

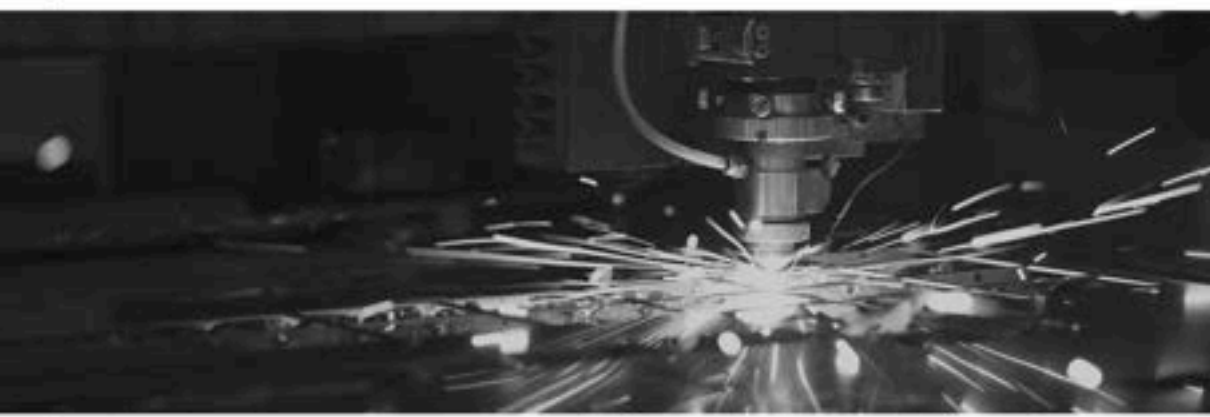


# **DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA NAS ENGENHARIAS DE MATERIAIS E METALÚRGICA**

---

**Amanda Fernandes Pereira da Silva**  
**(Organizadora)**

 **Atena**  
Editora  
Ano 2022



# **DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA NAS ENGENHARIAS DE MATERIAIS E METALÚRGICA**

---

**Amanda Fernandes Pereira da Silva**  
**(Organizadora)**

**Atena**  
Editora  
Ano 2022

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



# Desenvolvimento e transferência de tecnologia nas engenharias de materiais e metalúrgica

**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Mariane Aparecida Freitas  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadora:** Amanda Fernandes Pereira da Silva

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

D451 Desenvolvimento e transferência de tecnologia nas engenharias de materiais e metalúrgica / Organizadora Amanda Fernandes Pereira da Silva. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0565-8

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.658221508>

1. Engenharia de Materiais. 2. Metalurgia. I. Silva, Amanda Fernandes Pereira da (Organizadora). II. Título.

CDD 669

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br



**Atena**  
Editora  
Ano 2022

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

A engenharia de materiais é um campo interdisciplinar que abrange o conhecimento acerca dos materiais e a relação que exige entre processamento, estrutura, propriedade e desempenho. É necessário compreender a interdependência entre esses componentes para que o material seja manuseado e aplicado da forma correta. A engenharia de materiais desenvolve modos de transformar esses materiais em dispositivos ou estruturas úteis.

A classificação dos materiais sólidos abrange, levando em consideração a composição química e estrutura atômica: metais, cerâmicas, polímeros, compósitos e materiais avançados (aplicação). Nesse sentido, a busca por materiais com melhores propriedades físico-químicas, mecânicas, melhor comportamento térmico, tem sido alvo de grande destaque nesse meio. É comum profissionais da engenharia, sejam eles mecânicos, civis, químicos, ou elétricos, cientistas se depararem com problemas de projeto envolvendo materiais.

Desta forma, neste livro são destacados trabalhos científicos nesse ramo da Engenharia de Materiais com pesquisas atuais. Apresenta desenvolvimento de novos materiais com combinações máximas ou ideais requeridas de acordo com sua aplicação já existente.

Por isso, esta obra surge com grande importância para o meio acadêmico sabendo que cientistas de materiais e engenheiros precisam estar envolvidos na investigação de novos produtos com melhorias para situações reais.

Boa leitura!

Amanda Fernandes Pereira da Silva



## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ALVENARIAS DE BLOCOS CERÂMICOS E DE CONCRETO POR MEIO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA**

Rodrigo Manoel Rufino Leão

Amanda Fernandes Pereira da Silva

Alisson Rodrigues de Oliveira Dias

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6582215081>

### **CAPÍTULO 2..... 15**

**ANÁLISE DA DUREZA E MICROESTRUTURA DA SUPERLIGA INCONEL 718 SUBMETIDA A SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO: COMPARAÇÃO PARA APLICAÇÕES NUCLEARES, AEROESPACIAIS E PETROLÍFERAS**

Sara Nunes Rios


Vitória Ferreira de Oliveira Marques

Sérgio Renan Lopes Tinô

Vinicius Carvalhaes

Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela

Manoel Ivany de Queiroz Júnior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6582215082>

### **CAPÍTULO 3..... 33**

**ROTINA DE SIMULAÇÃO EM YADE (LIVRE ACESSO) PARA ESCOAMENTO DE GRÃOS EM SILOS DE GRANDE PORTE UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)**

Gabriel Carvalho Matoso

Alexandre Candido Soares

Yara Daniel Ribeiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6582215083>


### **CAPÍTULO 4..... 47**

**SIMULAÇÃO VIA PYTHON DAS INTERAÇÕES DE ATRAÇÃO E REPULSÃO DE PARTÍCULAS PELO POÇO DE POTENCIAL DE LENNARD-JONES COMO REQUISITO PARA SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM SILOS**

Gabriel Carvalho Matoso

Alexandre Candido Soares

Yara Daniel Ribeiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6582215084>

### **SOBRE A ORGANIZADORA..... 55**

### **ÍNDICE REMISSIVO..... 56**

## ANÁLISE DA DUREZA E MICROESTRUTURA DA SUPERLIGA INCONEL 718 SUBMETIDA A SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO: COMPARAÇÃO PARA APLICAÇÕES NUCLEARES, AEROESPACIAIS E PETROLÍFERAS

Data de aceite: 11/08/2022

### Sara Nunes Rios

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG)  
Departamento 4 - Engenharia Mecânica  
Goiânia, GO, Brasil

### Vitória Ferreira de Oliveira Marques

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG)  
Departamento 4 - Engenharia Mecânica  
Goiânia, GO, Brasil

### Sérgio Renan Lopes Tinô

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG)  
Departamento 4 - Engenharia Mecânica  
Goiânia, GO, Brasil

### Vinicius Carvalhaes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG)  
Departamento 4 - Engenharia Mecânica  
Goiânia, GO, Brasil

### Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG)  
Departamento 4 - Engenharia Mecânica  
Goiânia, GO, Brasil

### Manoel Ivany de Queiroz Júnior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG)  
Departamento 4 - Engenharia Mecânica  
Goiânia, GO, Brasil

