

# ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA SUPERLIGA INCONEL 718 APÓS ENSAIOS DE TRAÇÃO A QUENTE\*

Tarcila Sugahara <sup>1</sup>  
Danieli Aparecida Pereira Reis <sup>2</sup>  
Mariano Castagnet <sup>3</sup>  
Antônio Augusto Couto <sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho investigou algumas propriedades mecânicas importantes em alta temperatura da superliga Inconel 718 obtidas por meio de ensaios de tração a quente, como o limite convencional de escoamento para 0,2% de deformação plástica ( $\sigma_{0.2}$ ), limite de resistência ( $\sigma_r$ ), e o alongamento percentual ( $A_p$ ). As amostras foram rompidas em temperaturas de 600°C, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C e 850°C e taxa de deformação de 0,5 mm/min ( $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) seguindo a norma ASTM E-8. Os resultados mostraram valores mais elevados de limite de escoamento na temperatura de 700°C, este comportamento anômalo pode ser atribuído à presença de precipitados endurecedores como observado no diagrama TTT da superliga Inconel 718. O exame das superfícies de fratura dos corpos-de-prova de tração mostrou que com o aumento da temperatura de ensaio o mecanismo de fratura atuante se modifica de intergranular para o coalescimento de microcavidades.

**Palavras-chave:** Inconel 718; Tração a quente; Fratura MEV.

## STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF INCONEL 718 SUPERALLOY AFTER HOT TENSILE TESTS

### Abstract

This research work investigated some important mechanical properties of Inconel 718 superalloy using hot tensile tests like conventional yield strength to 0.2% strain ( $\sigma_{0.2}$ ), ultimate strength ( $\sigma_r$ ), and specific elongation ( $\epsilon_u$ ). Samples were strained to failure at temperatures of 600°C, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C and 850°C and strain rate of 0.5 mm/min ( $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) according to ASTM E-8. The results showed higher values  $\sigma_{0.2}$  of yield strength at 700°C, this anomalous behavior can be attributed to the presence of hardening precipitates as observed in the TTT diagram of superalloy Inconel 718. Examination of the sample's surfaces tensile fracture showed that with increasing temperature test the actuating mechanism changes from intergranular fracture to coalescence of the microcavities.

**Keywords:** Inconel 718; Hot tensile test; SEM fractures.

\*Dedicado à Memória do Prof. Carlos de Moura Neto

## I INTRODUÇÃO

As superligas são materiais muito utilizados em aplicações aeroespaciais por causa de propriedades especiais, sobretudo a temperaturas elevadas. O Inconel 718 destaca-se devido as suas propriedades de elevada resistência mecânica, boa resistência à fadiga e fluência, boa resistência à corrosão [1].

O Inconel 718 pertence à família das superligas à base de Ni-Cr que tem uma grande variedade de ligas com propriedades mecânicas e aplicações variadas. As ligas Inconel geralmente contêm ainda Al, Ti, Nb, Co, Cu, e W que aumentam a resistência mecânica e à corrosão. O Fe também está presente em quantidades que variam

<sup>1</sup>Engenheira de Materiais, Mestre e doutoranda, Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: tarcilasugahara@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Engenheira Química, Profa. Dra., Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: danieli.reis@unifesp.br

<sup>3</sup>Físico, Mestre, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: mcastagnet@ipen.br

<sup>4</sup>Engenheiro Mecânico, Professor Doutor, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, Universidade de São Paulo – USP e Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: acouto@ipen.br

de 1% a 20% [2]. A liga 718 foi desenvolvida para uso em discos de turbinas aeronáuticas, mas atualmente são também usadas em motores, como parafusos e eixos de rotor além de aplicação na indústria nuclear, petrolífera e criogenia [3].

Similarmente ao ensaio convencional, o ensaio de tração a quente determina propriedades como o limite escoamento para 0,2% de deformação plástica ( $\sigma_{0,2}$ ), limite de resistência ( $\sigma_r$ ) e o alongamento específico uniforme ( $\epsilon_u$ ). O objetivo deste trabalho é a determinação de propriedades mecânicas da superliga Inconel 718 obtidas por meio dos ensaios de tração a quente e entender o mecanismo de fratura nas diversas temperaturas de ensaio.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A superliga Inconel 718 foi fornecida pela Villares Metals S.A.. O material foi obtido por fusão a vácuo (VIM) com refino VAR (Vacuum Arc Remelting), tratamento térmico de homogeneização, forjamento a quente em matriz aberta, laminação a quente de desbaste e acabamento.

