

ESTUDO DE FLUÊNCIA E MECANISMOS DE FRATURA DA SUPERLIGA INCONEL 718 ENVELHECIDA¹

Felipe Rocha Caliar²
Kátia Cristiane Gandolpho Candioto³
Danieli Aparecida Pereira Reis⁴
Antonio Augusto Couto⁵
Carlos de Moura Neto⁶
Carlos Ângelo Nunes⁷

Resumo

A avaliação do fenômeno de fluência é importante para aplicação de materiais em altas tensões e temperaturas. Superligas possuem boa resistência a fluência, fadiga, resistência à corrosão e oxidação a quente, requisitos determinantes para aplicação nas indústrias aeroespacial, petroquímica entre outras. Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento em fluência, segundo a norma ASTM E139-06, da superliga Inconel 718 submetida a tratamento térmico de duplo envelhecimento. Os parâmetros tempo de fluência primária (t_p), taxa de fluência secundária ($\dot{\epsilon}_s$), tempo de fluência até a fratura (t_f) e deformação até a fratura (ϵ_f) são utilizados para avaliar a resistência a fluência. Estudam-se os mecanismos de fratura e a evolução microestrutural por meio de análise pelas técnicas de MEV/EDS. Os parâmetros experimentais obtidos a 700°C evidenciam que o tratamento térmico de duplo envelhecimento confere aumento da resistência à fluência.

Palavras-chave: Fluência; Envelhecimento; Inconel 718; Mecanismos de fratura.

STUDY OF CREEP AND FRACTURE MECHANISM OF SUPERALLOY INCONEL 718 AGED

Abstract

The evaluation of creep phenomenon is important for application of materials in high temperature and stress. Superalloys have good creep resistance, fatigue, hot corrosion and oxidation resistance, which are requirements for application in aerospace industry, petrochemical and others. This work aims to study the creep behavior, according to standard ASTM E139-06, of superalloy Inconel 718 double aged. The parameters primary creep time (t_p), steady-state creep rate ($\dot{\epsilon}_s$), time to fracture (t_f) and strain to failure (ϵ_f) are used in order to evaluate the creep resistance. fracture mechanism and microstructural evolution were analyzed via SEM/EDS. Experimental parameters at 700°C show increase of creep resistance after double aging heat treatment.

Key words: Creep; Aging treatment; Inconel 718; Fracture mechanism.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng. Químico. Aluno de mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil.

³ Eng. Química. Prof. Pesquisador, Escola de Engenharia de Lorena (EEL); ; Associação Educacional Dom Bosco, Resende, RJ, Brasil.

⁴ Eng. Química. Prof. Pesquisador, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, SP, Brasil.

⁵ Eng. de Materiais. Prof. Pesquisador, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares; Universidade Presbiteriana do Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil.

⁶ Eng. Metalúrgico. Prof. Pesquisador, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil.

⁷ Eng. Metalúrgic. Prof. Pesquisador, Escola de Engenharia de Lorena (EEL), USP, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A fluência é fenômeno termicamente ativado, que representa o acúmulo de deformação plástica em função de temperatura, tensão, tempo, estrutura cristalina, módulo de elasticidade, tamanho de grão, entre outros. A taxa de fluência secundária pode ser associada com a tensão aplicada por meio da lei de potência:⁽¹⁾