**RESUMO:** Superligas à base de níquel têm sido cada vez mais usadas na indústria aeroespacial, petrolífera, nuclear e outras, devido ao seu comportamento em altas temperaturas. O estudo pretende analisar o comportamento da superliga Inconel 718 para aplicações aeroespaciais, petrolíferas, nucleares e o envelhecimento natural. Para isto, foi necessário a realização de tratamentos térmicos em amostras de Inconel 718 que foram submetidas a solubilização seguida de envelhecimento tanto artificial quanto natural. Para cada aplicação segue-se uma norma onde são especificados os parâmetros de temperatura, tempo e modo de resfriamento para cada tratamento do material. Foram feitas as medidas de durezas e feito a microscopia óptica e medidas de tamanho de grão das amostras para cada aplicação citada, a peça como recebida e também para o envelhecimento natural com o objetivo de analisar os efeitos dos tratamentos térmicos no material e comparar os tipos de aplicações. Também foi analisada uma amostra envelhecida naturalmente, ou seja, cujo envelhecimento é feito a temperatura ambiente e constatou-se que esta endureceu e continuou envelhecendo ao longo dos meses, aumentando sua resistência. Verificou-se também que a precipitação das fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$  é de grande influência para o aumento da dureza e da resistência do material.

**PALAVRAS - CHAVE:** Inconel 718, Superligas, Solubilização, Envelhecimento.

**ABSTRACT:** Nickel superalloys have been increasingly used in the aerospace, petroleum, nuclear and other industries due to their high

temperature behavior. The study intends to analyze the behavior of the Inconel 718 superalloy for aerospace, oil, nuclear and natural aging applications. For this, it was necessary to carry out thermal treatments on samples of Inconel 718 that were subjected to solubilization followed by both artificial and natural aging. For each application, a standard is followed where the parameters of temperature, time and cooling mode are specified for each treatment of the material. Hardness measurements were made and optical microscopy and grain size measurements of the samples were carried out for each mentioned application, the part as received and also for natural aging in order to analyze the effects of heat treatments on the material and compare the types of applications. A naturally aged sample was also analyzed, that is, whose aging is done at room temperature and it was found that it hardened and continued aging over the months, increasing its resistance. It was also found that the precipitation of the  $\gamma'$  and  $\gamma''$  phases is of great influence to increase the hardness and strength of the material.

**KEYWORDS:** Inconel 718, superalloys, solubilization, aging.

## 1 | INTRODUÇÃO

Algumas classes de materiais possuem a capacidade de manter suas propriedades em elevadas temperaturas. Suas aplicações são variadas e podem ser encontradas em dutos de motores de turbina a gás, tanques criogênicos, componentes de motor, molas, fixadores, válvulas de gavetas e outras aplicações de alta resistência. Este tipo de material possui três características importantes que são consideradas desejáveis: habilidade de suportar carregamentos em uma temperatura de operação muito próxima a do ponto de fusão desta; resistência a degradação mecânica sob longos períodos de tempo e tolerâncias em ambientes críticos de operação (Reed, 2006). Como exemplo de materiais com essa característica podem ser citadas as superligas, que consistem em ligas a base de ferro, cobalto ou níquel.

Quando são requeridas resistências ao carregamento estático, fadiga e deformação, a superliga de níquel é a que mais se destaca. Estas ligas não são sujeitas a transformações martensíticas e não são possíveis os tratamentos de têmpera e revenimento. Além disso, tem matriz com estrutura CFC e não sofrem transformações alotrópicas até o ponto de fusão. Podem ser trabalhadas a frio, morno e a quente (Meyers e Chawla, 1982).

As ligas de Inconel pertencem à família das superligas de níquel (Ni) e cromo (Cr) que possui uma ampla variedade de composições e propriedades mecânicas. O níquel e cromo fornecem resistência à corrosão oxidação, carburação e outros danos mecânicos causados pela ação de temperaturas elevadas. As ligas de Inconel possuem boas propriedades criogênicas, resistência à fadiga e força mecânica em temperaturas moderadas e um bom comportamento de deformação (Thomas *et al.*, 2006).

As principais fases responsáveis pelas superiores propriedades mecânicas a elevadas temperaturas da matriz  $\gamma$  (cfc) na liga 718 são a fase  $\gamma''$  (Ni<sub>3</sub>Nb - tetragonal), principal fase endurecedora, e a fase coerente com a matriz  $\gamma'$  (Ni<sub>3</sub>(Al,Ti)), esta menos

efetiva no endurecimento.

O níquel e cromo contribuem para a resistência a corrosão do Inconel 718. Eles cristalizam como uma fase  $\gamma$  (cúbico de face centrada). Níobio é adicionado para precipitação de endurecimento  $\gamma''$  (componente meta estável intermetálico  $\text{Ni}_3\text{Nb}$ , cristal centrado tetragonal). Titânio e Alumínio são adicionados para se transformarem na forma intermetálica  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ , cristal cúbico simples). Eles têm um efeito menor de endurecimento do que as partículas  $\gamma''$ . Uma fase  $\beta$  (intermetálica  $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ), também chamada de fase  $\delta$ , pode surgir, é uma partícula de equilíbrio com estrutura ortorrômbica. Todas essas partículas podem precipitar ao longo dos contornos de grão da matriz  $\gamma$  aumentando a resistência do fluxo intergranular da liga em questão.

Desde que se tornou material em “evidência”, o Inconel vem sendo extensivamente estudado por vários grupos de pesquisa de todo o mundo. Não somente a liga 718, mas todos os tipos de Inconel têm sido investigados no que se refere à resistência a corrosão por tensão, corrosão em altas temperaturas, mecanismos de permeação de hidrogênio, morfologia dos filmes, efeitos do tratamento térmico, dentre tantos outros estudos que deem as reais características destas superligas (Schubert, 1983).

Tendo em vista a importância de tal liga e sua constante inserção no mercado, o presente trabalho visa estudar o comportamento da superliga Inconel 718 quando submetido à solubilização seguida de envelhecimento, analisando após estes a microestrutura e propriedades mecânicas da liga Inconel 718 e comparando os resultados obtidos para as aplicações aeroespaciais, petrolíferas e nucleares seguindo as especificações das normas para cada uma e também realizar um estudo sobre o efeito do envelhecimento natural na superliga.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### Fluxograma experimental e preparação das amostras

Para o seguinte estudo e com base nas determinações das normas (AMS 5662 e ASM 1991) e tratamentos citadas no item anterior seguiu-se a metodologia mostrada na Fig. 1 que ilustra de forma resumida os procedimentos feitos para análise do material.

