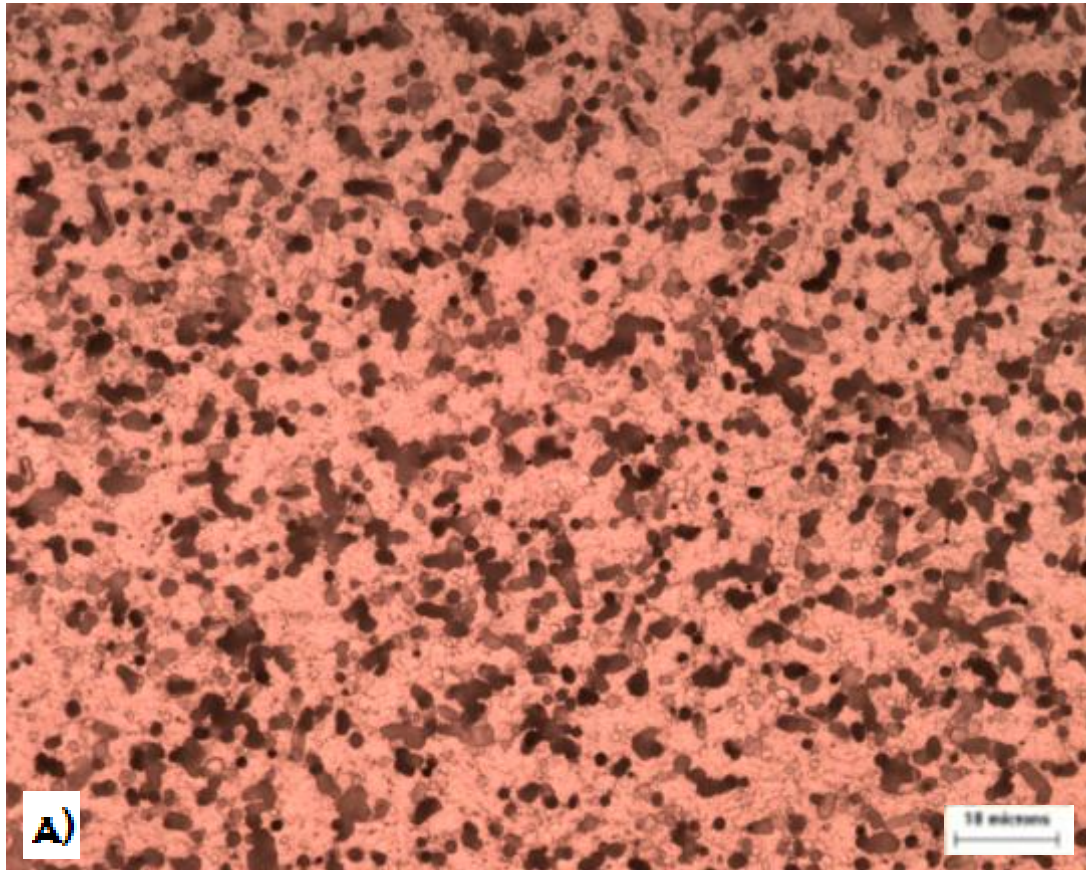
Analisando as micrografias ilustradas na figura 06 (a, b e c) não é possível determinar com clareza qual condição de tratamento térmico é a mais resistente à corrosão apenas com 03 meses de exposição na região litorânea do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará. Não foi verificado em nenhuma das micrografias o indício de corrosão sob tensão fraturante (CSTF).





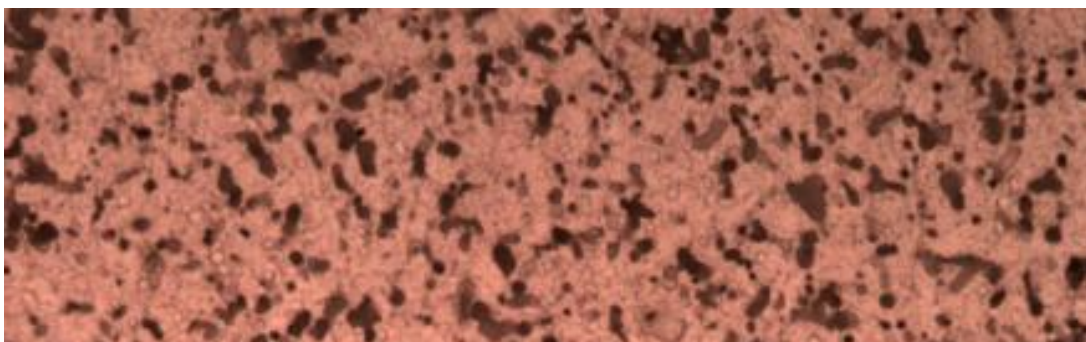
A figura 07 exibe o resultado da caracterização microestrutural da liga de alumínio nas três condições propostas pelo trabalho após 04 (quarto) meses de exposição.

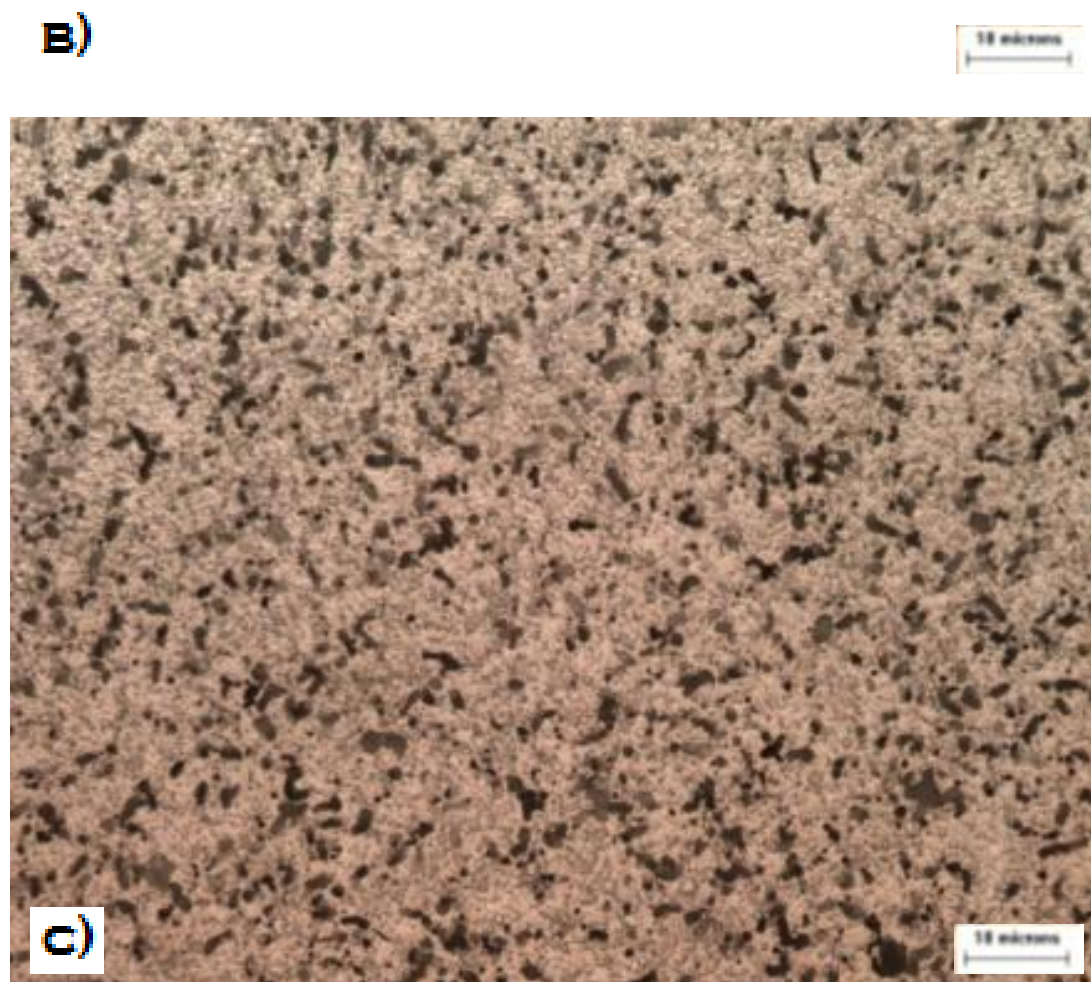
Figura 07 - Micrografias dos fios das camadas externas dos cabos da liga de Alumínio 6201 (a) Solubilizada, (b). Recozimento Pleno com resfriamento moderado e (c) Recozimento Pleno com resfriamento lento. 04 meses de exposição.



Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

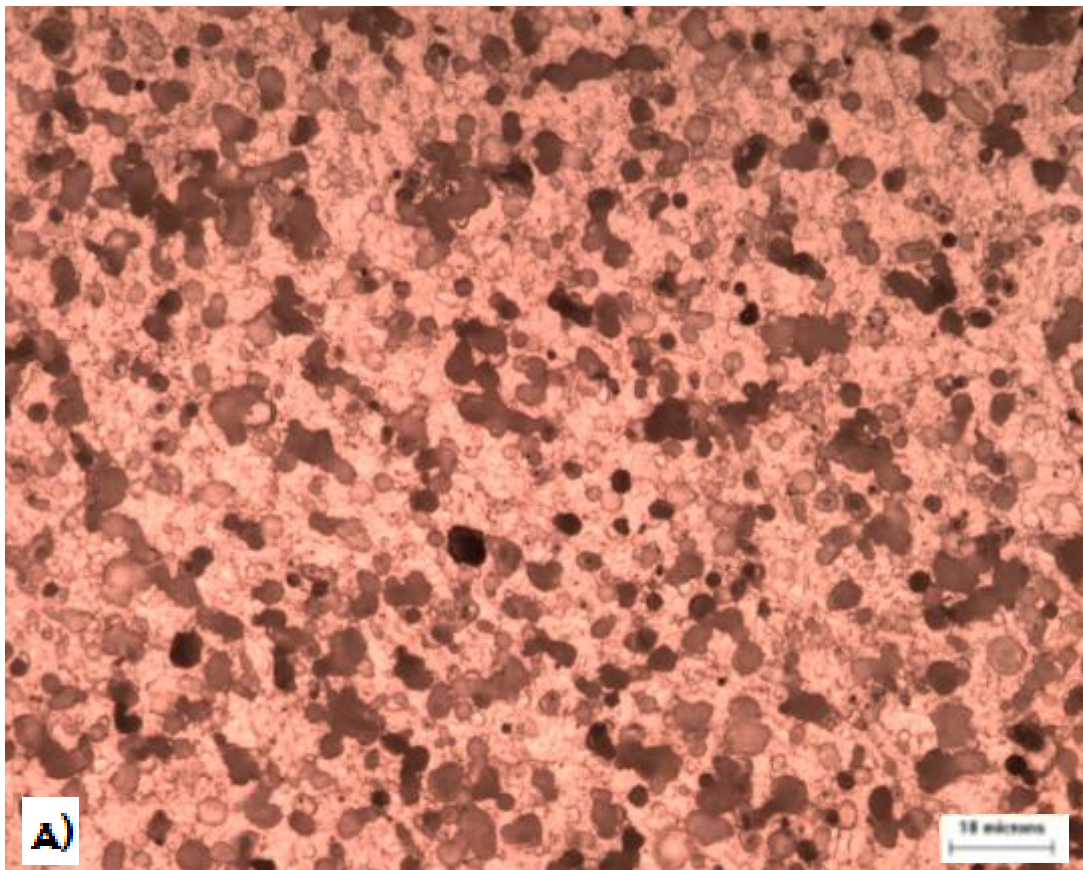
Analisando as micrografias ilustradas na figura 07 (a, b e c) não é possível determinar com clareza qual condição de tratamento térmico é a mais resistente à corrosão apenas com 04 meses de exposição na região litorânea do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará. Não foi verificado em nenhuma das micrografias o indício de corrosão sob tensão fraturante (CSTF).





