

ANÁLISE DE TÊMPERA DE LIGAS DE ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO AQUOSA DE POLÍMERO. UM ESTUDO COMPARATIVO COM TÊMPERA EM ÁGUA¹

Patrícia M. Kavalco²
Lauralice C. F. Canale³
George E. Totten⁴

Resumo

A têmpera com solução aquosa de polímero melhora as propriedades de distorção, dureza e corrosão intergranular. Neste trabalho, foi realizado um estudo comparativo entre a têmpera em água e em solução aquosa de polímero de ligas de alumínio aeronáutico 2024, 7475 e 7075 submetidas a diferentes condições de resfriamento, sendo a água em duas diferentes temperaturas (30°C e 70°C) e de soluções aquosas de polímero PAG com diferentes concentrações (12% e 20%) a 40°C. Os resultados de distorção e corrosão intergranular ficaram dentro do esperado. As soluções de polímero, por apresentarem uma troca de calor mais uniforme, garantiram propriedades de dureza com baixa distorção. Isso oferece subsídios para que as indústrias de tratamento térmico de alumínio melhorem a qualidade dos componentes tratados, diminuindo a porcentagem de retrabalho.

Palavras-chave: Têmpera de alumínio; Polímeros; Distorção; Corrosão intergranular.

ANALYSIS OF THE ALUMINUM ALLOYS QUENCH IN AQUEOUS SOLUTION OF POLYMERS. A COMPARATIVE STUDY WITH WATER QUENCH

Abstract

The quenching with aqueous solution of polymer improves the properties of distortion, hardness and intergranular corrosion. In this work was performed a comparative study between water quench and polymer aqueous solution quench of aircraft aluminum alloys 2024, 7475 and 7075 under different conditions of cooling, the water at two different temperatures (30°C and 70°C) and PAG polymer aqueous solutions with different concentrations (12% and 20%) at 40°C. The results of distortion and intergranular corrosion were within the expected. The solutions of polymer, for presenting a more uniform heat exchange, guaranteed properties of hardness with low distortion. It provides subsidies to the industries of heat treatment of aluminum components to improve the quality of treatment, decreasing the percentage of rework.

Key words: Aluminum quench; Polymers; Distortion; Intergranular corrosion.

¹ Contribuição técnica ao 11º Seminário de Metais Não Ferrosos, 1 a 3 de setembro de 2009, São Paulo, SP.

² Aluna de Mestrado em Engenharia Mecânica/Materiais Escola de Engenharia de São Carlos (USP), patikavalco@gmail.com, (16) 88192041

³ Professora Associada do Departamento de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), lfcanale@sc.usp.br, (16) 33739579

⁴ Portland State University, Portland, OR; membro da ASM Internacional e membro da ASM Heat Treating Society, getotten@aol.com.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo determinar as propriedades de distorção, dureza e corrosão intergranular em ligas de alumínio aeronáutico 2024, 7475 e 7075, sendo realizado o tratamento térmico e utilizando, como meio de têmpera, água fria, água quente e soluções aquosas de polímero em duas diferentes concentrações.

1.1 Ligas de Alumínio

As ligas de Al podem ser classificadas de acordo com o tipo de processo de fabricação empregado, podendo ser forjadas ou fundidas, tratáveis termicamente ou não. Os fatores que determinam os tipos de tratamentos térmicos são: temperatura, taxas de aquecimento e resfriamento, tempo de permanência em uma determinada temperatura. A escolha adequada desses elementos está diretamente relacionada com a estrutura das ligas.⁽¹⁾ Para as ligas de alumínio 2024, 7075 e 7475, os tratamentos térmicos são T4 (solubilização e envelhecimento natural), T6 (solubilização e envelhecimento artificial) e T61 (solubilização e têmpera em água fervente para minimizar tensão residual) que são tratamentos de solubilização e precipitação.