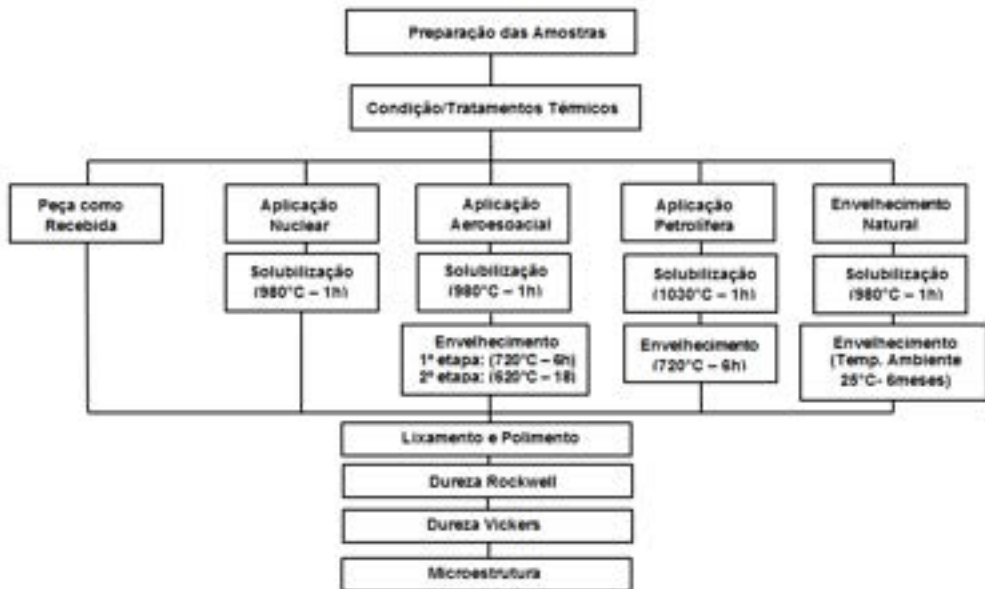


Figura 1: Fluxograma dos procedimentos experimentais.

Realizou-se o corte de amostras de Inconel 718 na cortadora metalográfica em dimensões dentro das especificações definidas pela norma NBR 13284 de preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica. Segundo a norma NBR 13284 a altura dos corpos-de-prova deve ser suficiente para manuseio conveniente durante as etapas de lixamento e polimento. As amostras para os estudos foram cortadas em alturas de 10 mm, as quais permitiram o manuseio sem necessidade de embutimento (Fig. 2). Ao total foram cortadas 13 amostras, 3 amostras da peça como recebida, 3 amostras para cada tratamento referente às aplicações nuclear, aeroespacial e petrolífera e 1 amostra para o envelhecimento natural (Tab. 1).



Figura 2: Altura das amostras cortadas para análise.

Quantidade de Amostras Cortadas	
Peça como recebida	3
Solubilizada (Nuclear)	3
Envelhecimento Artificial (Aeroespacial)	3
Envelhecimento Artificial (Petrólifera)	3
Envelhecimento Natural	1
<b>Total</b>	<b>13</b>

Tabela 1: Quantidade de amostras cortadas sem tratamento e para cada tratamento.

## Tratamentos Térmicos

As peças foram submetidas aos tratamentos térmicos de solubilização e solubilização seguida de envelhecimento, conforme a norma de inspeção aeroespacial da liga 718 (AMS 5662), a especificação da liga Inconel 718 de petróleo e gás API (UNS N07718), e os parâmetros para aplicação nuclear e envelhecimento natural.

Os meios de resfriamento utilizados foram o ar para aplicações aeroespacial e nuclear, e a água para aplicação de petróleo e gás e para o envelhecimento natural. Para cada tipo de aplicação foram utilizadas três amostras, exceto para o envelhecimento natural que foi utilizada apenas uma amostra. Cada grupo de amostra permaneceu no patamar de temperatura, por um determinado período de tempo determinado pelas normas de cada aplicação. A Tab. 2 mostra as temperaturas a serem trabalhadas para cada tipo de aplicação, os meios de resfriamento e o tempo para a solubilização e a Tab. 3 determina os mesmos parâmetros para o envelhecimento.

Para aplicação aeroespacial, a solubilização foi feita a 980°C por 1 hora, com resfriamento em ar até temperatura ambiente, seguida de envelhecimento a 720 °C por 6 horas e resfriamento no forno até 620°C por 18 horas até o completo envelhecimento, com posterior resfriamento ao ar até temperatura ambiente.

Aplicação	Temperatura de Solubilização (°C)	Tempo de Solubilização (h)	Modo de Resfriamento
Aeroespacial	980	1	Ar
Petróleo e Gás	1030	1	Água
Nuclear	980	1	Ar
Envelhecimento Natural	980	1	Água

Tabela 2: Temperaturas, tempo e resfriamento para a solubilização para amostras de cada aplicação.

Para as aplicações na indústria de petróleo e gás, a solubilização foi realizada a 1030°C por 1 hora, com resfriamento em água, seguida de envelhecimento a 780°C por 6 horas, com resfriamento em água até a temperatura ambiente e, para aplicação nuclear, a

solubilização foi realizada a 980°C por 1 hora, com resfriamento em ar sem envelhecimento.

Aplicação	Temperatura de Envelhecimento (°C)	Tempo de Envelhecimento	Resfriamento
Aeroespacial	720 (1ª etapa) 620 (2ª etapa)	6 horas (1ª etapa) 18 horas (2ª etapa)	1ª etapa: forno 2ª etapa: ar
Petróleo Gás	780	6 horas	Água
Nuclear	-	-	-
Envelhecimento Natural	Temperatura Ambiente	6 meses	Ar

Tabela 3: Temperaturas, tempo e resfriamento para o envelhecimento para amostras de cada aplicação.

Para efeito de estudos foi feito os mesmos tratamentos da nuclear em uma amostra que foi submetida ao envelhecimento natural, que consiste no envelhecimento a temperatura ambiente. Como não há uma norma específica para o envelhecimento natural foram utilizados os parâmetros de solubilização da norma de inspeção aeroespacial da liga 718 (AMS 5662), com resfriamento em água e com envelhecimento a temperatura ambiente durante 6 meses.

### Lixamento, polimento, ataque químico e micrografia

Segundo a norma NBR 13284 o lixamento deve proporcionar uma superfície plana e sem deformações, corrigindo as imperfeições da etapa inicial de extração do corpo de prova. O corpo de prova foi preparado em um prato horizontal rotativo onde o corpo de prova será apoiado. A superfície do corpo de prova foi lubrificada com água, para promover a refrigeração e o arraste de partículas extraídas do corpo-de-prova durante a operação. As amostras foram submetidas a lixas de granularidade de 180, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 mesh. Depois de serem lixadas as peças foram polidas e foi usado como abrasivo o óxido de alumínio.

Após o lixamento e polimento as amostras foram submetidas ao ataque químico para revelar a estrutura metalográfica das amostras. O objetivo do ataque químico é permitir a identificação (visualização) dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura. O reagente utilizado varia de material para material, é escolhido de acordo com os constituintes microestruturais que se deseja contrastar na análise metalográfica (Rohde, 2010). Para o Inconel 718 atacou-se a superfície polida com o reagente Kalling nº 2 (100 ml etanol + 100 ml HCl + 5 g CuCl<sub>2</sub>) durante aproximadamente 5 minutos cada amostra.