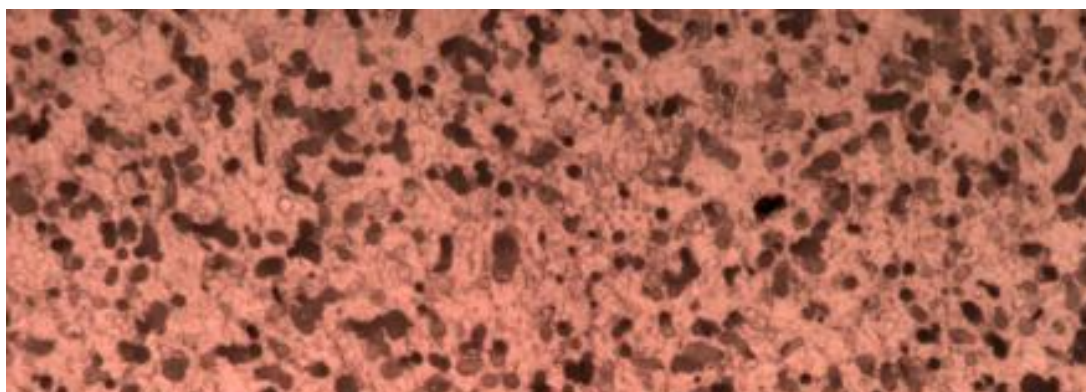
A figura 08 exibe o resultado da caracterização microestrutural da liga de alumínio nas três condições propostas pelo trabalho após 05 (cinco) meses de exposição.

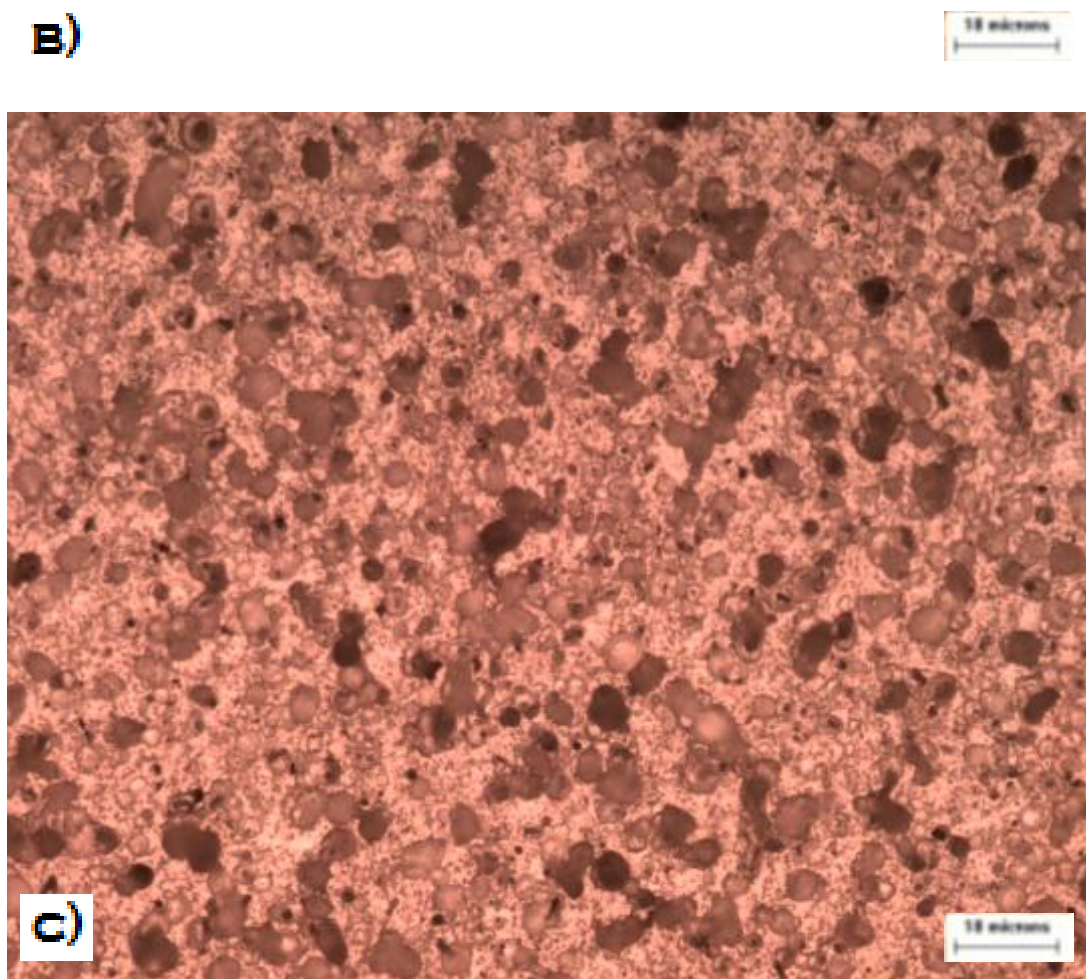
Figura 08 - Micrografias dos fios das camadas externas dos cabos da liga de Alumínio 6201 (a) Solubilizada, (b). Recozimento Pleno com resfriamento moderado e (c) Recozimento Pleno com resfriamento lento. 05 meses de exposição.



Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

Analisando as micrografias ilustradas na figura 06 (a, b e c) não é possível determinar com clareza qual condição de tratamento térmico é a mais resistente à corrosão apenas com 05 meses de exposição na região litorânea do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará. Não foi verificado em nenhuma das micrografias o indício de corrosão sob tensão fraturante (CSTF).





É importante ressaltar que o não aparecimento de CSTF nos cabos estudados, ou não variação na microestrutura do material nesse tempo de exposição não necessariamente implica que estes são resistentes a este tipo

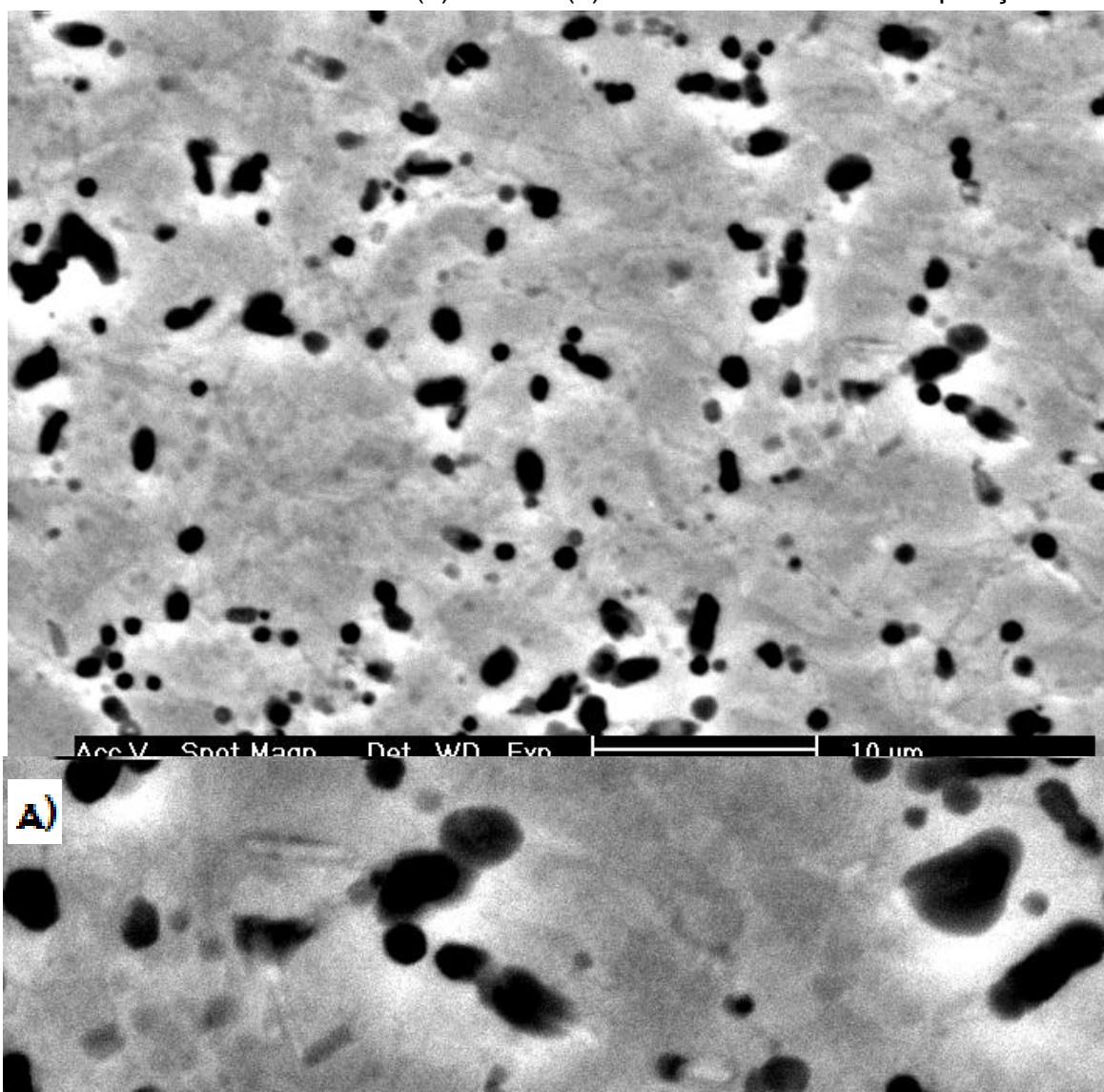
de corrosão, pode-se concluir também que o tempo de exposição não foi suficiente para o aparecimento desse tipo de corrosão.

