

# EFEITO DE MÚLTIPLOS CICLOS DE SOLUBILIZAÇÃO SUB-SOLVUS DELTA E ENVELHECIMENTO NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DA SUPERLIGA 718

Alexandre de Oliveira <sup>1</sup>

Alessandra Vieira Guimarães <sup>1</sup>

Melânea Almeida Ramalho Medeiros <sup>1</sup>

Adeir Junior <sup>1</sup>

Matheus Campolina Mendes <sup>2</sup>

Leonardo Sales Araújo <sup>1</sup>

## Resumo

No presente trabalho, amostras forjadas e fundidas de superliga 718, oriundas de um motor aeronáutico, foram submetidas a repetidos ciclos de solubilização e envelhecimento, sendo a solubilização em temperatura sub-solvus da fase  $\delta$ , induzindo crescente quantidade dessa fase com o número de ciclos de tratamentos térmicos. Por meio de observação e quantificação da fase  $\delta$  por microscopia eletrônica de varredura, ensaios de tração das amostras e difração de raios-X após os ciclos, foi possível observar o aumento da fração e tamanho médio das partículas de  $\delta$ , com a consequente redução da resistência, que pode ser associada a uma menor disponibilidade de Nb na matriz para a precipitação da principal fase endurecedora,  $\gamma''$ .

**Palavras-chave:** Superliga 718; Fase  $\delta$ ; Tratamentos térmicos.

## EFFECT OF MULTIPLE CYCLES OF SUB-SOLVUS DELTA SOLUTION ANNEALING AND AGING ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOY 718

## Abstract

In the present work, forged and cast samples of superalloy 718, from an aircraft engine, were submitted to multiple cycles of solution annealing and aging, being the solution annealing in a sub-solvus  $\delta$  temperature, inducing an increasing quantity of this phase with the number of heat treatment cycles. Through quantification of  $\delta$  phase using scanning electron microscopy, tensile tests and X-ray diffraction after the heat treatment cycles, it was possible to observe an increasing fraction and particle size of  $\delta$  phase, with a consequent reduction in the strength, which can be associated with less Nb available in the matrix for the precipitation of the hardening phase,  $\gamma''$ .

**Keywords:** Superalloy 718;  $\delta$  phase; Heat treatment.

## I INTRODUÇÃO

A liga 718 tem mostrado grande utilização em alguns modelos de motores aeronáuticos, podendo chegar até em 50% de aplicação [1]. Essa liga é endurecida por precipitação das fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$  pelos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento, conferindo alta resistência e ductilidade até 650°C. Tais componentes de motores aeronáuticos sofrem danos durante o serviço, se tornando mais vantajoso

economicamente repará-los do que substituí-los. Nessa conjuntura, o reparo por soldagem se torna extremamente interessante, principalmente por ser uma técnica de baixo custo e de fácil execução. A quantidade de reparos realizados depende do tipo de aplicação e criticidade da peça no motor. Sua vida útil pode ser limitada pelos números de vôos ou pela quantidade de reparos. Como a liga 718 possui

<sup>1</sup> Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PEMM), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: [aleengmat@poli.uffj.br](mailto:aleengmat@poli.uffj.br)

<sup>2</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca-RJ (CEFET), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

\*Versão revisada de trabalho apresentado na ABM Week 2017, de 2 a 6 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.



excelentes propriedades mecânicas, ela pode passar pelo mesmo procedimento inúmeras vezes, até que sua própria especificação dimensional não seja atendida.

Após os reparos, é mandatória a realização de ciclos térmicos de solubilização e envelhecimento. Na solubilização, além da dissolução dos precipitados  $\gamma'$  e  $\gamma''$ , as tensões de soldagens são aliviadas. No presente trabalho, a solubilização é feita abaixo da linha solvus de  $\delta$ , inibindo o crescimento do tamanho de grão. Em seguida é feito o envelhecimento, em que a resistência mecânica é restaurada em razão da precipitação das fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$  [2].