O ensaio metalográfico consistiu em analisar a microestrutura da peça através de um microscópio óptico com aumentos de 200X e 500X. Após o processo de preparação das amostras, seu devido lixamento, polimento e ataque químico, as amostras foram levadas ao microscópio para realizar a análise de sua microestrutura. Foi utilizado o software AnalySIS

para captura das imagens para análise.

## Medidas de tamanho médio de grão

O método utilizado para a medição do tamanho de grão foi o planimétrico de Jeffries, seguindo a norma ASTM E112-96 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.

O método foi aplicado fazendo um círculo sobre as fotomicrografias com o auxílio do software AnalySIS e contando os números de grãos totalmente dentro da área ( $n_1$ ) e o número de grãos interceptados pelo perímetro da área de teste dividido por 2 ( $n_2$ ). Para cada aplicação foram realizadas duas medições de tamanho de grão em cada amostra e fez-se a média entre elas.

O número total de grãos equivalentes é dado por:

$$n_{eq} = n_1 + \frac{n_2}{2}$$

A medida de tamanho de grãos, segundo a ASTM, é dada por:

$$N = 2^{G-1}$$

Onde, N = número de grão por polegada quadrada e G = número de grão ASTM.

## Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza Rockwell consiste em medir a dureza do corpo de prova de Inconel 718, através da aplicação de uma pré-carga. De acordo com a norma NBR NM ISO 6508, o ensaio deve ser realizado sobre uma superfície plana e lisa, isenta de camadas oxidadas. A espessura do corpo-de-prova deve ser pelo menos dez vezes a profundidade de penetração permanente para penetradores cônicos. Ainda segundo a norma NBR NM ISO 6508, deve-se colocar o penetrador com a superfície a ser ensaiada e aplicar a pré-carga sem exceder 3 s, depois aumenta essa força em não menos que 1 s e não mais que 8 s, que deve ser mantida por um tempo de 2 a 4 s. Segundo a norma NBR NM ISO 6508, a distância entre os centros de duas impressões adjacentes deve ser, de pelo menos quatro vezes o diâmetro da impressão (embora não menor que 2 mm) e a distância desde o centro de qualquer impressão a uma borda do corpo-de-prova, deve ser de pelo menos duas vezes o diâmetro da impressão (embora não menor que 1 mm).

Para o ensaio de dureza Rockwell das amostras de Inconel 718, utilizou-se o indentador de diamante e uma carga de 60 kgf, para tanto a medida foi feita em escala Rockwell A, conforme especificado a norma supracitada. Foram realizadas 5 medidas para cada amostra, com distância de 3 mm entre uma medida e outra, sendo que para as discussões posteriores, serão utilizadas as médias dessas medidas para cada aplicação. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais do IFG-GO utilizando um durômetro Sussen Wolpert tipo Testor HTI.

Para o ensaio de microdureza Vickers foi realizado conforme a norma ABNT NBR NM



ISO 6507-1:2008, que diz que o corpo de prova deve ter uma superfície lisa e plana, livre de carepa, substâncias estranhas e completamente livre de lubrificantes, e sua espessura deve ser no mínimo 1,5 vezes o comprimento da diagonal da impressão. A norma também diz que o corpo de prova deve ser colocado sobre um suporte rígido, estando firmemente apoiado no suporte, de modo que não ocorra deslizamentos durante o ensaio. O penetrador deverá ser colocado em contato com a superfície de ensaio e a força de ensaio aplicada na direção perpendicular à superfície.

Para obter a dureza do Inconel 718, foram aplicadas cargas de 1 kgf, durante 30 segundos, com penetrador piramidal com ângulo de diedro de 136°. Foram realizadas cinco medições aleatórias de microdureza Vickers ao longo da seção da peça. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais do IFG-GO utilizando um microdurômetro Mitutoyo HM 102.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Microscopia Óptica e Tamanho Médio de Grão

Foi realizada a microscopia óptica da Superliga Inconel 718, na qual para captura de imagens, foram utilizadas lentes de aumentos de 200x e 500x, porém as imagens selecionadas foram as com aumento de 200x, pois deferiram uma melhor observação. As figuras a seguir mostram a microestrutura para as amostras como recebida (Fig. 3), para aplicações nucleares (solubilizadas) (Fig. 4), para aplicações aeroespaciais (Fig. 5) e petrolíferas (Fig. 6) que foram envelhecidas artificialmente e para a envelhecida naturalmente (Fig. 7).

Com exceção dos contornos mais definidos no ataque, as mudanças microestruturais não são muito perceptíveis, tais mudanças requerem o uso do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para uma análise mais profunda. Para tanto foi utilizada a análise no MEV de Valle (2010) para casos da peça como recebida, solubilizada e envelhecida artificialmente para estabelecer uma comparação com a microscopia dos casos citados.

No material como recebido na Fig. 3 percebe-se a presença de vários pontos pretos, que são precipitados identificados como carbetos. Tais carbetos são do tipo (Nb,Ti)C e, possivelmente, a maior parte é constituída de NbC, uma vez que a liga possui mais nióbio do que titânio.

Na microestrutura da peça solubilizada para aplicações nucleares a 980 °C por 1 hora (Fig. 4) observa-se a presença de carbetos assim como os identificados no material como recebido. Observa-se, portanto, que não houve dissolução completa dos carbetos durante a solubilização, uma vez que estes ainda aparecem no material após solubilização, mesmo que com menor frequência do que no material como recebido.

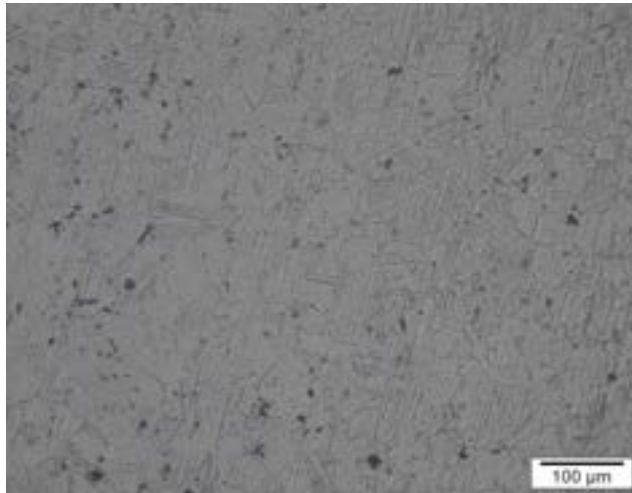


Figura 3: Micrografia óptica do material Inconel 718 como recebido com ampliação de 200x.