6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

As micrografias abaixo são referidas apenas dos fios das camadas externas dos cabos da liga de alumínio AA 6201 com 0 (zero) e 05 (cinco) meses de exposição com os tratamentos térmicos previstos, como recebido no estado solubilizado, recozimento pleno à 350°C por 5 minutos com resfriamento moderado e recozimento pleno à 350°C por 1 minuto com resfriamento lento, respectivamente.

A figura 09 exibe a microscopia eletrônica de varredura da camada externa da liga de alumínio estudada na condição solubilizada, como recebida com 0 meses de exposição.

Figura 09 – Microscopia eletrônica de varredura da camada externa da liga de Alumínio 6201 Solubilizadas. (a) 5.000X (b) 10.000X. 0 meses de exposição.



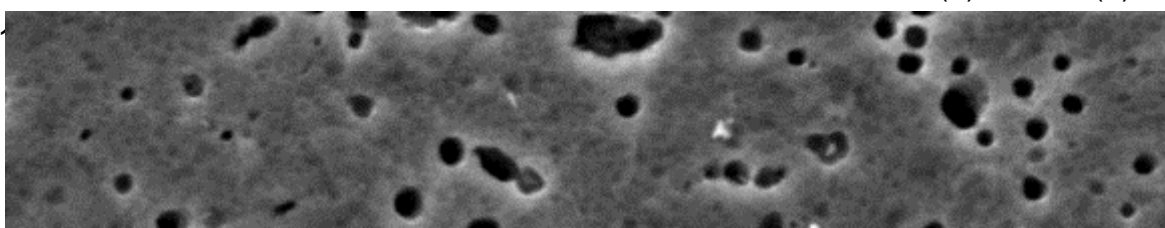
E)

Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

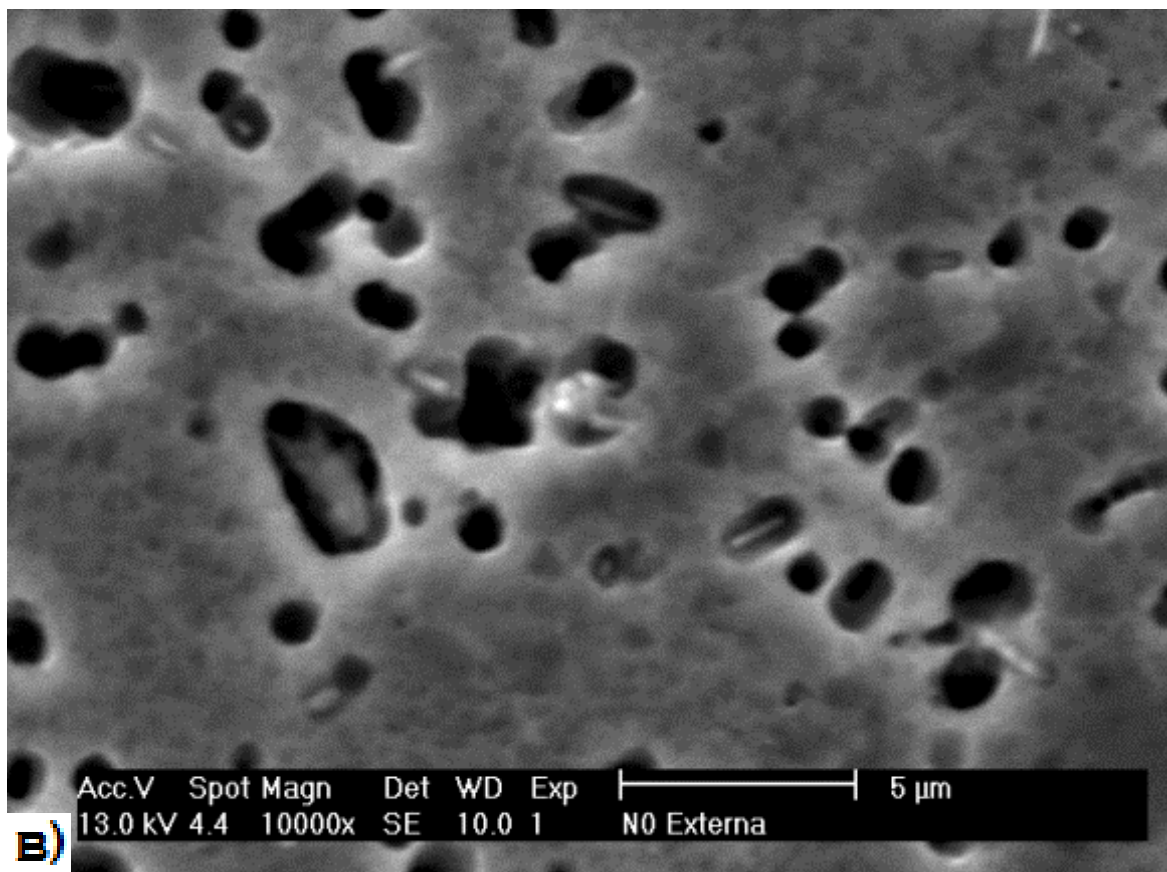
Com a magnificação adequada consegue-se observar contornos de grão na figura 09 (a. e b.) percebe-se, também, uma microestrutura característica do alumínio, onde a parte mais clara, cinzenta, trata-se da matriz de alumínio e essas estruturas mais escuras são compostos intermetálicos de Mg_2Si ^[5].

A figura 10 exibe a microscopia eletrônica de varredura da camada externa da liga de alumínio estudada na condição de recozimento pleno com resfriamento moderado com 0 meses de exposição.

Figura 10 - Microscopia eletrônica de varredura da camada externa da liga de Alumínio 6201 recozimento Pleno com resfriamento moderado (a)5.000X (b)



A)

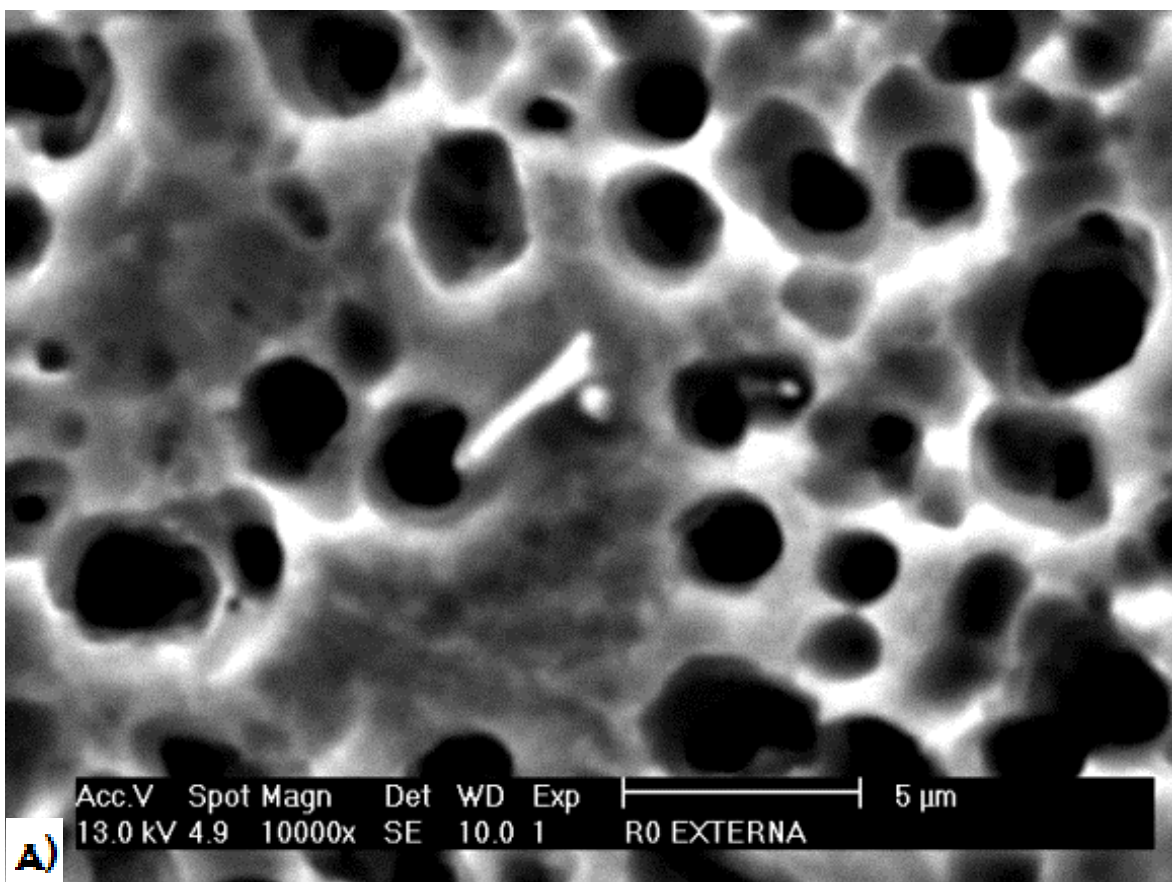


As micrografias eletrônicas de varredura das amostras tratadas termicamente com nenhum mês de exposição, ilustradas nas figuras 10a e 10b, mostraram o aparecimento de bastonetes brancos pequenos, com sua

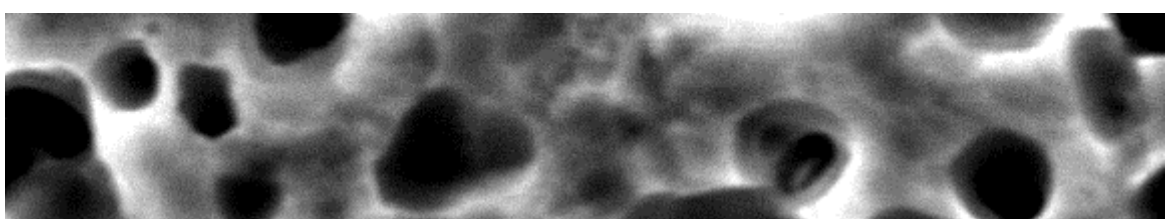
fácil visualização só a partir de magnificação acima de 5.000X. Foi feito um EDS.

