

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO E TEMPERATURAS ELEVADAS NA MICROESTRUTURA DA LIGA AA5083¹

Alexandre Sartori²
Bruno Arezo e Silva³

Resumo

A liga AA5083 é bastante utilizada na fabricação de tanques rodoviários, de armazenamento de produtos químicos, silos para estocagem de grãos e aplicações marítimas como, por exemplo, casco de barco. Sabe-se que a resistência à corrosão das ligas do grupo 5XXX com mais de 3% de magnésio é bastante afetada quando expostas a temperaturas elevadas por tempos prolongados. O presente trabalho visa relatar as principais alterações microestruturais da liga AA5083 durante exposição a temperaturas elevadas. Esse teste constituiu no aquecimento de várias amostras em um forno de laboratório, entre 50°C e 225°C e em períodos de 360 e 480 horas. As amostras que foram tratadas até 80°C mostraram um ligeiro aumento da fase beta (Mg_2Al_3) em contorno de grão, quando comparado com uma amostra na condição inicial, ou seja, como laminada. As amostras tratadas a temperaturas entre 80°C e 100°C mostraram um aumento significativo da fase beta (Mg_2Al_3). Entre 100°C e 140°C houve uma completa precipitação em rede contínua, tornando com isso o material susceptível a corrosão intergranular, por exfoliação e ou sob tensão. Já o tratamento a 225°C, a fase beta (Mg_2Al_3) precipitou de forma aleatória no interior do grão, o que significa que o material nessa condição apresenta boa resistência à corrosão intergranular, sob tensão e exfoliação. O estudo mostrou que não é recomendada a utilização da liga AA5083 a temperaturas na faixa de 50°C a 200°C.

Palavras-chave: Corrosão; Microestrutura; Alumínio-magnésio.

INFLUENCE OF EXPOSURE TIME AND ELEVATED TEMPERATURES ON THE MICROSTRUCTURE OF AA5083 WROUGHT ALUMINUM ALLOY

Abstract

The aluminum alloy AA5083 is commonly used in the manufacture of transport fuel tanks, chemical storage tanks and marine applications for example, boat hull. It is known that the corrosion resistance of alloys that contain more than 3% of magnesium are wide affected with long time exposure to elevated temperatures. The present paper aims to investigate the main microstructural changes that occur due long time exposure to elevated temperatures of AA5083 alloy. In this work the samples had been heating in a laboratory furnace in the range of 50 to 225°C during 360 and 480 hours. The samples that had been heating to 80°C showed slight increase in the precipitation of the beta (Al-Mg) phase in the grain boundaries when compared with the as rolled condition. The samples that had been heating in the range from 80 to 100°C showed a significant increase of the beta (Al-Mg) phase in the grain boundaries. In the range of 100 to 140 °C had a complete precipitation in the grain boundaries resulting in susceptibility to intergranular and exfoliation corrosion and stress-corrosion cracking. The precipitate formed at 225°C is relatively coarse and does not form a continuous phase at the grain boundaries. Such structures have shown excellent resistance to stress-corrosion cracking. The study showed that AA5083 alloys is not recommended for service where the operating temperature in the range from 50 to 200°C.

Key words: Corrosion; Microstructure; Aluminum magnesium.

¹ Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.

² MSc. Engenheiro de Processo Sênior, Novelis do Brasil Ltda.

³ Analista Metalográfico, Novelis do Brasil Ltda.

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão das ligas endurecidas por precipitação são amplamente afetadas quando submetidas a temperaturas elevadas por tempos prolongados. Dessa mesma forma, algumas ligas não tratáveis termicamente de alumínio-magnésio também podem ser afetadas. Essas ligas fazem parte do grupo de ligas 5XXX alumínio-magnésio com mais de 3% em peso de magnésio em sua composição. As ligas desse grupo são caracterizadas por terem boa soldabilidade e excelente resistência à corrosão.^[1] São amplamente utilizadas na fabricação de tanques rodoviários e de armazenamento de produtos químicos, silos para grãos e aplicações marítimas como, por exemplo, casco de barco.

Em função do efeito da temperatura na resistência à corrosão, nem todas as composições são apropriadas sob certas condições de serviço.

Esse trabalho discute o efeito da temperatura e o tempo de exposição na microestrutura do material liga AA5083.