1.2 Tratamento térmico e distorção

Um dos maiores problemas do tratamento térmico das ligas de alumínio é o perigo de distorcer ou trincar parte do material quando resfriado rapidamente em água a partir da temperatura de solubilização.

O uso de ligas de alumínio na indústria aeronáutica exige que esses materiais apresentem elevada resistência, que é alcançada no processo de tratamento térmico de solubilização com temperaturas tipicamente entre 465°C e 565°C com o rápido resfriamento (têmpera) para formar solução sólida supersaturada. No posterior envelhecimento a precipitação ocorre aumentando a dureza e a resistência.⁽²⁾

Se a velocidade de resfriamento for baixa, a liga pode não obter a resistência máxima, e pode ficar suscetível à corrosão intergranular. Durante um resfriamento lento, precipitados de equilíbrio, irão se formar no contorno de grão. Esse precipitado contribui muito pouco com o aumento da resistência e, na presença de um eletrólito, fará com que a área próxima ao contorno de grão se torne anódica em relação ao resto do grão. Entretanto, se a velocidade de resfriamento for excessivamente rápida, pode ocorrer distorção do material, especialmente em partes fabricadas antes do tratamento térmico. Em grandes elementos, trincas devido ao resfriamento geralmente acontecem. Distorção, surgimento de trincas, corrosão intergranular e propriedades mecânicas pobres são problemas sérios, principalmente na indústria aeronáutica.⁽³⁾

Assim, um equilíbrio deve ser obtido entre a necessidade de uma têmpera suficientemente rápida para manter solubilizada a maioria dos elementos de endurecimento e a necessidade de minimizar a tensão residual e a distorção nas partes sendo temperadas.

Normalmente a água fria é utilizada para a têmpera e, em componentes mais sensíveis à distorção, usa-se água quente. Entretanto, a água é um meio de resfriamento pouco eficiente no que diz respeito à uniformidade e a utilização de

soluções de polímeros pode controlar melhor este problema, pois oferece melhor uniformidade durante o resfriamento e, com isso, minimiza a distorção.⁽³⁾ Isso é especialmente importante quando se trata de chapas finas. A concentração do polímero e conseqüentemente a espessura da película formada ao redor do componente durante o resfriamento, deve ser dimensionada para cada tipo de liga e espessura do componente, conforme demonstra a tabela a seguir.

Tabela 1 – Máxima concentração de polímero na têmpera

Liga	Forma	Espessura Máxima Nominal (polegadas)	Concentração de Polímero (porcentagem por volume)	
			Tipo 1	Tipo 2
2014, 2017, 2024, 2117, 2119, 2219, 2524	Todas	0.040	34 máximo	34 máximo
		0.063	28 máximo	22 máximo
		0.071	22 máximo	16 máximo
		0.080	16 máximo	16 máximo
7075, 7175, 7178, 7050	Chapa, placa, barra, tubo e extrusão	0.032	40 máximo	40 máximo
		0.063	40 máximo	34 máximo
		0.080	34 máximo	34 máximo
		0.125	34 máximo	28 máximo
		0.190	28 máximo	20 máximo
		0.250	22 máximo	18 máximo
7075	Forjados	0.630	16 máximo	N/A
		0.75	40 máximo	16 máximo
		1.5	28 máximo	16 máximo
		3.0	18 máximo	N/A

Fonte: Boeing Standard 5602

O polímero tipo 1 é formado de apenas um polímero enquanto que o tipo 2 é um copolímero. Ambos possuem propriedades de solução e desempenho dentro das especificações da norma AMS 3025.