$$\dot{\epsilon} = B \sigma^n \quad (1)$$

Em que os valores de n (expoente de tensão) variam de acordo com o material e $\dot{\epsilon}$ representa a taxa de fluência secundária. A relação entre temperatura de trabalho e temperatura de fusão, denominada temperatura homóloga, T_H , é um parâmetro importante no estudo de fluência e, normalmente, utiliza-se a faixa $0,4 < T_H < 0,7$.⁽²⁾ Os mecanismos responsáveis pela deformação em fluência podem ser: transporte de átomos por difusão, escalagem e escorregamento de discordâncias e escorregamento em contorno de grão. Os mecanismos atuantes no estudo da fluência em ligas endurecidas pela presença de fases secundárias são complexos⁽³⁾ se comparados com ligas unárias e binárias e, portanto, faz-se necessário o aprofundamento do estudo destes mecanismos. Neste trabalho, estuda-se o efeito da tensão (510 MPa a 700 MPa) sobre a fluência, na temperatura de 700°C, na superliga Inconel 718 antes e após o tratamento térmico de duplo envelhecimento. O desenvolvimento de superligas, datado do início dos anos 1940,⁽⁴⁾ objetiva a aplicação em condições extremas de tensão e temperatura, em ambientes corrosivos. A superliga Inconel 718, endurecível por precipitação, representa uma alternativa para aplicação nas indústrias aeronáutica, petroquímica etc, devido a sua alta resistência mecânica em temperaturas elevadas. Fases intermetálicas como gama linha (γ') e gama duas linhas (γ''), atuam de forma efetiva no bloqueio da movimentação de discordâncias como também no escorregamento de contorno de grão. O tratamento térmico de duplo envelhecimento é dividido em duas partes: tratamento de solução sólida e envelhecimento. Como resposta ao tratamento observa-se o aumento no tamanho de grão⁽⁵⁾ e melhor dispersão das fases intermetálicas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Composição da Superliga Inconel 718 e Preparações do Corpo de Prova para Ensaio de Fluência

A superliga Inconel 718, fornecida pela empresa Multialloy, foi obtida pelo processo VIM/VAR e no estado recozido. A composição química da superliga é descrita na Tabela 1. Os corpos de prova foram usinados pela Fautec Ferramentaria Automação e Usinagem Ltda., conforme as dimensões da Figura 1.

Tabela 1. Composição da superliga Inconel 718

Inconel 718 (%p/p)							
Cr	Ni	Si	Mo	Ti	Nb	Fe	Al
18,94	54,47	0,04	1,35	1,05	5,89	17,99	0,27

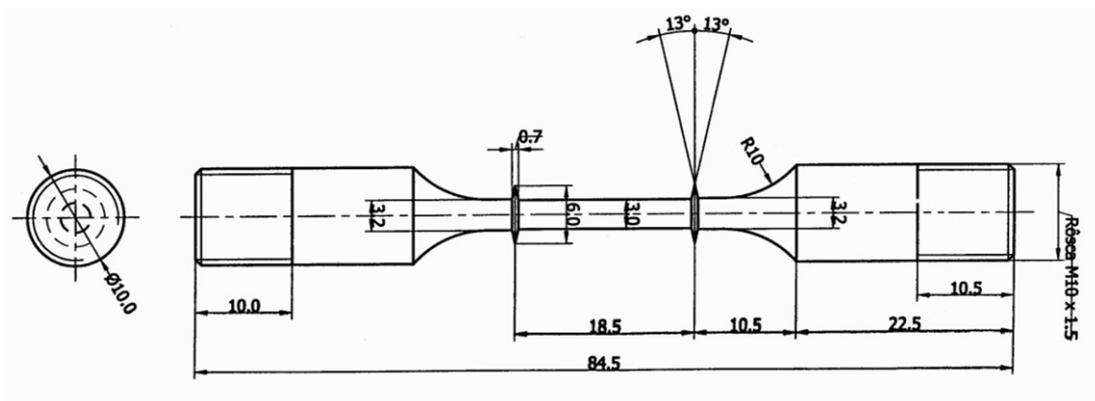


Figura 1. Dimensões do corpo de prova.

2.2 Tratamento Térmico

O tratamento térmico de duplo envelhecimento foi realizado em forno tubular Lindberg/Blue M (100V/ 50A/ 50kW), na Escola de Engenharia de Lorena (EEL USP/DEMAR). A rota de tratamento é detalhada na Figura 2.