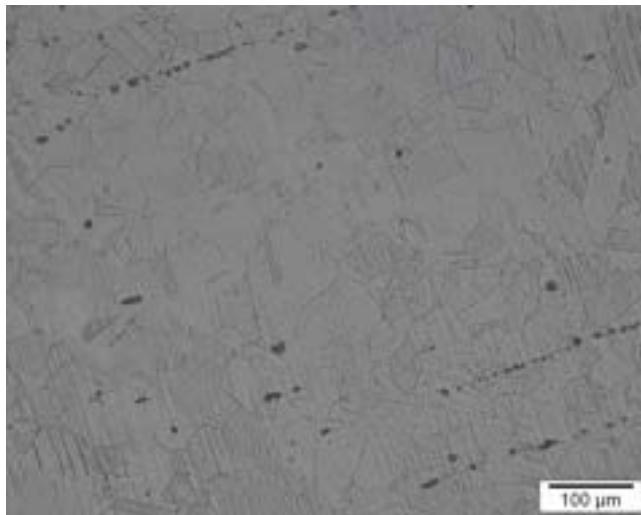


Figura 4: Micrografia óptica do material Inconel 718 solubilizado, para aplicação nuclear com ampliação de 200x.

Na microestrutura dos materiais envelhecidos artificialmente para aplicações aeroespaciais (Fig. 5) e petrolíferas (Fig. 6) percebe-se também a presença de carbeto, citados anteriormente, porém com tamanhos maiores do tipo  $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ , tanto com alto pico de nióbio e baixo pico de titânio quanto com pico de titânio e nióbios menores. Esta diferença nos teores de nióbio e de titânio nos carbeto  $(\text{Nb,Ti})\text{C}$  ocorre porque, de acordo Donachie e Donachie (2002), neste tipo de carbeto, os elementos nióbio e titânio podem ser substituídos um pelo outro durante tratamento térmico. Provavelmente por este motivo, este maior teor de titânio, é verificado somente nas condições envelhecidas. Percebe-se ainda a presença de partículas pequenas no contorno de grão que são identificadas como

fase  $\delta$  por sua morfologia, pelo seu tamanho e pela cinética de precipitação dessa fase. Não houve dissolução de carbeto durante o envelhecimento. De acordo com o diagrama TTT das diferentes fases do Inconel 718 na Figura 2, a uma temperatura de 720°C e 780°C por 6 horas, que foram os parâmetros utilizados para os dois envelhecimentos artificiais, é suficiente para a precipitação das fases  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  e  $\delta$ .

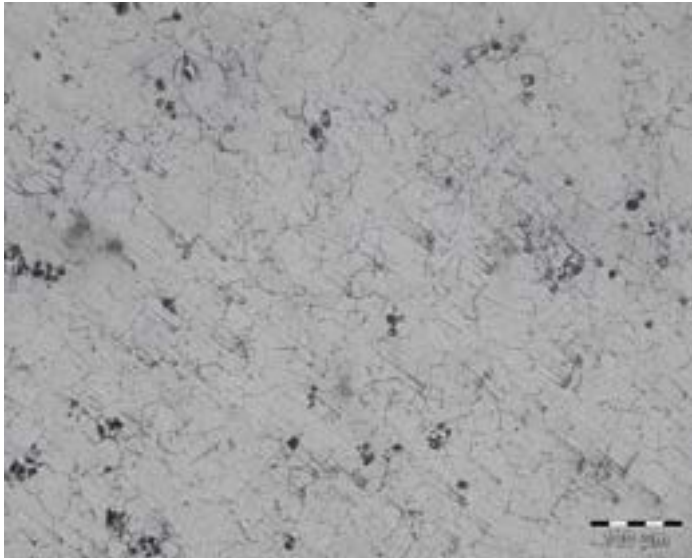


Figura 5: Micrografia óptica do material Inconel 718 com envelhecimento artificial para aplicação aeroespacial com ampliação de 200x.

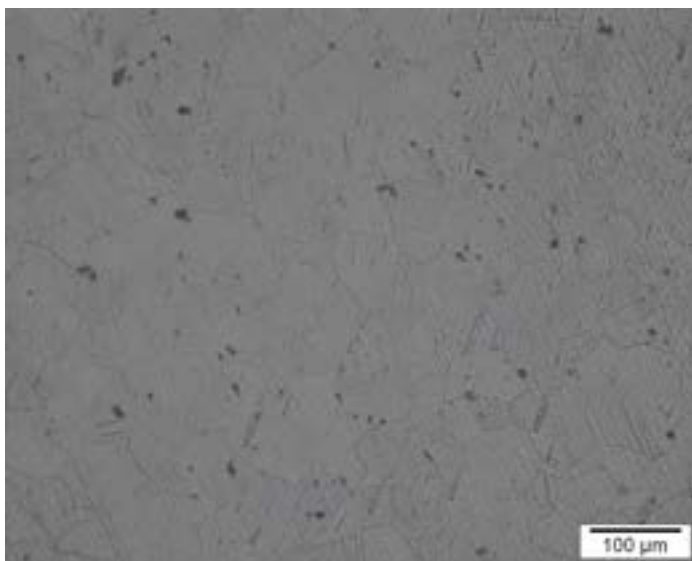


Figura 6: Micrografia óptica do material Inconel 718 com envelhecimento artificial para aplicação petrolífera com ampliação de 200x.

No envelhecimento natural (Fig. 7) ainda percebe-se alguns carbeto, porém com menor frequência se comparado com o material como recebido.

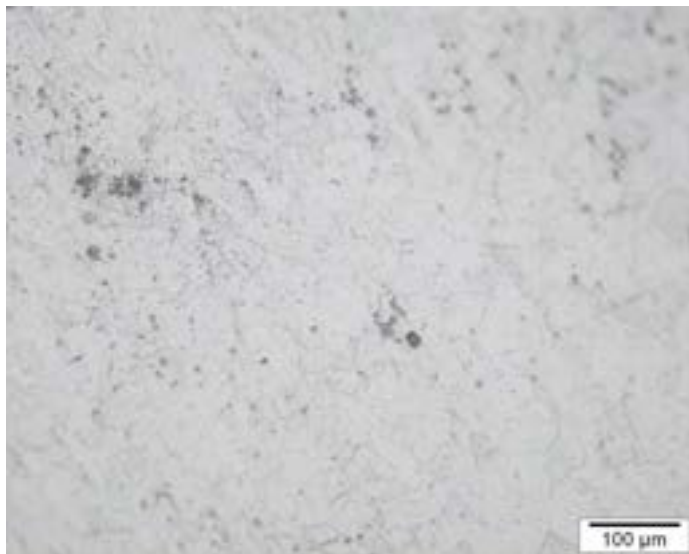


Figura 7: Micrografia óptica do material Inconel 718 com envelhecimento natural com ampliação de 200x.

Espera-se que o tempo de solubilização de 1 hora seja suficiente para solubilizar totalmente as fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$  e parte de fase  $\delta$ . Segundo análise de Valle (2010) feita no Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) o material após envelhecimento artificial apresenta fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$  dispersas na matriz.

A Tab. 4 mostra os resultados do tamanho médio de grão para cada amostra de cada condição e aplicação.

Comparando o material envelhecido artificialmente para aplicação aeroespacial houve um aumento do tamanho médio de grão e para o envelhecimento artificial para aplicação petrolífera não houve alteração. Comparando a peça solubilizada para aplicação nuclear com a peça como recebida houve uma diminuição do tamanho médio de grão, assim como a envelhecida natural comparada com a peça como recebida.

