



## Efeito dos ciclos térmicos na dureza da liga Inconel 718

### Effect of thermal cycling on the hardness of Inconel 718 alloy

Lorena Gonçalves de Mendonça<sup>1</sup>, Marcela Eduarda Januario<sup>2</sup>, Paulo César Borges<sup>3</sup>

#### RESUMO

A Superliga Inconel 718 possui ampla aplicação na indústria de petróleo e gás devido sua considerável resistência à corrosão e propriedades mecânicas, sendo adequada para alta pressão e altas temperaturas. Entretanto, sua baixa dureza e resistência ao desgaste limitam a aplicação do material, sendo necessários tratamentos de endurecimento para a obtenção das propriedades requeridas para operação. Os tratamentos térmicos de envelhecimento destacam-se entre os processos aplicados, uma vez que sua matriz austenítica endurece através da precipitação de fases secundárias. Desta maneira, objetivou-se neste trabalho avaliar o efeito do ciclo térmico de duplo envelhecimento à 620°C durante 8h, 24h, 36h, e 48h em amostras em estado de fornecimento previamente solubilizadas a 1089°C por 1 hora e envelhecidas a 788°C por 7 horas. Foram realizadas medições de dureza a fim de correlação com as fases observadas através de microscopia óptica. Constatou-se a efetividade do duplo envelhecimento no aumento de dureza da liga, associado a precipitação de  $\gamma'$  e  $\gamma''$ . Além disso, observou-se a redução da dureza causada pela transformação da fase  $\gamma''$  em  $\delta$  a partir de 24 horas de tratamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Inconel 718; tratamento térmico; envelhecimento; dureza.

#### ABSTRACT

Inconel 718 Superalloy has wide application in the oil and gas industry due to its considerable corrosion resistance and mechanical properties, being suitable for high pressure and high temperatures. However, its low hardness and wear resistance limit the application of the material, requiring hardening treatments to obtain the properties required for operation. Thermal aging treatments stand out among the processes applied, since its austenitic matrix hardens through the precipitation of secondary phases. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of the double aging thermal cycle at 620°C for 8h, 24h, 36h, and 48h on samples in the supplied state previously solubilized at 1089°C for 1 hour and aged at 788°C for 7 hours. Hardness measurements were carried out in order to correlate with the phases observed through optical microscopy. The effectiveness of double aging in increasing the hardness of the alloy, associated with the precipitation of  $\gamma'$  and  $\gamma''$ , was verified. Furthermore, a reduction in hardness caused by the transformation of the  $\gamma''$  phase into  $\delta$  was observed after 24 hours of treatment.

**KEYWORDS:** Inconel 718; heat treatment, aging; hardness.

## INTRODUÇÃO

O Inconel 718 é uma superliga de níquel-cromo com grande aplicação nas indústrias de petróleo e gás devido a sua considerável resistência à corrosão e propriedades mecânicas, apresentando resultados satisfatórios mesmo sob condições operacionais extremas, como alta pressão e altas temperaturas (Caliari, 2012; Rayatpour, 2021; Resende, 2015).

<sup>1</sup> Aluna voluntária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: lorenamendonca@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 8287660741266870.

<sup>2</sup> Bolsista da CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: mjanuario@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 2037582780832180.

<sup>3</sup> Docente do curso de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: pborges@utfpr.edu.br. ID Lattes: 2389356434049800.

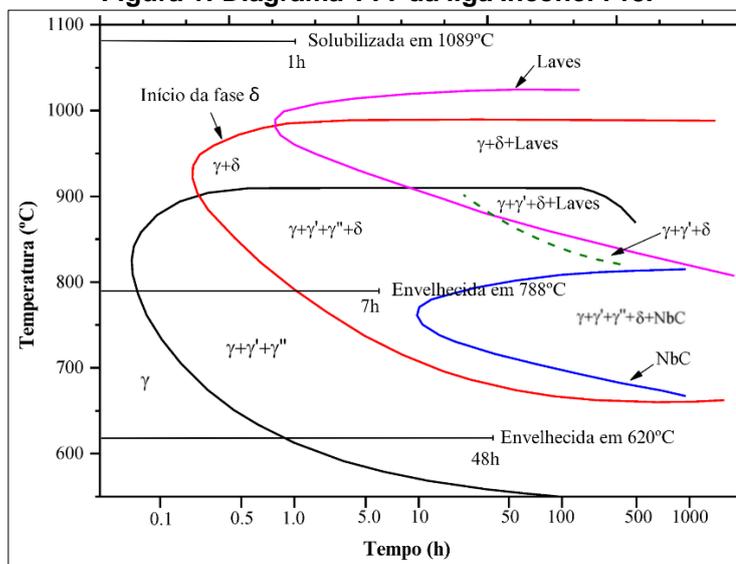


No entanto, sua dureza é considerada baixa quando comparada a outras superligas, assim, usualmente o material é condicionado a tratamentos que possibilitem aumentar a dureza e a resistência mecânica conforme os requisitos de operação (Oikava, 2019).