A liga AA5083 (Al-4.4Mg-0.7Mn-0.15Cr) é uma liga não tratável termicamente, que possui média resistência mecânica e é conhecida por apresentar excelente resistência à corrosão em ambientes marítimos.

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Como mostrado na Figura 1, cada liga de Al-Mg consiste de solução sólida de magnésio no alumínio a temperaturas no campo da fase (Al). A temperaturas menores, entretanto a solubilidade do magnésio no alumínio diminui rapidamente. Ligas contendo mais magnésio em solução sólida do que o equilíbrio permite, tende a precipitar o excesso na forma de um componente chamado de Beta (Mg_2Al_3). A precipitação dessa fase tem efeito considerável nas características das ligas de alumínio-magnésio.

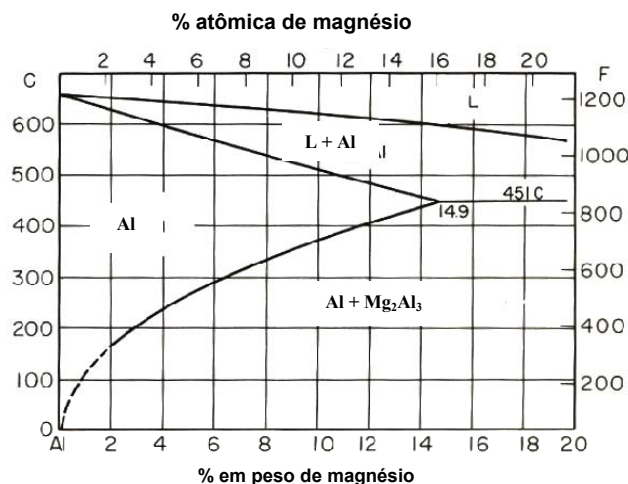


Figura 1: Diagrama de fase alumínio-magnésio.^[1]

A precipitação da fase Beta (Mg_2Al_3) é dependente do tempo e temperatura e tende a ocorrer mais lentamente a temperaturas menores, embora a precipitação a temperatura ambiente seja lenta, mudanças importantes na estrutura e propriedades das ligas de alumínio-magnésio podem ocorrer com o tempo de envelhecimento.^[1]

Quando o material é aquecido no range entre 50° e 200°C e mantido por tempos suficientemente longos ocorre à dissolução seletiva da fase Beta (Mg_2Al_3), a qual precipita em rede contínua no contorno de grão. É claro que existe uma relação tempo-temperatura, ou seja, para temperaturas menores é necessário tempos maiores.

Estudos feitos por Dix, Anderson e Shomaker mostram que uma liga de 6% Mg deformada a frio, não foi observado o precipitado (Mg_2Al_3) quando analisada posteriormente a deformação. Porém após 24 anos de envelhecimento a temperatura ambiente observou-se uma rede contínua precipitada em contorno de grão.

Em geral pequena quantidade do precipitado Beta (Mg_2Al_3) em contorno de grão tem pouco efeito na resistência a corrosão.

Ligas de alumínio-magnésio com mais de 3% de magnésio sob certas condições tende a precipitar a fase Beta (Mg_2Al_3) em rede contínua em contorno de grão.

Esse precipitado é fortemente anódico com relação as regiões adjacentes do grão e quando na presença de muitos eletrólitos corrói preferencialmente. Dessa forma uma precipitação em rede contínua diminui fortemente a resistência à corrosão intergranular, sob tensão e exfoliação da liga.^[1]

Além da temperatura e do tempo, a quantidade de magnésio da liga e a deformação também tem efeito na precipitação da fase Beta (Mg_2Al_3).^[1]

Estudos mostram que a medida que aumenta o percentual de magnésio da liga é necessário diminuir o percentual de deformação a frio a fim de controlar a susceptibilidade a corrosão sob tensão.^[1]

Dix, Andersen e Shumaker também demonstraram que para uma liga de 6% de Mg em peso e 10% de deformação a frio o material se torna susceptível à corrosão sob tensão após 20 anos de envelhecimento à temperatura ambiente. Em contrapartida, uma liga com 4% de Mg em peso necessita de 35 a 40% de deformação a frio para se tornar susceptível a corrosão sob tensão com o mesmo tempo de envelhecimento.