A figura 11 exibe a microscopia eletrônica de varredura da camada externa da liga de alumínio estudada na de recozimento pleno com resfriamento lento com 0 meses de exposição.

Figura 11 – Microscopia eletrônica de varredura das camadas da liga de Alumínio 6201 recozimento Pleno com resfriamento lento. (a) bastonete branco 10.000X (b) 10.000X. 0 meses.



Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)



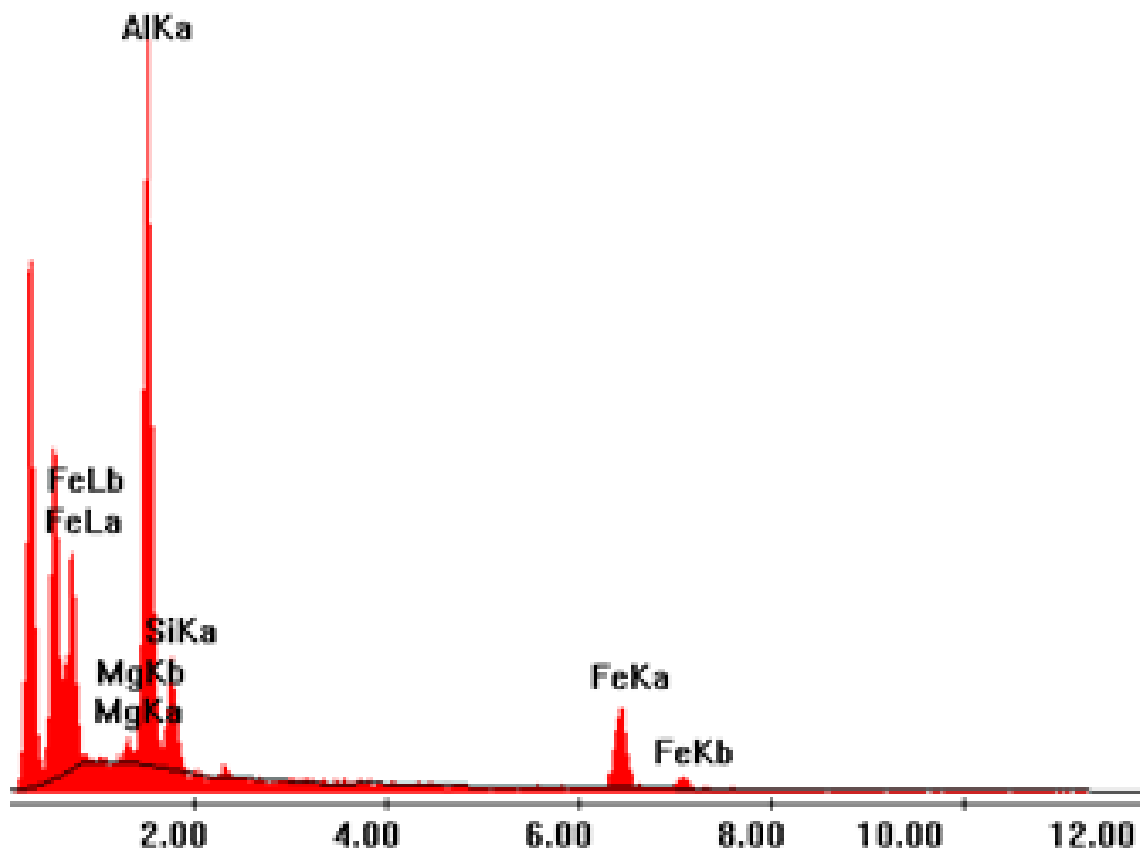
E)

Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

As micrografias eletrônicas de varredura das amostras tratadas termicamente com nenhum mês de exposição, ilustradas nas figuras 10a e 10b, mostraram o aparecimento de bastonetes brancos pequenos, com sua fácil visualização só a partir de magnificação acima de 5.000X.

A partir dessas observações foram realizadas análises de EDS nesses bastonetes como mostra a figura 12. Os picos de alumínio, magnésio e silício são esperados devido à liga pertencer ao grupo da série 6XXX, principais elementos de liga, dos alumínios, no entanto, o aparecimento do elemento ferro, que deveria estar dissolvido na matriz e o tratamento térmico conferiu energia suficiente para que este se ligasse com o alumínio, em grandes proporções, de fato, é o que chama atenção.

Figura 12 - EDX do bastonete branco da amostra da liga de alumínio 6201 tratada termicamente na condição de recozimento pleno com resfriamento lento. Bastonete também visualizado nas amostras com condição de recozida com resfriamento moderado.



Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

O tratamento térmico proporcionou ao material além de um alívio de tensões, pois não se nota uma microestrutura tão deformada, o aparecimento de um composto que possui uma quantidade considerável de elemento ferro.

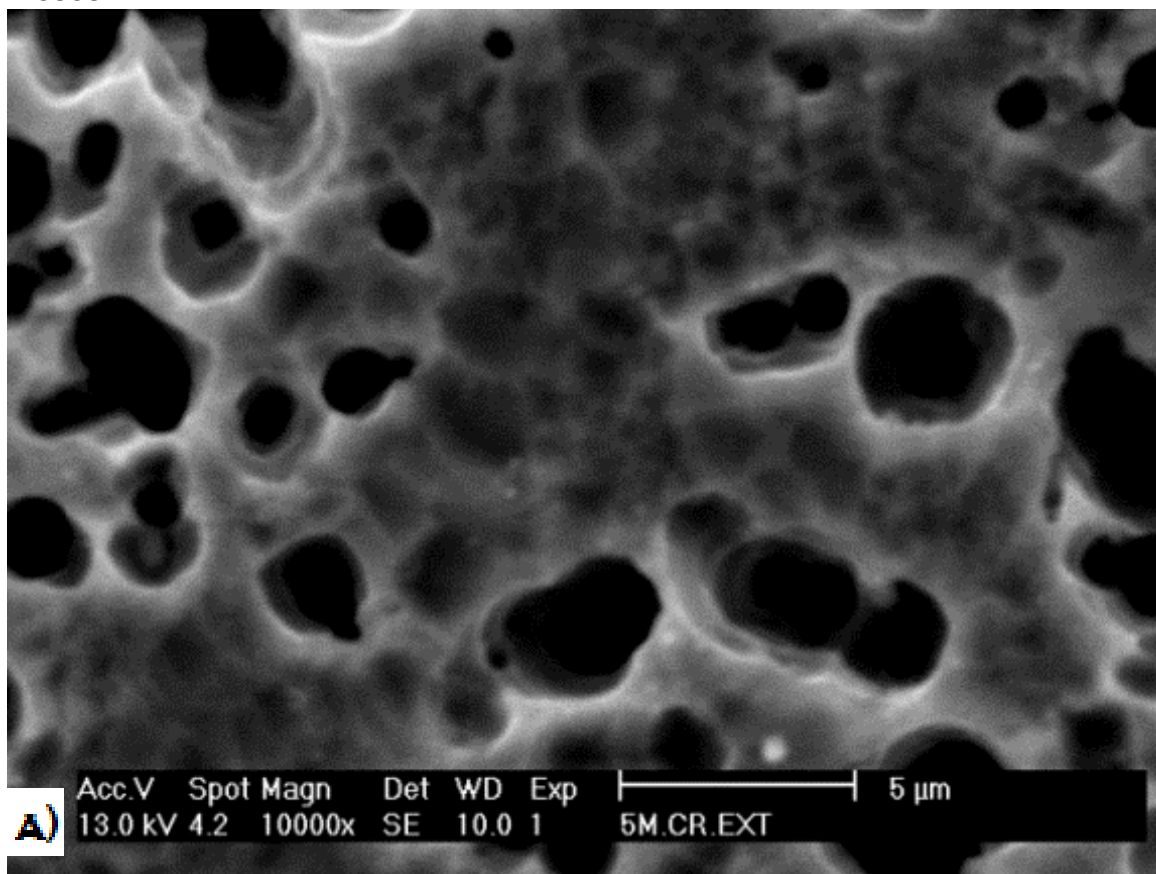
A figura 13 exibe a microscopia eletrônica de varredura da camada externa da liga de alumínio estudada na de recozimento pleno com resfriamento lento após 5 meses de exposição.

Analisando as micrografias ilustradas na figura 13 (a, b e c) não é possível determinar com clareza qual condição de tratamento térmico é a mais resistente à corrosão apenas após 05 meses de exposição na região litorânea do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará.

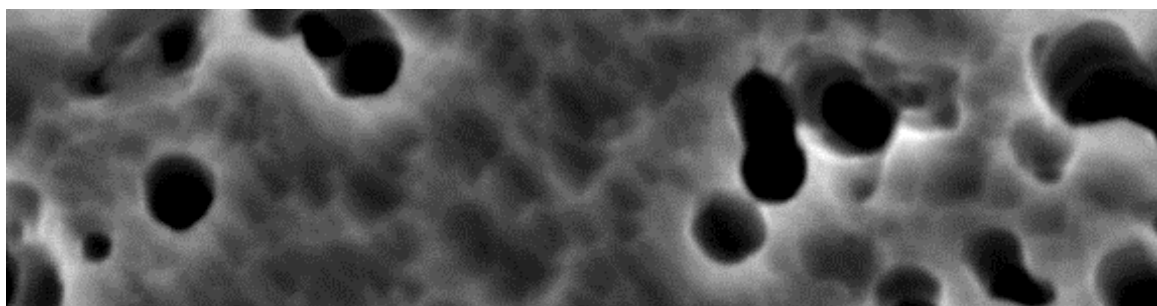
Não foi verificado em nenhuma das micrografias o indício de corrosão sob tensão fraturante (CSTF).

