

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE SOLUBILIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA MICROESTRUTURA DO INCONEL 625

Wesley Macedo Sales¹

Carolina Koxne Monteiro²

Aleksandra G. S. G. da Silva³

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento mecânico da liga de Inconel 625 quando submetido a diferentes parâmetros (temperatura e tempo de patamar) de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, a fim de adequar valores de dureza para que o mesmo seja utilizado como anel de vedação de um equipamento para extração de petróleo. O uso de ligas a base de Níquel na indústria de Petróleo tem sido uma alternativa para minimizar os efeitos da degradação devido a extração de petróleo cada vez mais pesados com altos teores de elementos corrosivos. Foram utilizadas amostras de Inconel 625 para realizar tratamentos térmicos de solubilização em diferentes condições, com o objetivo de adequar a dureza e tenacidade para níveis que atendam as normas NACE MR0175 E ISO 15156. De acordo com os ensaios realizados constatou-se a viabilidade do tratamento de solubilização, para os anéis de vedação, devido a melhora das propriedades mecânicas do material.

Palavras-chave: Inconel; Solubilização; Envelhecimento; Dureza.

¹ Aluno do 6º período do curso de Engenharia de Produção pela FAE Centro Universitário. Bolsista do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2017-2018). *E-mail*: w.macedosales@gmail.com

² Aluna do 8º período do curso de Engenharia Mecânica pela FAE Centro Universitário. Voluntária do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2017-2018). *E-mail*: carolinakmonteiro50@gmail.com

³ Doutora em Engenharia de Materiais pela UTFPR. Professora dos cursos de Engenharia na FAE Centro Universitário. *E-mail*: aleksandra.silva@fae.edu

INTRODUÇÃO

A liga composta basicamente de níquel-cromo-ferro, denominada comercialmente de Inconel 625, vem sendo aplicada em larga escala em campos específicos onde há necessidade de resistência a altas temperaturas, boa resistência mecânica, boa soldabilidade e excelente resistência à corrosão e oxidação (SPECIAL METALS, 2017).

Para aplicações em meios aquosos e salinos, destaca-se seu uso na indústria de óleo e gás, que aproveita as propriedades do material para garantir resistência à tração, à corrosão por *pits*, alveolar, intergranular e sobtensão. A liga está presente em conectores, cabeças de poços, vedações, molas, dutos de escape, entre outros. (SPECIAL METALS, 2017).

No campo aeroespacial torna-se interessante, além da resistência à tração, a resistência à fluência, à fadiga, à oxidação e a sua boa soldabilidade. É usada em anéis de proteção de turbinas, em componentes do sistema de escape e compressores (SPECIAL METALS, 2017).

O Inconel 625 também pode ser aplicado na indústria nuclear devido a sua alta resistência mecânica e à corrosão uniforme e alveolar, como por exemplo, em alguns componentes de reatores (SPECIAL METALS, 2017).

No Brasil, nos últimos dezoito anos, há uma taxa de crescimento na extração de petróleo de cerca de 4% ao ano, fato que se deve principalmente pelo desenvolvimento tecnológico do país. Além disso, a extração de petróleo *offshore* vem se consolidando como principal fonte de extração do mineral no país (ANP, 2017).

Com esta alta demanda se tornam cada vez mais necessárias ações voltadas ao desenvolvimento de soluções que resultem em maior eficiência e que ofereçam o menor custo para a operação.

Dentre os mecanismos usados para a extração de petróleo *offshore* tem-se a árvore de natal molhada. Equipamento que possui flanges revestidas com superligas de níquel, que oferecem propriedades mecânicas suficientes para atender os elevados níveis de pressão ao qual o dispositivo é submetido, além de maior resistência à corrosão, já que o mesmo está exposto à água salgada.

Porém existe um problema com as linhas de fluxo de produção de petróleo, que são fabricadas com aço baixo carbono e revestidas com Inconel 625 utilizando vedantes feitos de Inconel 825.

Ao colocar em contato estas duas ligas diferentes de Inconel, percebem-se alguns pontos de corrosão galvânica, já que ao colocar dois metais diferentes em contato, forma-se uma pilha, então aquele que possui a menor resistência irá corroer.

Levando em consideração esses desafios, nesse artigo serão avaliadas as modificações mecânicas da liga de Inconel 625 com o tratamento térmico de solubilização, bem como a microestrutura da liga quando tratada termicamente em diferentes condições.

Esse estudo irá avaliar também a possibilidade de substituição do anel de vedação de Inconel 825 por Inconel 625, eliminando a pilha eletroquímica e a corrosão galvânica nesta junção devido à presença de dois materiais diferentes.