As ligas de alumínio-magnésio aumentam progressivamente a resistência mecânica com o conteúdo de magnésio. A Figura 2 mostra o efeito do percentual de magnésio na resistência mecânica das ligas de Al-Mg.^[1]

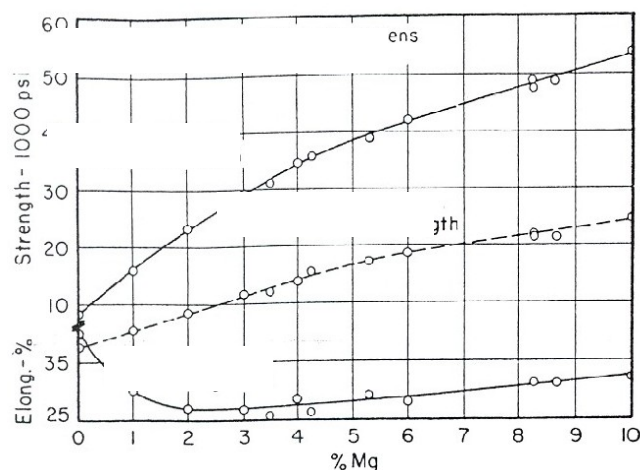


Figura 2: Efeito do percentual de Mg na resistência mecânica das ligas de alumínio-magnésio.^[1]

Mudanças nas propriedades e estruturas que normalmente ocorre ao longo de muitos anos à temperatura ambiente, podem ser aceleradas quando submetidas a temperaturas elevadas. Essa mudança é facilmente observada, por exemplo, na liga

AA5083 quando aquecida a 175°C por 168 horas. Esse tratamento é comumente chamado de sensitização, onde ocorre a precipitação da fase Beta (Mg_2Al_3) em rede contínua em contorno de grão. O material nessa condição está susceptível a corrosão intergranular. Portanto o processo metalúrgico é fundamental para determinar a resistência à corrosão intergranular, sob tensão ou exfoliação, ou seja, se durante o processo de fabricação a fase Beta (Mg_2Al_3) precipitar de forma aleatória no interior do grão, o material apresentará boa resistência.^[2] A Figura 3 mostra os desenhos esquemáticos da precipitação da fase Beta (Mg_2Al_3).

O Alumínio tem estrutura cristalina cúbica de face centrada e durante a laminação a frio são introduzidos na estrutura do material defeitos cristalinos como, por exemplo, discordâncias e bandas de deformação. Quando uma liga de Al-Mg com mais de 3% em peso de Mg é laminada a frio e submetida a temperaturas da ordem de 205°C, a fase Beta (Mg_2Al_3) tende a precipitar nas bandas de deformação, conseqüentemente distribuídas aleatoriamente no interior do grão, tornando com isso um material resistente à corrosão intergranular, sob tensão e por exfoliação.

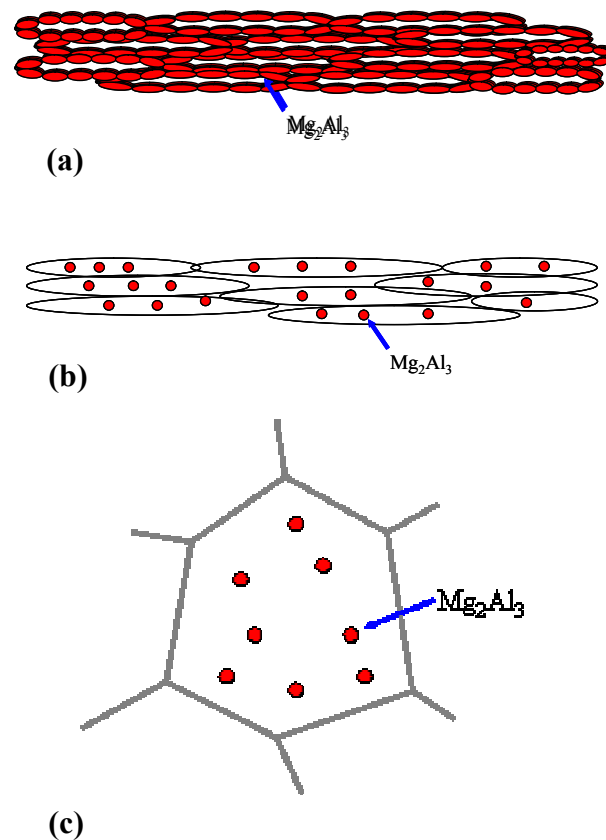


Figura 3. (a) Precipitação contínua em contorno de grão; (b) Precipitação no interior do grão deformado e (c) Precipitação no interior do grão recristalizado.

