

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE TIRAS DE INCONEL 718 SUBMETIDAS A DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS DE ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO¹

Antonio Carlos Strabelli Junior²

Renato Paulo Rezende³

Olandir Vercino Correa⁴

Clarice Terui Kunioshi⁵

Resumo

Dentro do projeto nuclear da Marinha, a fabricação do elemento combustível (EC) contempla a montagem e confecção das grades espaçadoras (GE) – componente estrutural responsável pela fixação das varetas combustíveis (VC), e que é composta por um arranjo de tiras de Inconel 718 estampadas e encaixadas. A pesquisa visa caracterizar as propriedades mecânicas da liga de Inconel 718 após diferentes tratamentos térmicos de envelhecimento, bem como estudar o processo de brasagem pelo qual a mesma será submetida para a confecção das grades espaçadoras (GE). Ensaios mecânicos de tração e de microdureza, além de ensaios metalográficos foram realizados com o objetivo de estudar as variações das propriedades mecânicas de acordo com os diferentes tratamentos e processos de brasagem utilizados nesta liga.

Palavras-chave: Inconel 718; Envelhecimento; Brasagem; Elemento combustível.

CHARACTERIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF INCONEL 718 STRIPS UNDER DIFFERENT PRECIPITATION HARDENING HEAT TREATMENTS

Abstract

In the Brazilian Navy Nuclear Project, the fabrication of the fuel cell includes the manufacture and assembly of the spacer grids - structural components responsible for the fuel rods fixation. These spacer grids consist of an arrangement of strips of Inconel 718 stamped and attached. The research aims to characterize the mechanical properties of Inconel 718 after different heat treatments of aging, as well as studying the brazing process by which the alloy shall be subject to the production of spacer grids (GE). Tensile tests, microhardness tests and metallography were carried out to observe the influence of different heat treatments and brazing process on the mechanical properties.

Keywords: Inconel 718; Aging heat treatment; Brazing; Fuel cell.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Graduando de Engenharia Metalúrgica. Bolsista PIBITI no Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo-CTMSP. São Paulo, SP, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico. Pesquisador do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo-CTMSP. São Paulo, SP, Brasil.

⁴ Químico. Técnico responsável pelo Laboratório de Corrosão e Tratamento de Superfície LABCORTS do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM). IPEN/CNEN-SP. São Paulo, SP, Brasil.

⁵ Engenheira de Materiais. Dra. Pesquisadora do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo-CTMSP. São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O CTMSP – Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo é o responsável pelo desenvolvimento e fabricação do elemento combustível (EC) do primeiro núcleo do Laboratório de Geração Núcleo Elétrica (LABGENE). Para isso, é necessário que o projeto seja desenvolvido de acordo com as normas em vigor (CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear), de maneira a garantir que o EC seja seguro, confiável e licenciável, utilizando-se um processo de fabricação qualificado, testado e reproduzível e um produto final que atenda aos limites de segurança e critérios de desempenho.

Esse projeto do EC envolve, em especial, a fabricação das grades espaçadoras (GE) – componente estrutural responsável pela fixação das varetas combustíveis (VC), que é composta por um arranjo de tiras de Inconel 718 estampadas e encaixadas. O processo de fabricação foi desenvolvido no final de 90 e pode ser dividido em duas etapas distintas. A primeira refere-se à estampagem das tiras e a segunda refere-se à niquelação, montagem e brasagem.

O Inconel 718 é uma liga de níquel endurecível por precipitação, que possui uma boa resistência à corrosão e alta resistência mecânica. No caso específico das tiras para a GE, elas devem apresentar, além das propriedades mecânicas adequadas, rigidez das molas (estampadas nas tiras) suficiente para segurar as VC. A magnitude da força dessas molas de fixação das VC na GE deve ser alta o suficiente para segurá-las na posição e minimizar o desgaste dos tubos devido à movimentação relativa das superfícies em contato da grade e da vareta, sem, no entanto, aplicar tensões elevadas no revestimento da VC nestes pontos de contato. As GE devem, também, permitir a expansão térmica diferencial das VC em relação à estrutura do elemento impondo pequena restrição que, no entanto, não deve ser suficiente para ocasionar a flambagem das varetas.