1.3 Envelhecimento

As propriedades dos materiais são influenciadas pelo resfriamento e subsequente envelhecimento da liga.⁽⁴⁾

Do ponto de vista do endurecimento por precipitação, é desejável que se resfrie a parte como inteira o mais rápido possível, a partir da temperatura de solubilização. Devido ao fato do processo de resfriamento ser um fenômeno superficial, pontos próximos ou na superfície resfriada terão um resfriamento suficientemente rápido para alcançar a máxima dureza e resistência, porém, no interior da parte, um resfriamento mais lento irá acontecer, resultando em propriedades mecânicas mais pobres no envelhecimento.⁽⁵⁾ O resfriamento muito rápido do exterior de uma parte que possua uma seção transversal com grande variação de espessura faz com que o interior da seção mais fina resfrie muito mais rápido que o interior da seção mais espessa. Assim, uma grande variação de temperatura localizada ocorrerá durante o resfriamento, o que leva a grandes tensões térmicas e assim, tensão residual e possível distorção (se a parte é relativamente fina e os gradientes são severos). Se a parte é resfriada muito lentamente, um resfriamento uniforme pode ocorrer, porém a resistência e dureza desejadas não podem ser obtidas no posterior processo de endurecimento por precipitação. Conseqüentemente, um valor ótimo de resfriamento existe dentro de

um intervalo de taxas de resfriamento aceitáveis, tal que a parte é resfriada o mais rápido e uniformemente possível,⁽⁶⁾ conforme indicado na Figura 1.⁽⁷⁾

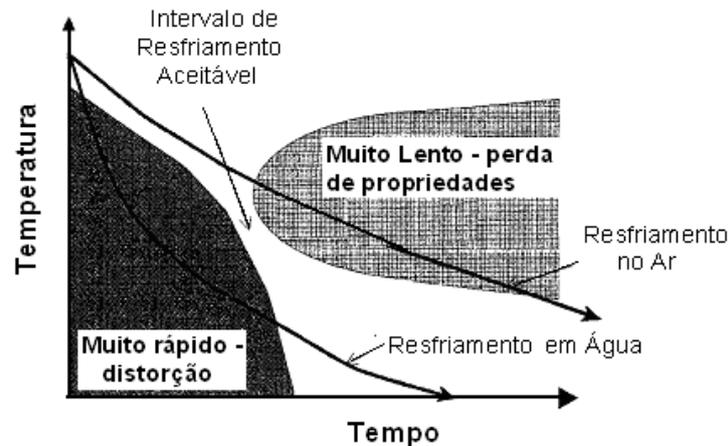


Figura 1 - Intervalo de taxas de resfriamento aceitáveis.⁽⁷⁾

1.4 Corrosão

As ligas de alumínio são muito susceptíveis à corrosão intergranular, figura 2. Esta forma de corrosão representa um grande perigo, pois a corrosão pode progredir consideravelmente sem ser notada. O ataque é localizado ao longo do contorno de grão, ou adjacente ao mesmo,⁽⁸⁾ enquanto que a maior parte do grão permanece em grande parte inalterada e acontece quando existe um caminho preferencial para a corrosão na região dos contornos de grão.⁽⁹⁾

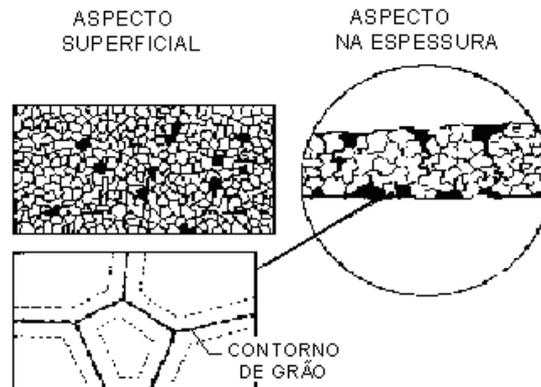


Figura 2 – Esquema da corrosão intergranular.⁽⁹⁾

Como exemplo tem-se a liga de alumínio 2024-T3, considerada forte e resistente à corrosão em geral, e vulnerável à corrosão intergranular, como mostrado na Figura 3.⁽¹⁰⁾