O resultado da análise química do Inconel 718 foi obtido pelas técnicas de gravimetria para silício e níquel, de combustão direta para carbono e enxofre, volumetria para o cromo e demais elementos por absorção atômica. A composição da superliga é mostrada na Tabela I.

A liga atende a especificação da norma ASTM B265-89 [4].

### 2.1 Ensaio de Tração a Quente

A superliga Inconel 718 foi ensaiada por tração a quente nas temperaturas de 600°C, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C e 850°C e taxa de deformação de 0,5 mm/min ( $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) seguindo a norma ASTM E-8 [5].

Os corpos-de-prova foram usinados conforme mostra o desenho da Figura 1.

Os corpos-de-prova foram ensaiados até o rompimento utilizando Máquina Instron 4400R – capacidade 10 t acoplada a Forno Instron 3112, com 3 zonas de temperatura e sistema de controle e aquisição de dados por computador.

**Tabela I.** Composição química da superliga Inconel 718 [1]

Elementos Químicos	(% peso)
C	0,042
S	0,0028
Mn	0,01
Co	0,02
Ni	52,97
Cr	18,56
Nb	5,61
Al	0,07
Ti	1,95
Mo	2,63

Para microscopia ótica os corpos-de-prova foram cortados na transversal e as superfícies de fratura foram submetidas à microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Material Recebido

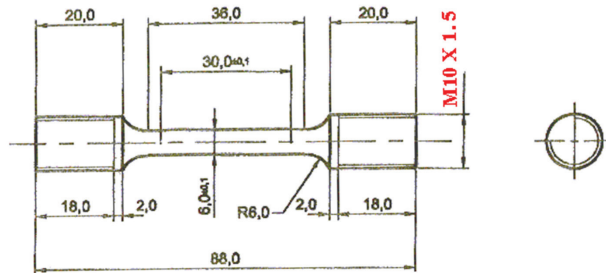
O material como recebido foi submetido a um ensaio de microdureza Vickers com carga de 500 gF (5 indentações) e o valor obtido para a liga foi 344,06 HV.

Na Figura 2 observa-se na imagem obtida por MEV que a microestrutura da liga Inconel 718 (como recebido) é formada de grãos heterogêneos com matriz de fase  $\gamma$  (CFC).

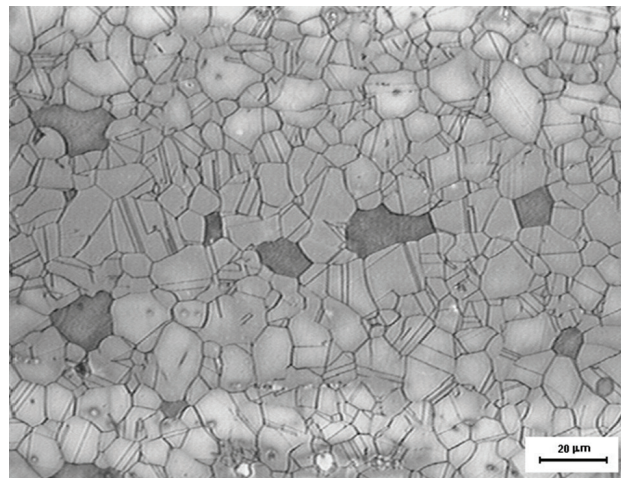
Para revelação da microestrutura foi realizado um ataque eletroquímico. As amostras foram atacadas com uma solução de 50 mL HCL, 50 mL HNO<sub>3</sub> e 5 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, de 2V a 4V de tensão, com tempos de imersão em torno de 5 s.

### 3.2 Ensaio de Tração a Quente

A Figura 3 apresenta a curva do Limite de Escoamento  $\times$  Temperatura obtida para a liga de Inconel 718.



