

Carlos A. Guimarães Pagnano (1)
Tomohiro Kajita (2)

R E S U M O

Os autores apresentam o procedimento adotado para o tratamento térmico das ligas de alumínio do tipo American Association 2024 e como estas ligas se comportam mecânicamente assim como o seu aspecto metalográfico. Em seguida foram feitas algumas experiências variando-se a temperatura, o tempo e a demora para resfriamento no processo de solubilização desta liga, com a finalidade de se observar as influências destas variáveis nas propriedades mecânicas, na resistência à corrosão e no aspecto metalográfico, da liga 2024.

I - INTRODUÇÃO

A liga de alumínio do tipo 2024 é a mais utilizada na construção Aeronáutica, devido às elevadas propriedades mecânicas que apresenta, aliadas à boa resistência à corrosão intergranular, quando adequadamente solubilizada e envelhecida.

Na construção do avião bimotor IPD-6504, pelo Departamento de Aeronaves do Instituto de Pesquisas e Desenvolvimento serão utilizadas chapas, perfis e rebites dessa liga, totalizando mais de 95 % em peso de sua estrutura.

-
- (1) Engenheiro Aeronáutico, pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica, em 1964 - São José dos Campos, SP.
Pesquisador do Departamento de Materiais do IPD/CTA.
- (2) Engenheiro Industrial Metalúrgico, pela Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, em 1966 - Volta Redonda, RJ.
Pesquisador do Departamento de Materiais do IPD/CTA.

Isto acarretou a necessidade de se fazer no Centro Técnico de Aeronáutica um estudo detalhado da liga 2024 para orientação quanto ao controle de qualidade das peças da referida liga.

O controle da liga deste tipo se restringe basicamente aos seus tratamentos térmicos: recozimento, solubilização e envelhecimento, sendo que destes, o que exige maior atenção é o tratamento de solubilização, devido às grandes dificuldades apresentadas durante a sua execução.

Por isto, o objetivo principal do presente trabalho é o de apresentar os diversos aspectos metalográficos da liga, quando solubilizada incorretamente, e, as suas correlações com as propriedades mecânicas e resistência à corrosão obtendo-se padrões de comparações, facilitando deste modo o trabalho do órgão controlador.

II. TRATAMENTOS TÉRMICOS RECOMENDADOS PARA A LIGA 2024

A liga 2024 contém cerca de 4,4% de Cu, 1,5% de Mn e estes elementos de liga formam os seguintes constituintes principais: (Al-Cu), (Al-Cu-Mg) e ainda, (Mg-Si) e (Al-Cu-Fe-Mn), devido à pequena porcentagem de Si e Fe sempre contidos como impurezas.

Destes, somente o (Al-Cu) e o (Al-Cu-Mg) possuem apreciáveis solubilidades no Alumínio em altas temperaturas e são os responsáveis pela melhoria das propriedades mecânicas, após os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento.

A norma americana MIL-6088, recomenda para este tipo de liga os seguintes tratamentos:

- A. RECOZIMENTO PLENO: Utilizado para anular o efeito de endurecimento causado por tratamento térmico anterior. Consiste em se aquecer a peça à temperatura de 425 °C, durante um período de 2 a 3 horas, e, resfriar no forno numa taxa de 30 °C por hora, até atingir a temperatura de 270 °C; a partir do qual, o resfriamento pode ser qualquer. O aspecto metalográfico do material recozido está apresentado na Figura 1.

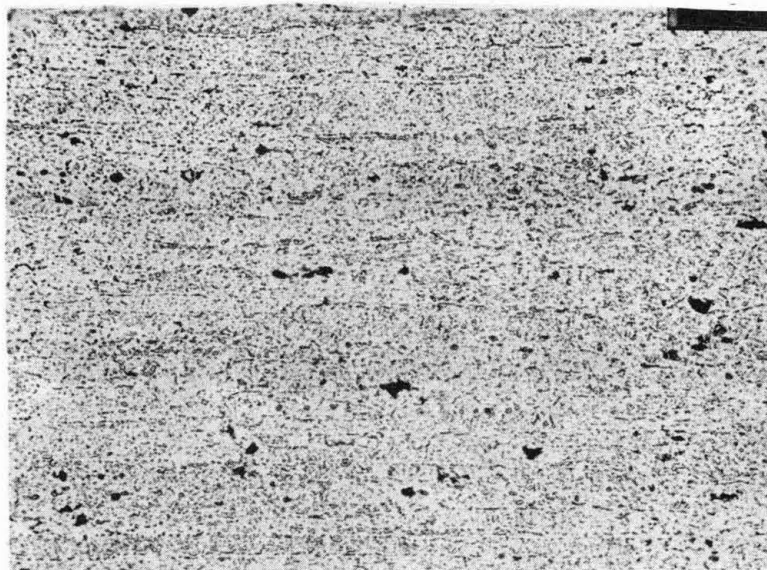


Figura 1

Liga de Alumínio 2024 no estado recozido

Aumento: 200 X - Ataque: Reagente de Keller

- B. SOLUBILIZAÇÃO: Êste tratamento consiste em se aquecer a liga a uma temperatura de (493 ± 5) °C durante um tempo suficiente para dissolver os constituintes (Cu-Al) e (Al-Cu-Mg), ditos **endurecedores**, na matriz e retê-los em solução supersaturada à temperatura ambiente, por meio de um resfriamento rápido em água, que é a condição ótima para posterior envelhecimento e endurecimento da liga. O material a pós êste tratamento apresenta um **aspecto metalográfico como o indicado na Figura 2**.

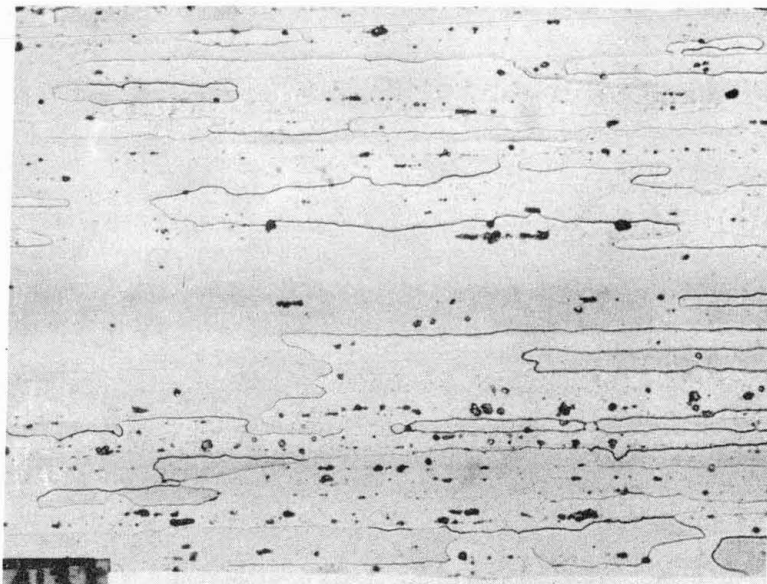


Figura 2

Liga de Alumínio 2024 no estado solubilizado

Aumento: 200 X - Ataque: Reagente de Keller

C. **ENVELHECIMENTO:** Este tratamento, realizado após a solubilização, acarreta um aumento das propriedades mecânicas da liga, pela precipitação dos constituintes endurecedores em partículas submicroscópicas, dispersas uniformemente na matriz. O envelhecimento artificial desta liga é feito mantendo-se a peça durante 16 a 18 hr a temperatura de 188 a 193 °C, que irá provocar uma precipitação dos constituintes endurecedores no contorno dos grãos, o que irá aumentar a susceptibilidade à corrosão intercrystalina da liga. Por esta razão, para este tipo de liga, dá-se preferência ao envelhecimento natural, que se processa à temperatura ambiente em um tempo relativamente curto, ou seja, após 5 dias já se obtém as propriedades mecânicas finais da liga, conforme pode ser observado pela Figura 3. Pode-se retardar o envelhecimento da liga mantendo-se a baixas temperaturas - (Figura 3) após sua solubilização, e, este procedimento, em geral, é adotado, por exemplo, no caso dos rebites, os quais são mantidos em geladeiras antes de seu uso.