Desta forma, o objetivo do presente trabalho é avaliar a influência dos múltiplos ciclos de solubilização sub-solvus de  $\delta$  e de envelhecimento na microestrutura e propriedades mecânicas da superliga 718.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras oriundas de uma carcaça de combustor de motor aeronáutico foram selecionadas. Essa peça possui duas regiões distintas em modo de fabricação: uma forjada e outra fundida, soldadas por feixe de elétrons na união das duas partes. As composições das regiões forjada e fundida são apresentadas na Tabela 1. As amostras selecionadas representaram tanto a região forjada quanto a fundida. A condição para este estudo considerou a peça no estado após operação, ou seja, um componente que já foi reparado anteriormente por soldagem seguido de tratamentos térmico de solubilização e envelhecimento.

As amostras analisadas foram cortadas com serra de fita refrigerada e, em seguida foram submetidas a até oito ciclos de tratamentos térmicos de solubilização (954°C/1 hora) e envelhecimento (760°C/5 horas + 649°C/1 hora). A região de união não foi considerada. A preparação metalográfica da amostra consistiu de lixamento convencional seguido de polimento em pasta de diamante e ataque químico com reagente composto por 20ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%) 40 ml de HCl e 60 ml de H<sub>2</sub>O. As imagens foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em modo retroespalhado. A fração de área e tamanho das partículas de  $\delta$  foram quantificadas por binarização da imagem, utilizando o software Image J. Para esta caracterização foram observadas as amostras submetidas a 1, 4 e 7 ciclos de solubilização e envelhecimento. Adicionalmente à caracterização microestrutural, foram realizadas avaliações por difração de raios-X (DRX) com ângulo variando de 10 a 100, passo de 0,02 e velocidade de 2 graus/min, nas amostras submetidas a 2 e 8 ciclos de tratamento térmico.

As propriedades mecânicas foram analisadas por ensaios de tração a uma taxa de deformação de 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>. Foram utilizadas as amostras submetidas a 2, 5 e 8 ciclos de solubilização e envelhecimento.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentadas as imagens obtidas por MEV das amostras forjadas e fundidas nas condições de 1 e 7 ciclos de solubilização e envelhecimento. Para as amostras forjadas (a e c), a homogeneização e a deformação da peça difundem o nióbio equilibrando a composição da mesma, desta forma nota-se uma precipitação intensa de fase  $\delta$  nos contornos de grãos, que são sítios preferenciais de nucleação, inibindo seu crescimento. O tamanho de grão das três condições foi em torno de 10  $\mu$ m, corroborando o forte efeito da precipitação de  $\delta$  para inibir o crescimento de grão [3]. Com relação às amostras fundidas (b e d) a crescente precipitação de  $\delta$  é preferencial nas regiões interdendríticas, onde há a segregação de Nb ocorrida durante a solidificação. Esse comportamento está relacionado com a temperatura sub-solvus de  $\delta$ , onde não há dissolução total da mesma durante o ciclo de solubilização prévia, causando o seu acúmulo na matriz sob os sucessivos ciclos de solubilização. Apesar da fase Laves ser comum em ligas fundidas, não foi evidenciada no presente trabalho. Isso pode ser devido à alta taxa de resfriamento da liga durante os tratamentos térmicos e a possibilidade de terem sido realizados tratamentos térmicos de homogeneização.

A Tabela 2 mostra os resultados de fração de área e tamanho de partícula da fase  $\delta$ . Observa-se a tendência de aumento do tamanho médio e da fração de área de fase  $\delta$  com o número de ciclos. No caso das amostras fundidas, o aumento da fração em área é mais intenso, o que pode ser associado às regiões mais ricas em Nb, onde a fase  $\delta$  se precipita preferencialmente.