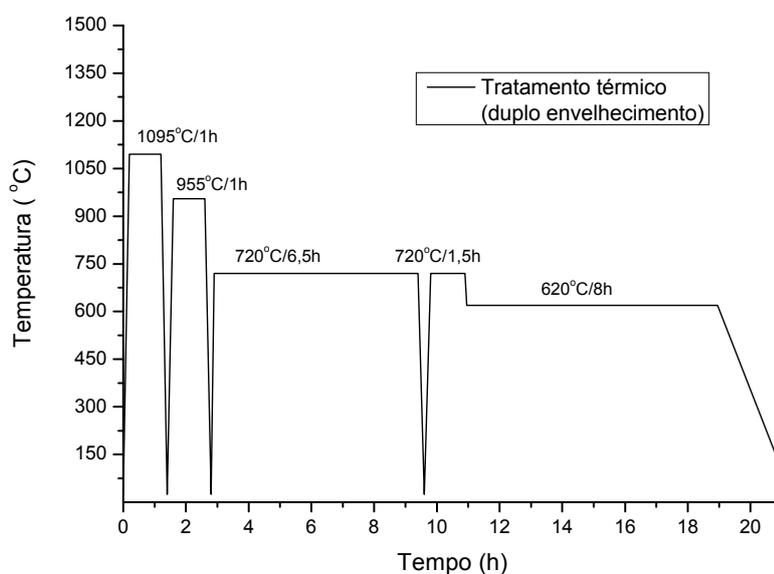


Figura 2. Rota de tratamento térmico aplicado à superliga Inconel 718.

2.3 Ensaio de Fluência

Os ensaios de fluência foram conduzidos em regime de carga constante, de acordo com a norma ASTM E139.⁽⁶⁾ As condições de ensaio abrangem a temperatura de 700°C e cargas entre 510 MPa e 700 MPa. A máquina de fluência (Figura 3) utilizada pertence ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA/DCTA). Os fornos são da empresa EMEC (*The Electronic and Mechanical Engineering Co. Ltd.*) e possuem sistema de controle e coleta de dados desenvolvida pela BSW Tecnologia Ltda., de acordo com os requisitos da norma ASTM E139/83.⁽⁶⁾



Figura 3. Máquina de fluência.

2.4 Fractografia

Após os ensaios de fluência, foi realizada a análise das superfícies das fraturas. As amostras foram limpas utilizando-se equipamento de ultrassom durante 5 minutos, imersas em acetona.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados dos Ensaios de Fluência

Os resultados dos ensaios de fluência da superliga Inconel 718, na condição como recebida (CR) e após tratamento de duplo envelhecimento (DE) (Tabela 2).

Tabela 2. Resultado dos ensaios de fluência

Temperatura (°C)	σ (Mpa)	Inconel 718	t_p (h)	$\dot{\epsilon}_s$	t_f (h)	$\dot{\epsilon}_f$
700	510	CR	1,667	3,18E-04	10,42	0,011
		DE	3,000	9,89E-05	41,40	0,009
	625	CR	0,004	1,06E+01	0,03	0,124
		DE	1,067	3,23E-04	7,95	0,010
	700	CR	0,011	1,33E+01	0,03	0,127
		DE	0,333	1,74E-03	2,95	0,011

As Figuras 4 a 6 correspondem às curvas de fluência, na modalidade carga constante, para a superliga Inconel 718. Os ensaios foram conduzidos nas tensões de 510 MPa, 625 MPa e 700 MPa. Os valores descritos na Tabela 2 são extraídos das curvas 4, 5 e 6, por meio da definição dos estágios primário, secundário e terciário.