Como existe o processo de brasagem das GE, que é realizada a uma temperatura em torno de 1020-1060°C, essa etapa foi acrescentada ao ciclo de tratamento térmico de envelhecimento das tiras da GE, que é feito na faixa de temperatura de 620 a 740°C.

1.1 Brasagem

Processo para união de materiais que consiste da fusão, fluidez e solidificação de um metal preenchedor para a formação de uma estrutura seladora e/ou de ligação, tendo como particularidade o fato de que esta ligação é formada somente pela fusão do metal preenchedor e não das partes a serem unidas.

Em uma definição mais técnica, descrita pela AWS (*American Welding Society*), brasagem é:

Um grupo de processos de soldagem que causa a união dos materiais pelo aquecimento dos mesmos a uma temperatura adequada e pelo uso de um metal preenchedor que possua temperatura liquidus acima de 450°C e abaixo da temperatura solidus dos materiais a serem unidos. O metal preenchedor é distribuído entre as superfícies justapostas da junta por atração capilar.⁽¹⁾ [tradução do autor].

A qualidade de uma brasagem está diretamente relacionada à limpeza e à proteção contra excessiva oxidação das partes a serem unidas, além do formato da junta na qual o metal preenchedor será depositado e do tipo de ciclo térmico que

será adotado para a realização de tal processo, além da escolha deste metal de ligação (fatores relacionados, principalmente, à viscosidade do mesmo).

A formação de óxidos prejudica a molhabilidade do metal base pelo metal preenchedor na superfície do substrato durante o processo de brasagem. A utilização de revestimentos, como a niquelação, tenta garantir tais condições, além do fato de inibir a rápida difusão de elementos presentes na pasta para o metal base, e a subsequente formação de fases frágeis intermetálicas.

1.2 Envelhecimento

Etapa caracterizada pela precipitação de partículas na matriz do material. Inicia-se com a nucleação de precipitados, seguida pelo crescimento destes (atenta-se para o fato que estas duas ações podem ocorrer simultaneamente, porém, o crescimento só ocorre em precipitados previamente nucleados). A velocidade em que ocorre a precipitação é diretamente dependente da temperatura. Em baixas temperaturas, períodos maiores de tempo são necessários já que a taxa de difusão de elementos é lenta. Também temperaturas prontamente abaixo da curva solvus levam à lentidão da precipitação, já que a solução sólida está pouco saturada nestas condições e a taxa de queda da energia livre de Gibbs é muito baixa.

A precipitação não ocorre imediatamente com o início da etapa de envelhecimento, requerendo um tempo mínimo chamado de período de incubação, que representa o intervalo de tempo necessário para que se torne visível os primeiros núcleos estáveis de precipitados.

O principal efeito da precipitação é o aumento da dureza causado na liga. Fixada a temperatura de envelhecimento, alcança-se uma dureza máxima em certo intervalo de tratamento, aumentando-se este intervalo começa a ocorrer diminuição da dureza alcançada, efeito conhecido como superenvelhecimento.

Uma característica significativa do endurecimento por precipitação está no fato de que os precipitados que se originam não estão normalmente em sua fase mais estável. O aumento da dureza de uma liga está diretamente relacionado com o aumento da dificuldade das discordâncias em se movimentarem. A dureza máxima está associada com um ótimo tamanho de partícula e sua correspondente quantidade, enquanto o superenvelhecimento se relaciona com pequenas quantidades de grandes partículas no reticulado.

1.3 Tratamento de Envelhecimento no Inconel 718

As fases metaestáveis γ' e γ'' são as principais responsáveis pelo endurecimento desta liga, principalmente a segunda, pelo fato da mesma apresentar maior taxa de crescimento ao longo do tratamento, impor maiores deformações ao reticulado e possuir maior fração volumétrica frente à primeira. Tanto a fase γ' e γ'' apresentam estequiometria N_3M , onde para as duas fases N representa os átomos de níquel (Ni), enquanto que para a fase γ' M representa átomos de alumínio (Al) e/ou titânio (Ti), e para γ'' M representa átomos de nióbio (Nb). A Figura 1 mostra a estrutura cubica de face centrada ($L1_2$) da fase γ' , bem como sua morfologia usual de corpos esféricos. A fase γ'' , de aspecto alongado e elíptico, apresenta estrutura tetragonal de corpo centrado (DO_{22}), podendo esta ser visualizada na Figura 2.