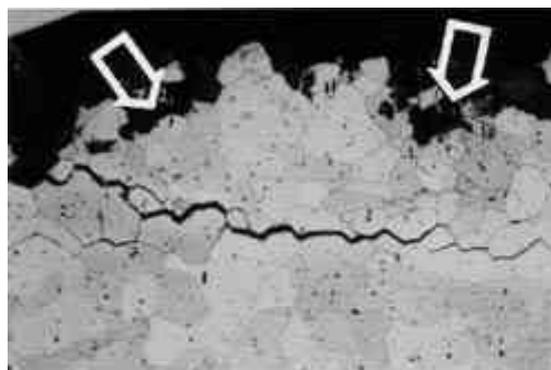


Figura 3 - Corrosão Intergranular na liga AA2024-T3.⁽¹⁰⁾

As ligas de alumínio são mais susceptíveis à corrosão durante a etapa do envelhecimento, que é quando ocorre maior precipitação.⁽¹¹⁾ Contornos de grão são locais preferenciais de precipitação e segregação, o que os torna física e quimicamente diferentes da matriz.⁽¹²⁾

Apesar da susceptibilidade a esses tipos de corrosão poder ser bastante melhorada utilizando um tratamento térmico apropriado, ela não pode ser completamente anulada.⁽¹³⁾

Elevadas taxas de resfriamento diminuem a probabilidade de precipitação no contorno de grão diminuindo também a probabilidade de ocorrer a corrosão intergranular. Porém, as taxas de resfriamento necessárias podem nem sempre ser possíveis na prática, principalmente em seções espessas.⁽¹¹⁾

Um fator que determina a resistência à corrosão intergranular é a microestrutura da liga, incluindo tamanho de grão e forma.⁽¹⁴⁾ Ligas de alumínio de elevada resistência em geral são alongadas e anisotrópicas, com grãos alongados na direção longitudinal (L) ou ao longo da direção transversal de maior comprimento (T) e mais curtos na direção transversal de menor comprimento (S).⁽¹⁵⁾ Observou-se que a corrosão é também anisotrópica em algumas ligas de alumínio. Foi relatado que a cinética da corrosão intergranular em uma chapa de AA2024-T3 laminada apresentava diferentes orientações em relação à direção de laminação, com a maior taxa de crescimento da corrosão intergranular na direção longitudinal (L) ou ao longo da direção transversal de maior comprimento (T) e as menores taxas na direção transversal de menor comprimento (S). Isso se deve ao caminho praticamente reto da corrosão intergranular nas duas primeiras direções, como ilustrado na Figura 4.