3 CORROSÃO INTERGRANULAR

A corrosão intergranular, também conhecida como corrosão intercristalina, é um tipo de ataque seletivo em contorno de grão ou em regiões adjacentes ao contorno, sem ataque no interior do grão.^[3] O mecanismo é eletroquímico e é resultado de uma célula local no contorno de grão. Células são formadas entre os microconstituintes de segunda fase e a zona empobrecida de solução sólida, ou seja, a corrosão

intergranular acontece quando existe um caminho preferencial para a corrosão na região dos contornos de grão, fazendo com que os grãos sejam destacados à medida que a corrosão se propaga.^[4]

Corrosão intergranular é um termo genérico que inclui variações associadas com diferentes estruturas do material e tratamentos termomecânicos.^[5]

4 CORROSÃO SOB TENSÃO

A corrosão sob tensão em ligas de alumínio é basicamente intergranular. De acordo com a teoria eletroquímica é necessária uma condição no contorno de grão que faz com que ele se torne anódico em relação as demais regiões da microestrutura, para que a corrosão se propague em contorno de grão.^[6] A susceptibilidade à corrosão intergranular é pré-requisito para a susceptibilidade a corrosão sob tensão.

Para que ocorra a corrosão sob tensão, além da susceptibilidade do material, também é necessário uma tensão e um eletrólito. Em meios contendo cloretos a taxa de corrosão é acelerada.

5 CORROSÃO POR EXFOLIAÇÃO

Exfoliação, também chamada de corrosão de camada ou lamelar, é um tipo seletivo de ataque sub superficial que ocorre ao longo dos contornos de grão paralelo à superfície do material. Esse tipo de corrosão ocorre predominantemente em produtos deformados com estrutura de grãos alongados. A intensidade da exfoliação aumenta em atmosferas levemente ácidas ou quando o alumínio está em contato com um metal dissimilar.

As ligas de alumínio-magnésio com mais de 3% em peso de magnésio podem desenvolver a corrosão por exfoliação. O grau de susceptibilidade pode ser controlado por tratamento metalúrgico especial.

A susceptibilidade à corrosão por exfoliação está relacionada com a estrutura do material e a agressividade da atmosfera. Quando ocorre a precipitação em rede contínua em contorno de grão da fase Mg_2Al_3 , o material é susceptível a esse tipo de falha. A corrosão por exfoliação se desenvolve rapidamente em meios contendo cloretos, como, por exemplo, em atmosferas marítimas.

6 MATERIAIS

Neste estudo foi utilizada amostra de lâminas nas dimensões 200 x 200 x 8 mm obtidos após laminação à quente. O material foi fornecido pela Novelis do Brasil Ltda, unidade de Pindamonhangaba – SP. A liga utilizada foi a AA5083 produzida pelo processo descontínuo *Direct Chill (DC)*. O processo descontínuo se caracteriza pelo vazamento de um lingote com dimensões variadas, laminado à quente e a frio. Nesse estudo foi utilizado um lingote com dimensões 600 x 1500 x 3800 mm. Posteriormente o lingote foi usinado em ambas as faces a fim de remover as segregações oriundas do processo de fundição. Na seqüência o lingote foi aquecido à temperatura acima de 400°C com o objetivo de homogeneizar a estrutura bruta de fusão e também pré-aquecer para a laminação à quente. Em seguida, o lingote foi laminado em um laminador desbastador quádruplo reversível até a espessura de 25 mm, e transferido para um laminador de tiras à quente que reduziu a espessura para

8 mm. A têmpera obtida nesse processo foi como fabricada F. A composição química do material é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química real da liga AA5083

% em peso							
Mg	Fe	Si	Mn	Cu	Cr	Ti	V
4.58	0.2	0.1	0.46	0.04	0.06	0.03	0.01

Para execução dos estudos foram utilizadas 16 amostras da posição central da bobina. Como o objetivo do estudo foi avaliar a influência da temperatura e do tempo na microestrutura do material, amostras foram submetidas a diferentes temperaturas e tempos e posteriormente ao exame metalográfico. A Tabela 2 mostra todas as temperaturas e tempos que foram submetidos os materiais.

