

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE MECÂNICA**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**GUILHERME HENRIQUE MOLINARI LOPES**

**ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA POR MEIO DO ENSAIO  
DE CORRENTES PARASITAS DA LIGA WASPALOY SUBMETIDA A  
TRATAMENTO TÉRMICO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2018**

**GUILHERME HENRIQUE MOLINARI LOPES**

**ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA POR MEIO DO ENSAIO  
DE CORRENTES PARASITAS DA LIGA WASPALOY SUBMETIDA A  
TRATAMENTO TÉRMICO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica do Departamento de  
Mecânica da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ma. Sandra Mara  
Kaminski Tramontin

Co-orientador: Prof. Dr Anderson Marena  
Pukasiewicz

**PONTA GROSSA**

**2018**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria  
Nome da Coordenação  
Nome do Curso



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA POR MEIO DO ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS DA LIGA WASPALOY SUBMETIDA A TRATAMENTO TÉRMICO**

por

**GUILHERME HENRIQUE MOLINARI LOPES**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 06 de Dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin  
Professora Orientadora

---

Prof. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto  
Membro titular

---

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à minha família, pelo total suporte em todos os momentos, acreditando em mim, mesmo quando eu não mais acreditava.

## AGRADECIMENTOS

Facilmente este é um dos momentos mais especiais que passei durante minha graduação. Neste período muitas pessoas dividiram minhas angústias e minhas alegrias e, por elas, apresento este trabalho com muita alegria.

Agradeço primeiramente à minha orientadora Prof. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin, pelo tempo a mim dedicado, pela paciência depositada e pela sabedoria dividida ao longo deste tempo.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Anderson Marena Pukasiewicz pelos conhecimentos repassados, pelas ideias propostas e pela confiança em mim creditada.

Àqueles colegas que sempre me ajudaram dos momentos mais devastadores aos mais brilhantes e que sempre acreditaram no meu potencial.

Ao Departamento de Mecânica pela colaboração sempre que foi preciso e aos professores pelos anos depositados neste trabalho.

À minha família que sempre esteve presente, mesmo distante, torcendo e incentivando para que todos os meus sonhos pudessem ser concretizados.

À minha mãe Lorena, que esteve comigo em todas as fases da minha vida, me apoiando, me moldando e me fazendo acreditar que com perseverança, dedicação e paciência podemos chegar onde queremos.

Ao meu pai Luiz, que com muito empenho e coragem, me ensinou que nada é mais recompensador do que ser justo e que com muito suor, de tijolo em tijolo, constrói-se a escada para o sucesso.

À minha irmã Giovanna, que a cada dia me mostra a importância de ser forte e ser fiel às nossas convicções.

Ao meu avô Laurindo que, mesmo sem saber, deixou em suas raízes uma identidade que certamente será carregada por muito tempo dentro da mecânica.

À minha noiva Maria, que não deixou o medo me abalar, que me apoiou nos momentos mais difíceis, que comemorou as minhas vitórias ao meu lado e que tem uma importância imensurável na conclusão desta etapa.

*“Não importa para o que você está olhando, se está olhando suficientemente bem, você está envolvido com o universo todo.” (Faraday, Michael)*

## RESUMO

LOPES, Guilherme H. M. **Análise da condutividade elétrica por meio do ensaio de correntes parasitas da liga de Waspaloy submetida a tratamento térmico.** 2018. 62 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