Em soluções sólidas susceptíveis à formação de fases intermetálicas, o endurecimento pode ser obtido por encruamento e/ou por tratamentos térmicos. Entre esses, se destacam os tratamentos de envelhecimento. Eles envolvem a solubilização seguida de aquecimento por um período específico, visando a precipitação fina e dispersa das fases endurecedoras no material. Sendo que as condições de tempo e temperatura de tratamento alteram significativamente as propriedades mecânicas e em alguns casos podem reduzir a resistência à corrosão.

O diagrama de transformação isotérmica do Inconel 718 (Figura 1) mostra que dentro da faixa de temperatura de trabalho em questão, espera-se encontrar as fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$ .

Figura 1: Diagrama TTT da liga Inconel 718.



Fonte: Adaptado de Mostafa (2017)

Nessa liga, a fase  $\gamma''$  é a responsável majoritária no aumento do valor de dureza do material, seguida por  $\gamma'$ . Por outro lado, a fase  $\delta$  possui impacto negativo no endurecimento do Inconel (Rafiei, 2019).

A presença de mais de uma fase secundária disponível requer o emprego de diferentes técnicas de envelhecimento, dentre as quais destaca-se o duplo envelhecimento pela obtenção de grãos finos e homogêneos, alta dureza, mantendo bons níveis de ductilidade (Wang, 2004).

Em um primeiro momento, esse trabalho tem por objetivo avaliar a influência das fases precipitadas na resistência mecânica (dureza) do Inconel 718 após ciclos térmicos.

## MÉTODO

A liga em estudo foi a Inconel 718 (UNS NO7718), previamente solubilizada a 1089°C por 1 hora, e envelhecida à 788°C por 7 horas. A composição química, determinada pela técnica de fluorescência de raios X (XRF), está presente no Quadro 1.



**Quadro 1 - Composição química em porcentagem de massa da superliga Inconel 718**

Elemento	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	Co
% peso	53,45	18,28	18,81	4,94	2,83	0,93	0,50	0,23

Fonte: Oikava (2019).

As amostras foram cortadas em corpos de prova de 11x11mm e submetidas ao envelhecimento nas condições 620°C/8h, 620°C/24h, 620°C/36h e 620°C/48h, em triplicatas. O tratamento térmico foi realizado em forno mufla da empresa Fornitec Ltda., pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Após o tratamento, foi feita a preparação metalográfica das amostras, consistindo no lixamento empregando lixas de SiC até granulometria #1200, seguida de polimento em diamante em suspensão monocristalino 1µm e suspensão de alumina 0,05µm, com posterior limpeza em álcool.

Para a análise microestrutural, as fases foram reveladas através de ataque químico em água régia durante 20 segundos. A microscopia óptica foi feita em um microscópio Olympus BX51M, foram feitas imagens na magnificação de 1000 vezes, das condições 620°C/8h, 620°C/24h, 620°C/36h e 620°C/48h.

As medidas de dureza Vickers das amostras tratadas e não tratadas foram realizadas em durômetro EMCO-TEST modelo M4C 025 G3M, com especificações HV 20 - 147.43x - standard, com carga principal de 196,2N durante 10 segundos, visando obter uma curva de dureza em função do tempo de envelhecimento. As medições foram realizadas no topo de cada corpo de prova, sendo realizadas 5 indentações em cada, de acordo com a norma a ASTM E384 (ASTM E384-99).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As medidas de dureza obtidas estão presentes no Quadro 2.