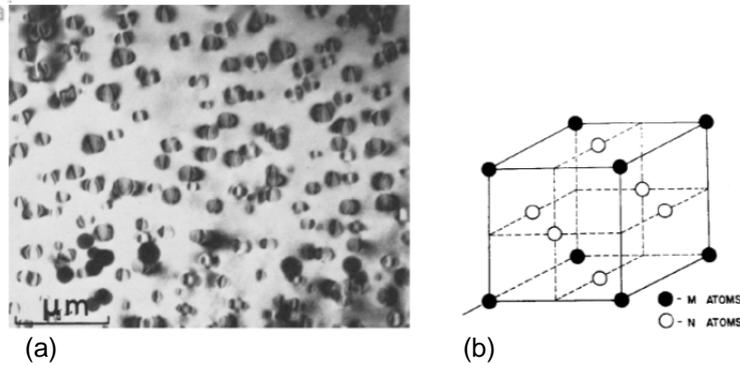


Figura 1. (a) Morfologia dos precipitados γ' em uma liga de níquel envelhecida por 4 h à 1123K.⁽³⁾ (b) Célula unitária de γ' .⁽⁴⁾

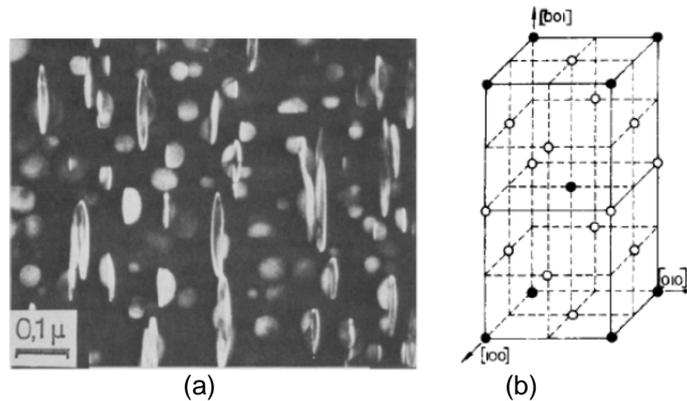


Figura 2. (a) Morfologia dos precipitados γ'' (partículas alongadas) em uma liga de níquel envelhecida por 128 h à 1023K.⁽²⁾ (b) Célula unitária de γ'' .⁽⁴⁾

Cozar e Pineau⁽²⁾ identificaram a existência de morfologias diferentes, bem como mudanças nas frações volumétricas, para com as fases γ' e γ'' mediante a variação de elementos atômicos presentes, principalmente em relação às variações quantitativas de alumínio, titânio e nióbio. O aumento na relação (Al+Ti)/Nb faz com ocorra maior fração volumétrica da fase γ' em relação à γ'' . Somado a isto, sob certas condições de tratamento e composições da liga, pode a mesma obter uma morfologia na qual a fase γ' assume uma forma cúbica e esta tem suas 6 faces em contato com a fase γ'' , sendo este arranjo denominado de “morfologia compacta”. Sundararaman, Mukhopadhyay e Banerjee⁽⁴⁾ avançaram os estudos referentes a tais morfologias, determinando que a presença da morfologia compacta não se fazia presente na liga de Inconel 718, porém, que os precipitados em questão cresciam em relação direta à raiz cúbica da temperatura do tratamento térmico.

Os estudos realizados ao longo dos anos nesta liga determinaram a existência de uma relação física entre estas fases nos mais variados tratamentos de envelhecimento aplicados, principalmente naqueles realizados à temperaturas próximas de 700°C, observando maiores sítios de nucleação da fase γ'' em contato com a fase γ' do que a formação de núcleos solitários. Tal fato levantou a discussão sobre qual fase precipitaria em primeiro lugar. Talukder et al.⁽⁵⁾ vieram a demonstrar que a fase γ'' é a que primeiro se nucleia na liga, porém, ambas as fases se fazem presentes em todas as etapas da nucleação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido com tiras estampadas e niqueladas de Inconel 718 semelhantes à Figura 3. O trabalho pode ser dividido em duas etapas - um estudo da brasagem das tiras e o próprio tratamento de envelhecimento das mesmas.



Figura 3. Seção de uma tira de Inconel 718 utilizada neste estudo (componente primário para montagem das grades espaçadoras).