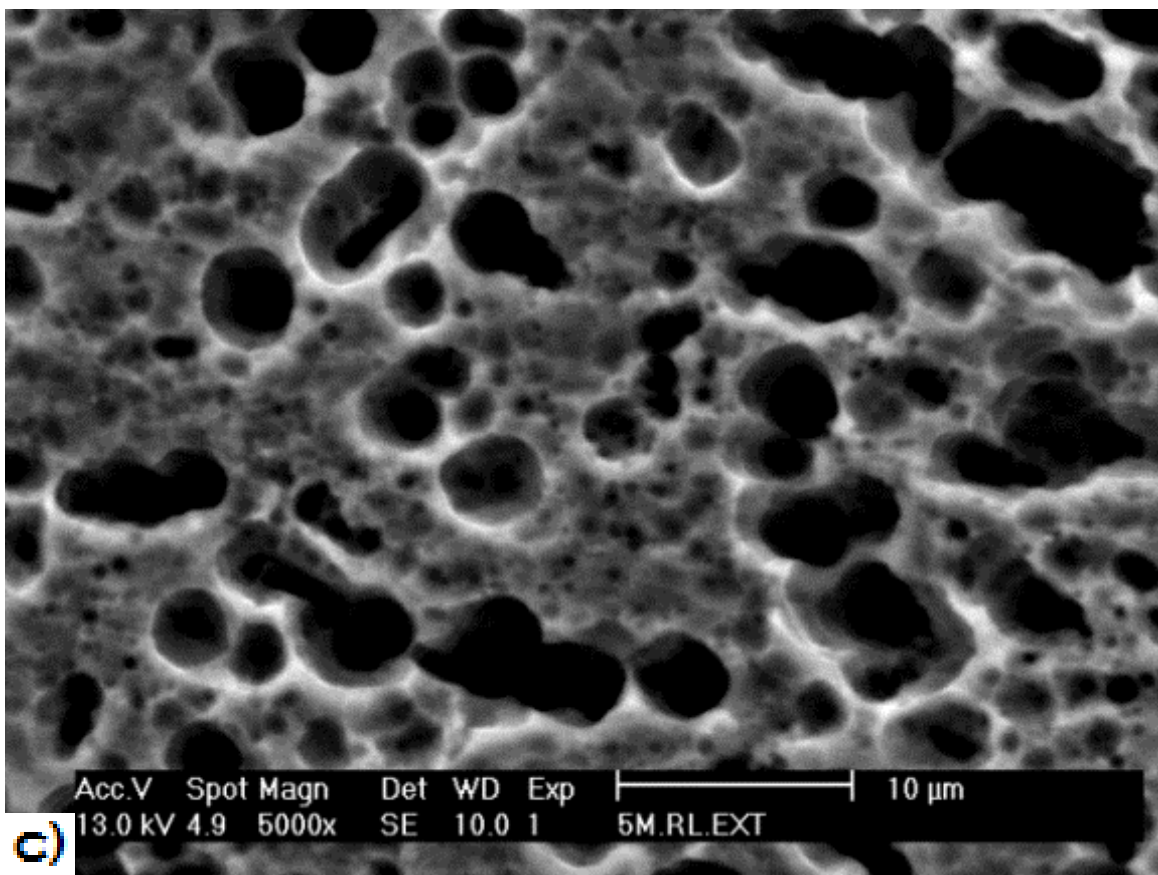
É importante ressaltar que o não aparecimento de CSTF nos cabos estudados, ou não variação na microestrutura do material nesse tempo de exposição não necessariamente implica que estes são resistentes a este tipo de corrosão, pode-se concluir também que o tempo de exposição não foi suficiente para o aparecimento desse tipo de corrosão

Figura 13 - Microestrutura eletrônica de varredura das camadas da liga de Alumínio 6201 recozimento Pleno com resfriamento lento. (a) Como Recebido 10.000X (b) Recozido Moderado 10.000X. (c) Recozido Lento 5.000X. 05 meses.



Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)



B)

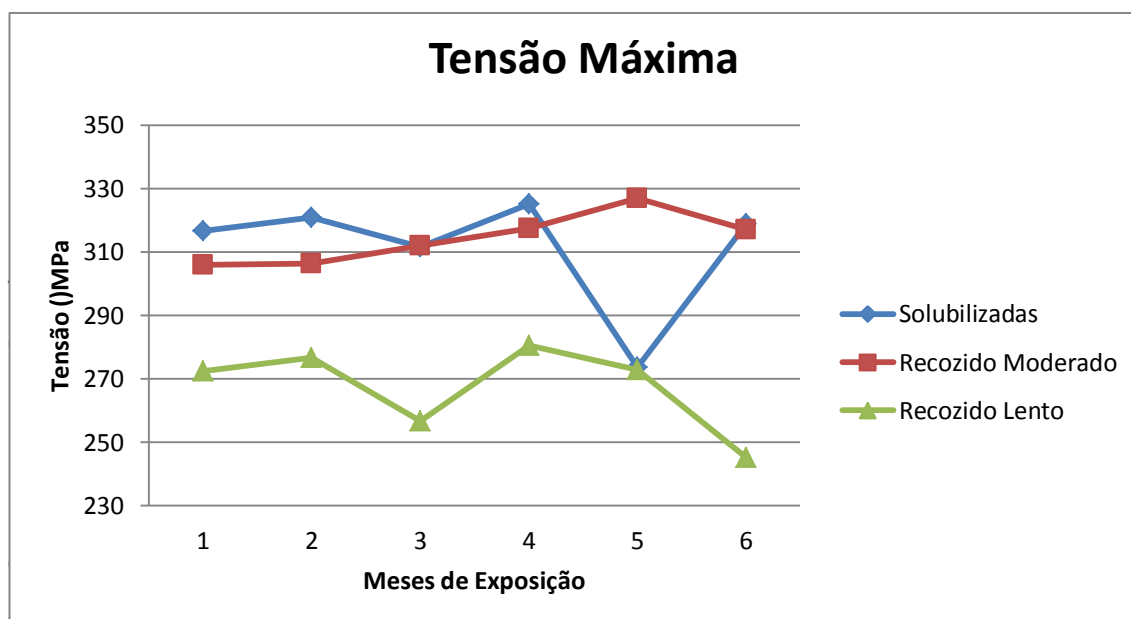
6.3 Resistência Mecânica a Tração

Os resultados abaixo se refere ao ensaio de resistência mecânica a tração das ligas de alumínio AA 6201 com 0 (zero) a 05 (cinco) meses de exposição com os tratamentos térmicos previstos, como recebido no estado solubilizado, recozimento pleno moderado à 350°C por 5 minutos com resfriamento e recozimento pleno à 350°C por 1 minuto, com resfriamento lento respectivamente.

As medições foram baseadas de acordo com a norma NBR 6810 – 1985: fios e cabos elétricos – tração e ruptura em componentes metálicos [8], que diz que o ensaio em cabos com fios encordoados devem ser feitos utilizando apenas o fio e não cabo por completo. Cada fio possui um diâmetro de 3,2 mm.

O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaios universais da empresa EMIC com capacidade de 10 (dez) toneladas no laboratório de ensaios mecânicos, subdivisão do laboratório de caracterização de materiais – LACAM da Universidade Federal do Ceará.

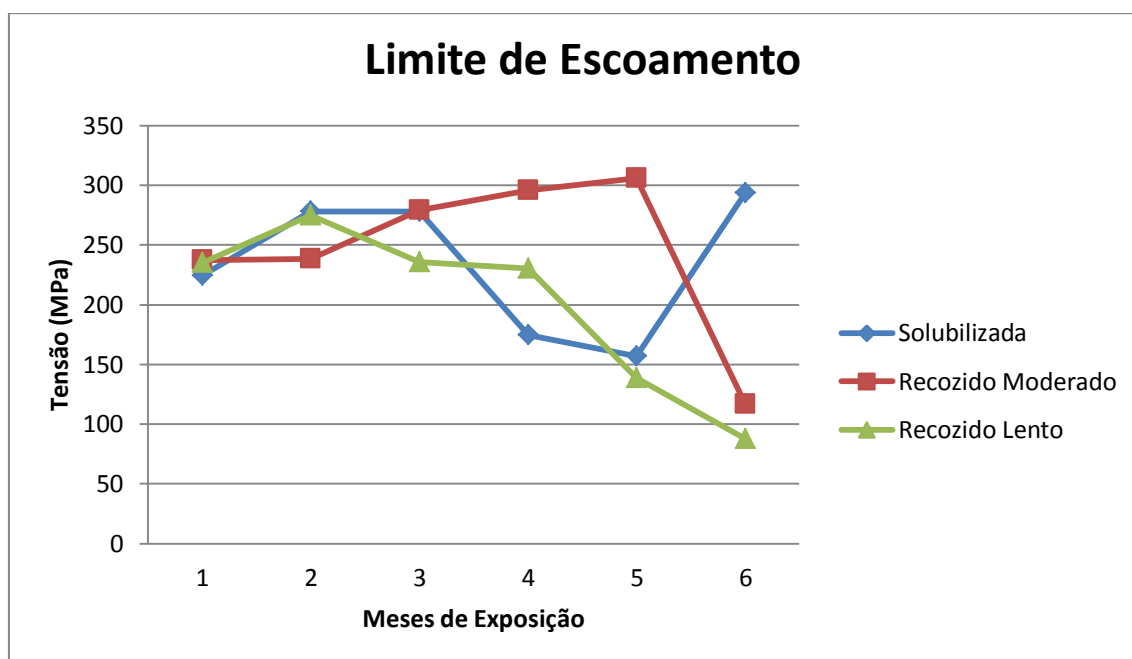
Figura 14 - Comparativo da resistência mecânica a tração da camada externa da liga de alumínio 6201 e dos tratamentos térmicos propostos. Tensão Máxima (Mpa) durante os cinco meses de exposição na região do Porto das Dunas – Aquiraz – CE.



como o resfriamento foi muito lento houve um crescimento granular maior do que o resfriamento moderado não permitindo que a resistência mecânica a

tração obedecesse a valores bem próximos aos outros cabos, no entanto, a diferença entre eles não é muito grande. Nesses cinco meses de exposição é perceptível que os resultados mantiveram uma linearidade, sem muitas variações significativas, assim sendo, apenas com cinco meses de exposição não é possível determinar com certeza qual condição é a mais resistente, mas, uma vantagem da condição recozida com resfriamento moderado é evidente, mesmo com o tratamento térmico que proporcionou um crescimento granular e alívio de tensão a resistência mecânica a tração permaneceu inalterado quando relacionada com o estado de como recebido.