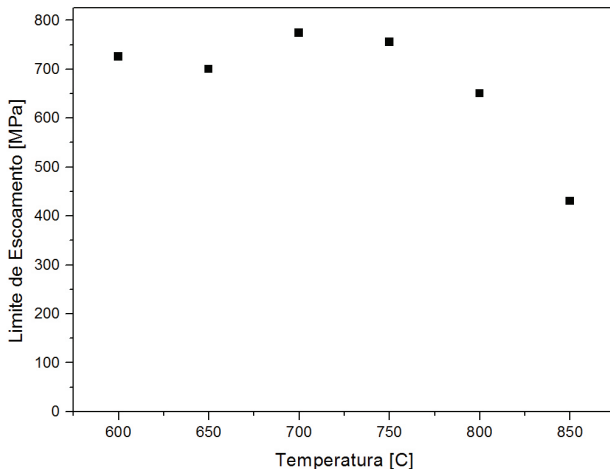
**Figura 1.** Corpo-de-prova para teste de tração a quente (mm).



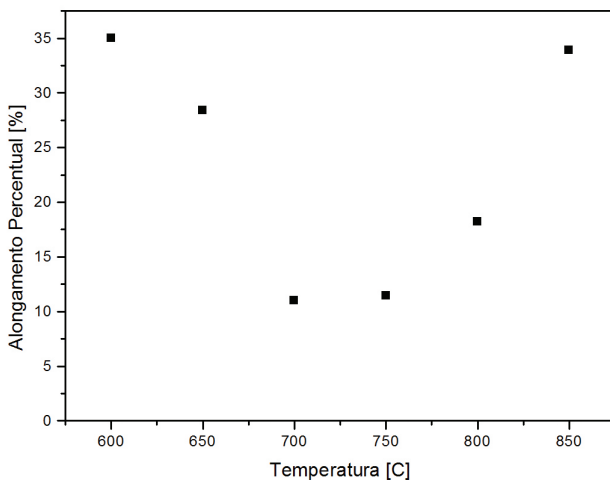
**Figura 2.** Microestrutura da liga de Inconel 718 [1].

A Figura 4 apresenta a curva do Alongamento Percentual  $\times$  Temperatura obtida para a liga de Inconel 718.

A Tabela 2 apresenta os valores relativos ao limite de escoamento ( $\sigma_{\epsilon}$ ), limite de resistência ( $\sigma_{\max}$ ), alongamento percentual ( $A_p$ ).



**Figura 3.** Curva do limite de escoamento  $\times$  temperatura obtida para a liga Inconel 718 em temperaturas de 600°C, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C e 850°C.



**Figura 4.** Curva do alongamento percentual  $\times$  temperatura obtida para a liga Inconel 718 em temperaturas de 600°C, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C e 850°C.

### 3.3 MEV das Fraturas

A Figura 5 apresenta imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura da fratura após ensaio de tração a quente a 650°C e taxa de deformação de  $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

A Figura 6 apresenta imagens de MEV da fratura a 700°C e taxa de deformação de  $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

A Figura 7 apresenta imagens MEV da fratura a 750°C e taxa de deformação de  $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

A Figura 8 apresenta imagens MEV da fratura a 800°C e taxa de deformação de  $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

A Figura 9 apresenta imagens MEV da fratura a 850°C e taxa de deformação de  $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