Sabendo que a dureza do Inconel 825 seria em torno 200HB, utilizada no revestimento atual das cavidades anéis de vedação das flanges em estudo e como requisito de diferencial de dureza de norma NACE MR0175/ ISO 15156-1 deve ser no mínimo 40HB, o anel de Inconel 625 deve apresentar no máximo 160 HB.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para um estudo mais completo, apresentam-se nesse artigo um pouco sobre o níquel e suas ligas, vantagens e desvantagens das ligas de Inconel 625 e 825, suas principais características, além do tratamento térmico solubilização e envelhecimento.

1.1 NÍQUEL E SUAS LIGAS

O níquel (Ni) é o quinto elemento mais abundante na Terra, porém sua extração não é tão fácil, um dos motivos é que para se obtenha uma tonelada de níquel são necessárias cinquenta toneladas do minério onde ele está contido (VALLE, 2010).

Seu ponto de fusão é 1455^o C, sua massa específica é de 8,88 g/cm³, com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Apresenta-se como um metal branco prateado, similar ao ferro em alguns aspectos, porém com resistência à oxidação e à corrosão muito melhor. Utilizado principalmente na melhoria da resistência mecânica a altas temperaturas e resistência à corrosão em uma ampla faixa de ligas ferrosas e não ferrosas. Aparecendo em cerca de 3 mil tipos de ligas, associando-se mais comumente com o ferro (VALLE, 2010).

A primeira liga de níquel foi desenvolvida em 1905, com aproximadamente dois terços de níquel e um terço de cobre, ficando conhecida como Monel 400. Em relação à classificação, o níquel se divide em quatro famílias: níquel comercialmente puro, ligas binárias, ligas ternárias, ligas complexas e superligas (VALLE, 2010).

1.2 INCONEL 625 E INCONEL 825

Nas Tabelas 1 e 2 encontram-se os elementos que compõe o Inconel 625 e o Inconel 825, bem como as suas respectivas porcentagens dentro de cada liga.

TABELA 1 – Composição Química (%) Inconel 625

Níquel	58,0 mín.
Cromo	20,0-23,0
Ferro	5,0 máx.
Molibdênio	8,0 - 10,0
Nióbio	3,15-4,15
Carbono	0,10 máx.
Manganês	0,5 máx.
Silício	0,5 máx.
Fósforo	0,015 máx.
Enxofre	0,015 máx.
Alumínio	0,4 máx.
Titânio	0,4 máx.
Cobalto	1,0 máx.

FONTE: SPECIALMETALS, 2017

Tabela 2 – Composição Química (%) Inconel 825

Níquel	38,0-46,0
Cromo	19,5-23,5
Ferro	22,0 mín.
Molibdênio	2,5-3,5
Carbono	0,05 máx.
Manganês	1,0 máx.
Silício	0,5 máx.
Cobre	0,015 máx.
Enxofre	1,5-3,0
Alumínio	0,2 máx.
Titânio	0,6-1,2

FONTE: Specialmetals (2017)

Percebe-se que a composição principal de ambas as ligas é níquel, cromo e ferro, contendo também pequenas porcentagens de outros elementos. Cada elemento tem uma função específica dentro da liga para fazer com que o material tenha as características desejadas.

Por exemplo, o Cromo (Cr) faz com que se tenha um aumento na resistência à corrosão e à oxidação. O Molibdênio (Mo), o Nióbio (Nb) e o Carbono (C) aumentam a resistência mecânica e à corrosão em altas temperaturas. O Manganês (Mn) reduz a plasticidade e aumenta a capacidade de endurecimento da liga, assim como o Alumínio (Al) e o Titânio (Ti), já o Silício (Si) aumenta a fluidez (RODRIGUES e HASSUI, 2005).

Tem-se que as principais vantagens do Inconel 625 são em relação à sua resistência mecânica, sua boa soldabilidade e principalmente nas corrosões de diversos tipos.

Destacam-se a corrosão por *pits* (forma cavidades com o fundo anguloso e profundidade maior que seu diâmetro), a corrosão alveolar (forma sulcos com fundo arredondado e profundidade menor que seu diâmetro), a corrosão intergranular (aparecimento de trincas nos contornos dos grãos sem afetar o interior dos mesmos), bem como as corrosões uniformes e sobtensão (PUC RIO, 2012).

Suas desvantagens são em relação à sua usinabilidade, que não é muito boa por diversos fatores. Como o encruamento do material, que ocorre muito rápido devido aos esforços aplicados durante o processo de usinagem, a baixa condutividade térmica que faz com que o desempenho da ferramenta utilizada seja ruim, já que o calor gerado não será extraído pelo cavaco ou pelo fluido, além da presença do cromo na liga a ser usinada que contribui na formação de carbonetos prejudicando assim todo o processo (RODRIGUES e HASSUI, 2005).