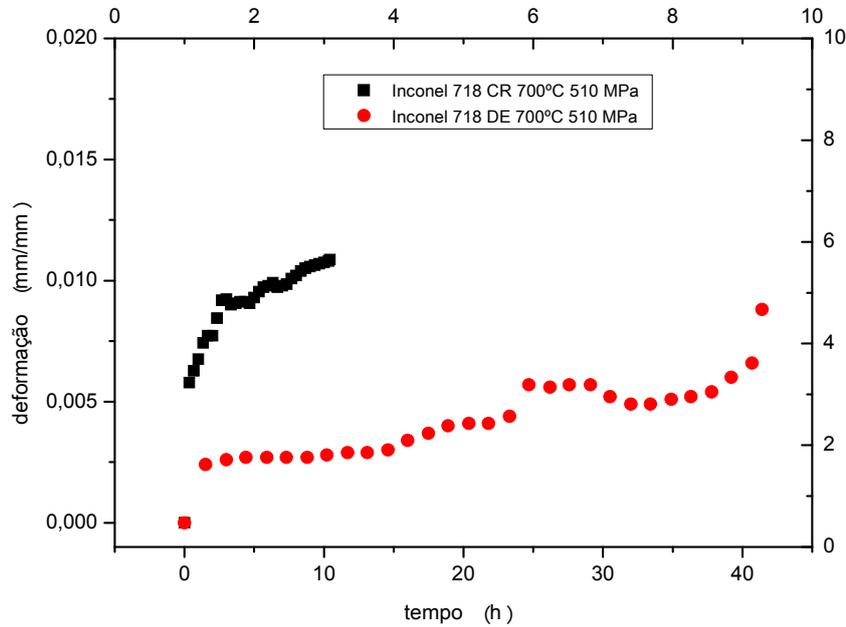


Figura 4. Comparação das curvas de fluência – Inconel 718 CR e DE (700°C e 510 MPa).

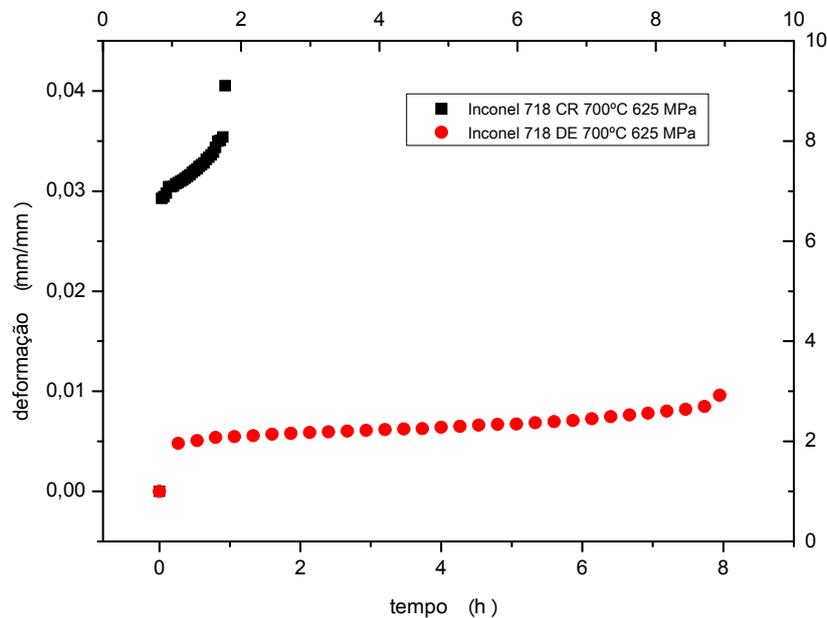


Figura 5. Comparação das curvas de fluência – Inconel 718 CR e DE (700°C e 625 MPa).