## 4 DISCUSSÃO

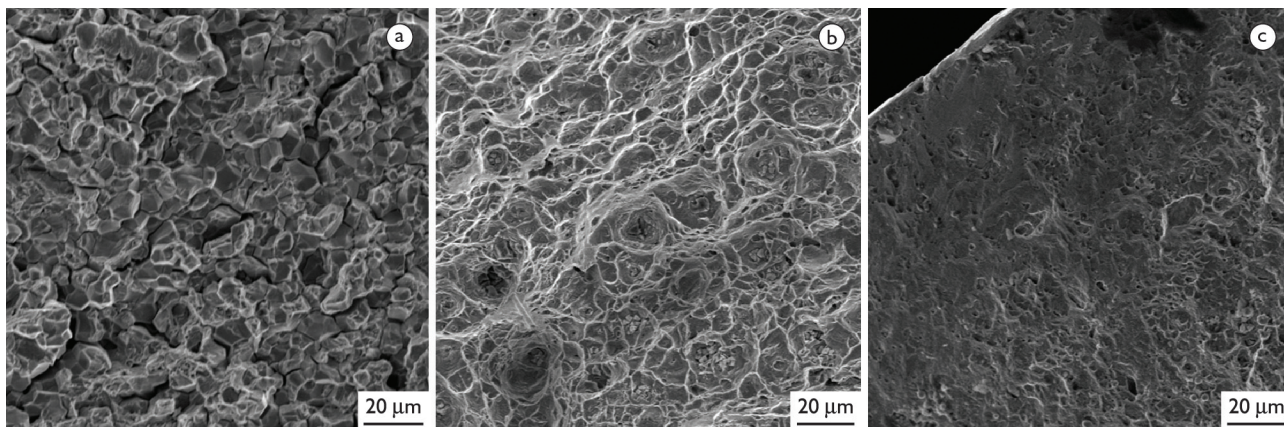
Todas as curvas tensão-deformação apresentaram o comportamento convencional dos materiais metálicos, com a tensão aumentando até um valor máximo, seguido de redução, normalmente associado a uma recuperação ou recristalização dinâmica, dependendo da temperatura de ensaio. Nas temperaturas de ensaio acima de 800°C a tensão máxima ocorreu num valor muito próximo à tensão de escoamento.

Como pode ser observado na Figura 3, o limite de escoamento apresenta uma ligeira queda de 600°C para 650°C, com posterior aumento e atingindo um valor máximo a 700°C. A partir de 700°C o limite de escoamento diminui continuamente com o aumento da temperatura de ensaio. O comportamento esperado era a diminuição do limite de escoamento com o aumento da temperatura de ensaio. O aparecimento dos valores mais elevados de limite de escoamento na temperatura de 700°C pode ser atribuído à ocorrência de precipitação de nitretos ou fases intermetálicas, enquanto que as presenças destas fases deterioram a ductilidade, a recristalização dinâmica resultante da deformação e alta temperatura produz o efeito oposto de melhoria de ductilidade. Portanto, o resultado do ensaio será a consequência desta competição entre o amolecimento causado pelo aumento da temperatura de ensaio e a precipitação [6-11].

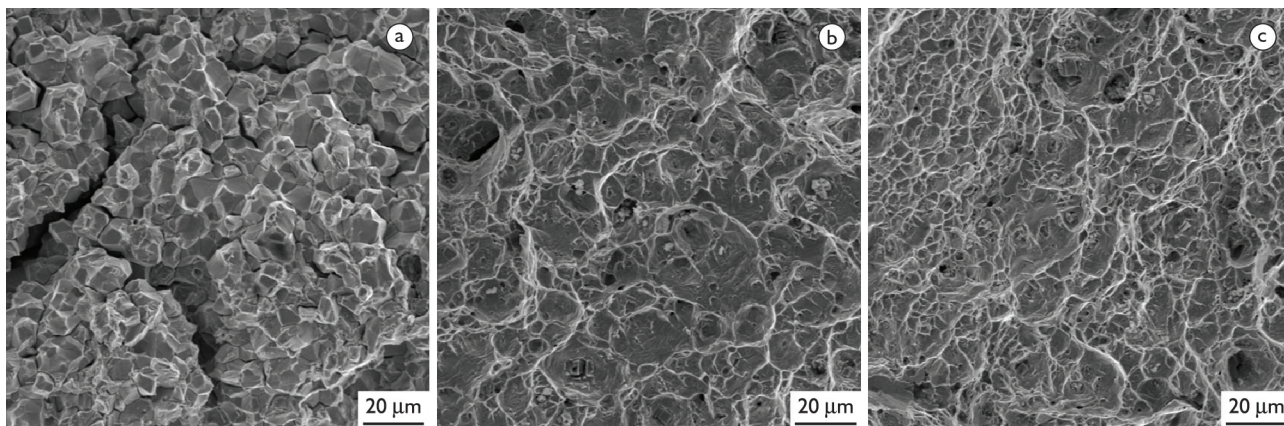
Na Figura 4, observa-se uma diminuição do alongamento percentual até temperaturas na faixa de 700°C a 750°C. A partir destas temperaturas de ensaio, o alongamento percentual aumenta para as temperaturas de