A preparação metalográfica dos corpos de prova foi realizada através do lixamento das amostras, com lixas de granulometria de 220# a 1200#, seguido do polimento das mesmas com pasta de diamante de 6,3 e 1 μm . O ataque utilizado para revelar as microestruturas foi uma solução composta por 100 mL de H_2O , 25 mL de HCl e 8 g de FeCl_3 . Ensaios de microdureza Vickers foram realizados em um microdurômetro Leitz Miniload 2 com carga de 1030 mN conforme a norma ASTM E384.

Ensaios mecânicos de tração das tiras de Inconel 718 e de corpos de prova de brasagem, bem como a execução de ensaios de compressão das molas da tira foram realizados em uma máquina de ensaios mecânicos Instron 1331, com célula de carga de 100 kN. Análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva de Raios-X (EDS) foram utilizadas ao longo deste estudo.

2.1 Método de Brasagem

Na etapa de brasagem, as tiras de Inconel foram cortadas para a confecção de corpos de prova (Figura 4) com a finalidade de simularem as regiões de junta da grade. O material para brasagem consistiu de uma mistura de uma resina (*binder*) e pó de uma liga Ni-Cr-P, BNi-7 segundo especificação AWS A5.8, de fabricação da Nicrobraz[®].



(a)

(b)

Nota: Na Figura 4(a) pode ser observado o acúmulo de material da pasta de brasagem no topo da amostra. Tanto a imagem (a) quanto a imagem (b) são de corpos de prova brasados.

Figura 4. Corpos de prova de brasagem.

Foi estudada a interação entre a pasta de brasagem e o substrato (tira de Inconel niquelada), sem que a aplicação posterior do tratamento de envelhecimento da liga. Foram selecionadas três tiras de Inconel 718 niqueladas, cujas características da camada de Ni são apresentadas na Tabela 3. Cada tira teve parte de material retirado para a execução do teste de aderência por dobramento da tira niquelada, de acordo com a norma ASTM B571 (apenas a boa aderência da camada de níquel garantiria a escolha da tira para este estudo), além da produção de 4 corpos de prova, como os apresentados na Figura 4, montados sempre com material da mesma tira de origem, não havendo combinações entre estes. Foram utilizadas duas formulações de pasta de brasagem: 93:7 e 91:9 de pó de Ni-Cr-P e *binder*, sendo estas proporções em massa. O processo de brasagem foi realizado em um forno a vácuo, à temperatura em torno de 1050°C por 5 minutos.

A pasta de brasagem (mistura pó/*binder*) foi aplicada no topo dos corpos de prova, mais precisamente na região da junta com auxílio de uma seringa e depósito de aproximadamente 200 mg de pasta, devendo esta cobrir toda a extensão do encaixe após o escoamento do material. Os corpos de prova foram brasados aos pares, com material da mesma tira, com a finalidade de se obter duas amostras submetidas às mesmas condições experimentais. As amostras brasadas foram seccionadas em três posições, base, meio e topo das tiras, e as seções transversais foram caracterizadas por microscopia óptica, MEV e EDS.

2.2 Tratamento Térmico de Envelhecimento

Inicialmente, foram adotados três tratamentos térmicos, detalhados na Tabela 1, que foram realizados com o processo de brasagem. Para cada tratamento foram obtidos, no mínimo, dez corpos de prova, semelhantes ao da Figura 4, os quais foram envelhecidos na mesma corrida do forno, para que estes tivessem históricos semelhantes. Para cada tratamento, utilizou-se um corpo de prova para metalografia e microdureza, sendo os demais destinados para testes de compressão da mola, cujo foco principal foi a obtenção de resultados relacionados a três valores de distensão da mola pré-estabelecidos em projeto.

Tabela 1. Tratamentos térmicos de envelhecimento adotados.

Tratamento 1	Tratamento 2	Tratamento 3
720°C por 8 horas, seguido de 10 horas à temperatura de 620°C, totalizando 18 horas de tratamento.	800°C por 8 horas	800°C por 6 horas

Nota: Na primeira coluna da tabela destaca-se um tratamento convencional para esta liga.