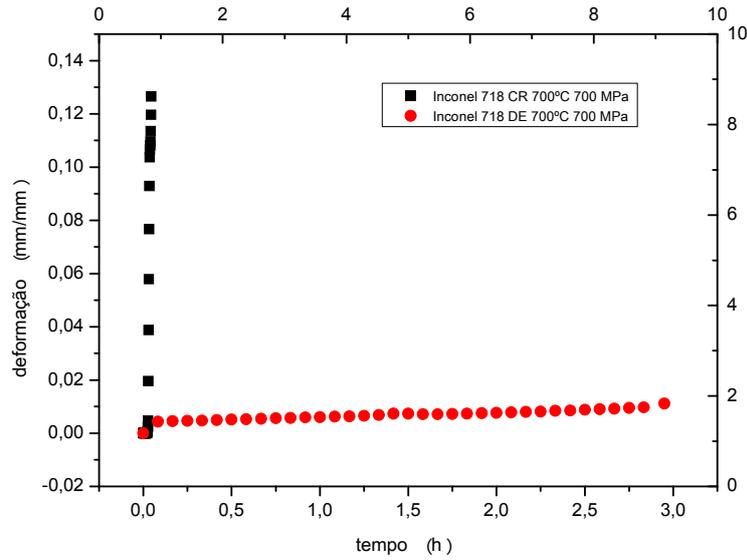


Figura 6. Comparação das curvas de fluência – Inconel 718 CR e DE (700°C e 700 MPa).

3.2 Resultados das Fractografias

A sequência das Figuras 7 a 12 mostram imagens das fraturas para todas as condições ensaiadas em fluência. Pode-se notar que, para cada condição, apresenta-se imagens do centro, da borda e da lateral das fraturas.

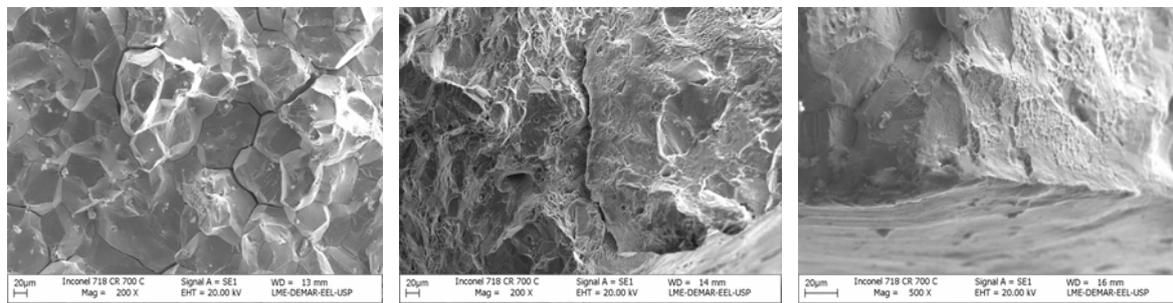


Figura 7. Inconel 718 CR – 700°C/ 510 MPa: (a) centro; (b) borda; e (c) lateral.

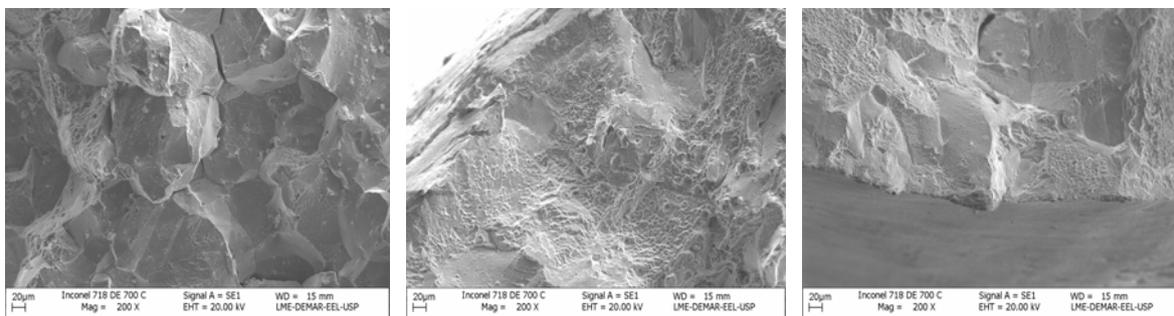


Figura 8. Inconel 718 DE – 700°C/ 510 MPa: (a) centro; (b) borda; e (c) lateral.