O aspecto metalográfico da liga 2024 após o seu envelhecimento é o mesmo apresentado pela liga no estado solubilizado (Figura 2).

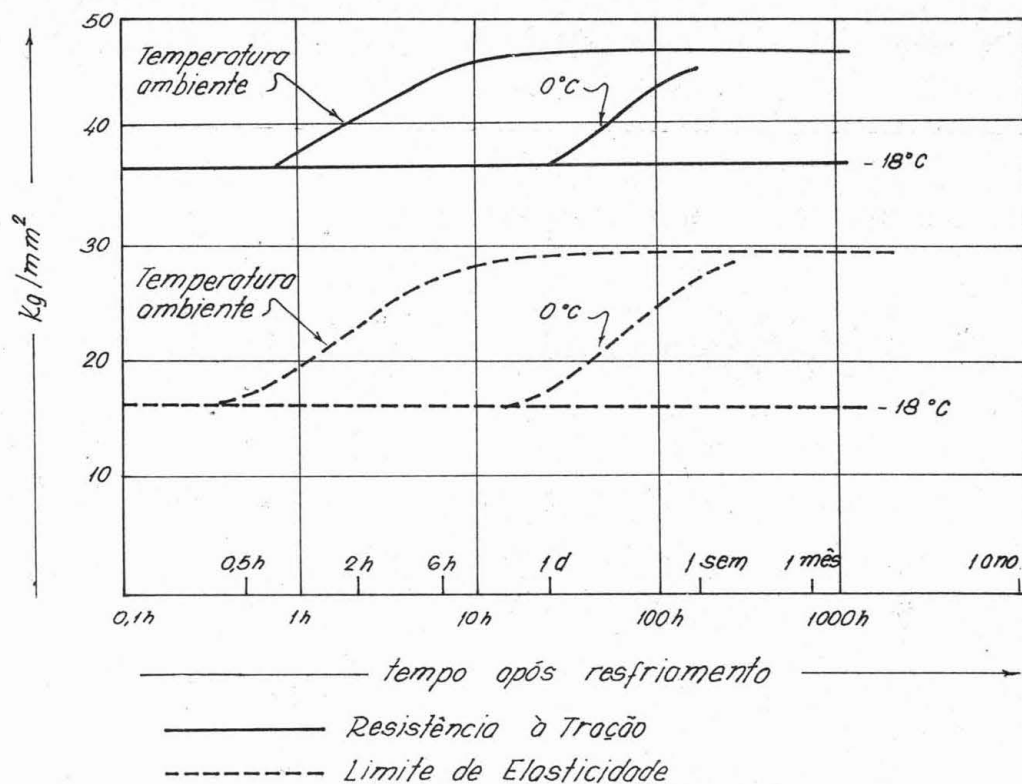


Figura 3

Variação da Resistência a Tração da liga 2024 com o tempo de envelhecimento, a várias temperaturas

III - MATERIAL E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A. Material:

Chapa laminada de liga 2004 - T4 de 3 mm de espessura, fornecida pela Alcoa, Aluminum Company of America. Devido a sua condição de solubilizada e envelhecida naturalmente, foi necessário um prévio recozimento pleno para as experiências.

B. Equipamentos:

- 1) Forno Degussa aquecido eletricamente, capacidade de aproximadamente de 1 m^3 de sal fundido, utilizado pelo Departamento de Aeronaves - IPD/CTA.
- 2) Forno de Laboratório - no qual o controle de temperatura foi realizado manualmente por meio de um reostato. A temperatura no banho de sal foi tomada através de 1 termopar calibrado de Alumel-cromel e um milivoltímetro para termopares "Leeds e Northrup" de precisão $\pm 0,005 \text{ mv}$.

- 3) Micromáquina de ensaio SADAMEL - Tipo MI-34, sistema Chevenard, que utiliza microcorpos de prova para ensaio de tração.

IV - DESCRIÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS

Tempo, temperatura e demora para resfriamento são os três fatores que influem no tratamento de solubilização dos duralumínios do tipo 2024. Então foram realizadas três séries de solubilizações, variando-se em cada uma, um dos fatores, permanecendo constantes as dos demais, conforme especificado na Norma MIL-6088. A seguir tomaram-se as amostras, para estudo de suas texturas metalográficas, propriedades mecânicas e resistência à corrosão.

A. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Foram solubilizadas no forno de laboratório amostras do material citado, nas temperaturas de 460 °C, 480 °C, 510 °C, 520 °C, 540 °C e 560 °C, contidas na faixa de temperatura entre a de recozimento e a de fusão do material. Todas as amostras foram tratadas durante 40 minutos e resfriadas rapidamente n'água, cujo tempo de demora não ultrapassou a 3 segundos.

B. INFLUÊNCIA DO TEMPO

O forno utilizado foi o Degussa, e a temperatura foi de $(493 \pm 5)^\circ\text{C}$ com uma demora de resfriamento não superior a 5 segundos.

Os tempos de solubilização adotados foram de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 90 e 120 minutos, cobrindo uma faixa bastante larga, pois o tempo especificado é de 40 minutos, para a espessura da chapa utilizada.

C. INFLUÊNCIA DA DEMORA PARA RESFRIAMENTO ("DELAY")

(1) Inicialmente, determinou-se a curva tempo-temperatura, procedendo-se da seguinte maneira:

(a) Foi aquecida durante 40 minutos uma amostra, à temperatura de $(493 \pm 5)^\circ\text{C}$, na qual foi inserido um termopar.

(b) A amostra foi retirada do forno e deixada resfriar ao ar.

(c) Foi anotada a temperatura atingida em diversos tempos, que, plotados no gráfico da Figura 4 forneceram-nos a curva temperatura x tempo de resfriamento ao ar.