A Tabela 3 apresenta os resultados de propriedades mecânicas para 2, 5 e 8 ciclos de envelhecimento das amostras forjadas e fundidas. Nota-se a redução dos valores de resistência (limite de escoamento e resistência) com os ciclos de envelhecimento. A crescente precipitação de fase  $\delta$ , de estequiometria Ni<sub>3</sub>Nb, leva a redução do Nb disponível para a precipitação do principal precipitado endurecedor,  $\gamma''$ , de mesma estequiometria. A Figura 2 mostra a tendência de redução da resistência com os ciclos de envelhecimento. Também se observa que, para o mesmo número de ciclos, os valores de resistência das amostras forjadas são maiores que

**Tabela 1.** Composição química das peças forjada e fundida, com balanço de Ni

Forjada	Elemento	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Fe	Al	Co	Nb	Ti	B	S	Cu
	% Peso	0,065	0,221	0,331	0,0012	19,52	2,26	18,81	0,453	1,49	6,08	3,86	0,0038	0,0011	0,182
Fundida	Elemento	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Fe	Al	Co	Nb	Ti	B	S	Cu
	% Peso	0,093	0,335	0,153	0,0042	17,97	2,96	20,7	0,499	0,214	4,43	0,84	0,0056	0,001	0,277

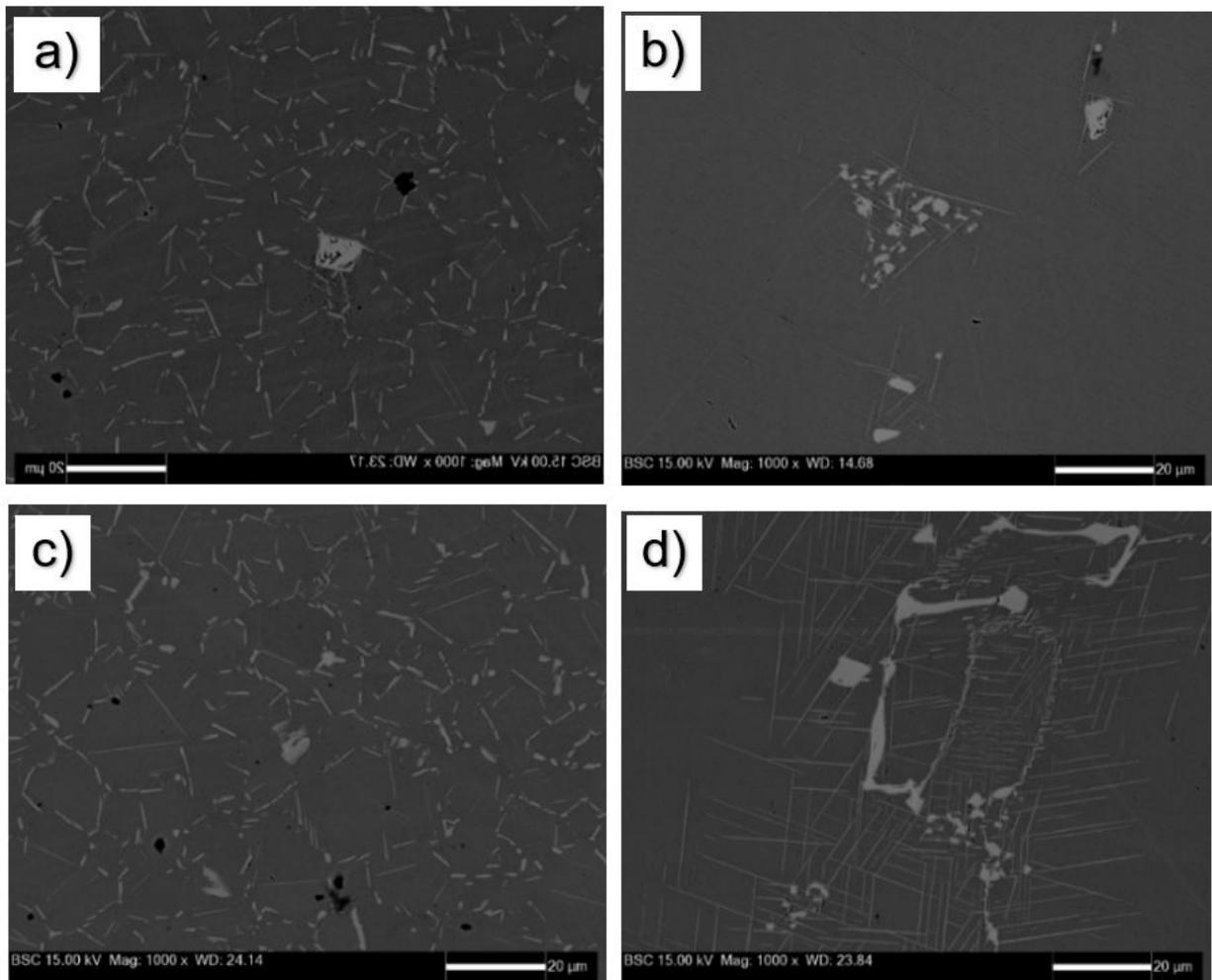


Figura 1. MEV das amostras: forjadas com (a) 1 e (c) 7 ciclos de tratamento térmicos e; fundidas com (b) 1 e (d) 7 ciclos de tratamentos térmicos.

Tabela 2. Fração de área  $\delta$  e tamanho médio de partículas  $\delta$  para as amostras forjadas e fundidas nas condições de 1, 4 e 7 ciclos de tratamento térmicos

AMOSTRA		Fração de Área de $\delta$ (%)	Tamanho Médio de Partículas ( $\mu\text{m}$ )
Forjada	1 ciclo	6,299	0,929
	4 ciclos	6,385	1,057
	7 ciclos	8,124	1,514
Fundida	1 ciclos	0,867	0,806
	4 ciclos	2,885	1,564
	7 ciclos	9,309	1,465

Tabela 3. Resultados do ensaio de tração

AMOSTRA		$\sigma_{LE}$ (Mpa)	$\sigma_{LR}$ (Mpa)	Al (%)
Fundida	2 ciclos	771,9	1021,5	21,38
	5 ciclos	673,6	1016,9	24,49
	8 ciclos	705,3	920,6	18,89
Forjada	2 ciclos	923,7	1291,6	20,0
	5 ciclos	830,1	1261,6	19,8
	8 ciclos	857,0	1211,9	22,93

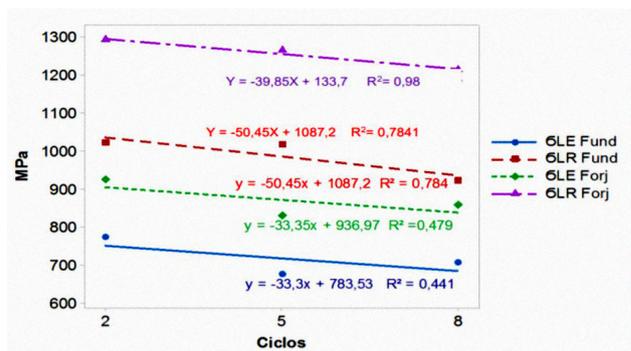
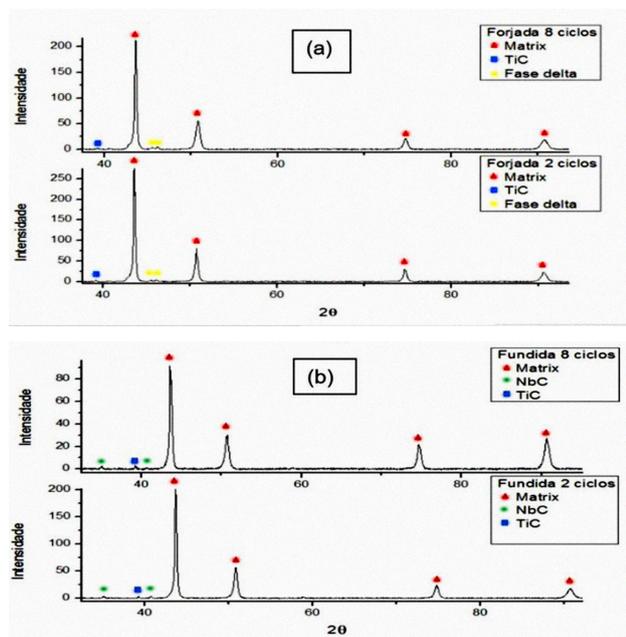


