



# ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA SUPERLIGA INCONEL 718 EM TEMPERATURAS ELEVADAS<sup>1</sup>

Tarcila Sugahara<sup>2</sup>  
Ana Cláudia de Oliveira Hirschmann<sup>3</sup>  
Danieli Aparecida Pereira Reis<sup>4</sup>  
Carlos de Moura Neto<sup>5</sup>  
Mariano Castagnet<sup>6</sup>  
Antônio Augusto Couto<sup>7</sup>

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo a determinação de algumas propriedades mecânicas da superliga Inconel 718 obtidas por meio de ensaios de tração a quente. Essas propriedades como o limite convencional de escoamento para 0,2% de deformação plástica ( $\sigma_e$ ), limite de resistência ( $\sigma_r$ ), e o alongamento específico uniforme ( $\epsilon_u$ ), são parâmetros importantes no estudo do comportamento mecânico do material. A superliga foi submetida a ensaios de tração a quente nas condições de temperatura 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. Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para a obtenção de imagens da superfície de fratura dos corpos-de-prova. As imagens da superfície de fratura foram analisadas a fim de se relacionar a temperatura do ensaio com o tipo de mecanismo de fratura.

**Palavras-chave:** Inconel 718; Tração à quente; Temperaturas elevadas.

## STUDY OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF INCONEL 718 SUPERALLOY AT HIGH TEMPERATURES

### Abstract

This study aims to determine some mechanical properties of Inconel 718 super alloy obtained through hot tensile tests. These properties as the conventional yield strength to 0.2% of plastic strain ( $\sigma_e$ ), ultimate strength ( $\sigma_r$ ), and specific elongation assessment ( $\epsilon_u$ ) are important parameters in the study of the mechanical material behavior. The superalloy was subjected to hot tensile tests at 600, 650, 700, 750, 800 and 850°C and a strain rate of 0.5 mm/min ( $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) according to ASTM E-8. It is used a scanning electron microscope (SEM) to obtain images of the fracture surface of specimens. The images of the fracture surface will be analyzed in order to relate the temperature of the test with the type of mechanism of fracture.

**Key words:** Inconel 718; Hot tensile test; High temperatures.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Mestranda, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA.

<sup>3</sup> Doutora, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA.

<sup>4</sup> Doutora, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, Sócia Titular da ABM.

<sup>5</sup> Professor Associado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, Sócio Titular da ABM.

<sup>6</sup> Mestre, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN.

<sup>7</sup> Professor Doutor, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN e Universidade Presbiteriana Mackenzie.



## 1 INTRODUÇÃO

O comportamento de metais e ligas durante deformação em altas temperaturas é complexo e muda com parâmetros de processamento termomecânicos e com as condições de trabalho. As superligas são materiais muito utilizados em aplicações aeroespaciais. Dentre as categorias de superligas, o Inconel 718 destaca-se devido as suas propriedades como: elevada resistência mecânica, boa resistência à fadiga e fluência, boa resistência à corrosão e capacidade de operar continuamente em temperaturas elevadas.<sup>(1)</sup>

O Inconel 718 pertence à família das superligas à base de Ni-Cr que tem uma larga faixa de composições e propriedades mecânicas. Geralmente as superligas da família Inconel também contêm Al, Ti, Nb, Co, Cu, e W que aumentam a resistência mecânica e à corrosão. O Fe também está presente em quantidades que variam de 1% a 20%.<sup>(2)</sup> Inicialmente desenvolvida como material de disco para *turbofans* de aeronaves, a liga 718 teve, nos últimos anos, seu uso estendido a outras peças de motores, como parafusos e eixos de rotor, sendo seu emprego adequado às indústrias nuclear, criogênica e petrolífera.<sup>(3)</sup>

O ensaio de tração a quente determina propriedades como o limite convencional de escoamento para 0,2% de deformação plástica ( $\sigma_e$ ), limite de resistência ( $\sigma_r$ ), e o alongamento específico uniforme ( $\epsilon_u$ ), que são parâmetros importantes no estudo do comportamento mecânico de um material. O objetivo deste trabalho é a determinação de propriedades mecânicas da superliga Inconel 718 obtidas por meio dos ensaios de tração a quente.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A superliga Inconel 718 utilizada neste trabalho foi fornecida pela empresa Villares Metals S.A. (Sumaré-SP). O material teve uma fusão em forno VIM, refusão em VAR, tratamento térmico de homogeneização, forjamento a quente em matriz aberta para desbaste, laminação a quente de desbaste e laminação a quente de acabamento.