A necessidade de novas fontes de energia elétrica e a reutilização de gases nocivos tem reinventado o mercado. As turbinas movidas a gás fazem parte desta revolução e os materiais dos seus componentes estão sendo desenvolvidos para que a eficiência da produção energética aumente. Neste trabalho, a relação entre condutividade elétrica e dureza de uma superliga de níquel, chamada Waspaloy, tratada termicamente por envelhecimento, será analisada pelo ensaio não destrutivo de correntes parasitas e, também, pelos métodos destrutivos de microdureza Vickers, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. O ensaio de correntes parasitas mostrou uma significativa variação de condutividade elétrica entre as amostras sem tratamento térmico e com tratamento térmico, não diferenciando estas com as amostras tratadas termicamente e revestidas com nitreto de titânio alumínio. O ensaio de microdureza Vickers mostrou que as amostras tratadas termicamente estavam mais duras que as amostras não tratadas termicamente. O ensaio de microscopia ótica representou a movimentação dos precipitados presentes dispersos na liga sem tratamento e depois concentrados nos contornos de grão da peça submetida ao tratamento térmico. O ensaio de microscopia eletrônica de varredura conseguiu determinar, com maior precisão, as fases presentes nas amostras e como os precipitados intermetálicos se agruparam nos contornos de grão. Todas as alterações detectadas pelos quatro ensaios validam o ensaio por correntes parasitas como um método eficaz na análise da condutividade elétrica de peças da superliga Waspaloy tratadas termicamente.

**Palavras-chave:** Correntes Parasitas. Waspaloy. Envelhecimento. Dureza.

## ABSTRACT

LOPES, Guilherme H. M. **Analysis of the electrical conductivity by Eddy Current test of the superalloy Waspaloy subjected to thermally treatment.** 2018. 62 sheets. Final Project (Mechanical Engineering Course), Federal University of Paraná. Ponta Grossa, 2018.

The demand for new electrical energy sources and the reuse of injurious gases have been reinvented the market. The gas turbines are part of this revolution and the materials of their components are being developed to grow up the energy production efficiency. In this paper, the relationship between electrical conductivity and hardness of a Nickel superalloy, named Waspaloy, thermally treated by aging, will be analyzed by Eddy Current non-destructive test and, also, the destructives methods of Vickers microhardness, optical microscopy and scanning electron microscopy. The Eddy Current test showed a significant variation of electrical conductivity between the samples without heat treatment and with heat treatment, not differentiating these with the thermally treated samples and coated with titanium aluminum nitride. The Vickers microhardness test determined that the thermally treated samples were harder than the untreated samples. The optical microscopy showed the movement of precipitates present dispersed in the untreated alloy and then concentrated in the grain boundaries of the part submitted to heat treatment. The scanning electron microscopy was able to determine more accurately the phases present in the samples and how the intermetallic precipitates were grouped in the grain boundaries. All changes detected by the four tests validate the Eddy Current test as an effective method in the analysis of the electrical conductivity of heat treated Waspaloy superalloy parts.

**Keywords:** Eddy Current. Hardness. Aging. Waspaloy.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sistema de funcionamento de uma turbina a gás. ....	5
Figura 2: Propriedades selecionadas das camadas de TiN, TiCN e TiAlN. ....	12
Figura 3: Geração de correntes parasitas no corpo de prova. ....	16
Figura 4: Efeito da espessura do material nos ensaios por correntes parasitas. ....	19
Figura 5: Correntes parasitas em superfície com camada não condutora ....	20
Figura 6: Barra de Waspaloy sem tratamento. ....	24
Figura 7: Corpos de prova tratados termicamente. ....	25
Figura 8: Corpos de prova tratados e revestidos com Lumena®. ....	25
Figura 9: Olympus Nortec® 500D (a) e barra de calibração Olympus (b) ....	26
Figura 10: Sonda de superfície (a) e cabo (b) marca Olympus ....	26
Figura 11: Ângulos em relação a horizontal dos materiais da barra de calibração. ...	28
Figura 12: Lixadeira APD4. ....	30
Figura 13: Politriz Buehler Beta Grinder com cabeçote Buehler Vector® Power Head. ....	31
Figura 14: Display com valores L1, L2 e dureza em HV. ....	32
Figura 15: Microscópio óptico Lenz® Axio Imager A2m ....	33
Figura 16: Microscópio Eletrônico de Varredura X-Act Oxford Instruments ....	34
Figura 17: Amostra de Waspaloy, sem tratamento térmico, atacada com reagente químico por 30 segundos e <i>zoom</i> de 1000 vezes ....	40
Figura 18: Amostra de Waspaloy após tratamento térmico, atacada com reagente químico por 30 segundos e <i>zoom</i> de 1000 vezes. ....	41
Figura 19: Aproximação de uma região de contorno de grão após tratamento térmico ....	42
Figura 20: Grãos e macla da amostra sem tratamento térmico. ....	42
Figura 21: Contornos de grão e precipitação na amostra tratada termicamente. ....	43
Figura 22: Detalhamento dos contornos de grão da amostra tratada termicamente. ....	43
Gráfico 1: Comparação dos ensaios de dureza Vickers nas amostras. ....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição de elementos comuns na superliga (%).....	8
Tabela 2: Condutividade de materiais. ....	18
Tabela 3: Resistividade de materiais.....	18
Tabela 4: Valores encontrados e comparados durante o ensaio de correntes parasitas.....	37
Tabela 5: Valores médios de ângulo e condutividade por fase de processo.....	38
Tabela 6: Valores de condutividade e resistividade absolutos para as amostras ensaiadas.....	38
Tabela 7: Valores medidos no ensaio de microdureza Vickers.....	39
Tabela 8: Valores médios de dureza para as amostras ensaiadas. ....	40