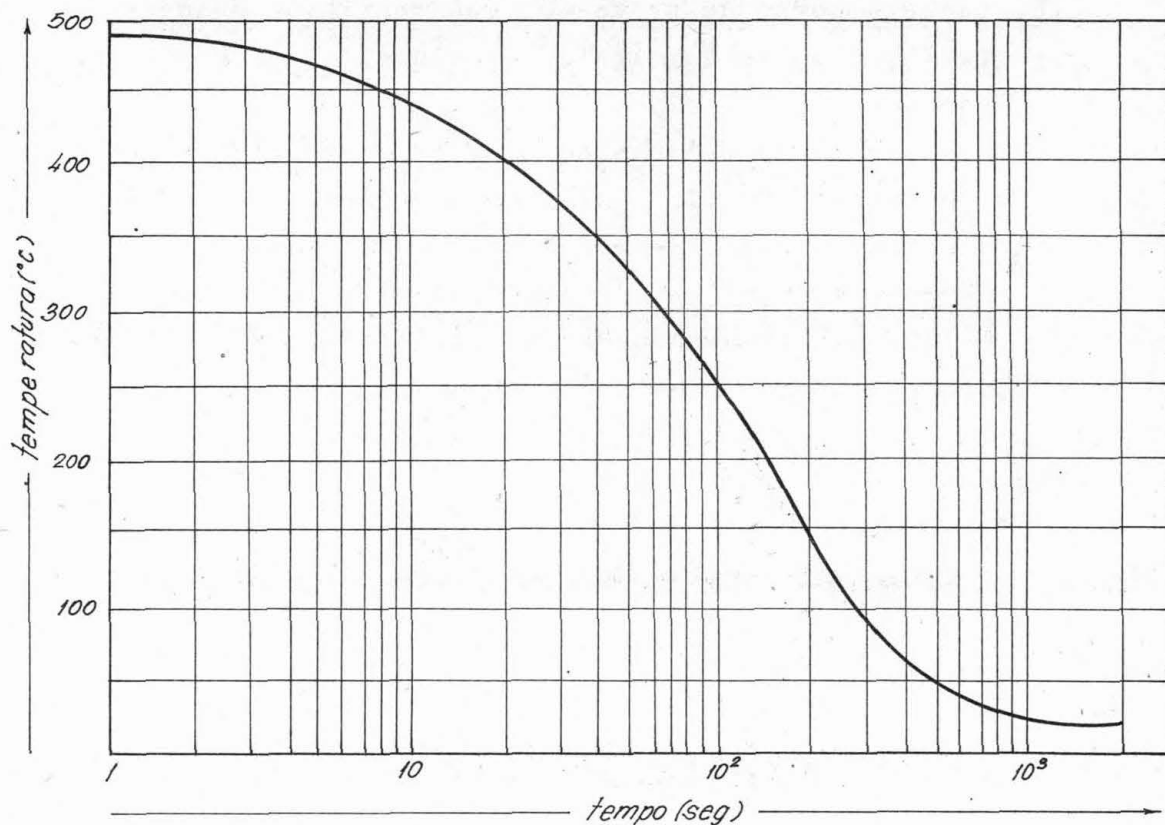


Figura 4

Gráfico: Temperatura x Tempo de resfriamento ao ar (25 °C)

Material: Chapa da liga 2024 de 3 mm de espessura.

- (2) Em seguida, utilizando-se o forno Degussa, solubilizaram-se várias amostras à temperatura de $(493 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, durante um tempo de 40 min.

Retiraram-se as amostras e antes do resfriamento brusco em água, observaram-se as seguintes demoras e respectivas temperaturas (de acordo com a Figura 4):

1 seg (485°C), 3 seg (480°C), 5 seg (460°C), 10 seg (440°C), 15seg (420°C), 30 seg (380°C), 45 seg (344°C), 1 min (312°C), 3 min (170°C) e 5 min (96°C).

- (3) Para o ensaio de corrosão adotou-se o procedimento descrito na Norma MIL-6088, que consta basicamente do seguinte:

(a) Imergir o corpo de prova durante 1 min na solução:

50 ml de Ácido Nítrico concentrado (70%)

5 ml de Ácido Fluorídrico (48%)

945 ml de água destilada.

- (b) Lavar o corpo de prova em água destilada e imergi-lo durante 1 min em ácido nítrico concentrado, à temperatura ambiente.
- (c) Lavar e secar o corpo de prova e imergi-lo durante 6 hr, a temperatura de $(30 - 5)^{\circ}\text{C}$ na seguinte solução, que deve ser preparada imediatamente antes do seu uso:
- 57 gramas de cloreto de sódio
10 ml de água oxigenada (30%)
diluir em água destilada até completar 1 litro.

V. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE SOLUBILIZAÇÃO

(1) Resultados

- (a) Variação das propriedades mecânicas: pode ser observada pelo gráfico da Figura 5, obtido através da Tabela I (anexo), onde atinge um máximo a uma temperatura em torno de 495°C , sendo que o alongamento permanece praticamente constante, para cair em amostras solubilizadas a temperaturas mais elevadas.

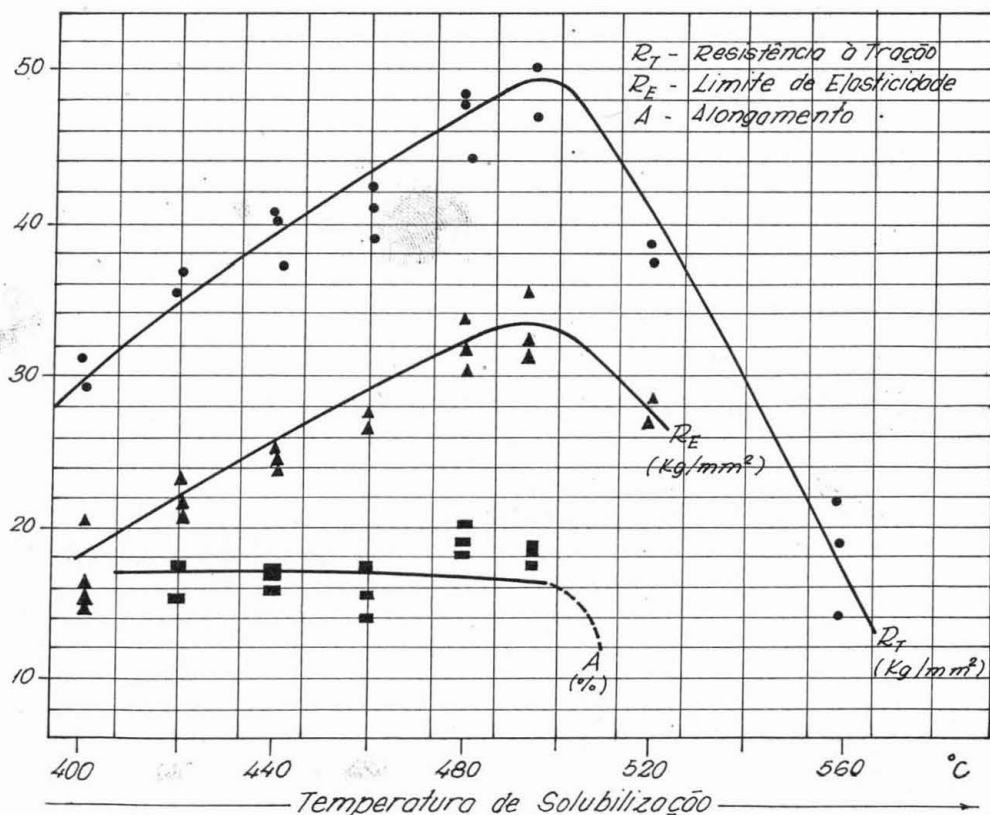


Figura 5
Variação das Propriedades mecânicas da liga 2024 com a temperatura de solubilização.

(b) Variação do aspecto metalográfico:

Observa-se pela Figura 6 que, quando a temperatura é inferior a 495°C , os constituintes endurecedores apresentam-se em grande quantidade, não dissolvidos na matriz, e, que o delineamento dos grãos não é muito nítido.

Já para temperaturas acima de 495°C são observados indícios de superaquecimento, pela fusão de eutético que se apresenta tanto na forma de rosetas, como depositado nos contornos dos grãos.