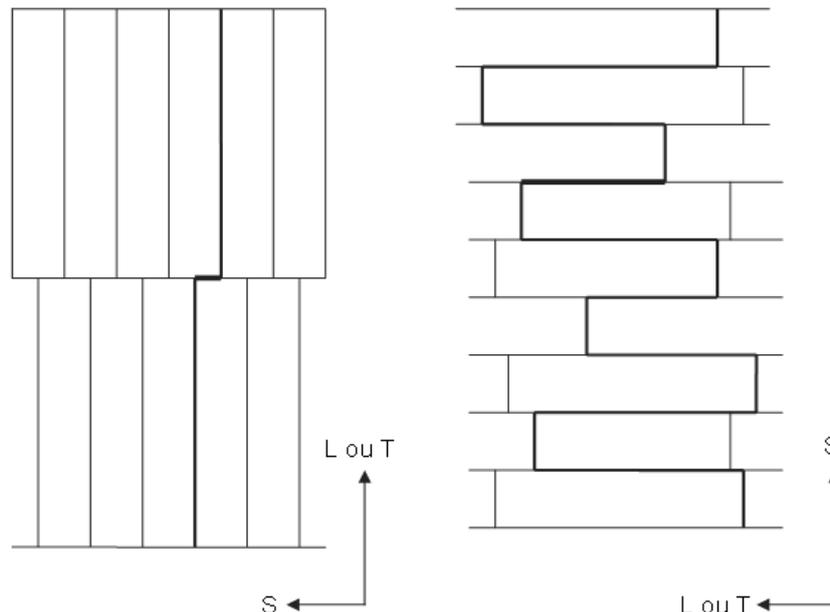


Figura 4 - Menor caminho nas direções L ou T, e o caminho na direção S.⁽⁹⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras utilizadas neste trabalho foram ligas de alumínio 2024, 7475 e 7075; sendo as duas primeiras em forma de chapa com espessura de 1,6 mm e a última em forma de barra, com seção transversal circular e com diâmetros de 30 e 50 mm. As barras foram confeccionadas com um comprimento de 4 vezes o diâmetro, assim foram feitas 12 amostras de 30 mm de diâmetro por 120 mm de comprimento e 9 amostras de 50 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento.

De acordo com a norma AMS 2770E⁽¹⁶⁾ foram determinadas as temperaturas e tempo de solubilização e envelhecimento para cada liga e são mostrados nas tabelas 4 e 5. Os tempos correspondem à solubilização em um forno convencional de ar.

Tabela 2 – Tempos e temperaturas do tratamento térmico⁽¹⁶⁾

Liga	Temperatura (°C)	Tempo Mínimo (horas : minutos)
2024	493	0:30
7475	471*	0:30
7075 (30 mm)	466	1:30
7075 (50 mm)	466	2:30

Após o tempo normal no forno, aumentar a temperatura para 493°C para Alclad e 513°C para não Alclad; tempo mínimo no forno para essas temperaturas, 15 minutos e 60 minutos, respectivamente.

Tabela 3 – Envelhecimento⁽¹⁶⁾

Liga	Condição antes do Envelhecimento	Condição depois do Envelhecimento	Temperatura °C	Tempo de Imersão Horas
2024	Como temperado	T4	ambiente	mínimo 96
7075	Como temperado	T6	121	23 - 25
7475	Como temperado	T61	121	03 - 05
			157	Seguido de 3 - 3,25

As amostras foram temperadas em água, nas temperaturas de 30°C e 70°C e em solução aquosa de polímero a 12% e 20% na temperatura de 40°C, utilizando o polímero PAG Aqua Quench 260 da Houghton Brasil Ltda. Nos ensaios, a agitação utilizada foi de aproximadamente $0,7 \cdot 10^{-3} m^3 / s$.

As chapas foram usadas nos ensaios de distorção, consistindo em medidas de deflexão antes e depois do tratamento utilizando um braço mecânico.

Para determinar os pontos de medição, foi feita uma malha em cada chapa, dessa forma garantiu-se que os pontos medidos antes e depois do tratamento térmico fossem exatamente os mesmos.

Das barras foram cortadas “bolachas” de aproximadamente 20 mm de espessura, para estudos de dureza. Foi utilizado o ensaio de dureza Brinell (HB) e os resultados refletem a média das medidas.

Os ensaios de corrosão foram feitos somente nas barras da liga de alumínio 7075, segundo a norma MIL-H-6088G.⁽¹⁷⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Distorção

Antes do início do tratamento térmico, foi determinada a agitação que seria utilizada nos ensaios, e para tanto foi feito o resfriamento em água fria em três condições: sem agitação do meio, com agitação média $0,7 \cdot 10^{-3} m^3 / s$, e com agitação máxima $1,3 \cdot 10^{-3} m^3 / s$. Esse resultado é ilustrado na Figura 5.