**Quadro 2 - Valores de dureza Vickers.**

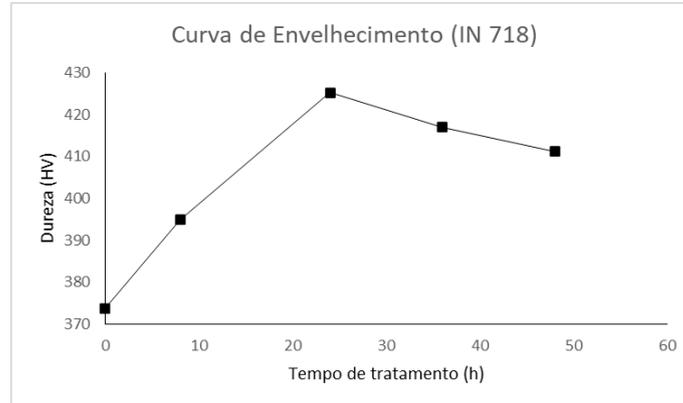
Condição	Estado de fornecimento	620°C/8h	620°C/24h	620°C/36h	620°C/48h
Dureza (HV)	373	373	425	416	411

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

As amostras em estado de fornecimento obtiveram dureza média condizente com o previsto em literatura (Caliari, 2012), e observa-se que todas as amostras tratadas possuem valores de dureza superiores aos do estado de fornecimento.

Entretanto, nota-se uma redução gradativa da dureza a partir da amostra na condição 620°C/36h, indicando o superenvelhecimento do material, onde ocorre a coalescência das fases precipitadas e se inicia o processo de reversão da austenita após longos períodos de tratamento (Wang, 2004). Esta redução pode ser observada pela curva da Figura 2.

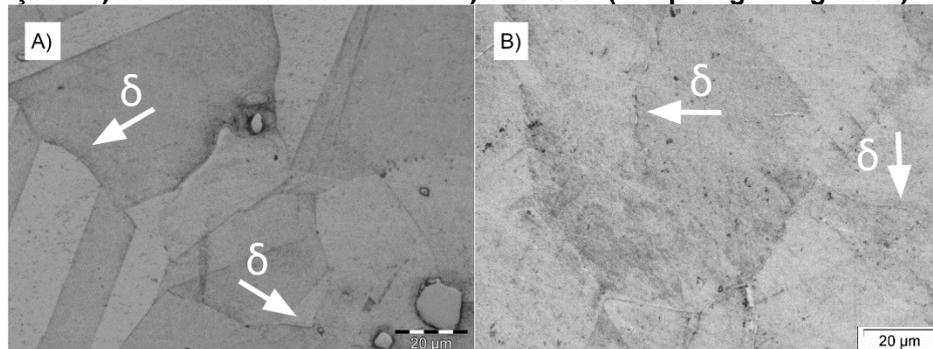
Figura 2 - Curva de dureza do Inconel 718



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Em estudos como o de Wang (2004) e Resende (2015), também foi observada uma diminuição gradativa nas medições de dureza após o duplo envelhecimento da liga Inconel 718, atribuída a formação da fase  $\delta$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) em detrimento das fases  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) e  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) (Caliari, 2014). Isso ocorre pois, tanto a fase  $\gamma''$  quanto a fase  $\delta$  são a base de  $\text{Ni}_3\text{Nb}$ , sendo  $\delta$  considerada fase de equilíbrio se formando em detrimento de  $\gamma''$ , que é metaestável (Rafiei, 2019).

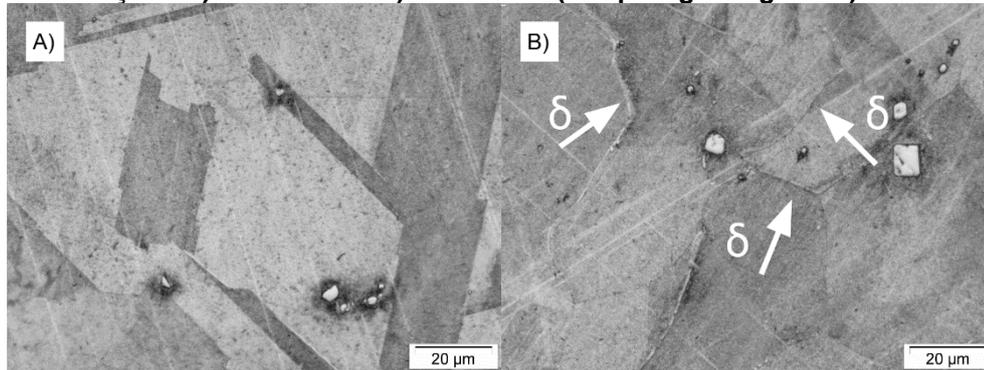
Figura 3 - Micrografias ópticas, na magnificação 1000 vezes da liga de Inconel 718 nas condições A) estado de fornecimento e B) 620°C/8h (Ataque água régia 30s).