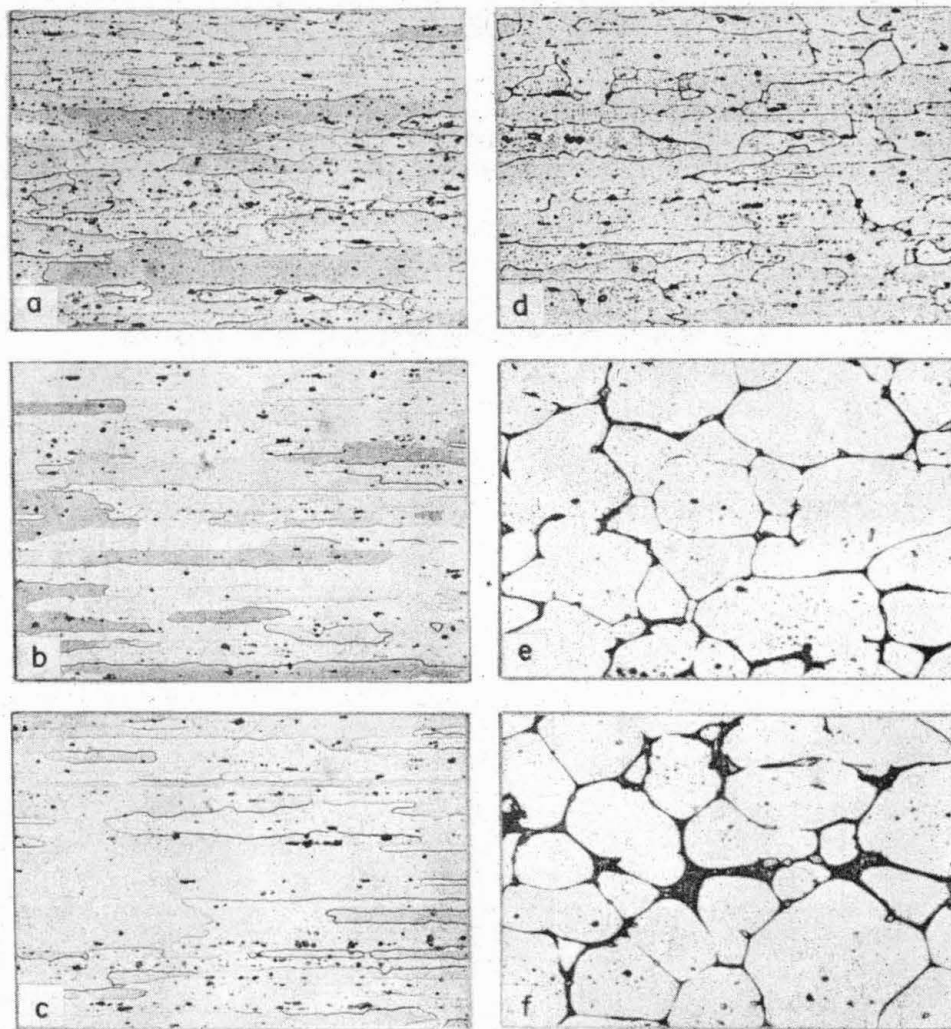


Figura 6

Variação do aspecto metalográfico da liga 2024 com a temperatura de solubilização.

Aumento: 200 X - Ataque: Reagente de Keller.

OBS.: (a) Solubilizada a 460°C , (b) a 480°C , (c) a 495°C
(d) a 520°C , (e) a 540°C , (f) a 560°C .

Quando a temperatura de solubilização fôr um pouco acima da faixa especificada, a detecção da fusão do eutético (superaquecimento) é difícil e isto então só é possível utilizando-se um aumento maior para exame ao microscópio, caso da Figura 7.

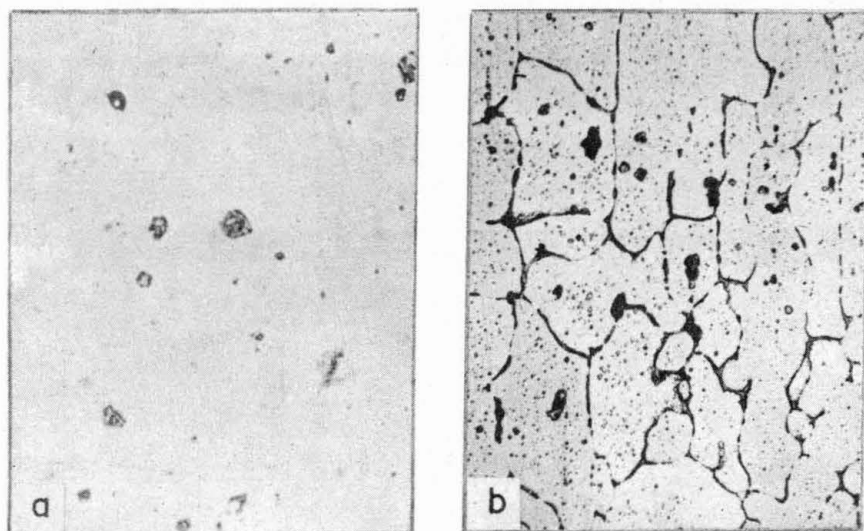


Figura 7

- (a) Solubilizada a 510 °C, aumento 800 X, ataque: reagente de Keller
 (b) Solubilizada a 520 °C, aumento 400 X, ataque: reagente de Keller

(2) Conclusões

- (a) Com uma temperatura de solubilização abaixo de 480 °C inclusive, nota-se que devido à má solubilização dos constituintes endurecedores, as propriedades mecânicas possuem valores abaixo daqueles quando a solubilização é completa. Como, com uma solubilização a 480 °C não se nota uma grande quantidade de constituintes não dissolvidos na matriz, é aconselhável após a constatação ao microscópio de que a amostra está solubilizada, proceder-se a um ensaio mecânico, e com isso, o exame microscópico se restringirá mais a verificações de que houve superaquecimento durante o tratamento térmico, ou se a amostra foi tratada a temperatura abaixo de 480 °C.
- (b) As amostras que sofreram superaquecimento, apresentaram resistências mecânicas baixas e também tornaram-se mais frágeis, à medida que a temperatura de solubilização aumentou, como pode ser observado pelo gráfico da Figura 5, em que se tem decréscimo acentuado do alongamento. Isto é devido ao aparecimento de trincas internas, ocasionadas pela fusão do

eutético e que tornarão o material irrecuperável, mesmo após outros tratamentos térmicos.

B. INFLUÊNCIA DO TEMPO NO PROCESSO DE SOLUBILIZAÇÃO

(1) Resultados

(a) Variação das propriedades mecânicas:

Pode ser observada pelo gráfico da Figura 8, obtido através da Tabela II (anexa), em que se nota que a resistência mecânica da liga cresce até um tempo em torno de 40 min, permanecendo daí por diante praticamente constante, enquanto que o alongamento não sofreu alterações significativas para os vários tempos de tratamento.