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	2
1.2 OBJETIVO GERAL .....	2
1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	3
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>4</b>
2.1 TURBINAS .....	4
2.1.1 Turbina a Gás .....	4
2.2 NÍQUEL .....	5
2.2.1 Superligas de Níquel .....	6
2.2.1.1 Waspaloy .....	8
2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS .....	8
2.3.1 Solubilização .....	9
2.3.2 Estabilização .....	9
2.3.3 Envelhecimento .....	10
2.4 REVESTIMENTOS .....	10
2.4.1 Aspersão Térmica .....	11
2.4.2 Deposição por Vapor Químico (CVD) .....	11
2.4.3 Deposição por Vapor Físico (PVD) .....	11
2.5 ENSAIOS MECÂNICOS DESTRUTIVOS .....	12
2.5.1 Ensaio de microdureza Vickers .....	13
2.5.2 Metalografia .....	13
2.6 ENSAIOS MECÂNICOS NÃO DESTRUTIVOS .....	15
2.6.1 Correntes Parasitas .....	15
2.6.1.1 Fundamentos do Ensaio .....	15
2.6.1.2 Propriedades Que Afetam as Correntes Parasitas .....	17
2.6.1.2.1 Condutividade Elétrica .....	17
2.6.1.2.2 Dimensão e Forma do Objeto .....	19
2.6.1.2.3 Permeabilidade Magnética .....	19
2.6.1.2.4 Espaçamento Entre a Peça e a Bobina .....	20
2.6.1.2.5 Frequência de Trabalho .....	20
2.6.1.2.6 Dureza .....	21
2.6.1.2.7 Tensões residuais .....	21
2.6.1.2.8 Camada condutora .....	21
2.6.1.3 Aplicações do Método .....	22
2.6.1.4 Vantagens e desvantagens .....	23
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
3.1 MATERIAIS .....	24
3.2 ENSAIOS POR CORRENTES PARASITAS .....	25

3.2.1 Equipamentos utilizados .....	25
3.3 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS .....	29
3.3.1 Equipamento utilizado.....	30
3.4 MICROSCOPIA ÓTICA.....	33
3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA .....	34
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>36</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

É muito comum, nos dias de hoje, encontrar pesquisas que focam em formas alternativas de se produzir energia, desligando o tradicional modo de se gerar energia elétrica a partir da água. Contando com as novas tecnologias existentes, as empresas vêm desenvolvendo técnicas que as tornem autossuficientes, ou seja, uma maneira eficiente de se gerar energia elétrica, reutilizando processos ou produtos por elas desenvolvidos.

Empresas que possuem como alguns dos produtos gases provenientes do refino de petróleo, acabam por reutilizar esses gases na produção de energia elétrica para a planta. Esses gases, depois de alguns processos, são encaminhados para uma grande turbina movida a gás, que pode gerar até metade da energia elétrica produzida por uma fábrica.