**Tabela 2.** Ensaio de tração a quente da liga Inconel 718 como recebido

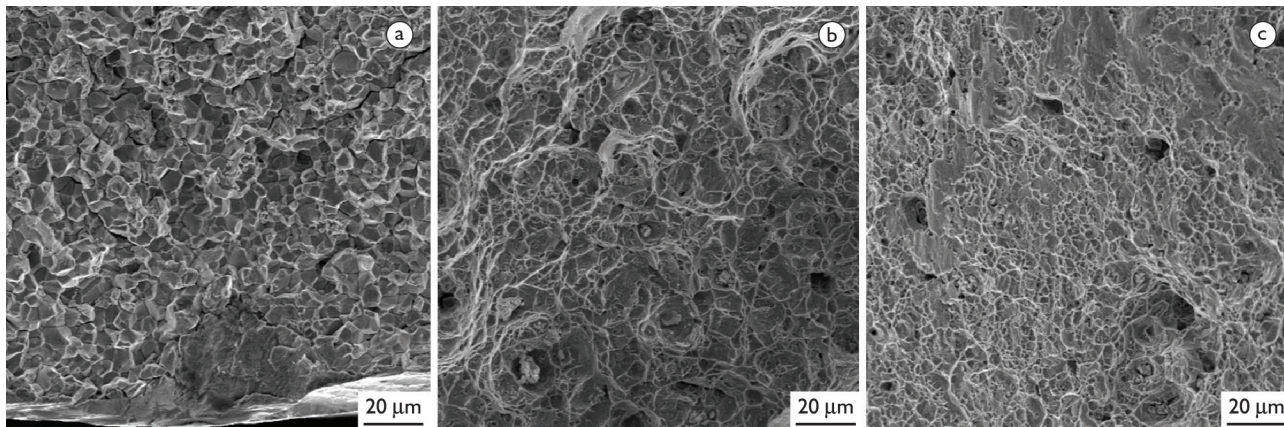
Temperatura (°C)	$\sigma_{\epsilon}$ (MPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$A_p$ (%)
600	725	1.059	35
650	700	974	28,37
700	774	888	11
750	755	811	11,44
800	664	664	18,20
850	430	435	33,91



**Figura 5.** MEV da superfície de fratura após ensaio de tração à quente a 650°C. (a) região da borda; (b) região central; e (c) região lateral.



**Figura 6.** MEV da superfície de fratura após ensaio de tração à quente a 700°C. (a) região da borda; (b) região central; e (c) região lateral.

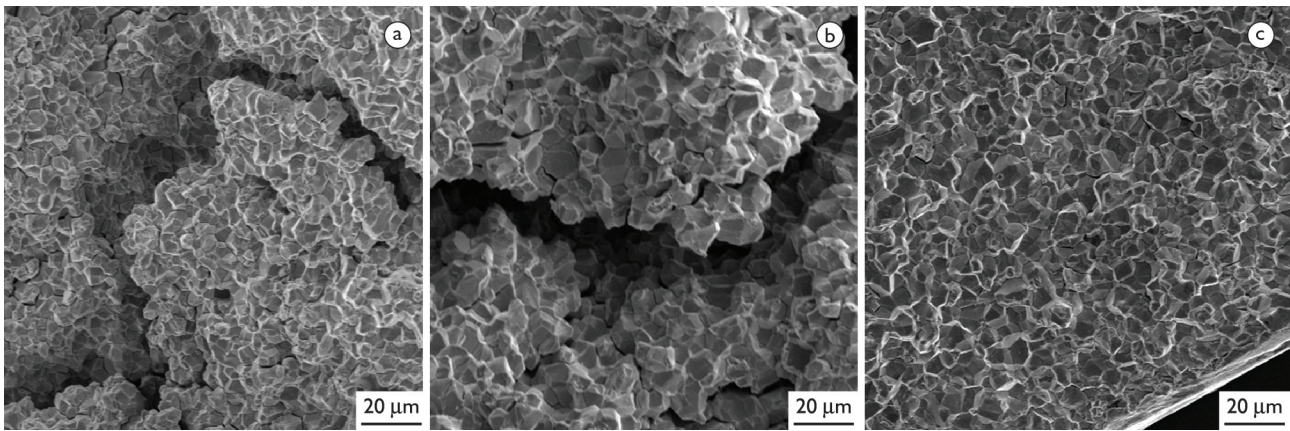


**Figura 7.** MEV da superfície de fratura após ensaio de tração à quente a 750°C. (a) região da borda; (b) região central; e (c) região lateral.