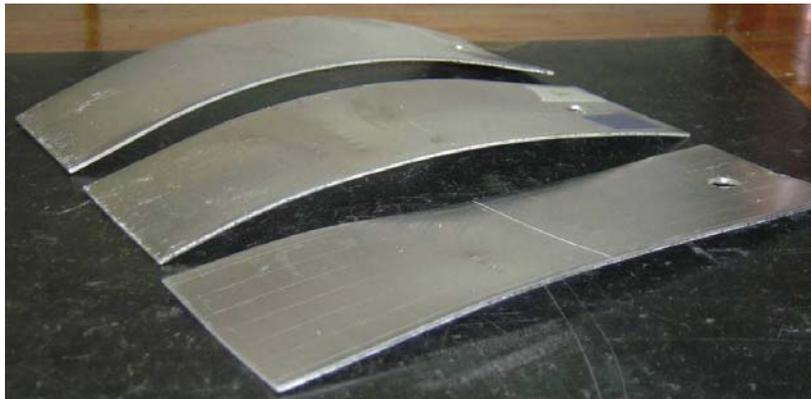


Figura 5 - Chapa da liga AA2024 submetida ao tratamento térmico e com resfriamento, respectivamente de cima para baixo: sem agitação, com agitação média, com agitação máxima.

Abaixo algumas fotos que ilustram como se deu a distorção em cada meio de têmpera diferente, para as chapas de AA2024, utilizando como agitação padrão a agitação média. As figuras das chapas da liga AA7475 foram suprimidas em razão da forte semelhança com os resultados obtidos das chapas da liga AA2024.



Figura 6 - Meio de têmpera água fria a 30°C, agitação média, liga AA2024 (vista lateral).



Figura 7 - Meio de têmpera água quente a 70°C, agitação média, liga AA2024 (vista lateral).



Figura 8 - Meio de têmpera solução aquosa de polímero com concentração de 12% a 40°C, agitação média, liga AA2024 (vista lateral).



Figura 9 - Meio de têmpera solução aquosa de polímero com concentração de 20% a 40°C, agitação média, liga AA2024 (vista lateral).



Figura 10 - Comparação entre as chapas mais distorcidas de cada condição de resfriamento (vista lateral). De cima para baixo respectivamente: água fria, água quente, solução aquosa de polímero a 12% e solução aquosa de polímero a 20%, agitação média, liga AA2024.



Figura 11 - Comparação entre as chapas mais distorcidas de cada condição de resfriamento (vista lateral). De cima para baixo respectivamente: água fria, água quente, solução aquosa de polímero a 12% e solução aquosa de polímero a 20%, agitação média, liga AA7475.

3.2 Dureza

A Tabela 4 reflete a média de oito medidas com o respectivo desvio padrão., após o tratamento térmico adequado.

Tabela 4 –Média das Medidas de Dureza Brinell para as chapas

Meio de Têmpera	2024	Desvio Padrão	7475	Desvio Padrão
Água fria (30°C)	124	0,37	163	3,65
Água quente (70°C)	130	0,71	148	1,27
Polímero 12% (40°C)	126	0,81	145	0,04
Polímero 20% (40°C)	126	0,41	148	0,79

Tabela 5 –Média das Medidas de Dureza Brinell para as barras

Meio de Têmpera	7075 (30 mm)	Desvio Padrão	7075 (50 mm)	Desvio Padrão
Água fria (30°C)	151	1,45	--	--
Água quente (70°C)	151	1,48	151	1,58
Polímero 12% (40°C)	154	1,41	151	2,01
Polímero 20% (40°C)	151	1,00	148	0,27

Tabela 6 – Medidas de dureza comparativas

	7075 (30 mm)	7075 (50 mm)	2024	7475
Inicial	162	159,2	45,4	50,5
Final (Polímero 20%)	151	148	126	148
Norma	135	135	95	115

3.3 Corrosão

A Figura 12 mostra uma amostra da liga 7075 (barras) temperada com água quente e submetida ao ensaio de corrosão descrito em materiais e métodos. A região observada foi a central, onde o resfriamento foi o mais lento. A figura a seguir é da barra de 30 mm de diâmetro. As micrografias da barra de 50 mm apresentaram resultados muito similares e, por isso, não serão mostradas.