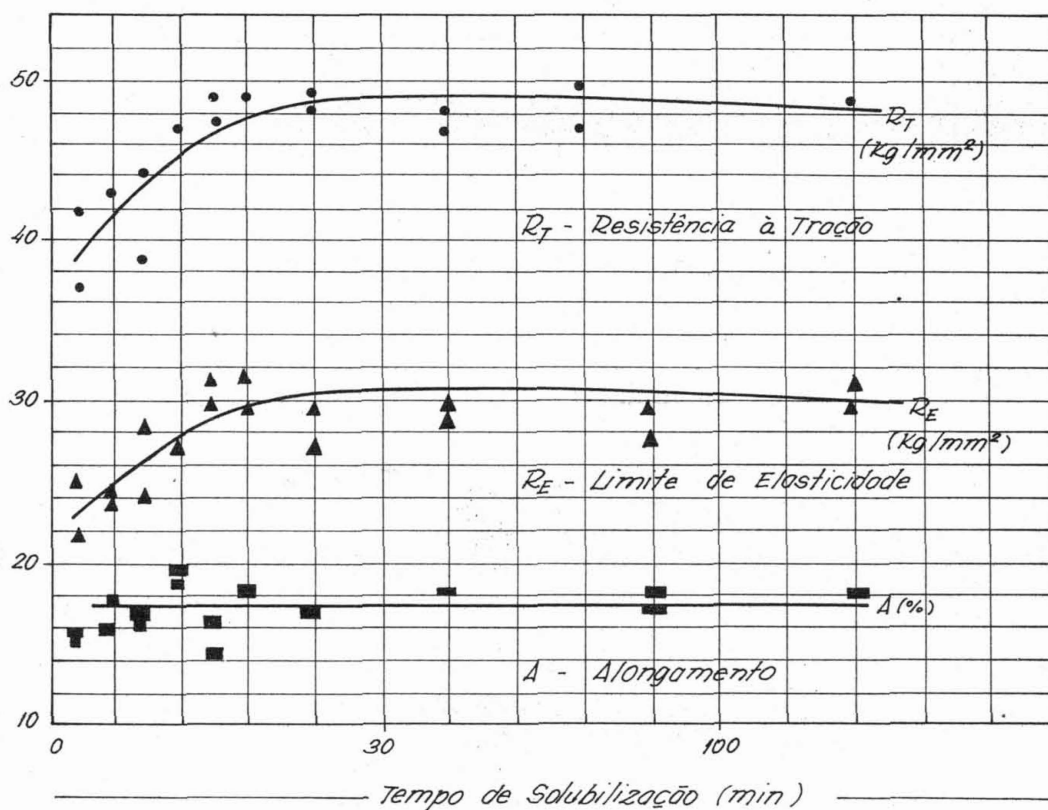


Figura 8

Variação das Propriedades Mecânicas da liga 2024 com o tempo de solubilização.

(b) Variação do aspecto metalográfico:

Observa-se pela Figura 9 que para tempos até 30 min tem-se uma grande quantidade de constituintes endurecedores que não

foram dissolvidos na matriz durante a solubilização, e, que se tornam bastante reduzidos para tempos maiores. Se compararmos as várias amostras, observa-se que não houve um aumento excessivo no tamanho do grão para os vários tempos de solubilização.

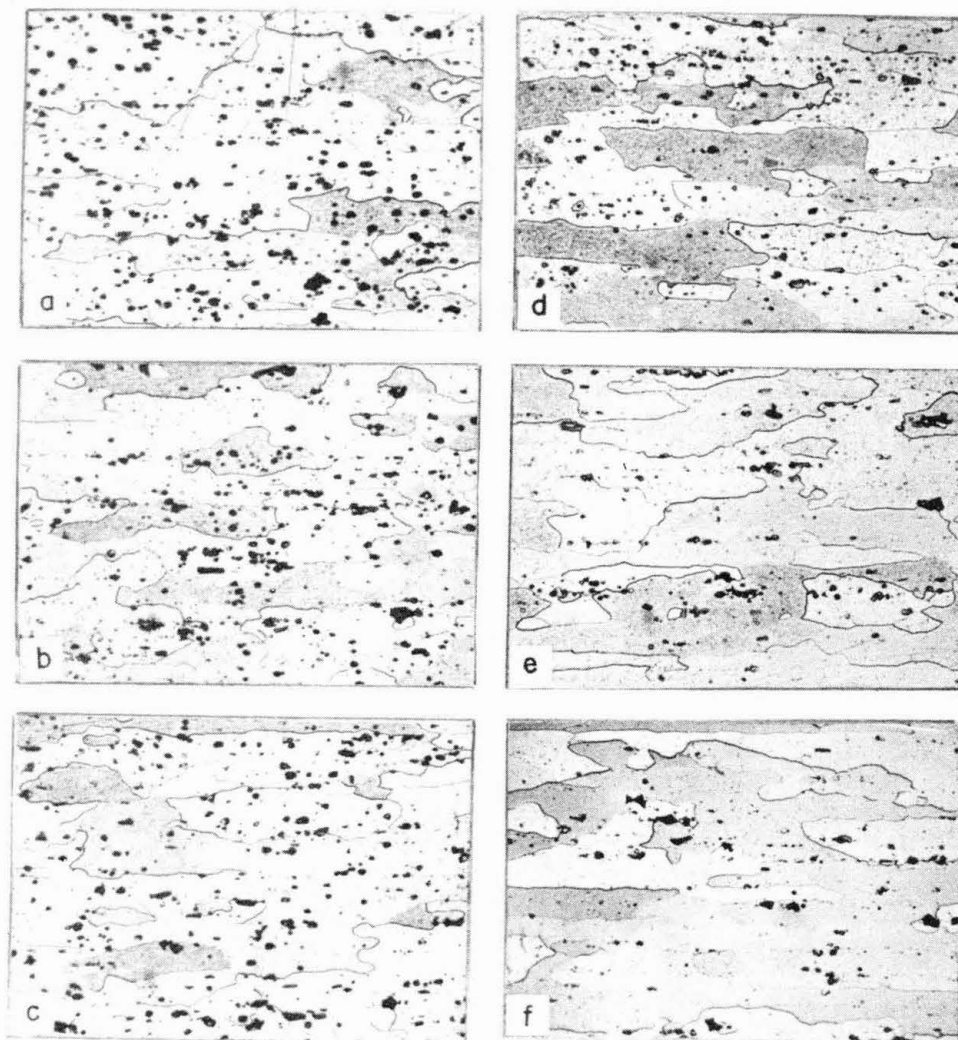


Figura 9

Variação do aspecto metalográfico da liga 2024 com o tempo de solubilização

Aumento: 400 X

- Ataque: reagente de Keller

OBS.: Tempo de solubilização: (a) 5 min, (b) 10 min, (c) 20 min, (d) 30 min, (e) 40 min, (f) 1 hr.

(2) Conclusões

(a) A resistência mecânica da liga é função inversa da quantidade de constituintes endurecedores que não tiveram tempo

suficiente de se dissolver na matriz, tanto assim que se atinge o máximo para tempo de solubilização em torno de 40 min

- (b) Existe dificuldades em se constatar se a quantidade de constituuintes endurecedores é exagerada, por isto, quando não se tiver certeza se o tempo é o adequado, deve-se processar um ensaio mecânico na liga.
- (c) Para longos tempos de solubilização não se observaram variações significativas nas propriedades mecânicas e nem um crescimento excessivo dos grãos.

C. INFLUÊNCIA DA DEMORA PARA RESFRIAMENTO APÓS A SOLUBILIZAÇÃO

(1) Resultados

(a) Variação das propriedades mecânicas:

Pela Figura 10, obtida pela Tabela III (anexa), observa-se que os valores das propriedades mecânicas permanecem praticamente constantes até a demora de 15 segundos. De 15 segundos até 1 minuto estes valores decrescem, permanecendo constante para valores superiores.

(b) Variação do aspecto metalográfico:

As amostras de demoras de 1 até 15 segundos não apresentam diferenças entre si quanto à distribuição dos constituintes, e nelas os constituintes aparecem distribuídos uniformemente por toda matriz, como pode ser visto pela Figura 11a. Nas amostras de demora superiores a 15 segundos, os constituintes se apresentam ora grandes em pequena quantidade, ora em forma puntual, em grande quantidade, dispersos na matriz .. (Fig.11b).