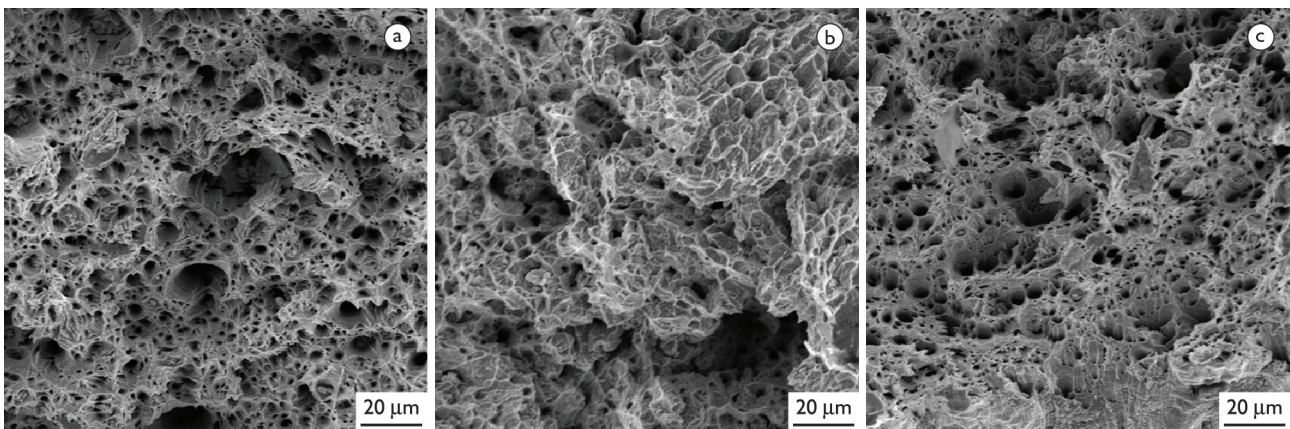
800°C e 850°C. O alongamento teve um comportamento inverso ao observado pelo limite de escoamento. No caso da superliga Inconel 718 a presença do nióbio acarreta na redução da energia de contorno de antifase do composto intermetálico  $Ni_3Nb$  ( $X''$ ) resultando no aumento mais pronunciado da tensão de escoamento e consequentemente a diminuição da ductilidade em certa faixa de temperatura.

Pode ser observado na Tabela 2 que o limite de resistência diminui com o aumento da temperatura de

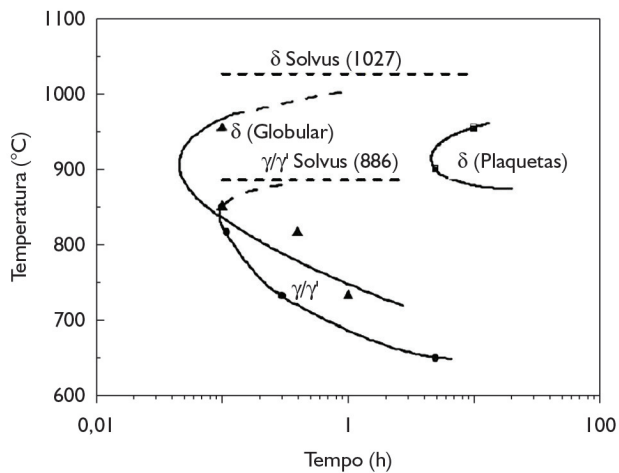
ensaio. Este comportamento também parece estar associado à combinação entre o amolecimento provocado pelo aumento da temperatura e à formação de fases endurecedoras numa faixa de temperaturas como observado no diagrama PTT (Precipitação, Tempo e Temperatura) apresentado na Figura 10. Como nas temperaturas onde o limite de escoamento apresentou valores mais elevados a alongamento foi menor, o limite de resistência não foi tão elevado, mantendo uma relação decrescente com o aumento da temperatura.



**Figura 8.** MEV da superfície de fratura após ensaio de tração a quente a 800°C. (a) região da borda; (b) região central; e (c) região lateral.