A composição da superliga é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química da superliga Inconel 718<sup>(1)</sup>

Elementos Químicos	(% p)
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



Foi utilizado microscópio óptico Leica modelo DMRXP e microscópio eletrônico de varredura da marca LEO modelo 435 VPI.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Ensaio de Dureza

Foi realizado um ensaio de dureza em uma máquina modelo Futuretech FM com carga de 500 gF (5 indentações), na escala de microdureza Vickers e o valor obtido para a liga foi 344,06 HV, e que se apresenta em conformidade com os valores fornecidos pela Villares Metals S.A.

Na Figura 2 pode ser observado que a microestrutura da liga Inconel 718 (como recebido) é uma estrutura de grãos heterogêneos. Além disso, pode-se notar uma pequena fração de partículas de carbonetos distribuídas de maneira não uniforme pela matriz. A fase  $\gamma$  aparece mais clara nas micrografias em relação à fase  $\gamma'$  (em pequena quantidade, porque não houve um tratamento térmico de envelhecimento).

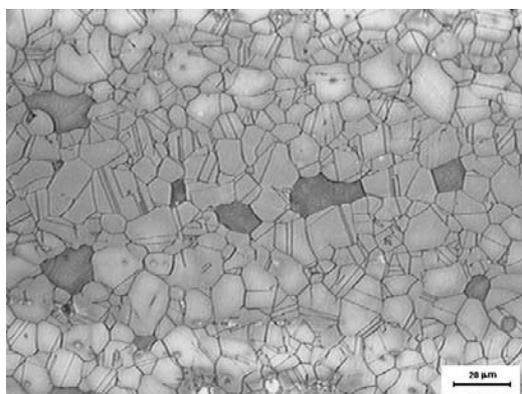


Figura 2. Microestrutura da liga de Inconel 718, como recebido.<sup>(1)</sup>

#### 3.2 Ensaio de Tração à Quente

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

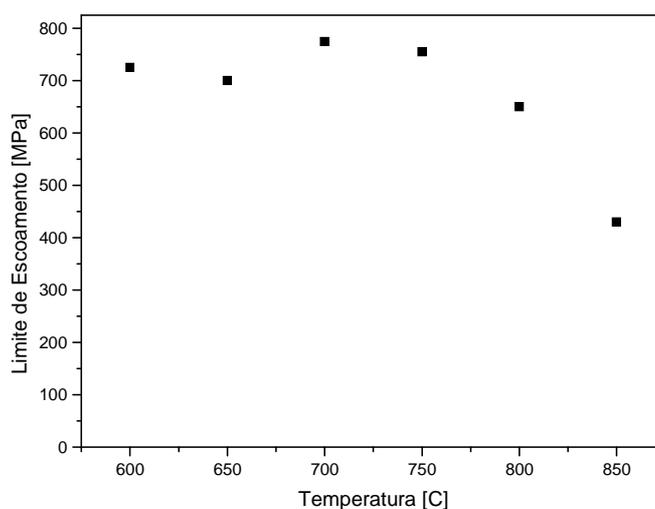
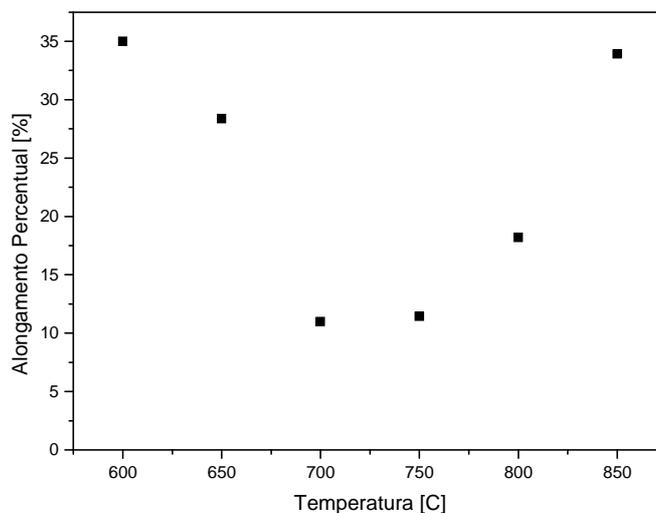


Figura 3. Curva do limite de escoamento x temperatura obtida para a liga Inconel 718 em temperaturas de 600°C, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C e 850°C.