Tal crescimento controlado do tamanho médio de grão, Tab. 4, pode ser relacionado à presença constante dos carbeto, pois estes refinam a microestrutura durante o tratamento térmico, através do controle do crescimento de grão. Além disso, eles aumentam a resistência da matriz, inibindo o deslizamento nos contornos de grão.

<b>Condição/Tratamento Térmico</b>	<b>Tamanho Médio de Grão (ASTM)</b>
<b>Como Recebido</b>	6
<b>Solubilizado para aplicação nuclear</b>	5
<b>Envelhecimento artificialmente para aplicação aeroespacial</b>	7
<b>Envelhecimento artificialmente para aplicação petrolífera</b>	6
<b>Envelhecimento natural</b>	5

Tabela 4: Resultado do tamanho médio de grão para o material como recebido, solubilizado, envelhecimento artificial e envelhecimento natural.

## Dureza Rockwell

As amostras foram submetidas ao ensaio de dureza Rockwell. Para cada amostra de cada aplicação e tratamento foram feitas 5 medidas, lembrando que para cada aplicação foram utilizadas 3 amostras, exceto para o envelhecimento natural que foi utilizada apenas 1 amostra. A partir da média das durezas de cada amostra foram feitas as análises.

Para facilitar a análise na Fig. 8 tem-se a média das médias das durezas de cada caso para assim poder visualizar melhor a diferença. Percebe-se que em comparação da peça como recebida com a solubilizada teve pouca alteração na dureza Rockwell, inclusive há uma diminuição da dureza entre a solubilizada e a peça como recebida. Comparando as duas peças envelhecidas artificialmente (aeroespacial e petróleo e gás) com a peça como recebida houve um aumento da dureza. As duas peças envelhecidas artificialmente, para aplicações aeroespaciais e petrolíferas, obtiveram durezas próximas. A peça que foi submetida ao envelhecimento natural durante 6 meses obteve um aumento na dureza de se comparada com a peça como recebida, mas tal aumento não é tão grande se for comparado com a diferença obtida para as duas peças envelhecidas artificialmente. A Tab. 5 mostra as médias das durezas Rockwell para cada amostra de cada caso citado.

<b>Média Dureza Rockwell (HRA)</b>	
<b>Peça como recebida</b>	
<b>Amostra 1</b>	48,2 ±1,2
<b>Amostra 2</b>	49 ±1,4
<b>Amostra 3</b>	53,4 ±3,1
<b>Solubilizada (Nuclear)</b>	
<b>Amostra 1</b>	50,4 ±1,0
<b>Amostra 2</b>	49,6 ±2,1
<b>Amostra 3</b>	49,4 ±3,4
<b>Envelhecimento Artificial (Aeroespacial)</b>	
<b>Amostra 1</b>	62,2 ±3,1
<b>Amostra 2</b>	65,4 ±6,0
<b>Amostra 3</b>	60,2 ±5,2
<b>Envelhecimento Artificial (Petróleo e Gás)</b>	
<b>Amostra 1</b>	61,6 ±5,9
<b>Amostra 2</b>	65,8 ±2,9
<b>Amostra 3</b>	70,2 ±0,7
<b>Envelhecimento Natural</b>	
<b>Amostra 1</b>	54,2 ±0,8

Tabela 5: Média das durezas Rockwell de cada amostra para cada caso.

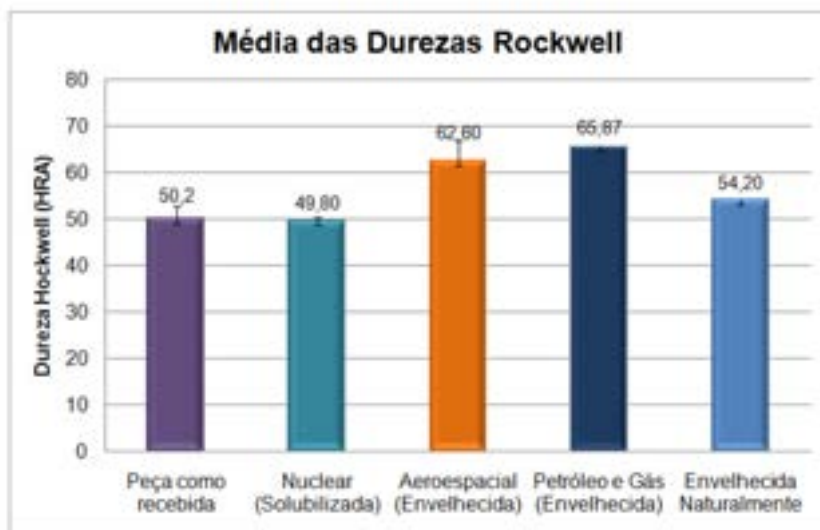


Figura 8: Média das médias das durezas Rockwell para cada caso estudado.

## Dureza Vickers

Foram realizadas 5 medidas em cada amostra para cada caso, sendo 3 amostras para cada: peça como recebida, solubilizada (nuclear), envelhecida artificialmente

(aeroespacial e petrolífera) e 1 amostra para o envelhecimento natural. A Tab. 6 mostra a média das durezas para cada amostra de cada caso.

<b>Média Dureza Vickers</b>	
<b>Peça sem Tratamento</b>	
<b>Amostra 1</b>	209,6 ±38,6
<b>Amostra 2</b>	154,2 ±24,5
<b>Amostra 3</b>	149,6 ±7,7
<b>Solubilizada (Nuclear)</b>	
<b>Amostra 1</b>	117,8 ±8,8
<b>Amostra 2</b>	152,4 ±29,5
<b>Amostra 3</b>	119,2 ±14,9
<b>Envelhecimento Artificial (Aeroespacial)</b>	
<b>Amostra 1</b>	226,8 ±16,1
<b>Amostra 2</b>	292,8 ±22,6
<b>Amostra 3</b>	291,4 ±11,9
<b>Envelhecimento Artificial (Petróleo e Gás)</b>	
<b>Amostra 1</b>	262,2 ±10,24
<b>Amostra 2</b>	231,6 ±17,6
<b>Amostra 3</b>	244,8 ±43,0
<b>Envelhecimento Natural</b>	
<b>Amostra 1</b>	227,4 ±8,0

Tabela 6: Média das durezas Vickers para cada amostra de cada caso.

Para facilitar a análise na Fig. 9 tem-se a média das médias das durezas de cada caso para assim poder visualizar melhor a diferença. Percebe-se que em comparação da peça como recebida com a solubilizada houve uma considerável redução da dureza. Verifica-se também que para os casos de envelhecimento artificial, tanto para aplicação aeroespacial quanto para aplicação petrolífera, houve um relevante aumento na dureza para aplicações aeroespaciais e para aplicações petrolíferas. A peça envelhecida naturalmente teve um aumento de dureza Vickers, o qual não é tão alto se comparada com ambos os casos de envelhecimento artificial, nos quais os envelhecimentos ocorreram em um período bem menor de tempo.