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Na análise das micrografias, na amostra da condição 620°C/8h (Figura 3.b) foi observada a presença de pequenas quantidades da fase  $\delta$ . Segundo o apresentado no diagrama de transformação isotérmica da liga, os parâmetros de temperatura e tempo utilizados não são compatíveis com o aparecimento da fase, sendo então relacionado ao tratamento a 788°C/7h realizado previamente, o que se confirmou pela verificação da amostra na condição de fornecimento (Figura 3.a).

Figura 4 - Micrografia óptica, na magnificação 1000 vezes da liga de Inconel 718 nas condições A) 620°C/24h e B) 620°C/36h. (Ataque água régia 30s).



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A amostra da condição 24h (Figura 4.a), amostra de maior dureza, apresentou uma quantidade de  $\delta$  similar à de 8h, em contraste ao grande aumento das fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$ . Por fim, nas condições 36h (Figura 4.b) e 48h houve aumento expressivo da precipitação da fase  $\delta$  nos contornos de grãos.

Constatou-se que a transição da fase  $\gamma''$  para a fase  $\delta$  está associada à diminuição da dureza do Inconel, sendo o aumento de horas de tratamento proporcional a quantidade de fase  $\delta$  que irá precipitar, o que justifica a queda da dureza nas condições que sucedem a 24h.

Logo, através dos resultados obtidos, percebe-se a efetividade dos ciclos térmicos na melhoria de propriedades da liga Inconel 718, apresentando maior dureza de topo em relação às tratadas nos parâmetros de fornecimento, contudo recomenda-se que a análise do comportamento de corrosão seja realizada antes de definir as condições de envelhecimento otimizadas.

## CONCLUSÃO

A partir do estudo, pode-se constatar a efetividade no aumento da dureza da liga Inconel 718 por meio do duplo tratamento térmico de envelhecimento, associadas à precipitação das fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$ .

A melhor condição de duplo endurecimento ocorreu para o envelhecimento realizado à 788°C por 7h seguido de envelhecimento na temperatura de 620°C por 24h.

Tempos maiores do que 24h para a temperatura de 620°C favorecem a transformação da fase  $\gamma''$  em  $\delta$ , com consequente redução de dureza.

## Agradecimentos

Agradeço a UTFPR pela disponibilização da infraestrutura e equipamentos para realização da pesquisa.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.



## REFERÊNCIAS

ASTM E384-99, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, 1999.

CALIARI, F. R. Avaliação do Comportamento em fluência da superliga Inconel 718 após duplo envelhecimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica), ITA, p.89, 2012.

CALIARI, F. R.; CANDIOTO, K. C. G.; REIS, D. A. P.; COUTO, A. A., MOURA NETO, C.; NUNES, C. **Efeito do tratamento de envelhecimento na superliga Inconel 718: aplicação em temperaturas elevadas.** TTT 2012. VI CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE TEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO, Atibaia, SP, 2012

CALIARI, F. R., ROSA, E. F., SILVA, M. A. REIS, D. A. P. **Analysis of pitting corrosion on an inconel 718 alloy submitted to aging heat treatment.** Technol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 11, n. 3, p. 189-194, jul./set. 2014.

MOSTAFA, A. **Structure, Texture and Phases in 3D Printed IN718 Alloy Subjected to Homogenization and HIP Treatments.** *Metals*, 7(6), 196, 2017.

OIKAVA, Y. **Comportamento tribológico da liga inconel 718 nitretada por plasma em gaiola catódica.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2019.

RAFIEI M., MIRZADEH H., MALEKAN M., **Micro-mechanisms and precipitation kinetics of delta (d) phase in Inconel 718 superalloy during aging.** *Journal of Alloys and Compounds*, 2019.

RESENDE, F. A. **Estudo do comportamento mecânico e microestrutural da superliga inconel 718 após tratamento térmico de duplo envelhecimento.** UNIFESP, 2015.

RAYATPOUR, M., LALEGANI, Z. **Microstructural Investigation and Determining the Optimal Conditions for Nondestructive Testing of Inconel 738LC Superalloy Gas Turbine Blade.** *J Fail. Anal. and Preven.* 21, 1203–1211 (2021).

SAHU, A. K., BAG, S., **Design of a double aging treatment for the improvement of mechanical and microstructural properties of pulse micro-plasma arc welded alloy 718.** *J Mater Sci*, 2021.

WANG, C., LI R., **Effect of double aging treatment on structure in Inconel 718 alloy,** *Journal of Materials Science*, 2004.