Para os testes mecânicos foram utilizadas máquinas de ensaio de tração, sendo necessário o acoplamento de um dispositivo semelhante ao da Figura 5, sistema que foi elaborado com base no artigo de Waseem et al.,⁽⁶⁾ para os testes de compressão das molas estampadas nas tiras.

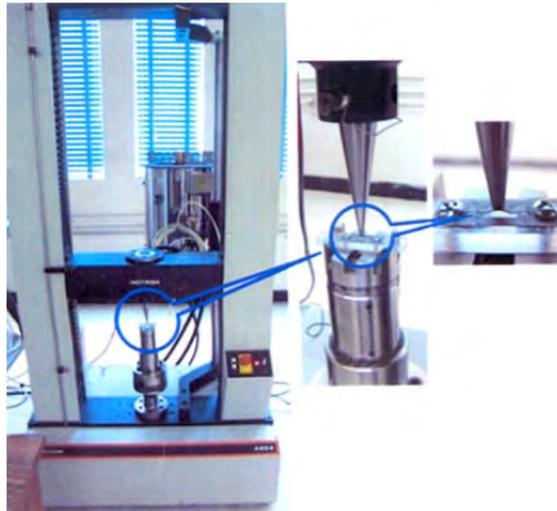
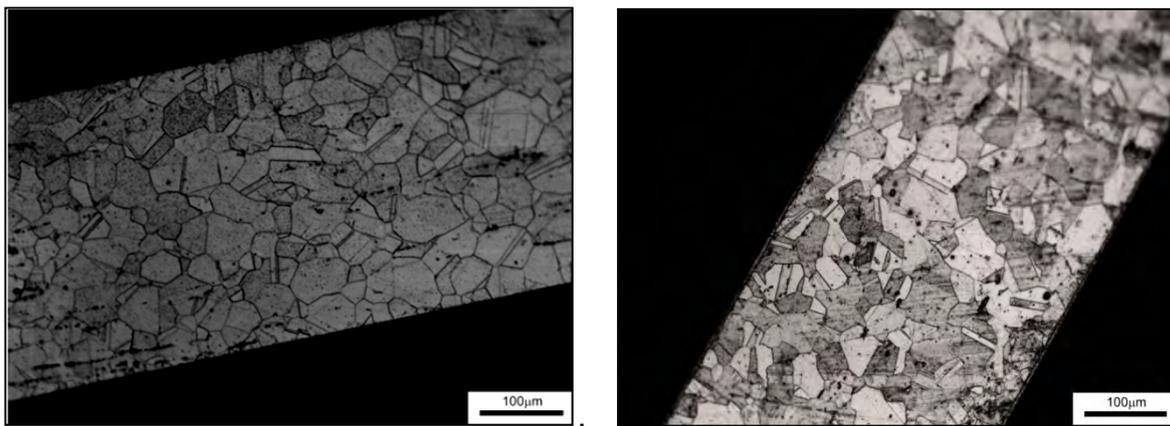


Figura 5. Imagem ilustrativa do aparato para medição da força da mola.⁽⁶⁾

3 RESULTADOS

A Figura 6 mostra as microestruturas das seções longitudinal e transversal das tiras de Inconel 718 utilizadas neste estudo. Foram realizadas caracterizações de microdureza Vickers e medidas de tamanho de grão de acordo com a norma ASTM E112,⁽⁷⁾ cujos resultados são apresentados na Tabela 2.



(a) seção transversal

(b) seção longitudinal

Figura 6. Microestrutura da tira de Inconel 718 no estado inicial.

Tabela 2. Propriedades do Inconel 718 no estado inicial

Propriedades	Seção Transversal	Seção Longitudinal
Dureza (HV)	231 ± 4	216 ± 10
Tamanho de Grão (µm)	27 ± 1	26 ± 1
Tamanho de Grão (ASTM)	7,48 ± 0,25	7,53 ± 0,25