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



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

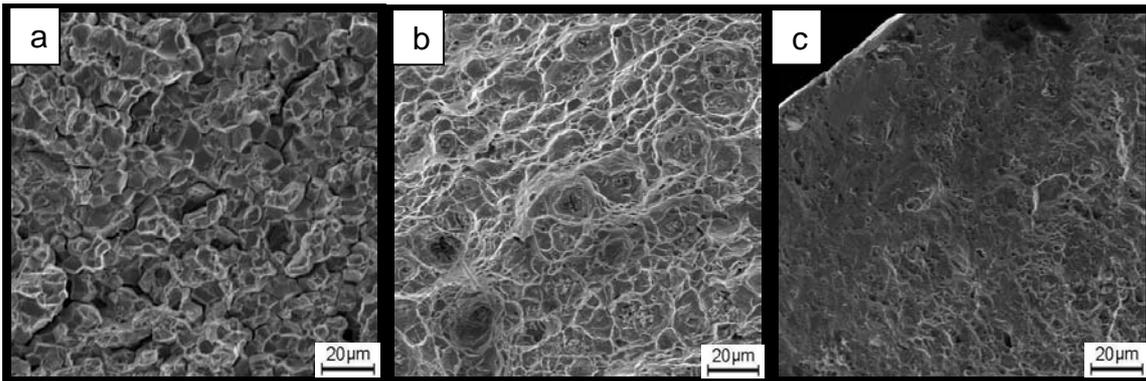
A Tabela 2 apresenta os valores relativos ao limite de escoamento ( $\sigma_e$ ), limite de resistência ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ), alongamento percentual ( $A_p$ ).

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

Temperatura (°C)	$\sigma_e$ (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$A_p$ (%)
600	725	1059	35
650	700	974	28,37
700	774	888	11
750	755	811	11,44
800	650	664	18,20
850	430	435	33,91

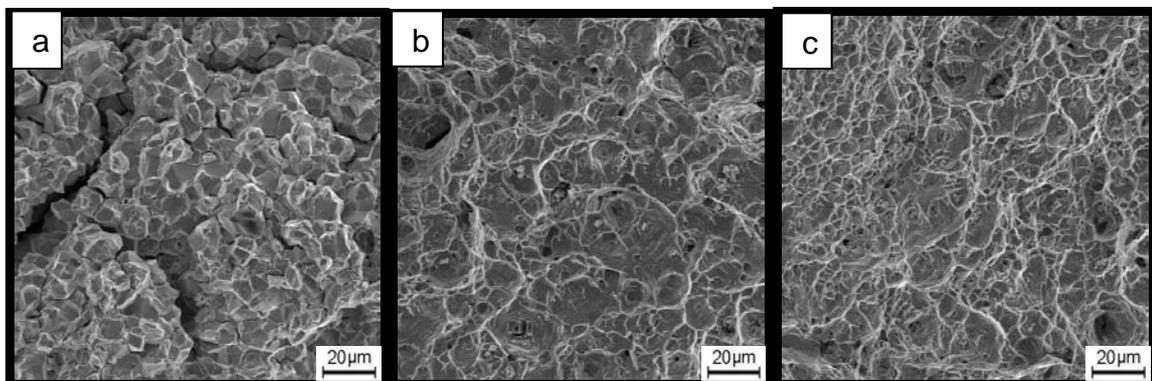
### 3.3 Análise Fractográfica

A Figura 5 apresenta imagens da análise fractográfica da superliga Inconel 718 após ensaio de tração à quente a 650°C e velocidade de 0,5 mm/min, obtidas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura.