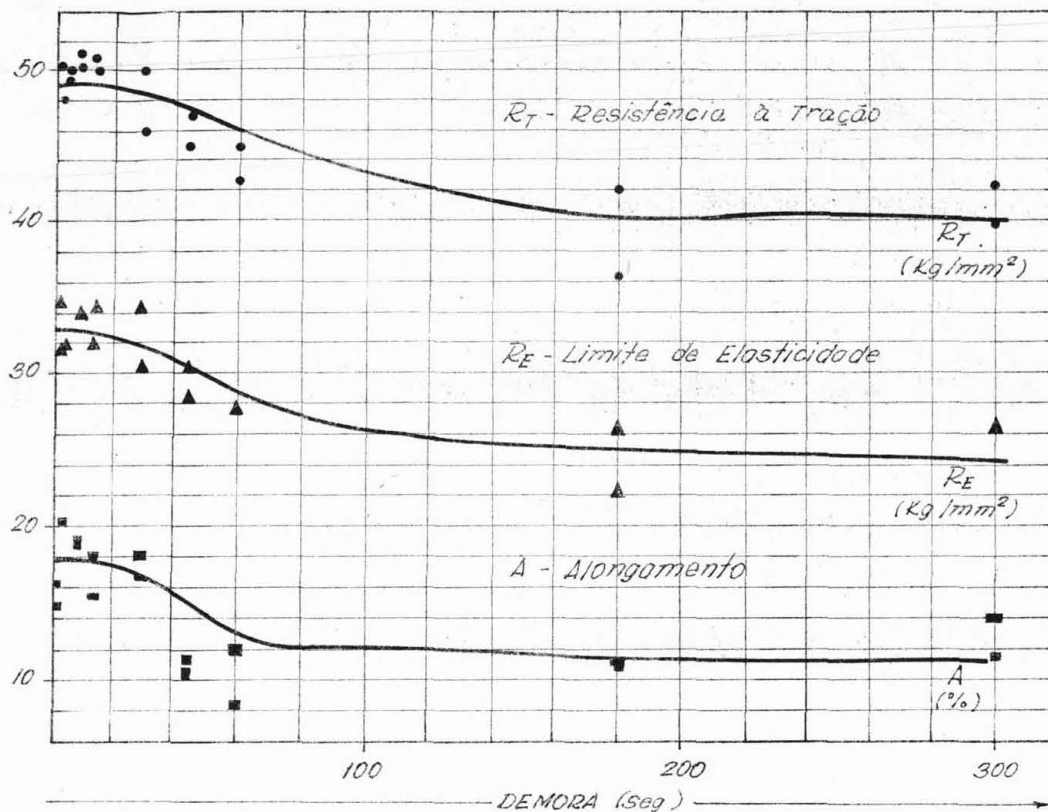


Figura 10

Variação das propriedades mecânicas com a demora de resfriamento.

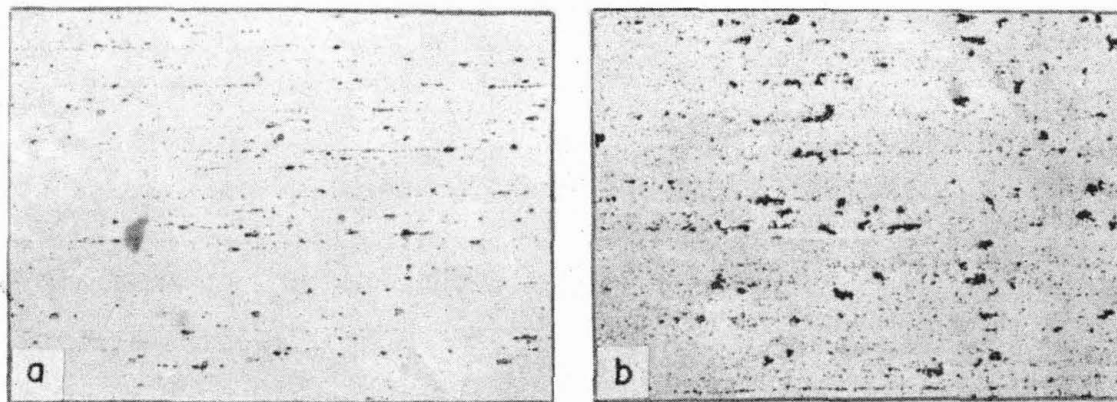


Figura 11

Variação da distribuição dos constituintes com a demora de resfriamento (a) amostras com demora até 15 seg, (b) amostras com demora superior a 15 seg.

Aumento: 200 X

- Ataque: HNO_3

Quanto ao delineamento dos grãos, observa-se o seguinte: As amostras solubilizadas com demora até 15 seg não apresentam grandes diferenças entre si e possuem bom delineamento dos grãos (Fig.12a e b), enquanto que nas amostras com demora superior a 15 seg (Fig 12) nota-se as seguintes alterações, nas microestruturas:

- O contraste entre os grãos decresce com o aumento da demora para resfriamento. Na amostra de "demora" de 5 minutos praticamente não se observam os grãos.
- Os contornos dos grãos se apresentam interrompidos, com baixa nitidez, diminuindo com aumento da demora, sendo que na de 5 min - não se observa mais contornos entre os grãos.
- Os constituintes apresentam-se na forma puntual, distribuidos por tôda matriz, e sua quantidade e tamanho aumentam com o aumento da "demora".

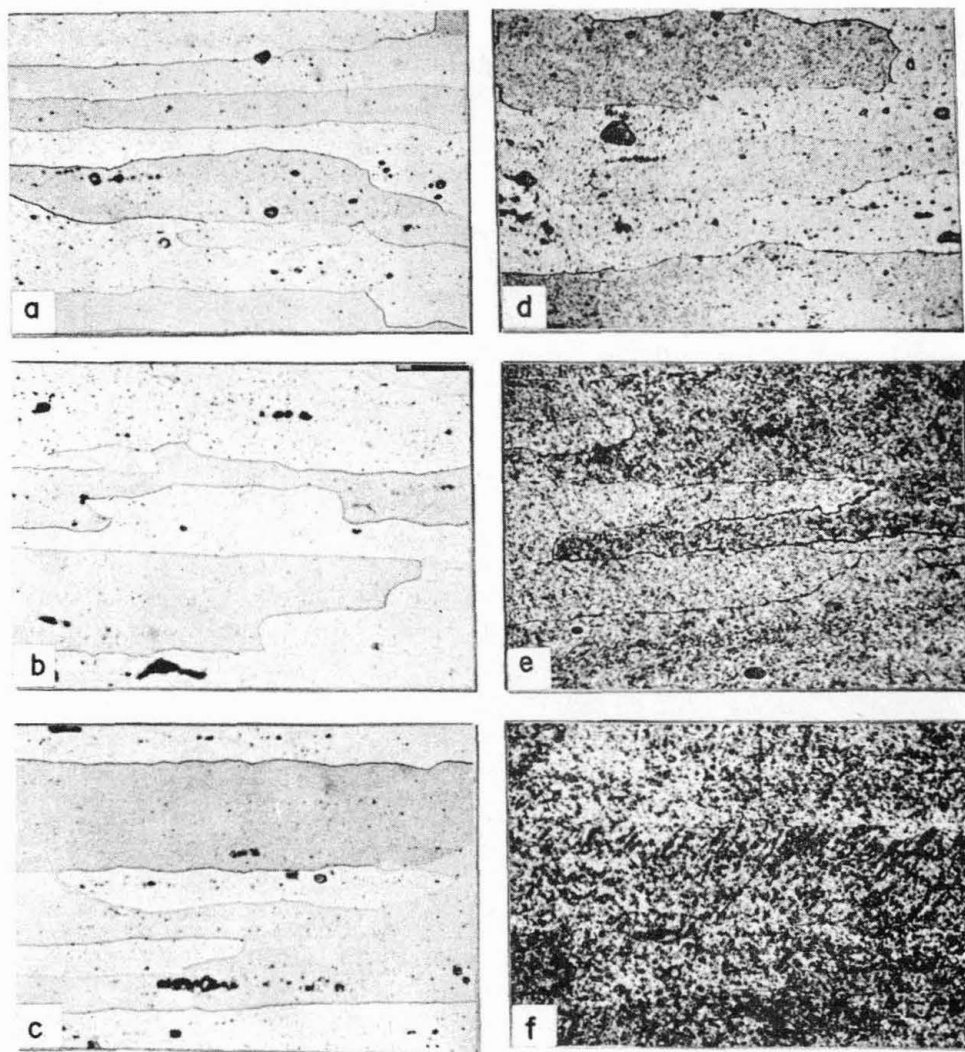


Figura 12

Variação do delineamento dos grãos com a demora para resfriamento
 (a) demora 1 seg, (b) 3 seg, (c) 15 seg, (d) 30 seg, (e) 1 min,
 (f) 5 min .