Percebe-se também que há medidas nas amostras que ocorrem grandes variações nas durezas que podem ter sido ocorridas devido ao fato de ao realizar o ensaio de dureza Vickers, o indentador tenha pegado uma área de carbeto, a qual possui uma dureza maior.

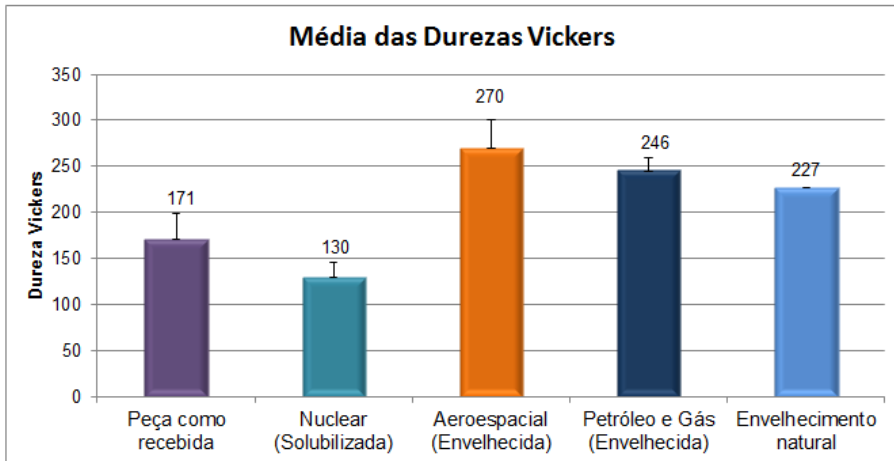


Figura 9: Média das médias das durezas Vickers para cada caso estudado.

A Tab. 7 apresenta os resultados dos ensaios de dureza Vickers e a comparação destes valores com o tamanho médio de grão. É apresentado também o desvio padrão das medidas de dureza Vickers. Observa-se que na solubilização houve uma considerável redução na dureza, que pode ser relacionada com a dissolução da fase  $\delta$ . Após o envelhecimento houve um relevante aumento nos valores de dureza, apesar da diferença de parâmetros utilizados para o envelhecimento artificial das aplicações aeroespaciais e petrolíferas, e as medidas das durezas das duas são bem próximas, apesar da diferença de tamanho médio de grão.

Os resultados das durezas mostraram que a solubilização da superliga Inconel 718 a temperaturas mais elevadas, como as utilizadas para as aplicações estudadas, podem provocar a dissolução total das fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$  e parte de fase  $\delta$ , uma vez que se percebe um crescimento limitado do tamanho de grão, que é benéfico para impedir uma diminuição drástica da resistência mecânica.

Os tratamentos térmicos de envelhecimento das aplicações aeroespacial e petróleo e gás elevaram os níveis de dureza devido, principalmente, à precipitação das fases endurecedoras  $\gamma'$  e  $\gamma''$ . Por este motivo, apesar de diferentes tamanhos de grãos nos dois casos de envelhecimento artificial, estes valores são muito próximos nas diferentes condições envelhecidas. Durante o envelhecimento, o tamanho de grão das peças dessas aplicações não aumentou muito, ocasionando a pouca diferença de tamanho de grão e de dureza entre as duas. Como as duas aplicações, aeroespacial e petrolífera, requerem uma dureza maior em altas temperaturas, os resultados obtidos foram satisfatórios tendo em vista que suas durezas aumentaram para as duas aplicações. Levando em conta que tais aplicações requerem altas resistências mecânicas o controle no crescimento de grão para esses casos impediu a diminuição da mesma.



Condição/Tratamento Térmico	Tamanho Médio de Grão (ASTM)	Dureza [HV]
Como Recebido	6	171,13±27,3
Solubilizado para aplicação nuclear	5	129,8±16,0
Envelhecimento artificialmente para aplicação aeroespacial	7	270,3±30,7
Envelhecimento artificialmente para aplicação petrolífera	6	246,2±12,5
Envelhecimento natural	5	227,4±8

Tabela 7: Resultado dos ensaios de dureza Vickers e comparação com o tamanho médio de grão nas diferentes condições de tratamento térmico.

Para aplicação aeroespacial, o material continuou no forno por mais 18 horas a 620°C, esse fato pode ter contribuído para a diferença na dureza Vickers entre as durezas da aplicação aeroespacial e petrolífera, uma vez que tal período a mais no forno pode ter favorecido a precipitação das partículas de forma mais efetiva sem que ocorresse superenvelhecimento

Na aplicação nuclear, como não é realizado o tratamento de envelhecimento, não há formação dos precipitados endurecedores  $\gamma'$  e  $\gamma''$ , o que impede o efeito de amolecimento induzido pela radiação e melhora a ductilidade. Por isso, o tamanho de grão das amostras e a dureza dessa aplicação não se diferem muito dos tamanhos de grão e das durezas das amostras do material como recebido e do envelhecimento natural.

Portanto, independente do tamanho médio de grão, o mecanismo de endurecimento por precipitação das fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$  se sobrepõe as demais variáveis microestruturais na liga 1718.

O envelhecimento natural obteve um aumento da dureza de, que pode ser considerado um valor não tão satisfatório levando em conta os envelhecimentos artificiais que obtiveram um aumento maior na dureza em relação ao material como recebido em um período bem menor de tempo. Com isso, pode-se constatar que as amostras podem endurecer e levar um certo tempo para aumentarem a sua resistência. Sendo assim, a indústria nuclear, por exemplo, pode aplicar este tipo de envelhecimento e contar com cerca de 6 meses para aumentarem sua dureza. Como o tempo utilizado para realização deste trabalho não foi suficiente para analisar a peça envelhecida naturalmente até o aumento de dureza equivalente ao da aplicação aeroespacial espera-se que, se o aumento continuar linearmente, em 10 meses a dureza seja aumentada até o valor da dureza da peça envelhecida artificialmente para aplicação aeroespacial. Se comparada com outras ligas, como a de alumínio que completa o envelhecimento natural em poucos dias, pode-se dizer que o Inconel 718 possui uma cinética de nucleação mais lenta, uma vez que este demora meses para possivelmente atingir o completo envelhecimento natural. Pode-

se dizer também, que o envelhecimento desta liga é mais lento o que pode impedir o superenvelhecimento, que é um efeito indesejável quando o objetivo é aumentar a dureza do material.

## 4 | CONCLUSÕES

A peça solubilizada para aplicação nuclear teve sua dureza reduzida comparada com a peça como recebida, tal redução deve-se ao fato de que durante a solubilização houve dissolução total das fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$ , fases as quais são mais efetivas no endurecimento. A não formação de tais precipitados é benéfica para indústria nuclear, pois sem eles não há o efeito de amolecimento induzido pela radiação, que dissolve tais precipitados.

Para aplicações aeroespaciais há necessidade de elevada resistência mecânica, que podem ser obtidas quando ocorre precipitação das fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$  e que estas podem ter sido mais efetivas ainda nessas propriedades dado ao fato desta ter passado por uma segunda etapa no forno. Com os estudos acima e com o aumento de dureza da mesma foi possível comprovar a importância da precipitação de tais fases para o aumento da dureza e resistência do material.