Figura 15 - Comparativo da resistência mecânica a tração da camada externa da liga de alumínio 6201 e dos tratamentos térmicos propostos. Limite de Escoamento (Mpa) durante os cinco meses de exposição na região do Porto das Dunas – Aquiraz – CE.



Outro ponto importante a ser avaliado é a tensão de escoamento, observado na figura 15, observa-se que nos meses iniciais houve certa linearidade em todas as condições propostas. A avaliação desse resultado é importante, pois a partir dessa tensão o material começa a plastificar, essa tensão de plasticidade fará com que tensões nos contornos de grão voltem a existir, com isso o tratamento térmico não teria sentido. As tensões de

escoamento além de estarem próximas uma das outras estão próximas da tensão máxima.

De fato, o ensaio de resistência mecânica a tração é favorável ao tratamento térmico de recozimento pleno com resfriamento moderado, mas não é possível ainda detectar qual das condições propostas é a mais eficiente, pensando nisso faz-se necessário ensaio de curvas de polarização a fim de observar potencial de corrosão de pite e a variação de passivação.

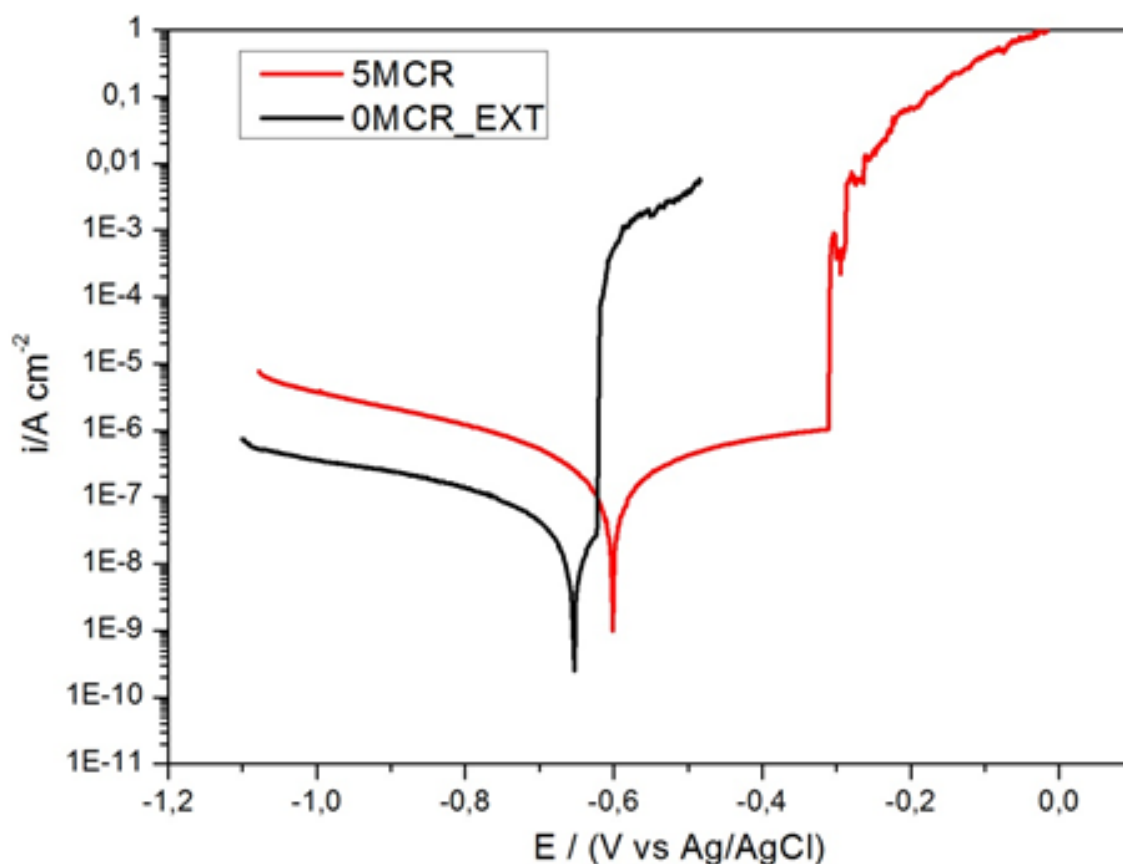
6.4 Curvas de Polarização Potenciodinâmica Linear

Devido ao fato dos ensaios anteriores mostrarem uma linearidade em seus resultados durante os cinco meses de exposição, as curvas de polarização foram realizadas apenas nas situações extremas, com 0 e 5 meses de exposição, apenas nos fios da camada externa das condições de tratamento térmico propostas pelo trabalho.

Foi utilizada a técnica de polarização linear potenciodinâmica para analisar a resistência à corrosão das amostras. Essa técnica faz uma varredura de potencial obtendo a densidade de corrente que flui da amostra para o contra eletrodo. Com esses dois parâmetros (potencial e densidade de corrente) é possível analisar o comportamento das amostras em relação à resistência à corrosão no meio considerado. O eletrólito utilizado foi uma solução aquosa de 5% de NaCl.

A figura 16 exhibe o resultado da curva de polarização comparando a camada externa da liga de alumínio na condição solubilizada, como recebido, com 0 e 5 meses de exposição.

Figura 16 - Resultado comparativo da curva de polarização da camada externa da liga de alumínio na condição solubilizada, como recebido, com 0 e 5 meses de exposição.

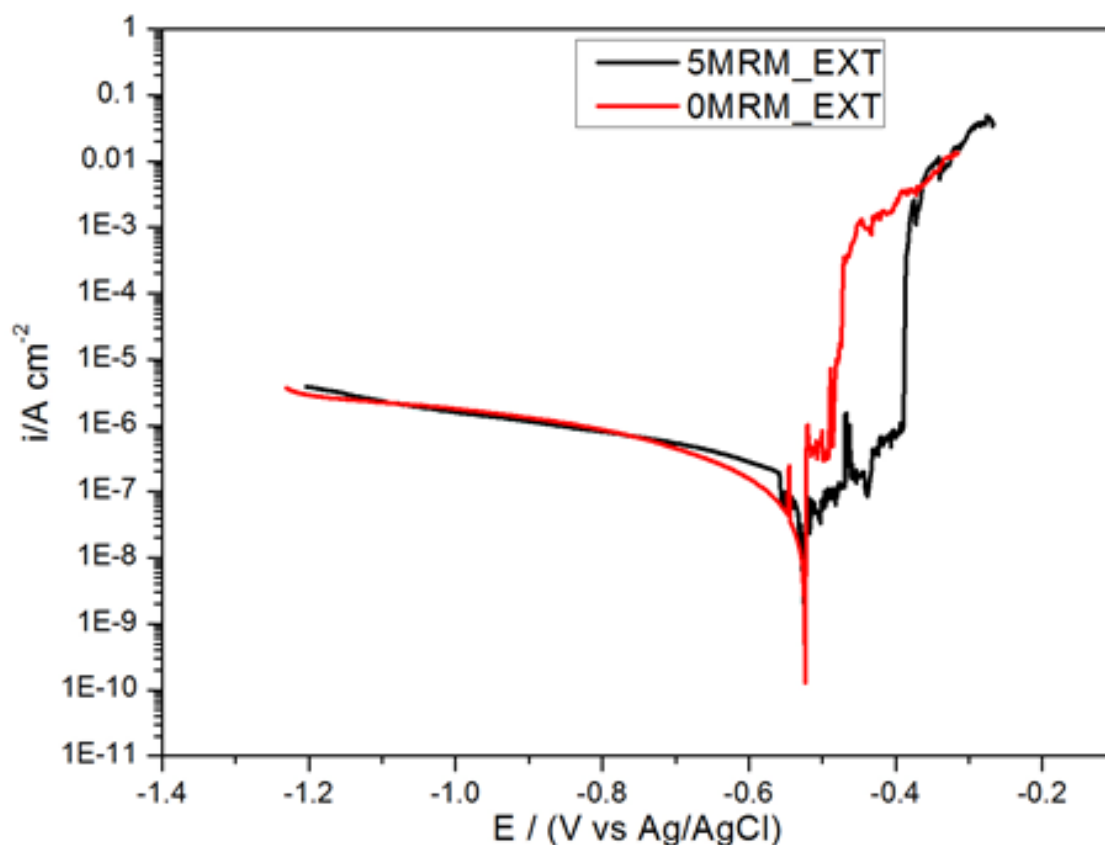


Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

A figura 16 mostra como resultado um aumento de resistência à corrosão com os cinco meses de exposição. Outro fator importante na observação desse gráfico é que este passivou muito mais com cinco meses de exposição do que com a condição não ensaiada, 0 meses. Além do potencial de pite e de corrosão serem maiores, isso já implica em um aumento de resistência a corrosão, a variação do potencial de passivação é muito maior, quanto maior for essa variação, mais o material passivou logo mais resistente a corrosão ele é. Esse aumento de resistência à corrosão pode ser devido à formação natural do óxido que protege mais o material da ação da atmosfera agressiva.

A figura 17 mostra o resultado da curva de polarização comparando a camada externa da liga de alumínio na condição de recozimento pleno com resfriamento moderado, com 0 e 5 meses de exposição

Figura 17 - Resultado comparativo da curva de polarização da camada externa da liga de alumínio na condição de recozimento pleno com resfriamento moderado, com 0 e 5 meses de exposição.