Figura 2. Curvas, em Mega pascal (MPa) por ciclos de tratamento, da tendência do limite de escoamento e resistência nos ciclos 2, 5 e 8.

das amostras fundidas, o que pode ser relacionado ao teor de Nb significativamente maior que das amostras fundidas, resultando na maior disponibilidade desse elemento para a formação do precipitado endurecedor,  $\gamma''$ . Além disso, o Nb mais distribuído na matriz em relação às amostras fundidas e o tamanho de grão refinado também têm papel no endurecimento da liga.

Os resultados de ductilidade apresentaram considerável dispersão nos valores, mas houve uma tendência de queda de ductilidade para as amostras fundidas, enquanto a tendência foi de ganho de ductilidade para as amostras forjadas. Para o caso fundido, a crescente precipitação de  $\delta$  ocorre de forma concentrada nas regiões interdendríticas, com impacto na ductilidade da mesma, atuando como pontos de iniciação de trincas e no esperado impacto negativa na ductilidade. No caso das amostras forjadas, a precipitação de  $\delta$  é dispersa e distribuída na matriz. Além disso, a menor disponibilidade de Nb pode induzir precipitados de  $\gamma''$  menores e em menor quantidade, resultado em menor resistência, mas maior ductilidade. Com relação a atuação da fase  $\delta$  na ductilidade, é reportado que esta fase pode favorecer essa propriedade [4], o que foi observado para as amostras forjadas.



**Figura 3.** (a) amostras forjadas 8 e 2 ciclos (b) Amostras fundidas 8 e 2 ciclos, mostrando a presença da matriz, Carbetos de Nb e carbetos de Ti.

## REFERÊNCIAS

- 1 Paulonis DF, Schirra JJ. Alloy 718 at Pratt & Whitney: historical perspective and future challenges. In: Loria EA, editor. Superalloys 718, 625, 706 and derivatives. Warrendale: TMS; 2001.
- 2 Caliaro FR. Efeito do tratamento de envelhecimento na superliga Inconel 718. In: Anais da VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico (TTT 2012); 2012 Junho 17-20. São Paulo: Metallum; 2012.
- 3 Loria EA. Superalloy 718-metallurgy and applications. Warrendale: TMS; 1989. p. 381-389, 673-683.
- 4 Rao GA, Kumar M. Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superalloy inconel 718. *Materials Science and Engineering A*. 2003;355:114-125.

Recebido em: 20 Nov. 2017

Aceito em: 31 Jul. 2018

A difração de raios X forneceu informações adicionais das fases presentes na amostra. A Figura 3 resume os picos observados nos espectros de difração. Além da matriz austenítica, foram observados picos relativos aos carbetos ricos em Nb e ricos em Ti. Nas amostras forjadas foram evidenciados os picos de fase  $\delta$ , não sendo discerníveis nas amostras forjadas, apesar de sua observação por MEV. Nos difratogramas das amostras fundidas também não foram discernidos os picos relativos à fase de Laves.

## 4 CONCLUSÃO

Por todas as informações apresentadas e as análises realizadas conclui-se então que:

- Os tratamentos térmicos pós-reparo com a solubilização sub-solvus  $\delta$  tendem a promover crescentes quantidades dessa fase, a qual irá crescentemente se acumular a medida que novos reparos forem realizados. Além disso, o tamanho médio de partículas aumentou com os ciclos de tratamentos térmicos;
- A precipitação da fase  $\delta$  foi eficaz na manutenção do tamanho de grão refinado das amostras forjadas, mesmo para sucessivos ciclos de envelhecimento, sendo considerada um fator preponderante no refino do tamanho de grão;
- Com os ciclos de solubilização e envelhecimento, há uma tendência de queda de resistência mecânica tanto das amostras forjadas quanto das amostras fundidas, o que pode ser relacionado à redução de Nb disponível na matriz para a precipitação de  $\gamma''$ , que é a principal fase endurecedora da liga.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e a CAPES pelo suporte financeiro.