Tabela 2: Temperatura e tempo de exposição.

Temperatura (°C)	Tempo (horas)
50	480
60	360
60	480
80	360
100	360
120	360
140	360
225	360

OBS: Testes realizados em réplicas, ou seja, em cada temperatura, foram colocadas duas amostras no forno.

7 EQUIPAMENTOS

Para execução desse trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Forno Industrial KR, aquecimento elétrico, com controlador de temperatura digital, máx. 750°C;
- Microscópio Ótico Nikon modelo eclipse NE600 acoplado a um analisador de imagens Clemex Vision;
- Pirômetro digital.

8 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O tempo total para execução de todos os testes de forno foram 115 dias. Além do termopar que mede a temperatura do ar dentro do forno, também se utilizou um pirômetro digital com termopar tipo K devidamente calibrados para garantir um maior controle da temperatura do material.

Em cada condição de teste, as amostras foram colocadas no forno e após a estabilização da temperatura tanto do display do forno quanto no pirômetro iniciou-se a contagem do tempo de exposição. Após todos os testes serem realizados, as amostras foram submetidas a ensaios metalográficos.

9 ENSAIO METALOGRAFICO

De cada amostra foram cortados corpos-de-prova nas seguintes dimensões: 20 x 10 x 8 mm.

Os corpos-de-prova foram embutidos à quente, na secção longitudinal a de laminação, posteriormente lixados manualmente com as seguintes granas: 220, 400 e 600 respectivamente. Na seqüência foram polidas com pasta de diamante 4µm, óxido de magnésio e sílica coloidal.

10 ATAQUE QUÍMICO

Após polimento metalográfico as amostras foram submetidas a um microataque químico a fim de revelar o precipitado Mg_2Al_3 . O ataque utilizado foi H_3PO_4 40% por 3 minutos a uma temperatura de 35°C.

11 COMENTÁRIOS

Práticas comerciais utilizadas para produzir a têmpera H3 nas ligas de alumínio-magnésio, inclui um aquecimento a temperaturas da ordem de 170°C que objetiva um material mais dúctil com estabilidade das propriedades mecânicas a temperatura ambiente. Essas práticas são chamadas de estabilização. Esse tratamento não é recomendado para ligas que contém mais de 3% de magnésio, porque essa irá induzir a susceptibilidade à corrosão sob tensão, intergranular e por exfoliação. Aquecimento alternativo a 225°C, que é um pouco abaixo da linha de solubilidade do magnésio no diagrama de equilíbrio, irá produzir um aumento na estabilidade desejada. Este é claro diminui as propriedades mecânicas do material, dessa forma deverá ser compensada, por exemplo, utilizando uma liga com maior percentual de magnésio.

Segundo Dix, o que explica o aumento da resistência à corrosão sob tensão em materiais estabilizados a temperatura de 225°C, é que esse tratamento precipita a fase Beta (Mg_2Al_3) relativamente grosseira no interior do grão e não em rede contínua em contorno de grão.

A liga AA5083 quando destinada a aplicações marítimas, deve ser produzida com rigorosos tratamentos metalúrgicos desde a fundição até o processo de deformação final, a fim de se obter uma estrutura apropriada, ou seja, resistente aos processos de corrosão intergranular, por exfoliação e sob-tensão. Por último o material deve ser submetido aos testes relativos às normas ASTM G66 e G67 e se aprovado, o material está apto a ser utilizado em ambientes marítimos.^[7,8]

O material na condição como laminado apresentou microestrutura com início de precipitação em contorno de grão, o que segundo a literatura não tem influência durante serviço (Figura 4).

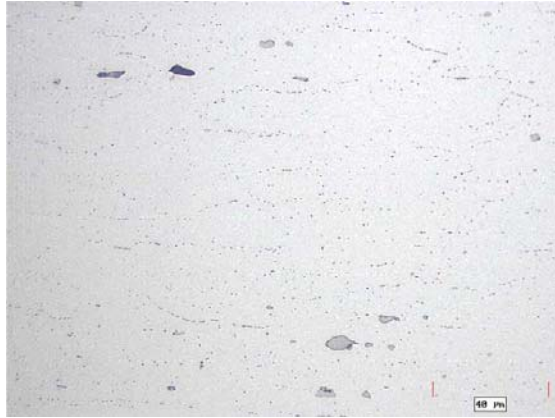


Figura 4: Microestrutura do material após laminação a quente.