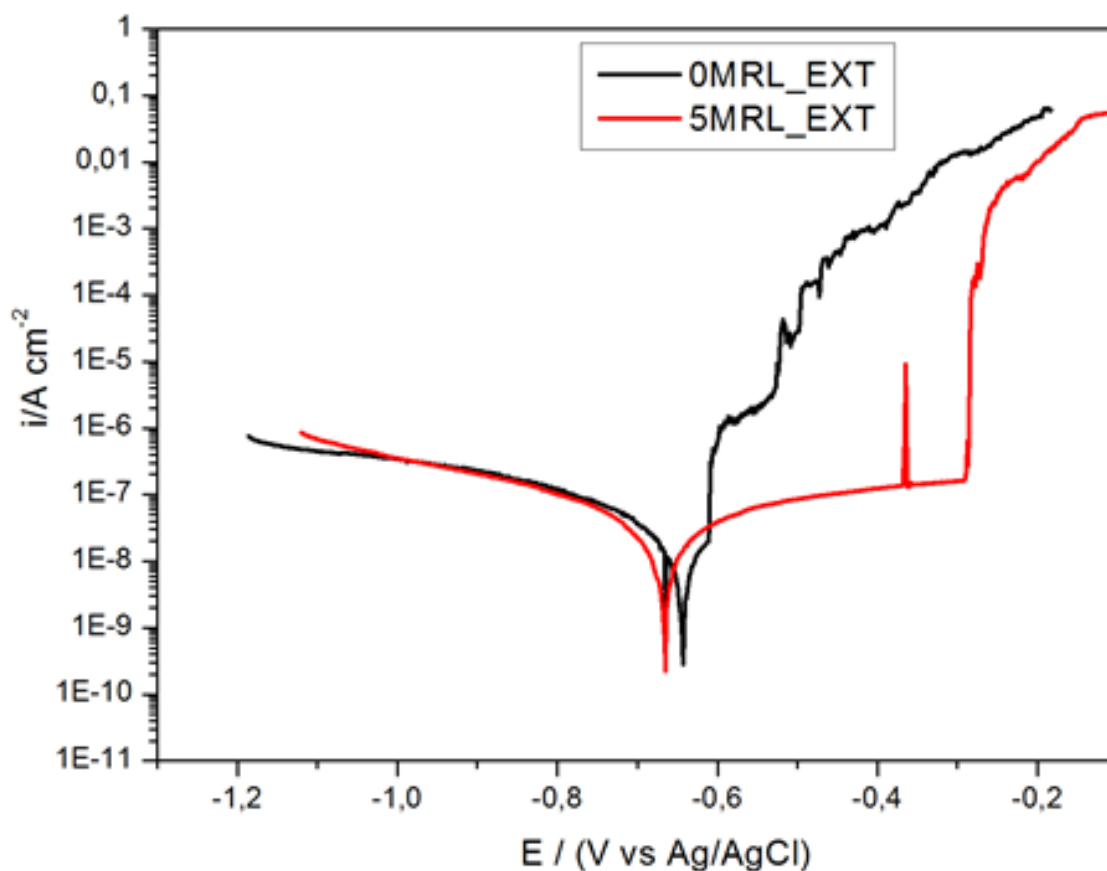


Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

A figura 17 com relação a potencial de corrosão é praticamente o mesmo, no entanto o potencial de pite é um pouco maior com cinco meses de exposição do que com 0 meses, ambas as situações tiveram bastante dificuldade de passivar, logo pode-se dizer que com relação a resistência à corrosão não houve ganho nem perda.

A figura 18 mostra o resultado da curva de polarização comparando a camada externa da liga de alumínio na condição de recozimento pleno com resfriamento lento, com 0 e 5 meses de exposição.

Figura 18: Resultado comparativo da curva de polarização da camada externa da liga de alumínio na condição de recozimento pleno com resfriamento lento, com 0 e 5 meses de exposição.

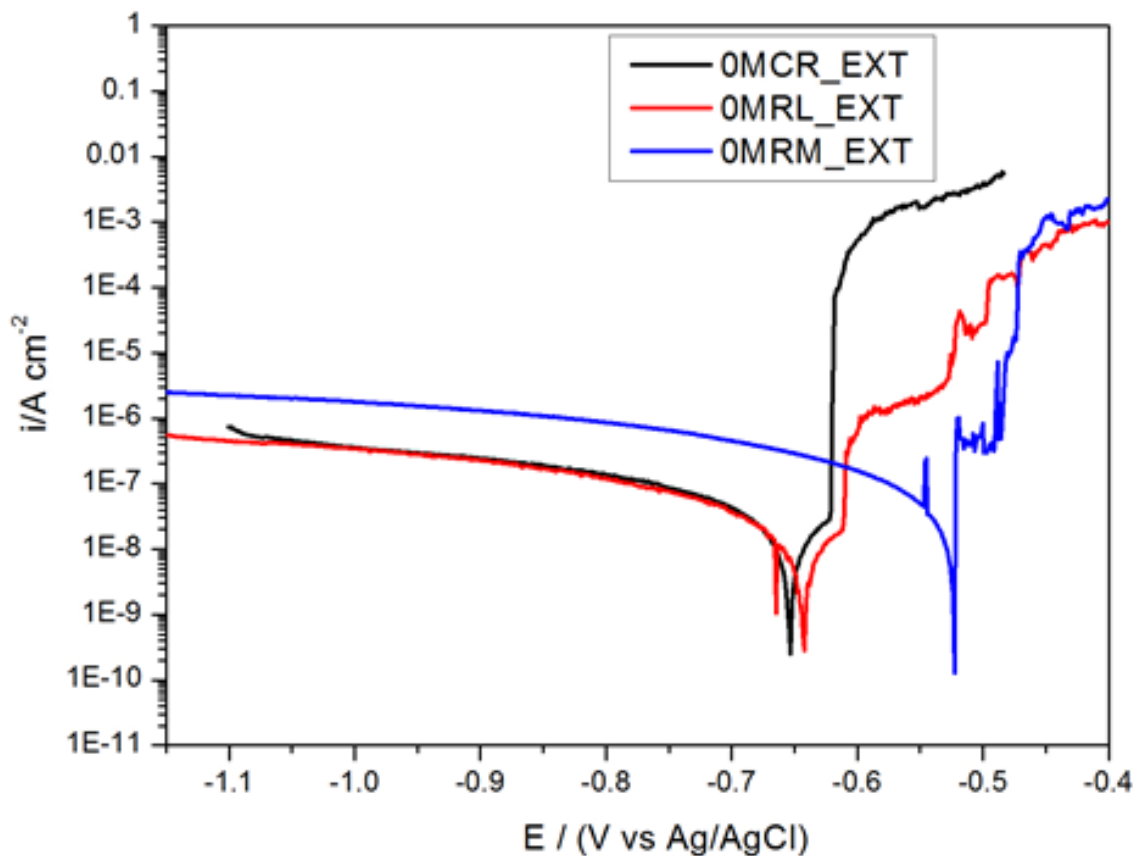


Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

A figura 18 foi à única condição a qual o potencial de corrosão foi abaixo na condição com cinco meses quando comparada com 0 meses, mas foi bastante próxima, no entanto, houve uma grande passivação, mostrando que com a exposição houve um acréscimo da variação de passivação. Das três condições a recozida com resfriamento lento mostrou um maior delta de passivação, esse resultado é ilustrado na figura 21

A figura 19 mostra o resultado da curva de polarização comparando a camada externa da liga de alumínio nas três condições de tratamento térmico proposto pelo trabalho com 0 meses de exposição.

Figura 19 - Comparativo das curvas de polarização das camadas externas da liga estudada nas condições de tratamento térmico proposto pelo trabalho. Amostras com 05 meses de exposição na região do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará.

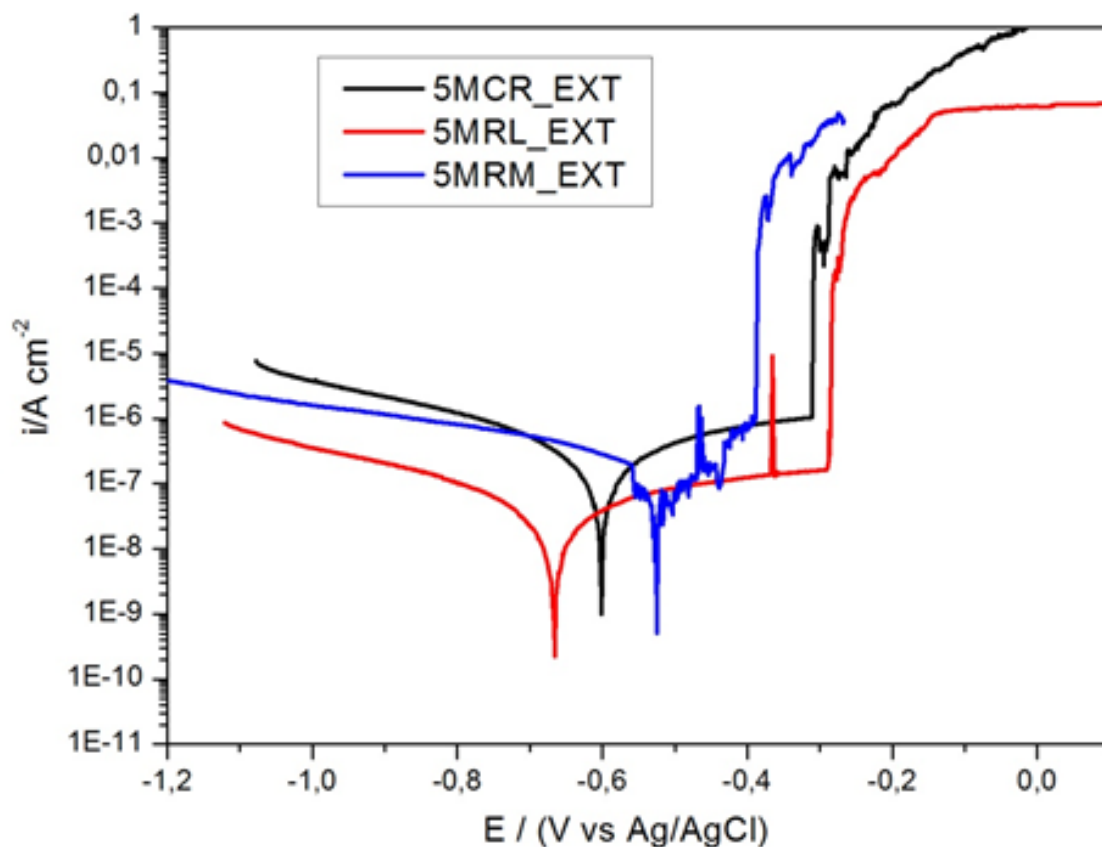


Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

A figura 20 mostra o resultado da curva de polarização comparando a camada externa da liga de alumínio nas três condições de tratamento térmico proposto pelo trabalho com 5 meses de exposição.