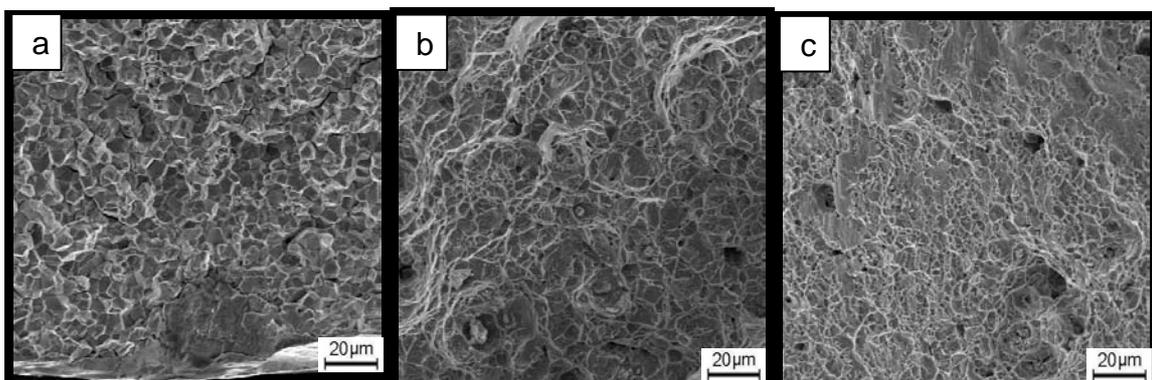
**Figura 5** – Micrografia da superliga Inconel 718 (aumento de 500X) após ensaio de tração à quente a 650°C. a) região da borda b) região central c) região lateral.

A Figura 6 apresenta imagens da análise fractográfica da superliga Inconel 718 após ensaio de tração à quente a 700°C e velocidade de 0,5 mm/min, obtidas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura.



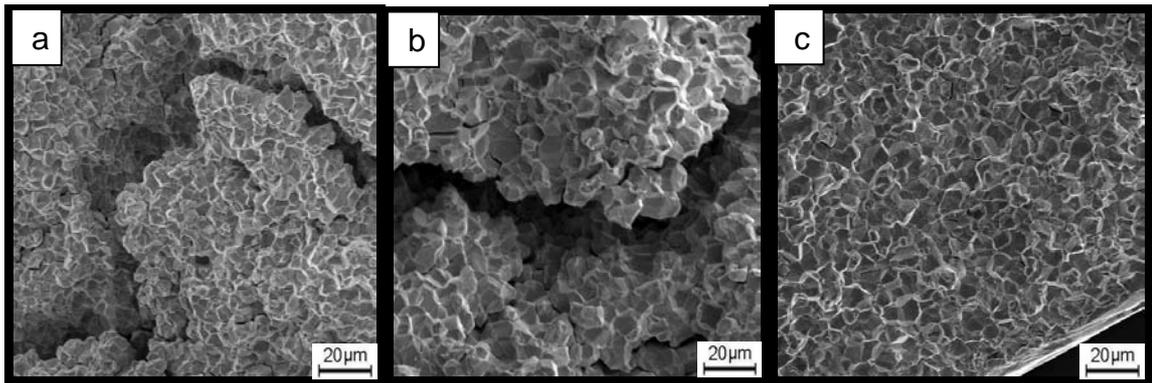
**Figura 6** – Micrografia da superliga Inconel 718 (aumento de 500X) após ensaio de tração à quente a 700°C. a) região da borda b) região central c) região lateral.

A Figura 7 apresenta imagens da análise fractográfica da superliga Inconel 718 após ensaio de tração à quente a 750°C e velocidade de 0,5 mm/min, obtidas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura.



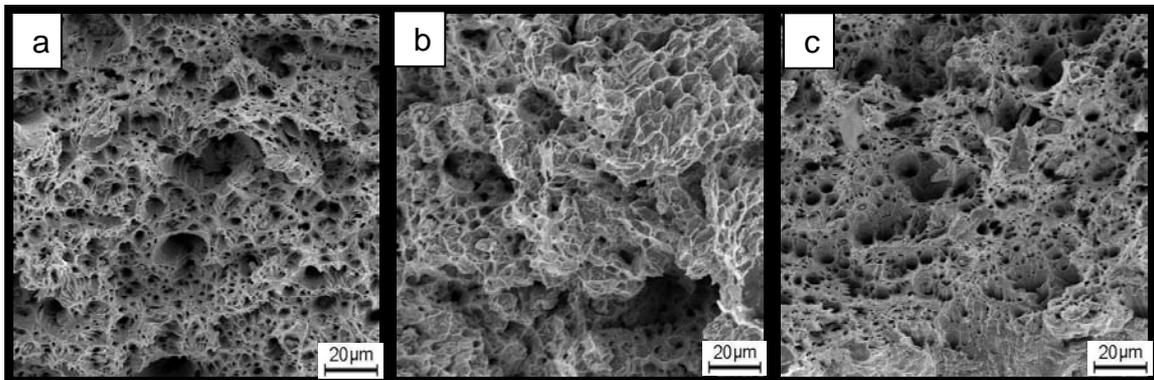
**Figura 7** – Micrografia da superliga Inconel 718 (aumento de 500X) após ensaio de tração à quente a 750°C. a) região da borda b) região central c) região lateral.