Após testes de sensitização a 50°C e 60°C por 360 horas e 480 horas respectivamente, houve um ligeiro aumento da precipitação da fase beta (Mg_2Al_3) em contorno de grão. Essa diferença na microestrutura pode ser observada nas Figuras 5 e 6.



Figura 5: Microestrutura do material após teste de forno 50°C por 480 horas.



Figura 6: Microestrutura do material após teste de forno 60°C por 480 horas.

Porém, quando este material foi submetido a temperaturas acima de 80°C pelos mesmos períodos de tempo, nota-se um aumento na precipitação da fase Mg_2Al_3 em rede contínua (Figura 7). Em temperaturas acima de 100°C ocorre a completa precipitação, tornando com isso um material susceptível a corrosão intergranular e ou sob tensão (Figuras 8, 9 e 10).

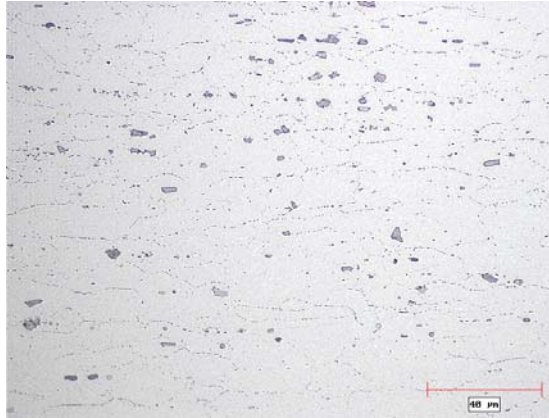


Figura 7: Microestrutura do material após teste de forno 80°C por 360 horas.

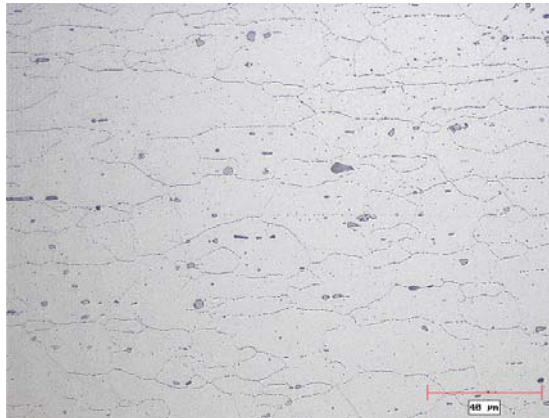


Figura 8: Microestrutura do material após teste de forno 100°C por 360 horas.

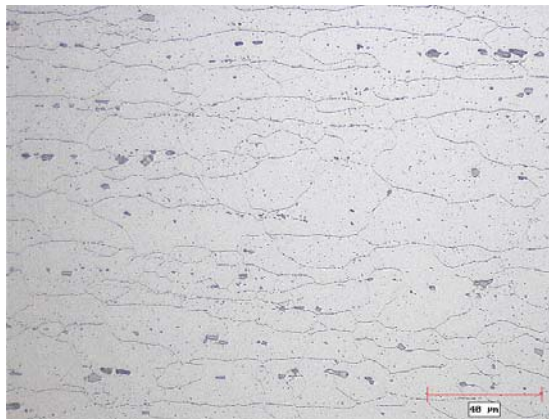


Figura 9: Microestrutura do material após teste de forno 120°C por 360 horas.

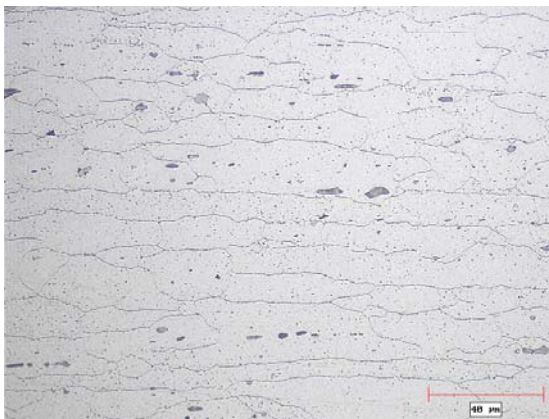


Figura 10: Microestrutura do material após teste de forno 140°C por 360 horas.