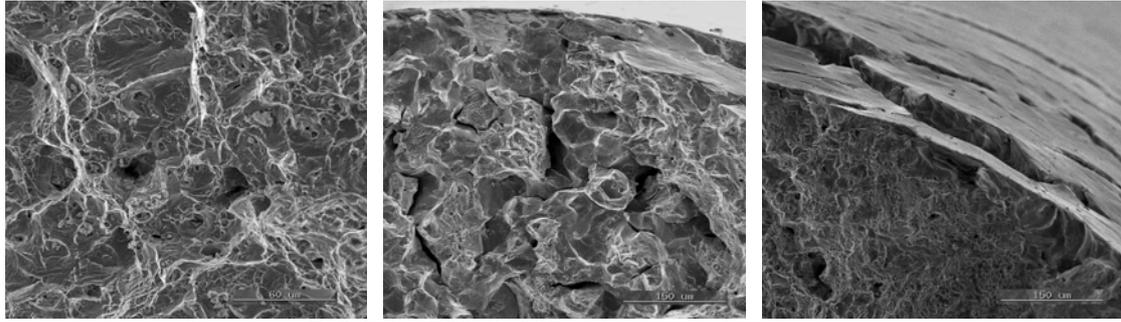


Figura 9. Inconel 718 CR – 700°C/ 625 MPa: (a) centro; (b) borda; e (c) lateral.

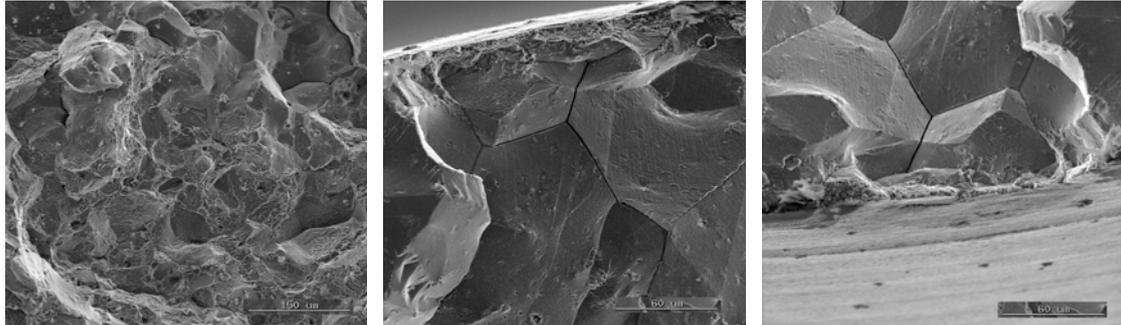


Figura 10. Inconel 718 DE – 700°C/ 625 MPa: (a) centro; (b) borda; e (c) lateral.

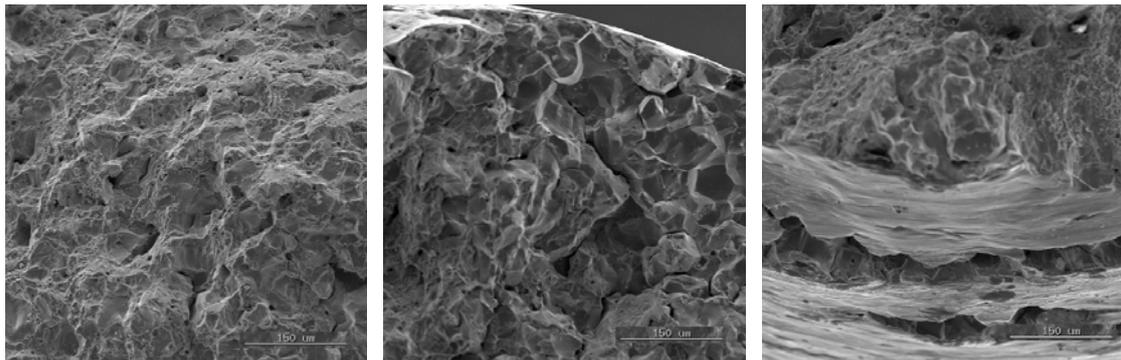


Figura 11. Inconel 718 CR – 700°C/ 700 MPa: (a) centro; (b) borda; e (c) lateral..