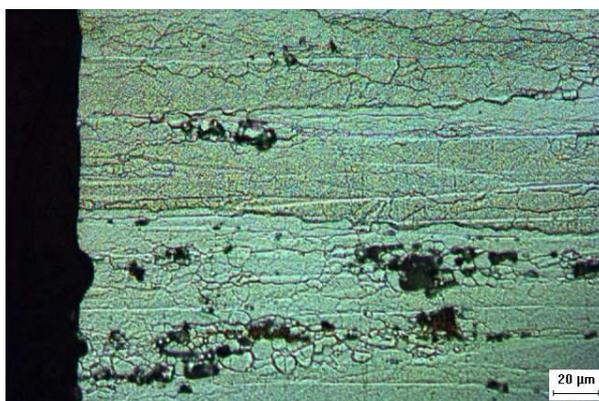


Figura 12 - Vista da seção transversal da amostra mostrando pites e “trincas” que se seguem horizontalmente, com padrão similar ao esquema da Figura 4. Aumento de 500X. Ataque com Keller.

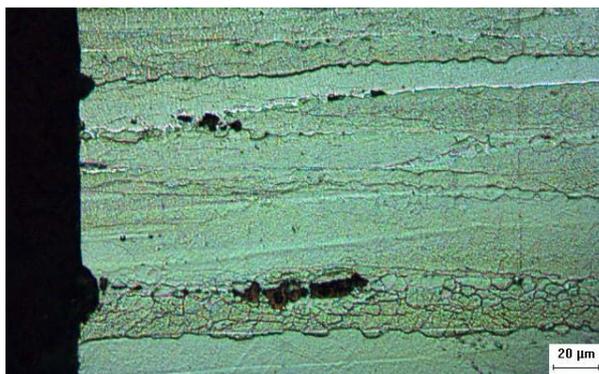


Figura 13 - Vista da seção transversal da amostra. Mesmo comentário anterior. Aumento de 500X.

Nas demais situações de têmpera, não se observou corrosão intergranular.

4 DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de distorção se apresentaram bastante dentro do esperado, já que uma das maiores vantagens de se utilizar a solução aquosa de polímero como meio de têmpera é justamente uma diminuição considerável da distorção causada nas partes, em especial em chapas finas.

É interessante observar que utilizando uma taxa de agitação máxima, a distorção resultante é bem menor, pois o filme formado ao redor da peça é rompido de maneira mais uniforme. Porém, quando comparada com a distorção resultante de têmperas em solução aquosa de polímero, mesmo com a agitação máxima em água fria a distorção é mais severa.

Os valores de dureza, mostrados nas Tabelas 4 e 5, são compatíveis com o estado envelhecido naturalmente (liga 2024) e envelhecido artificialmente (ligas 7075 e 7475).

A Tabela 6 mostra os valores obtidos das ligas como recebidas, após o tratamento térmico e o valor de dureza mínimo estabelecido pela norma MIL-H-6088G. É possível observar que os valores de dureza de todas as ligas estão acima do mínimo estabelecido pela norma, desta forma, essas ligas apresentam resistência suficiente para serem usadas comercialmente na indústria aeronáutica, já que quanto maior a dureza, maior é o valor de resistência mecânica do material. Observando os valores de dureza obtidos para as três ligas estudadas, é possível verificar que mesmo se tratando de resfriamentos mais lentos, os valores de dureza ficaram acima dos valores mínimos estabelecidos pela norma MIL-H-6088G. Assim esse fato não seria determinante na escolha do meio de resfriamento a ser utilizado, diferente do que se observou no quesito distorção, onde claramente a escolha de soluções de polímeros a 12% possibilita a obtenção de componentes de menor distorção.

A utilização de água quente como meio de têmpera pode não ter grande influência na propriedade de dureza medida, mas claramente afeta o desempenho em corrosão da liga de alumínio estudada (AA7075).

5 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que a têmpera em soluções de polímero oferece claras vantagens promovendo maior uniformidade durante o resfriamento, o que resulta em baixas distorções.

Embora a agitação tenha influência também no grau de distorção, no caso da água, mesmo com grande agitação a distorção ainda acontece.

Em termos de dureza todos os meios de resfriamento utilizados atendem aos requisitos mínimos de norma, não sendo, portanto fator predominante na escolha por soluções de polímeros.