Para aplicações petrolíferas não é exigido uma resistência tão alta quanto para aplicações aeroespaciais, porém é necessária uma combinação de boa resistência mecânica e à corrosão que também são obtidas através da precipitação das fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$  e através do estudo proposto acima foi possível perceber que houve a precipitação de tais fases para essa aplicação.

O tamanho médio de grão para todos os casos obteve baixas variações, tal fato pode ser relacionado a constante presença dos carbetos no material.

A peça submetida ao envelhecimento natural mostrou que tal liga possui uma lenta cinética de nucleação, uma vez que para ocorrer um aumento na dureza em relação a peça como recebida foram necessários 6 meses, tal fato pode contribuir para evitar o superenvelhecimento no material, uma vez que este é submetido à aplicações que requerem altas temperaturas. Pode se dizer que no período de 6 meses o material possivelmente foi ou está sendo envelhecido naturalmente.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao suporte técnico dos laboratórios no IFG.

## REFERÊNCIAS

ASM Metals Handbook v. 2. Properties and selection of nonferrous alloys and special purpose materials: nickel and nickel alloys. ASM International, USA, 1990.

ASM Metals Handbook v. 4. Heat Treating. ASM International, USA, 1991.

Associação brasileira de normas técnicas. NBR 6508-1: Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell. Parte 2: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T). Rio de Janeiro, p. 39. 2008.

Associação brasileira de normas técnicas. NBR 11568: Materiais metálicos - Determinação do tamanho de grão. Rio de Janeiro, p. 30. 2016.

Associação brasileira de normas técnicas. NBR 13284: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica. Rio de Janeiro, p. 3. 1995.

Donachie MJ, Donachie SJ. Superalloys: A Technical Guide. ASM International, Second Edition, USA, 2002.

Meyers MA, Chawla KK. Princípios de Metalurgia Mecânica. Editora Edgard Blücher, 1982.

Reed RC. The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge, Cambridge University Press, 2006.

Rohde RA. Metalografia: Preparação de Amostras. Rio Grande do Sul, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai, 2010.

Schubert F. Temperature and time dependent transformation: Application to heat treatment of high temperature alloys. ASM, Metals Park, p.3, 1983.

Thomas A, El-Wahabi M, Cabrera JM, Prado JM. High temperature deformation of Inconel 718. Journal of Material Processing Technology, v. 177, pp. 469- 472, 2006.

Valle LCM. Efeitos da solubilização e do envelhecimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas da superliga Inconel 718. 2010. 105f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Alvenaria 1, 2, 4, 5, 8, 10  
Aplicação aeroespacial 19, 24, 25, 26, 28, 30  
Aplicação nuclear 19, 23, 25, 26, 30, 31  
Aplicação petrolífera 24, 25, 26, 28, 30  
Aquecimento 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12  
Arcos de tensão 33

### B

Blocos cerâmicos 1, 4, 9, 10, 11, 12

### C

Concreto 1, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 55  
Conforto térmico 1, 2, 4  
Construção civil 1, 2, 55

### D

Desempenho térmico 1, 2, 3, 13, 14  
Dureza 15, 21, 22, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32

### E

Edificação 1, 2, 3, 13  
Energia 2, 3, 12, 43, 44, 47, 49, 52, 53, 54  
Energia interna 49, 54  
Envelhecimento 15, 17, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32  
Escoamento 33, 34, 35, 37, 38, 42, 46, 47, 48

### G

Grãos 21, 29, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 54

### I

Inconel 718 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 29, 30, 32  
Interação 34, 38, 47, 48, 49, 51

### M

Materiais granulares 34, 46, 48, 54  
Mecânica 15, 16, 29, 31, 32, 33, 48

Método de elementos discretos (DEM) 33, 35, 36

Microestrutura 15, 17, 20, 22, 23, 25, 32

## **N**

NBR 15575 1, 2

Níquel 15, 16, 17

## **O**

Otimização 34, 35, 47, 49, 54

## **P**

Partículas 17, 20, 23, 30, 34, 35, 36, 43, 44, 47, 48, 49, 51, 52, 53

Poço de potencial 47, 48, 49, 52, 53

Potencial de Lennard-Jones 47, 48, 49

Python 33, 34, 35, 45, 47, 48, 49, 51

## **R**

Resistência 2, 15, 16, 17, 25, 29, 30, 31, 44

## **S**

Silo flow 45, 47, 48

Silos 33, 34, 35, 36, 45, 46, 47, 54

Simulação 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 53, 54

Simulação em Yade 33

Sistemas de vedações verticais 1

Sistemas granulares 33, 34, 47, 48, 49

Solubilização 15, 17, 19, 20, 22, 25, 29, 31, 32

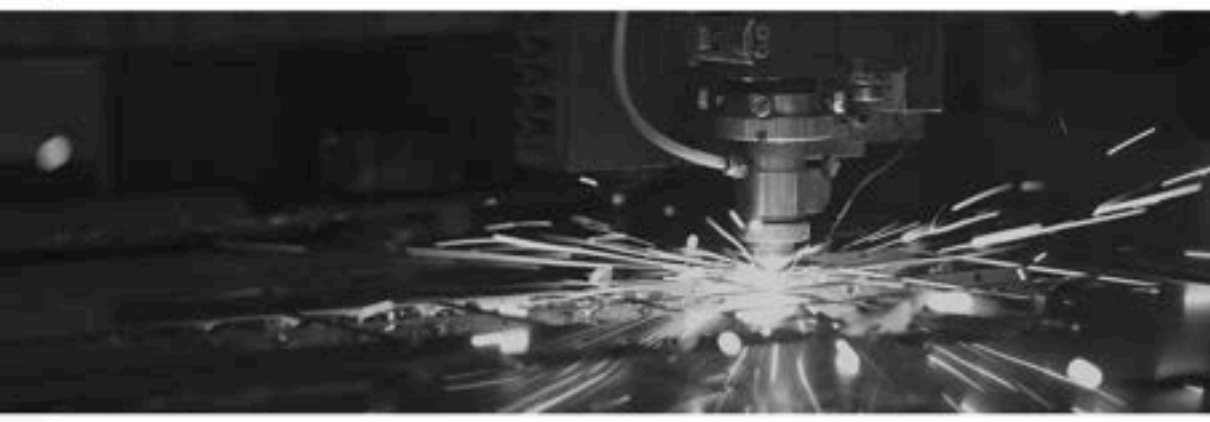
Superligas 15, 16, 17

## **T**

Temperatura 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 15, 16, 19, 20, 24, 36

Termografia infravermelha 1, 2, 3

Tratamento térmico 17, 23, 25, 26, 30



# DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA NAS ENGENHARIAS DE MATERIAIS E METALÚRGICA

---

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)



# DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA NAS ENGENHARIAS **DE MATERIAIS E METALÚRGICA**

---

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)