A Figura 8 apresenta imagens da análise fractográfica da superliga Inconel 718 após ensaio de tração à quente a 800°C e velocidade de 0,5 mm/min, obtidas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura.



**Figura 8** – Micrografia da superliga Inconel 718 (aumento de 500X) após ensaio de tração à quente a 800°C. a) região da borda b) região central c) região lateral.

A Figura 9 apresenta imagens da análise fractográfica da superliga Inconel 718 após ensaio de tração à quente a 850°C e velocidade de 0,5 mm/min, obtidas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura.



**Figura 9** – Micrografia da superliga Inconel 718 (aumento de 500X) após ensaio de tração à quente a 850°C. a) região da borda b) região central c) região lateral.

#### 4 DISCUSSÃO

Todas as curvas tensão-deformação determinadas no ensaio de tração à quente para a superliga Inconel 718 apresentaram um comportamento típico de materiais metálicos. Ocorre um aumento de tensão até um valor máximo, seguido de amolecimento, 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 diminuiu 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, provavelmente, à presença de precipitados endurecedores que se formam em temperaturas próximas a esta. Os resultados obtidos devem estar associados à competição entre o amolecimento causado pelo aumento da temperatura de ensaio e a precipitação de compostos endurecedores.



Na Figura 4, observa-se uma diminuição do alongamento percentual até temperaturas na faixa de 700°C a 750°C. A partir de stas temperaturas de ensaio, o alongamento percentual aumenta para as temperaturas de 800 e 850°C. O alongamento teve um comportamento inverso ao observado pelo limite de escoamento.

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 precipitados endurecedores numa faixa de temperaturas. 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.

Nas Figuras 5, 6, 7, 8 e 9, o exame das superfícies de fratura dos corpos-de-prova de tração evidencia que com o aumento da temperatura de ensaio o mecanismo de fratura atuante 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

O limite de resistência da liga Inconel 718 diminui com o aumento da temperatura.

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, provavelmente, à presença de precipitados endurecedores que se formam em temperaturas próximas a esta.

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.

## 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, D.A.P, HIRSCHMANN, A.O., PIORINO NETO, F. Estudo do comportamento em fluência da superliga Inconel 718, ENCITA 2009, São José dos Campos.
- 2 THOMAS, A., EL-WAHABI, M., CABRERA, J.M., PRADO, J.M. High temperature deformation of Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology* 177, 469-472, 2006.
- 3 SIMS, T.S., STOLOFF, N., HAGEL, W.C. Superalloys II High Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power, ed. *John Willey*, New York, 1987.

- 4 ASTM E-8, American Association State Highway and Transportation Officials Standard - Annual Book of ASTM Standards.
- 5 KIM, D.H., KIM, J.H., SA, J.W, LEE, Y.S., PARK, C.K., MOON, S.I. Stress rupture characteristics of Inconel 718 alloy for ramjet combustor, *Materials Science and Engineering A*, 483-484, 262-265, 2008.
- 6 COUTO, A.A, 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, IPEN, São Paulo, 2008.
- 7 HIRSCHMANN, A.C.O., MOURA NETO, C., REIS, D.A.P., SUGAHARA, T., COUTO, A.A., CASTAGNET, M., PIORINO, F., BARBOZA, M.J.R. Comportamento mecânico da liga Inconel 718 sob condições de tração a quente, CIBIM, 2009.
- 8 GIAMPAOLO, T. " The gas turbine handbook: Principles and practices "2. ed., Marcel Dekker, Inc. 2002.
- 9 EZUGWU, E.O., WANG, Z.M., MACHADO, A.R. - The machinability of nickel-based alloys: a review. - *Journal of Materials Processing Technology* v. 86, p.1-16, 1999.
- 10 BARBOSA, C., NASCIMENTO, J.L., CAMINHA, I.M.V., ABUD, I.C. Microstructural aspects of the failure analysis of nickel base superalloys components. *Engineering Failure Analysis* v.12 p. 348–361, 2005.