As figuras 19 e 20 pode-se observar que a condição recozida com resfriamento moderado é a que tem o potencial de corrosão mais elevado, já a com resfriamento lento que possui um maior delta de passivação. Em momento algum a condição como recebida mostrou-se superior a qualquer tratamento térmico proposto no estudo.

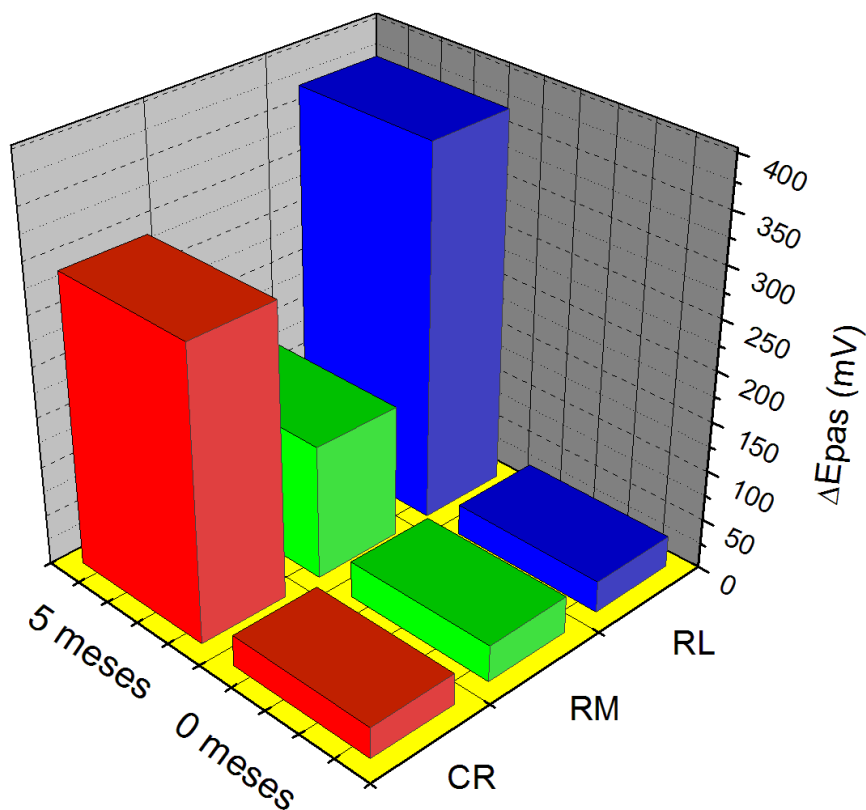
Figura 20 - Comparativo das curvas de polarização das camadas externas da liga estudada nas condições de tratamento térmico proposto pelo trabalho. Amostras com 05 meses de exposição na região do Porto das Dunas – Aquiraz – Ceará.



Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

A figura 21 mostra o resultado da variação de passivação (ΔE_{pas}), em mV, dos fios das camadas externas das três condições estudadas com 0 e 5 meses de exposição.

Figura 21: Comparativo das variações de passivação (ΔE_{pas}), em mV, dos fios das camadas externas das três condições estudadas com 0 e 5 meses de exposição.



Fonte: Produção própria do autor – Universidade Federal do Ceará (2012)

Na figura 21 a diferença desse delta de passivação da condição como recebida para a condição recozida com resfriamento moderado é de pouco mais de 80 mV, o que para resistência à corrosão é considerável.

6.5 Microdureza Vickers

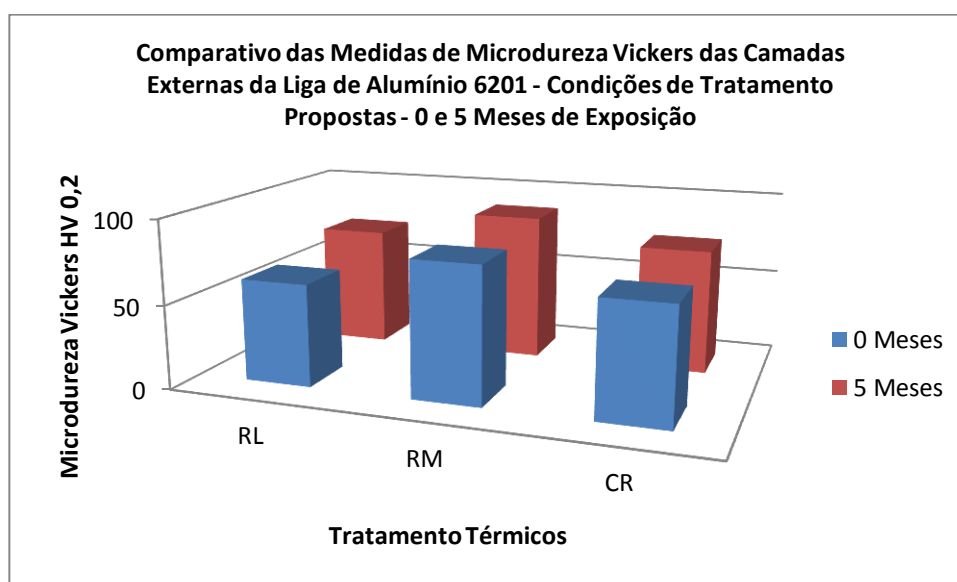
Seguindo o mesmo raciocínio dos ensaios de curva de polarização foi verificado uma linearidade em seus resultados durante os cinco meses de exposição às medidas de microdureza Vickers foram realizadas apenas nas situações extremas, com 0 e 5 meses de exposição, apenas da camada externa das condições de tratamento térmico propostas pelo trabalho.

Foi utilizado um microdurômetro Vickers da marca Shimadzu, a força do penetrador utilizada é classificada como 0,2 HV em um tempo de 10 (dez) segundos.

É extremamente importante a realização desse ensaio, pois em ligas de alumínio da série 6XXX um tratamento térmico pode vir a aparecer zonas que endurecem o material, Zonas GP, zonas de Guinier-Preston ^[5], que só podem ser visualizadas em microscópios eletrônicos de transmissão. Um aumento significativo da dureza pode melhorar a resistência do material quanto ao jateamento de areia provocado pelos ventos do litoral, além de no momento em que esses cabos são instalados entre os poste os operários tendem a arrastá-lo no chão, isso também é prejudicial.

A figura 22 ilustra a média das medidas dos comparativos de microdureza Vickers das camadas externas da liga de alumínio 6201 nas condições de tratamentos térmicos propostas em um período de 0 e 5 Meses de exposição.

Figura 22: Média das medidas dos comparativos de microdureza Vickers das camadas externas da liga de alumínio 6201 nas condições de tratamentos térmicos propostas em um período de 0 e 5 Meses de exposição.



7. Conclusão

Houve um crescimento granular durante a realização dos tratamentos térmicos, pode-se dizer com isso que houve o alívio de tensões, mas não é interessante que haja esse crescimento dos grãos, pois diminuem a resistência mecânica consideravelmente.

O tratamento térmico de recozimento pleno com resfriamento moderado foi o que obteve o resultado mais próximo da condição como recebida, solubilizada, logo, caracteriza-se, até então, como o melhor resultado, pois, houve o alívio de tensões, caracterizado pelo crescimento granular, e não houve uma queda na resistência mecânica a tração.

Após a realização do ensaio de campo e das metalografias não foi constatado nenhuma alteração microestrutural que caracterize uma corrosão sob tensão fraturante ou alguma que possa vir a prejudicar no desempenho de resistência a corrosão do material tanto na amostra como recebida, no estado solubilizado após extrusão, quanto nas tratadas termicamente

Com relação à dureza da liga proposta percebeu-se que não houve um aumento considerável após a realização dos tratamentos térmicos, o que pode não ocasionar o aparecimento da zona GP.

As curvas de polarização cíclica mostram que em momento algum a condição como recebida se mostrou mais resistente à corrosão do que os tratamentos térmicos propostos, ora a condição recozida com resfriamento moderado era superior quando relacionou-se com potencial de corrosão, ora a condição recozida com resfriamento lento mostrou-se mais resistente quando relacionada com a variação de passivação.

Pode-se concluir que cinco meses de exposição não é tempo suficiente para determinarmos com certeza qual condição é mais resistente à corrosão, mas que na maioria dos ensaios os tratamentos térmicos propostos se comportaram de forma melhor do que a condição como recebida, mostrando que o tratamento térmico ideal está entre o recozido com resfriamento moderado e o com resfriamento lento.

8. Referências

- [1] Documento eletrônico disponível em: http://www.fundec.edu.br/tecnico/seguranca_trabalho/trabalhos/1.4.4.1%20-%20Os%20metais%20utilizados.pdf . Acessado dia 09 de Julho de 2012, às 14:37.
- [2] Projeto Corrosão e Degradação Atmosférica dos Materiais Elétricos - Projeto Corrosão
- [3] Avaliação do uso de Cabo Liga de Alumínio Engraxado em Área de Alta Agressividade Salina - Projeto Cabo Liga.
- [4] GENTIL, V. Oxidação e corrosão em temperaturas elevadas. In.: Corrosão. 2.ed. Rio de Janeiro: L. 1982.
- [5] SMITH, Willian F. Structure and Properties of Engineering Alloys, 2nd ed.: Chapter 5: Aluminium Alloys. New York: McGraw-Hill, Inc, s.d.
- [6] Documento eletrônico disponível em: <http://www.abal.org.br/aluminio/temperas.asp> . Acessado dia 09 de Julho de 2012 às 15:09.
- [7] PACIORNIK, S. ; MAURICIO, M. H. P. Digital Imaging. In: George Vander Voort. (Org.). ASM Handbook, Volume 9, Metallography and Microstructures. Materials Park: ASM International, 2004, v. 9, p. 368-402.
- [8] NBR 6810 – 1985: Fios e cabos elétricos – tração e ruptura em componentes metálicos
- [9] Manual do fabricante, Nexans. Disponível no endereço eletrônico: http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt_BR/pdf-family_-74111/Cabos_de_Alum_nio_Liga_6201_CAL.pdf
- [10] DIETER, G.E., Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International. Ed. G. Toffen, M.Howes, T. Inove .,Ohio. 44073,2002.