3.1 Resultados da Etapa de Brasagem

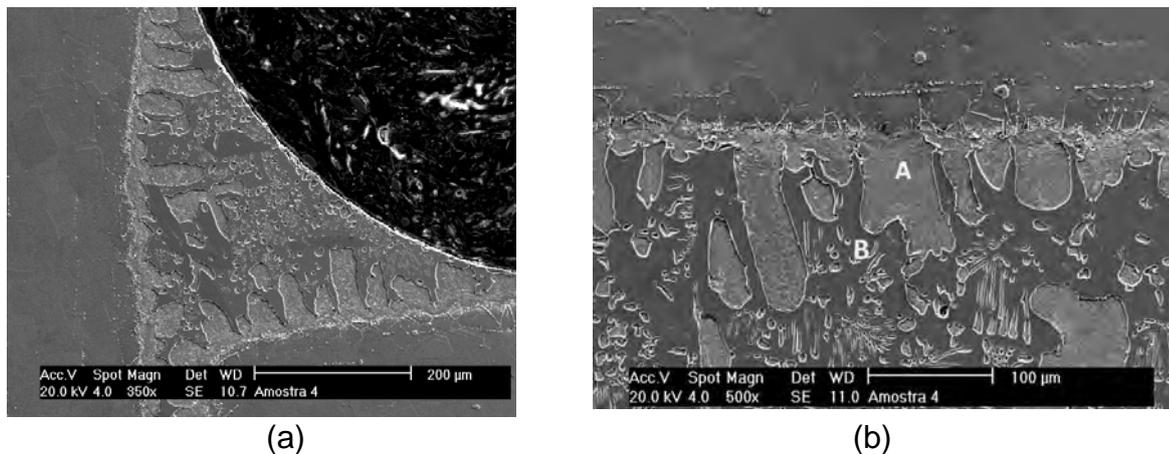
Foram selecionadas 3 tiras com diferentes espessuras de camada, medidas através da metalografia (Tabela 3).

Tabela 3. Tabela de espessura de camadas niqueladas

	Tira 1	Tira 2	Tira 3
Espessura da camada (µm)	3,3 ± 0,3	12,8 ± 0,8	6,7 ± 0,7

Entre os dois tipos de formulação de pasta de brasagem, o que continha uma menor quantidade de *binder* (93% em massa de pó e 7% em massa de *binder*) foi o que apresentou melhor resultado, uma vez que cobriu toda a extensão da junta, ao contrário da outra formulação em que a região da base dos corpos de prova apresentou falta de material.

Na metalografia dos corpos de prova foi possível determinar a existência de 2 fases que se formam na região pasta de brasagem, como pode ser vista na Figura 7. As fases em questão foram analisadas por EDS a fim de se determinar as suas composições químicas (Tabela 4).



Nota: Imagens de MEV. (a) Região da junta brasada. (b) Detalhes e determinação das fases presentes.

Figura 7. Região da brasagem.

A camada de Ni, previamente depositada nas tiras de Inconel, é incorporada na estrutura da solda, vindo esta a fazer parte da composição de ambas as fases presentes. Uma análise mais detalhada da região de interface tira/solda permitiu observar a formação de precipitados nos contornos de grão do Inconel 718 (Figura 8). As análises de composição química por EDS mostra uma grande quantidade de fósforo, o que pode implicar em uma possível fragilização dos contornos de grão, com conseqüente diminuição da resistência da brasagem.

Tabela 4. Composição química das fases A e B observadas na região de brasagem, obtidas por EDS (dados semi-quantitativos)

ELEMENTO	FASE A (% em peso)	FASE B (% em peso)
Nb	1,42	-
Ti	-	-
V	-	-
Ni	82,69	80,60
Cr	10,13	3
P	0,65	17,09
Si	0,42	-
Fe	4,69	1,15

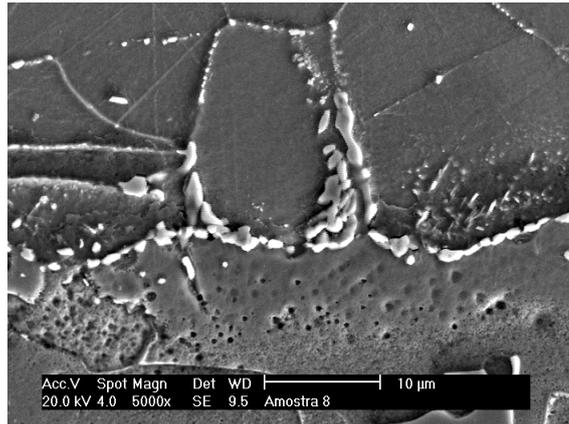


Figura 8. Precipitados nos contornos de grão do Inconel 718 na região de interface com a pasta de brasagem.