**Figura 9.** MEV da superfície de fratura após ensaio de tração à quente a 850°C. (a) região da borda; (b) região central; e (c) região lateral.



**Figura 10.** Diagrama PTT (Precipitação Tempo Temperatura) da liga 718, mostrando a precipitação das fases endurecedoras  $\gamma$  e  $\gamma'$ . Adaptado de [3].

Nas Figuras 5 a 9, as superfícies de fratura evidenciam que com o aumento da temperatura de ensaio o mecanismo de fratura modifica-se de intergranular para o coalescimento de microcavidades. A região central das superfícies de fratura dos corpos-de-prova ensaiados a 700°C e 750°C parece ter a presença de precipitados, o que pode confirmar os maiores valores de limite de escoamento.

## 5 CONCLUSÃO

Era esperada a diminuição do limite de escoamento com o aumento da temperatura de ensaio. Porém houve o aparecimento de valores mais elevados de limite de escoamento na temperatura de 700°C, este comportamento anômalo pode ser atribuído à presença de precipitados endurecedores como observado no diagrama PTT da superliga Inconel 718.

O exame das superfícies de fratura dos corpos-de-prova de tração mostrou que com o aumento da temperatura de ensaio o mecanismo de fratura atuante se modifica de intergranular para o coalescimento de microcavidades.

Os resultados obtidos neste trabalho foram de importante relevância para a determinação das propriedades em fluência da superliga Inconel 718.

## Agradecimentos

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, pelos ensaios de tração à quente.

À FAPESP, pela concessão da bolsa e suporte financeiro para realização deste trabalho.

Ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica, pelo apoio em infraestrutura e suporte acadêmico.

## REFERÊNCIAS

- 1 Sugahara T, Moura Neto C, Reis DAP, Hirschmann AO, Piorino Neto F. Estudo do comportamento em fluência da superliga Inconel 718. São José dos Campos: Encita; 2009.
- 2 Thomas A, El-Wahabi M, Cabrera JM, Prado JM. High temperature deformation of Inconel 718. *J. Mater. Process. Technol.* 2006;177:469-472. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.072>
- 3 Sims TS, Stoloff N, Hagel WC. Super alloys II high temperature materials for aerospace and industrial power. New York: John Wiley; 1987.
- 4 American Society for Testing and Materials. ASTM B265-89: Standard specification for titanium and titanium alloy strip, sheet and plate. West Conshohocken: ASTM; 1990.
- 5 American Society for Testing and Materials. ASTM E8: Standard test method for tension testing of metallic materials. West Conshohocken: ASTM; 2003.
- 6 Kim DH, Kim JH, Sa JW, Lee YS, Park CK, Moon SI. Stress rupture characteristics of Inconel 718 alloy for ramjet combustor. *Mater. Sci. Eng., A Struct. Mater.: Prop. Microstruct. Process.* 2008;483-484:262-265. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.159>
- 7 Couto AA. Influência do teor de cromo e de tratamentos térmicos na microestrutura e no comportamento mecânico de ligas intermetálicas ordenadas à base de Fe<sub>3</sub>Al [tese de doutorado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2008.
- 8 Hirschmann ACO, Moura Neto C, Reis DAP, Sugahara T, Couto AA, Castagnet M, et al. Comportamento mecânico da liga Inconel 718 sob condições de tração a quente. In: *Federacon Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. 9º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica; 2009; Las Palmas de Gran Canaria, Espanha. CIBIM; 2009.*
- 9 Giampaolo T. The gas turbine handbook: Principles and practices. 2. ed. Boca Raton: Marcel Dekker Inc.; 2002. <http://dx.doi.org/10.1201/9780824756024>
- 10 Ezugwu EO, Wang ZM, Machado AR. The machinability of nickel-based alloys: a review. *J. Mater. Process. Technol.* 1999;86:1-16. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00314-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00314-8)
- 11 Barbosa C, Nascimento JL, Caminha IMV, Abud IC. Microstructural aspects of the failure analysis of nickel base superalloys components. *Eng Fail. Anal.* 2005;12:348-361. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.09.010>

Recebido em: 20/11/2013

Aceito em: 31/03/2014