(c) Susceptibilidade à corrosão:

Após os ataques como descritos no ítem IV - C-3, examinaram-se tôdas as amostras ensaiadas no comprimento de 5cm da seção transversal e observou-se o seguinte:

- Amostras de demora até 15 seg apresentam sômente "pits" de corrosão (Fig. 13).
- Para demoras superiores a 15 segundos, tem-se o aparecimento de corrosão intergranular (Fig.14).

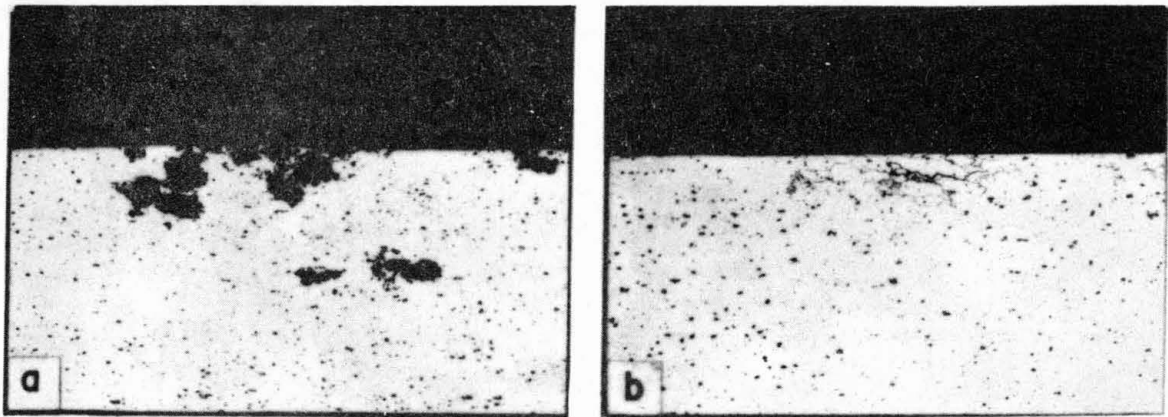


Figura 13

(a) "Pits" de corrosão

Demora - 10 seg

Aumento - 100 X

Sem ataque

(b) Corrosão intergranular

Demora: 45 seg

Aumento - 100 X

Sem ataque

(2) Conclusões

- (a) Para "demoras" até 15 seg (temperatura atingida durante o resfriamento ao ar $\pm 420^{\circ}\text{C}$), não se tem comprometimento da solubilização tanto no aspecto metalográfico como nas propriedades mecânicas e susceptibilidade à corrosão.
- (b) Para demoras superiores a 15 seg (temperaturas no resfriamento ao ar abaixo de 420°C) a solubilização é comprometida seriamente. As propriedades mecânicas decrescem, o delineamento e contraste entre os grãos tendem a desaparecer e o-

corre o aparecimento das corrosões intergranulares, facilitado pela precipitação intergranular dos constituintes.

VI - CONCLUSÃO GERAL

Pelo exposto, pode-se concluir que, para controle de Tratamento Térmico da liga 2024, devem-se observar as seguintes etapas:

A. EXAME METALOGRAFICO

(1) Verificação de Fusão do eutético.

Com a amostra sem ataque deve-se examinar, micrograficamente, com um aumento de 200 X, superaquecimento intenso (Figuras 6 (e) e (f)). Caso nada se constate, com um aumento de 800 X, devem-se verificar indícios de superaquecimento sob a forma de rosetas ou de pequena quantidade de fusão do eutético no contorno dos grãos, (Figura 7). Qualquer um dos casos citados anteriormente são evidências de tratamento térmico inadequado, portanto, motivo para rejeição da amostra.

(2) Verificação dos Precipitados.

Com a amostra atacada com o reagente de Keller, deve-se verificar com um aumento de 200 X a distribuição dos constituintes endurecedores na matriz. Caso eles se apresentem como na Figura 9 (a) (b) e (c) devido a um tempo de solubilização insuficiente ou como na Figura 6 (a) (b) e (c), devido a temperatura de solubilização baixa, a amostra deve ser rejeitada. Se, no entanto, julgarmos que a amostra apresenta uma quantidade razoável de precipitados, caso das Figuras 6(b) e 9(d), deve-se executar um ensaio mecânico a fim de possibilitar um controle mais adequado da amostra.

A observação de precipitados no contorno do grão em quantidade razoável, examinada com um aumento de 400 a 800 X Figura 12(d), exige que se faça um ensaio de corrosão e também um ensaio mecânico.

B. ENSAIO MECÂNICO

Deve ser realizado na amostra quando se tiver dúvidas quanto ao exame metalográfico e se desejar menor probabilidade de erro durante o controle de Tratamento Térmico das ligas 2024.

AGRADECIMENTO

Os autores externam seus agradecimentos aos funcionários Mathias Marcondes do Amaral e José Higinio de Oliveira pela colaboração prestada na preparação das amostras para exame metalográfico e fotografias das mesmas, tornando possível a confecção do presente trabalho.

TABELA I

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE SOLUBILIZAÇÃO
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA 2024

Amostra	Temperatura de solubilização (min)	Resistência a Tração (kg/mm ²)	Limite de Elasticidade (kg/mm ²)	Alongamento %
1	400	31,5	20,9	15,8
2	400	29,3	15,5	15,2
3	400	29,4	16,4	16,0
4	420	36,6	22,1	17,5
5	420	34,7	20,7	15,5
6	420	34,8	23,4	17,4
7	440	37,0	24,7	16,7
8	440	39,5	25,7	16,1
9	440	40,0	25,5	16,9
10	460	41,5	27,6	17,6
11	460	42,4	26,8	14,2
12	460	38,7	26,8	15,8
13	480	44,0	32,1	18,2
14	480	47,0	30,3	20,4
15	480	47,8	34,2	19,1
16	495	49,5	32,7	19,2
17	495	47,0	31,5	18,6
18	495	50,5	35,6	17,7
19	520	38,2	28,5	4,65
20	520	37,5	27,7	7,05
21	520	37,5	27,8	5,25
22	540	23,4	-	-
23	540	-	-	-
24	540	23,3	-	-
25	560	14,3	-	-
26	560	19,0	-	-
27	560	22,4	-	-

TABELA IIINFLUÊNCIA DO TEMPO DE SOLUBILIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA 2024

Amostra	Tempo de solubilização (min)	Resistência a Tração (kg/mm ²)	Limite de Elasticidade (kg/mm ²)	Alongamento (%)
1	5	41,6	25	15,1
2	5	37,2	21,8	15,5
3	10	41,5	23,8	15,8
4	10	43,0	24,7	17,8
5	15	39	24,0	16,8
6	15	44,2	28,5	15,9
7	20	47,1	27,3	19,5
8	20	47,1	27,3	18,9
9	25	49,0	31,5	14,5
10	25	47,5	29,8	16,8
11	30	49,1	31,8	18,5
12	30	49,0	29,8	18,5
13	40	49,3	27,2	16,7
14	40	48,5	29,7	16,9
15	60	46,9	29,8	17,9
16	60	48,0	29,0	18,2
17	90	49,5	29,3	17,3
18	90	47,0	27,5	18,5
19	120	48,8	29,8	18,6
20	120	48,8	31,0	18,5