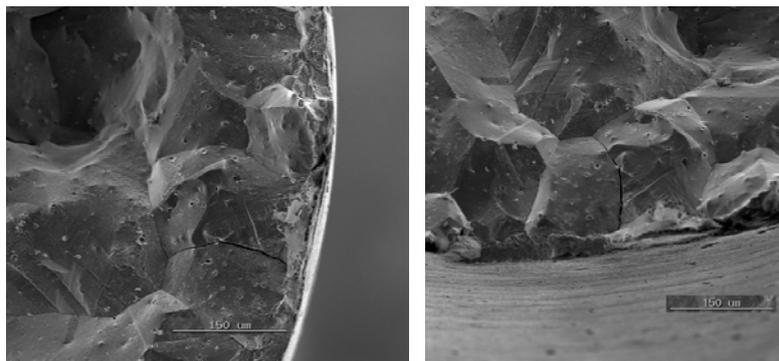


Figura 12. Inconel 718 DE – 700°C/ 700 MPa: (a) borda; e (b) lateral.

4 DISCUSSÃO

Os resultados apresentados na Tabela 2 e nas Figuras 4 a 6 indicam aumento da resistência à fluência após tratamento térmico de duplo envelhecimento, evidenciado pelas menores taxas de fluência secundária, maiores tempos de fluência primária e de fluência até a ruptura. Ainda observa-se grande redução nos valores de

deformação até a fratura para as amostras DE. O mecanismo predominante de fratura para as amostras CR e DE dá-se por ruptura clivagem intergranular, principalmente devido à presença da fase delta δ nos contornos de grão. Contudo, nas amostras CR e nas tensões de 510 MPa e 625 MPa, observam-se regiões da superfície da fratura com a presença de microcavidades.

5 CONCLUSÃO

O efeito do tratamento térmico aumenta a resistência à fluência, pelos mecanismos de endurecimento clássicos: fases intermetálicas, formadas por elementos como gama linha (γ') e gama duas linhas (γ''), atuando de forma efetiva no bloqueio da movimentação de discordâncias como também no escorregamento de contorno de grão.

Entretanto, faz-se necessário um aprofundamento no estudo relacionado ao mecanismo dominante de fluência para a superliga Inconel 718, nas condições propostas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao ITA/DCTA, ao IPEN, e à EEL-USP pelo apoio ao desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Nabarro, F.R.N; Villiers, H.L. Physics of Creep. London: Taylor & Francis, 1995. cap. 2, p. 25-31.
- 2 Reis, D. A. P. Efeito do recobrimento cerâmico e da atmosfera de ensaio na fluência de liga metálica refratária de titânio – São José dos Campos: INPE, 2005. p. 35 (INPE-14182-TDI/1094)
- 3 Wilshire, B; Evans, R.W. Creep behaviour of crystalline solids. Swansea: Pineridge Press, 1985. cap. 3, p.91-92.
- 4 Sims, C.T.; Stoloff, N.S.; Hagel, W.C. Superalloys II. Canada: Wiley-Interscience.1987. cap. 1.
- 5 C.-M. Kuo; Y.-T. Yanga; H.-Y. Borb; C.-N. Wei b; C.-C. Tai. Effect of double aging treatment on structure in Inconel 718 alloy. Journal of Material Science 39 (2004), p. 2593-2595.
- 6 ASTM E-139/83, American Society For Testing And Materials, 1990, Surface Engineering, v. 5, Philadelphia.