A utilização de água quente, quando comparada com água fria, traz menor distorção ao componente, porém, por ter uma menor velocidade de resfriamento, promove intensa precipitação, que é a causa dos fenômenos de corrosão encontrados na liga estudada.

Agradecimentos

A Fapesp, pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. MACHADO, I. F. Introdução à Manufatura Mecânica, PMR 2202. **Tratamentos Térmicos e de Superfície**. 18 páginas.
2. BATES, C.E. Selecting Quenchants to Maximize Tensile Properties and Minimize Distortion in Aluminum Parts. **Journal of heat treating**. Vol. 5, No 1, p. 27-40. 1987.
3. McALEVY, R.B. **Interrupted Quenching and Isothermal Treatment of Aluminum Alloy 2024**. The Pennsylvania State University, the Graduate School, Department of Metallurgy, 48 páginas. 1965. (dissertação)
4. METALS Handbook. **Heat Treating**. 4ª edição, Vol. 4, American Society for Metals, Metals Park, OH, p. 688-695, 1981.
5. ROZZI, J.C., KLINZING, W.P., MUDAWAR, I. Effects of Spray Configuration on the Uniformity of Cooling Rate and Hardness in the Quenching of Aluminum Parts with Nonuniform Shapes. **Journal of Materials Engineering and Performance**, ASM International, Vol. 1(1), p. 49-60, February. 1992.
6. CHEVRIER, J.C., SIMON, A., BECK, G. Optimal Cooling Rate and Process Control in Metallic Parts Heat Treatment. **Heat and Mass Transfer in Metallurgical Systems**, D. B. Spalding e N. H. Afgan, Hemisphere Publishing Corp., Washington, DC, p. 535-544, 1981.
7. JARVSTRAT, N., TJØTTA, S. A process model for on-line quenching of aluminum extrusions. 1996.
8. GUILLAUMIN, V., MANKOWSKI, G. Localized corrosion of 2024 T351 aluminum alloy in chloride media. **Corrosion Science**. Vol. 41, p. 421 – 438, 1999.
9. ZHAOA, S., WOLFEA, D.A., HUANGB, T.-S., FRANKEL, G.S. Generalized model for IGC growth in aluminum alloys. **Journal of Statistical Planning and Inference**. Vol. 137 p. 2405-2412. 2007.
10. Inovação Tecnológica, acessado em 05/09/2008.
<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010170041201>
11. SVENNINGSEN, G., LARSEN, M.H., NORDLIEN, J.H., NISANCIOGLU, K. Effect of high temperature heat treatment on intergranular corrosion of AlMgSi(Cu) model alloy. **Corrosion Science**. Vol. 48, p. 258-272. 2006.
12. SVENNINGSEN, G. **Corrosion of Aluminum Alloys**. Department of Materials Technology, Norway.

13. CAO, F.-H., ZHANG, Z., LI, J.-F., CHENG, Y.-L., ZHANG J.Q., CAO C.N. Exfoliation corrosion of aluminum alloy AA7075 examined by electrochemical impedance spectroscopy. **Materials and Corrosion**, Vol. 55, No. 1, p. 18-23. 2004.
14. ROBINSON, M.J., JACKSON, N.C. The influence of grain structure and intergranular corrosion rate on exfoliation and stress corrosion cracking of high strength Al–Cu–Mg alloys. **Corrosion Science**. Vol. 41, p. 1013 –1028, 1999.
15. LIU, X., FRANKEL, G.S., ZOOFAN, B., ROKHLIN, S.I. Effect of applied tensile stress on intergranular corrosion of AA2024-T3. **Corrosion Science**. Vol 46, p. 405 – 425, 2004.
16. SAE International. Aerospace Material Specification **AMS 2770E**. Issued 6-1-74, Revised 1-1-89. Heat treatment of wrought aluminum alloy part. 20 páginas.
17. Military Specification, **MIL-H-6088G**. Heat treatment of aluminum alloys, 1981.