Mesmo não ocorrendo à completa precipitação da fase Beta (Mg_2Al_3) em rede contínua no intervalo de temperatura entre $50^\circ C$ e $80^\circ C$ por 480 horas, é importante lembrar que a precipitação pode aumentar se o material for mantido por períodos mais prolongados. No tratamento a $225^\circ C$ por 360 horas, a fase beta (Mg_2Al_3) precipitou de forma aleatória no interior do grão, porém com tamanho maior, o que significa que o material nessa condição apresenta resistência à corrosão intergranular e ou sob tensão (Figura 11).

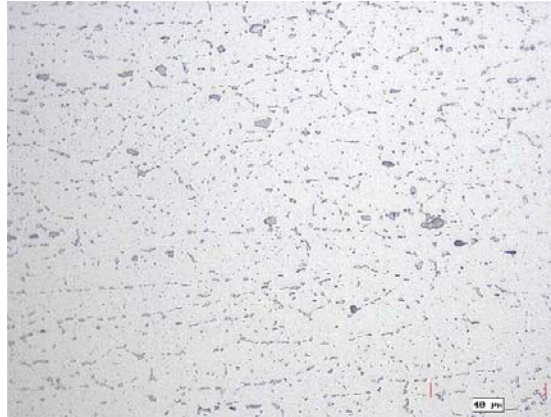


Figura 11: Microestrutura do material após teste de forno $225^\circ C$ por 360 horas.

OBS.: Todas as amostras foram atacadas com H_3PO_4 40% e fotografadas com 500X de aumento.

12 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que a precipitação da fase Beta (Mg_2Al_3) em rede contínua em contorno de grão está relacionada com o aquecimento a temperaturas elevadas por tempos prolongados, ou seja, quanto maior a temperatura, maior será a precipitação da fase Beta em contorno de grão.

- Houve um aumento progressivo da precipitação da fase Beta em contorno de grão no intervalo de temperatura entre $50^\circ C$ e $140^\circ C$.
- Não é recomendado utilizar a liga AA5083 a temperaturas entre $50^\circ C$ e $200^\circ C$ em serviço por tempos prolongados.
- Tratamentos convencionais de estabilização para produzir têmperas H3 não são recomendados para liga AA5083.
- Na amostra tratada a $225^\circ C$ a precipitação ocorreu de forma aleatória no interior do grão.

REFERÊNCIAS

- 1 DIX, E.H.JR.; ANDERSON, W.A.; SHUMAKER, M.B. Influence of Service Temperature on the Resistance of Wrought Aluminum-Magnesium Alloys to Corrosion. **Corrosion-National Association of Corrosion Engineers**, v.15, p. 19 – 26, 1959.
- 2 SARTORI, A.; VEIGA, J. **Determinação da Susceptibilidade à Corrosão Intergranular para Ligas Al-Mg (5XXX) com mais de 3% de Mg Através da Perda de Massa por Unidade de Área**. Pindamonhangaba: Novelis do Brasil Ltda, 2005.

- 3 DAVIS, J.R. Intergranular and Exfoliation Corrosion. In.: **Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys**. Ohio: ASM International, 1999. p. 63 – 74. cap 4.
- 4 HATCH, J.E. **Aluminum Properties and Physical Metallurgy**. Metals park, Ohio: ASM, 1984.
- 5 ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook: Corrosion**. 9.ed. Ohio: ASM International, v.13, p. 583 – 609, 1987.
- 6 BINGER, W.W.; HOLLINGS WORTH, E.M.; SPROWLS, D.O. Resistance to Corrosion and Stress Corrosion. In.: VAN HORN, K.R. **Aluminum: Properties Physical Metallurgy and Phase Diagrams**. Ohio: ASM, 1967. p. 209 – 276. v.1.
- 7 **ASTM. G 66-99 – Reapproved 2005**: Visual assessment of exfoliation corrosion susceptibility of 5XXX series aluminum alloys (ASSET test). USA: ASTM, 1999.
- 8 **ASTM. G 67-99**: Determining the susceptibility to intergranular corrosion of 5XXX series aluminum alloys by mass loss after exposure to nitric acid (NAMLT test) USA: ASTM, 1999.