TABELA III

INFLUÊNCIA DA DEMORA PARA RESFRIAMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA 20

Amostra	Demora (seg)	Resistência a Tração (kg/mm ²)	Limite de Elasticidade (kg/mm ²)	Alongamento (%)
1	1	48,4	34,2	17,5
2	1	47,8	33,5	15,4
3	3	48,0	31,6	14,8
4	3	50,4	34,6	16,2
5	5	49,5	31,8	20,4
6	5	49,9	31,8	-
7	10	50,4	33,8	18,8
8	10	51,3	-	19,0
9	15	50,8	32,8	18,1
10	15	50,2	34,2	15,4
11	30	50,1	34,2	18,1
12	30	46,0	30,2	16,6
13	45	44,8	28,4	10,3
14	45	46,7	30,2	11,3
15	60	42,5	27,6	8,48
16	60	44,7	27,7	12,1
17	180	36,3	22,0	11,2
18	180	42,0	26,2	10,9
19	300	38,7	24,4	11,4
20	300	43,3	26,2	14,0

BIBLIOGRAFIA

1. Mondolfo, L.F. - Metallography of Aluminum Alloys
John Wiley e Sons, Inc., 1943.
2. Heat Treating Aluminum
Aluminum Company of Canada, Ltd., 1962
3. Apert, Ch., Metaux II
École Nationale Supérieure de l'Aeronautique, 1962
4. Metals Hand Book, Vol. II
A.S.M., 1964
5. Keller, F. and Bossert, R.A. - Revealing the Microstruture of 24S Alloy
Metals Progress, vol. 41, January 1942, pg 63 to 71.
6. Keller, F. - Physical Metallurgy of Aluminum Alloys
A.S.M., 1949
7. Budgen, N.F. - Aluminum and its Alloys
Pitman Published Co., 1947
8. Keller, F. and Wilcox, G.W. - Identification of constituents of
Aluminum Alloys.
Aluminum Research Laboratoris, Technical Paper nº 7, 1948
9. Forming Alcoa Aluminum,
Aluminum Company of America, 1962
10. Military Specification, Heat Treatment of Aluminum Alloys; Process
for (Aircraft Application) - MIL-H 6088 A (ASG), 10 May 1954.
11. Souza, O.S.C. - Estudo Metalográfico das Principais Ligas de Alumí-
nio - Cobre do Tipo Alclad, C.T. do XXII Congresso da ABM realizado
em Vitória, 1967.
12. Metals Handbook
A.S.M., 1948.

Carlos Alberto G. Pagnano (1)

Tomohiro Kajita (2)

DEBATE:

Édio Azevedo (3)

- Gostaria de felicitar os autores pelo magnífico trabalho apresentado, mostrando a capacidade de pesquisa e procura para soluções de diversos problemas da indústria aeronáutica nacional. Entretanto por questão de curiosidade gostaria de mencionar, na página 4, no gráfico da figura 3 do trabalho, onde o autor mostra que a resistência a tração máxima atingida com o envelhecimento natural é da ordem de 50 kg/mm^2 . Parece que a preocupação de não atingir o máximo por outros meios como o artificial provém do fato, primeiro de não se obter uma dureza maior e segundo não melhorar a resistência a tração do material. Tenho a impressão, apesar de não ter conhecimento nenhum dessa liga, que com o envelhecimento artificial pode-se e deve-se obter um envelhecimento melhor, isto é, uma resistência à tração melhor do que com o envelhecimento natural. Gostaria de saber do autor porque da escolha do envelhecimento natural e não do artificial, porque para mim, o máximo da resistência a tração com o envelhecimento natural deve ser menor do que o máximo com o artificial.

Pagnano

- O envelhecimento artificial seria utilizado no caso em que se desejaria uma utilização imediata da peça, então isto seria uma vantagem do envelhecimento artificial ao natural. Entretanto, as desvantagens que ele apresenta quanto a corrosão da liga, já não se justifica fazer o envelhecimento artificial da liga.

Kajita

- Complementando o que foi dito pelo colega Pagnano, gostaria de esclarecer que o envelhecimento artificial ocasiona precipitação dos constituintes dissolvidos na matriz pelo tratamento térmico de solubilização, nos contornos dos grãos. Isto favorece a corrosão intergranular no material. Devido o sempre interesse nos materiais de utilização aeronáutica, evitar o favorecimento deste tipo de corrosão, não nos interessou o seu estudo.

Barille (4)

- Eu queria saber se esta afirmação final dizendo que deve-se usar o controle mecânico para se ter uma menor probabilidade de erros não se leva a concluir que o melhor seria fazer de início os ensaios mecânicos, e, tendo uma dúvida, proceder o controle metalográfico? A dúvida, neste sentido é porque acredito que o ensaio mecânico seja mais econômico que o ensaio metalográfico e menos demorado.

Pagnano

- Quanto a parte econômica de um ensaio e outro não acredito que o ensaio mecânico seja mais vantajoso que o ensaio metalográfico. Isto porque há necessidade de confecções de corpos de provas e em quantidade de 4 ou 5 para se obter um valor de menor erro possível. A confecção de corpos de provas para ensaios mecânicos é mais demorado do que a dos de ensaio metalográfico. De onde economicamente, acredito ser o ensaio mecânico menos vantajoso que o metalográfico. Além disso o tempo requerido para um ensaio metalográfico é bem menor do que aquele para ensaio mecânico. Então a utilização da metalografia e em caso de dúvida a de ensaio mecânico, é bastante vantajoso para controle de qualidade de grande quantidade de amostras. Devo sa

liantar também que fazemos o contrôlê de qualidade, para o Departamento de Aeronaves, dos materiais utilizados no Projeto Bimotor. Fazemos diàriamente cêrca de 15 ensaios metalogràficos e raras vêzes houve o caso de necessidade da complementaçãõ com o ensaio mecânico.

Weinbaum (5)

- Queria mencionar que sempre um ensaio completa outro. Agora, estou estranhando nesse trabalho a figura 5 da pág. 8 e a figura 8 da pág. 11, em que o alongamento não comporta como se podia esperar, sabemos que geralmente quando a resistênciã aumenta, abaixa a dutilidade e neste caso êle permanece constante.

Kajita

- O alongamento desta liga no estado recozido é de 19% e no estado solubilizado e envelhecido naturalmente é de 18%. Verifica-se, portanto, que embora a resistênciã à traçãõ e leve de 30 kg/mm^2 no estado recozido para 50 kg/mm^2 no estado solubilizado, o alongamento tem uma variaçãõ sòmente de 1%.
Devido a pequena variaçãõ do alongamento e da mínima quantidade de corpos de prova ensaiados, as curvas foram plotadas praticamente como constantes.
Para se ter valores mais exatos, deve se ensaiar um maior número de corpos de prova de cada amostra.

- (1) Carlos Alberto Guimarães Pagnano
Engenheiro Aeronáutico do Depto. de Materiais - IPD/CTA
S. José dos Campos

- (2) Tomohiro Kajita
Engenheiro Industrial Metalúrgico - IPD/CTA
S. José dos Campos

- (3) Édio Vieira de Azevedo
Prof. Catedrático de Metalurgia Física da EEUFMG

- (4) Norberto Victor Barile
Gerente Depto. Metalúrgico da ALCAN - Alum. do Brasil S/A

- (5) Richard Martin Otto Weinbaum
Dr. Eng. Conselheiro Científico da Metal Leve S/A
Prof. da Faculdade de Engenharia Federal da PUC
de São Paulo e da Escola de Engenharia Mauá