Apesar de contraditório outra desvantagem são as inúmeras vantagens do Inconel 625, fazendo com que seu custo seja alto, além de ser usado para fins muito específicos, em campos como o aeroespacial, petroquímico e nuclear. Já o Inconel 825 apesar de possuir uma excelente resistência à corrosão como o Inconel 625, apresenta baixa dureza, resistência mecânica menor e maior deformabilidade (SPECIAL METALS, 2018).

1.3 SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO

Os tratamentos térmicos são usados para modificar as propriedades dos materiais de acordo com a necessidade. A temperatura, o tempo e a taxa de resfriamento são variáveis que influenciam nos resultados obtidos (VALLE, 2010).

A solubilização é o processo que ocorre quando a liga é aquecida até que os precipitados solúveis se dissolvam para só então começar o envelhecimento, onde o material fica durante um longo tempo aquecendo em uma temperatura ambiente ou em uma temperatura pouco elevada (FERNANDES, 1993).

Como o nome sugere, o tratamento de solubilização tem como função solubilizar segundas fases que apresentam efeitos indesejáveis no material (VALLE, 2010).

As ligas de níquel possuem matriz γ e podem surgir outras fases devido a grande quantidade de elementos químicos ou devido ao efeito de alguns tratamentos térmicos. A fase γ' , provinda do alumínio e titânio, junto com a fase γ'' , provinda do nióbio faz com que ocorra o endurecimento por precipitação, conhecido também como envelhecimento, assim aumentando a resistência da liga (CAVALCANTE, 2013).

Para Callister (2016) uma fase é uma porção homogênea de um sistema, tal fase possui características químicas e físicas, ou seja, podemos considerar que a mudança de fase é a mudança de um estado do material para outro estado, sendo esta mudança a principal responsável pelas novas características do material após a submissão do mesmo a um determinado tipo de tratamento.

O envelhecimento ocorre após a solubilização, e a temperatura de envelhecimento determina o tamanho, a distribuição e o tipo de precipitado (VALLE, 2010).

Fernandes (1993) caracterizou em seu estudo a microestrutura e as propriedades mecânicas da liga de Inconel 600 após o tratamento de solubilização e envelhecimento. A faixa de temperatura utilizada foi 620°C e o tempo de 1 hora. Percebeu-se em seu estudo que após a solubilização e envelhecimento houve a precipitação das fases, porém manteve-se a ductilidade. Identificou-se o endurecimento na liga, pois os valores dos ensaios foram superiores ao das amostras iniciais.

Viera (2010) analisou a influência do tratamento térmico nas propriedades mecânicas da liga de Inconel 825. A solubilização foi realizada à 1200°C por 4 horas e o envelhecimento à 900°C por 1 hora. Identificou-se uma relação maior entre a resistência à tração e a dureza após o tratamento da liga.

Valle (2010) investigou a influência dos tratamentos térmicos na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga de Inconel 718. A solubilização foi realizada a 1050°C por 5 e 10 minutos e o envelhecimento a 800°C por 6 horas. Percebeu-se que após a solubilização e envelhecimento, os materiais se tornaram mais duros e resistentes. Porém, concluiu-se também que os valores de dureza e de resistência à tração entre os materiais com e sem solubilização prévia não foram extremamente significantes.

1.4 ENSAIOS DE DUREZA

Primeiramente é preciso conhecer o real significado desta característica, para o ramo da engenharia.

Segundo Souza (1982), esta definição pode variar de acordo com a ocupação de cada avaliador. Para o autor, “um engenheiro mecânico define como a resistência a penetração de um material duro no outro.” o que pode divergir das visões de um metalurgista ou até mesmo de um projetista, por exemplo.

Para Callister (2016) esta propriedade pode ser considerada como uma medida de resistência de um material a uma deformação plástica.

O fato é que existem diversos ensaios para classificar a dureza dos materiais, tais como: dureza Brinnell, dureza Rockwell, dureza Vickers, entre outros.

2 METODOLOGIA

O material de estudo provem de um tubo de aço carbono que foi revestido com Inconel 625 através do processo de soldagem TIG modalidade arame quente. Após a soldagem foi removido através do corte apenas o revestimento para análise. As amostras tem em torno de 1cm³ de volume. Estas amostras passaram por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, para posteriormente serem analisadas as suas durezas.

2.1 PARÂMETROS

Após a análise de artigos que abordam a solubilização em ligas de níquel, determinou-se os parâmetros de tempo e temperatura para o presente estudo.