3.2 Resultados da Etapa de Envelhecimento

Após os diferentes tratamentos, as ligas mostraram alterações em suas durezas, bem como em seus tamanhos de grão, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5. Tamanho de grão e microdureza após os diferentes tratamentos

Parâmetro	Tratamento 1	Tratamento 2	Tratamento 3
Tamanho de Grão (ASTM)	7,19 ± 0,25	7,11 ± 0,25	7,40 ± 0,25
Microdureza Vickers [HV]	563 ± 20	441 ± 9	462 ± 16

No gráfico da Figura 8 temos as curvas de Força x Deslocamento das molas, junto da Tabela 6 de valores de força para determinados deslocamentos da mesma.

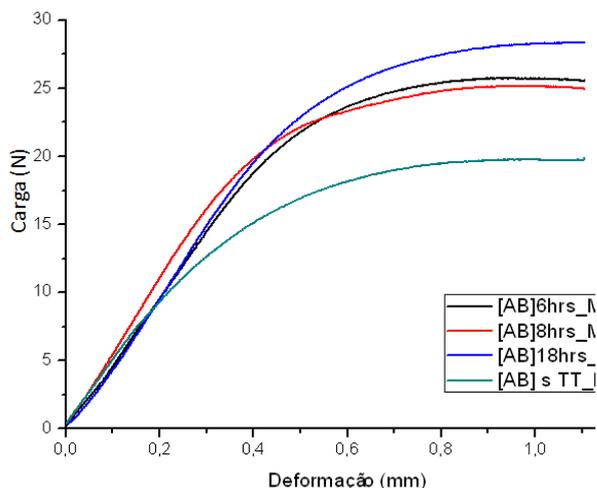


Figura 8. Curva carga x deformação para os diferentes tratamentos e para o material em sua condição inicial

Tabela 6. Valores de cargas aplicadas para certas deformações (Figura 8)

Deformação (mm)	[AB] 6 h (N)	[AB] 8 h (N)	[Ab] 18 h (N)	[AB] s TT (N)
0,32	15,44	17,01	15,93	13,17
0,42	19,51	20,40	20,33	15,55
0,52	22,23	22,47	23,43	17,22

Legenda

[AB]6hrs	Tratamento 3
[AB]8hrs	Tratamento 2
[AB]18hrs	Tratamento 1
[AB]s TT	Condição inicial do material

4 DISCUSSÕES

Com o propósito de diminuir a temperatura *liquidus* de metais e ligas de adição, elementos como P, Si, B e Pd são adicionados a esses materiais. Entretanto, fases intermetálicas extremamente duras e frágeis podem se formar e diminuir a resistência destes.

A pasta de brasagem utilizada neste estudo é composta por um pó metálico Ni-Cr-P, misturado com uma resina volátil, que desaparece durante o processo. A presença de Cr no metal de preenchimento vem a garantir maior resistência mecânica à matriz de Ni, assim como maior resistência à corrosão. O teor de fósforo, utilizado como fundente neste material, combina-se com os demais elementos produzindo fosfetos, os quais se caracterizam pela formação de fases frágeis intermetálicas presentes na região da junta e nos contornos de grão do Inconel próximos à interface.

A análise por MEV e EDS da região de brasagem mostra claramente a presença de duas fases, A e B indicadas na Figura 7(b). Caracteriza-se a fase A como sendo uma solução sólida de Ni e a fase B como sendo uma fase intermetálica de fosfetos como Ni_5P_2 , $Ni_{12}P_5$ ou, mais provavelmente, de Ni_3P (fase tetragonal de corpo centrado de composição semelhante). A fase A possui maior teor de Cr em relação à fase B, o que é explicado pela solubilidade entre estes dois elementos, sendo que o Cr apresenta baixa solubilidade em matrizes de fósforo. Observa-se, ainda, que há

difusão de elementos presentes no metal base (Inconel 718), como Nb e Fe, para a região de solda, havendo maior preferência pela fase A, fruto da solubilidade entre estes elementos e compatibilidade de reticulado cristalino.

A fase B é constituída de um material mais duro e frágil do que a fase A, sendo esta prejudicial para a integridade da brasagem, devido a sua menor capacidade de suportar esforços mecânicos ou pelo fato de constituir áreas mais susceptíveis à corrosão na região da solda.⁽⁸⁾ Uma análise mais detalhada da região de interface tira/solda permitiu observar a formação de precipitados nos contornos de grão do Inconel, sendo estes ricos em fósforo, o que pode implicar em uma possível fragilização dos contornos de grão, com conseqüente diminuição da resistência da soldagem.