Foram utilizadas no total doze amostras de Inconel 625. Para o tratamento térmico de solubilização serão usadas seis amostras a temperatura de 1050°C e outras seis a 1150°C, os tempos serão de 5 minutos e 10 minutos. Depois envelhecimento a 800°C por 3 e 6 horas de algumas amostras.

No Quadro 1, tem-se as condições experimentais adotadas no ensaio.

QUADRO 1 – Condições experimentais

PARÂMETROS					
AMOSTRA	Solubilização		Envelhecimento		
	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	
1	1050°C	5 min	800°C	3 horas	
2	1050°C	5 min	800°C	6 horas	
3	1050°C	10 min	800°C	3 horas	
4	1050°C	10 min	800°C	6 horas	
5	1150°C	5 min	800°C	3 horas	
6	1150°C	5 min	800°C	6 horas	
7	1150°C	10 min	800°C	3 horas	
8	1150°C	10 min	800°C	6 horas	

FONTE: Os autores (2018)

2.2 PROCEDIMENTOS

Primeiramente foram medidas as durezas de todas as amostras utilizando o Durômetro Brinell. Cada amostra foi medida quatro vezes para se obter uma média, os resultados obtidos estão expostos no Quadro 2.

QUADRO 2 – Dureza (HB) Inconel 625

Amostra	Como recebido	Após solubilização	Após envelhecimento
1	266	153	195
2	275	161	209
3	277	162	205
4	280	162	200
5	280	161	196
6	282	163	204
7	283	149	189
8	290	156	190

FONTE: Os autores (2018)

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Pelo Quadro 2, pode-se verificar que os tratamentos foram eficazes para alteração na dureza. Os valores de dureza após a solubilização demonstram uma queda significativa de dureza, chegando aos valores desejados e especificados pela norma NACE MR0175/ ISO 15156-1, ou seja, em torno de 160 HB. Já quando realizado a tratamento de envelhecimento esta dureza se eleva novamente a valores não admissíveis. Esta elevação da dureza se deve provavelmente a precipitação de fases mais duras como γ' e γ'' (Valle, 2010), o que pode ser identificado em análise metalográfica e que será realizada em outra etapa do trabalho.

As amostras 7 e 8 apresentaram os menores valores de dureza depois do tratamento de solubilização, pois as mesmas foram submetidas a temperaturas maiores (1150°C) e 10 min, o que possibilitou a maior dissolução das fases γ' e γ'' , fazendo com que a alteração de dureza fosse mais significativa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento são eficazes na alteração de propriedades mecânicas de ligas de níquel conhecidas como Inconel, principalmente na liga em estudo a 625.

Pode-se observar que houve a alteração desejada, pois, com o tratamento aplicado foi possível atingir aos requisitos da norma que especifica a aplicação de tal material.

Porém, para a aplicação desejada o ideal seria apenas realizar o tratamento de solubilização, pois o envelhecimento faria com que o material atingisse valores acima do esperado para o critério analisado, a dureza do material.

REFERÊNCIAS

ANP. **Boletim mensal de produção de petróleo e gás natural**. 2018. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/boletins-anp/2395-boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAVALCANTE, N. E. **Influência do envelhecimento na resistência à corrosão da superliga de Níquel Inconel 625**. 2013. 45 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

FERNANDES, S. M de C. **Caracterização microestrutural e mecânica da superliga da base de Níquel (Liga 600) após tratamentos térmicos**. 1993. 325 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1993.

NACE-MR0175/ISO15156. **Petroleum and natural gas industries: materials for use in H2S-containing environments in oil and gas production**. 2015. Disponível em: <<https://store.nace.org/ansi-nace-mr0175-iso-15156-20212>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

PROAQT. **Tratamento térmico de envelhecimento**. 2018. Disponível em: <<http://www.proaqt.com.br/tratamento-termico-envelhecimento>>. Acesso em: 03 jan. 2018.

PUC RIO. **Formas de corrosão**. 2018. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/20714/20714_4.PDF>. Acesso em: 11 maio 2018.

RODRIGUES, M. A.; HASSUI, A. **Análise dos desgastes de ferramentas de metal duro revestidas no fresamento da liga à base de Níquel – Inconel 625 – depositada em forma de revestimento metálico**. 2015. 10 f. Curso de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

ROHDE, R. A. **Metalografia preparação de amostras: uma abordagem prática Versão-3.0**. Santo Ângelo: URI/LEMM, 2010.

SOUZA, S. A. de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Blucher, 1982.

_____. **Inconel Alloy 825**. 2008. Disponível em: <<http://www.specialmetals.com>>. Acesso em: 28 jan. 2018.

VALLE, L. C. M. **Efeitos da Solubilização e do Envelhecimento na Microestrutura e nas Propriedades Mecânicas da Superliga Inconel 718**. 2010. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.