Comparando as estruturas dos tratamentos de envelhecimento com a do material inicial, conclui-se que houve mudanças nas mesmas. As durezas de todas as estruturas obtiveram aumento com os tratamentos, fruto da formação de precipitados na matriz do Inconel (envelhecimento). O tamanho de grão para cada ensaio também se alterou, ocorrendo aumento em todas as condições. A disparidade entre as microdurezas das ligas tratadas pode ser explicada pela proximidade da temperatura de envelhecimento (800°C) com as curvas *solvus* dos precipitados, o que confere menor diferença de energia livre de Gibbs no processo, causando deficiências na nucleação dos mesmos, além do fato de que, de acordo com Cozar e Pineau⁽²⁾, os benefícios de dois patamares de temperatura conferem uma boa estabilidade aos precipitados, devido à morfologia que estes tomam, além da melhoria das propriedades mecânicas que são causadas pelo aumento da fração volumétrica dos precipitados que se formam em temperaturas menores.

Os resultados apontam para o fato de que os tratamentos térmicos foram benéficos para o aumento da resistência da mola, aumentando o módulo de resistência do material e aumentando os limites de escoamento destes, resultando em profundo interesse para com a sua aplicação.

5 CONCLUSÕES

Os estudos permitiram verificar o comportamento da camada de níquel nas regiões de brasagem das tiras de Inconel 718 e identificar a presença de duas fases na região brasada, sendo uma fase constituída por uma solução sólida de Ni e outra fase intermetálica frágil e dura composta de fosfetos. Foi possível, ainda, verificar que há difusão de elementos presentes no metal base (Inconel 718), como Nb e Fe, para a região de solda, havendo maior preferência pela solução sólida. A fase dura e frágil, composta por fosfetos, é prejudicial para a integridade da brasagem, devido a sua menor capacidade de suportar esforços mecânicos e pelo fato de ser mais susceptível à corrosão. Soma-se o fato de que o tratamento 1 (18 horas), sugerido na literatura, obteve melhores resultados de resistência frente aos demais tratamentos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica PIBITI (Processo nº 153285/2011-7), ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e Força Atômica LabMicro (Poli-USP), em nome do Prof. Dr. André P. Tschiptschin, e ao CTMSP, que possibilitaram a realização deste estudo. Em especial: Dr. José

Roberto Berretta, Mario Guilherme Pedroni, Márcio Justino, Rafael Rocha Maia e aos funcionários do LADICON/CTMSP.

REFERÊNCIAS

- 1 AWS Committee on Brazing and Soldering. *Brazing Handbook*. 4th. s.l. : AWS, 1991.
- 2 COZAR, R. and PINEAU, A. Morphology of γ' and γ'' Precipitates and Thermal Stability of Inconel 718 Type Alloys. *Metallurgical Transactions*. january 1973, Vol. 4, pp. 47-60.
- 3 RAGHAVAN, M. Formation of γ' and γ'' Precipitates in Cu-Ni-Nb-Al Alloys. *Metallurgical Transactions A*. may 1978, Vol. 9A, pp. 734-736.
- 4 SUNDARARAMAN, M., MUKHOPADHYAY, P. and BANERJEE, S. Some Aspects of the Precipitation of Metastable Intermetallic Phases in INCONEL 718. *Metallurgical Transactions A*. july 1992, Vol. 23A.
- 5 TALUKDER, ALAMA, et al. Precipitation and clustering in the early stages of ageing in Inconel 718. *Materials Science and Engineering A*. august 2010, Vol. 527, pp. 7770-7774.
- 6 WASEEM, N, et al. Fuel rod-to-support contact pressure and stress measurement for CHASNUPP-1(PWR) fuel. *Nuclear Engineering and Design*. 241, 2011.
- 7 ASTM E112-12. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. ASTM International, 2012.
- 8 YEH, M. and CHUANG, T. Effects of Applied Pressure on the Brazing of Superplastic Inconel 718 Superalloy. *Metallurgical and Material Transactions A*. june 1997, pp. 1367-1376.