Um fato importante é que esses gases carregam elementos corrosivos, que danificam as peças da turbina, podendo gerar graves problemas para todo o sistema. Além disso, pequenas partículas provenientes dos filtros e processos acabam atingindo as palhetas e discos da turbina, contribuindo para o desgaste acentuado.

Para minimizar os problemas, superligas de níquel, com excelente resistência térmica e boas propriedades quando submetidas a ambientes em condições severas, são empregadas em elementos importantes das turbinas, aumentando as horas de trabalho empregadas para a geração de energia.

A Waspaloy, superliga de níquel policristalina, resiste a altíssimas temperaturas, conferindo excelente desempenho nas conhecidas partes quentes de um gerador movido a gás.

O tratamento térmico de envelhecimento simula as condições de exposição das superligas, auxiliando na análise do material submetido a temperaturas muito próximas da temperatura de fusão.

Parte desta simulação recorre ao poder energético que o calor tem sobre a microestrutura do corpo, alterando, dentre tantas propriedades, a forma como o material se comporta quanto a sua dureza durante a vida útil.

Para medir as vantagens de se utilizar a superliga, as peças são ensaiadas por métodos destrutivos, ou seja, há a retirada de uma parte da peça que, posteriormente

será tratada e terá avaliadas as propriedades da parte, sendo que a mesma não poderá reintegrar o corpo de onde foi retirada.

A alternativa ao ensaio destrutivo é o ensaio não destrutivo, muito pouco aplicado neste tipo de processo. Acredita-se que, pelo tipo de utilização, o ensaio não destrutivo por correntes parasitas, ou correntes de Foucault, pode auxiliar na análise de desgaste da peça, tanto em detrimento de sua velocidade de diagnóstico, como em sua simplicidade de procedimento.

O método de correntes parasitas utiliza uma bobina que gera um campo na região a ser ensaiada. Esse campo é revisado instantaneamente pelo equipamento e, caso constatada uma irregularidade no sinal recebido, há a indicação do local da descontinuidade da peça. Esse método é muito empregado em análises de espessura de tubulação de caldeiras, porém existem outras características que podem ser avaliadas, como a condutividade elétrica e, por consequência, a dureza.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O ensaio não destrutivo por correntes parasitas pode se enquadrar como uma metodologia coadjuvante na análise da mudança microestrutural por tratamento térmico, que simula uma condição de trabalho em altas temperaturas em tempo prolongado, por meio do estudo das variações de condutividade elétrica em relação às possíveis mudanças microestruturais geradas, devido as condições de trabalho em altas temperaturas. Com este método, mesmo que qualitativo, têm-se uma resposta mais rápida e simples de verificação e análise, podendo ser realizado em campo, no conjunto ainda montado.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

A pesquisa tem como objetivo verificar a aplicabilidade do ensaio de correntes parasitas na caracterização das variações microestruturais da superliga Waspaloy, quando submetida a um ciclo térmico de aquecimento e resfriamento controlado.

### 1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO

Avaliar e relacionar, através do método de ensaio não destrutivo de correntes parasitas e do método destrutivo de microscopia ótica, a variação de condutividade elétrica e microestrutural da superliga de níquel Waspaloy submetida a um ciclo de tratamento térmico.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção apresentam-se revisões de literatura sobre as turbinas, o níquel e suas ligas, a condutividade, as microestruturas, o ensaio de microdureza Vickers, o ensaio de micrografia e o ensaio por correntes parasitas.

### 2.1 TURBINAS

Muitos equipamentos, nos dias atuais, possuem, como principal fundamento, o movimento de fluidos. Dentre uma gama de produtos existentes no mercado, as turbinas se destacam por sua versatilidade. Desde a geração de energia até a propulsão de aviões, as turbinas vêm sendo requisitadas há anos.

Com tantas aplicações, há de se estudar este equipamento. Peng (2008), um destes pesquisadores, subdividiu as turbinas entre aquelas movidas a gás, a vapor, eólicas e hidráulicas.

Define-se a turbina como sendo o equipamento gerador de trabalho em um eixo por meio de energia cinética e térmica de um fluido – gás, vapor, ar, água (PENG, 2008).

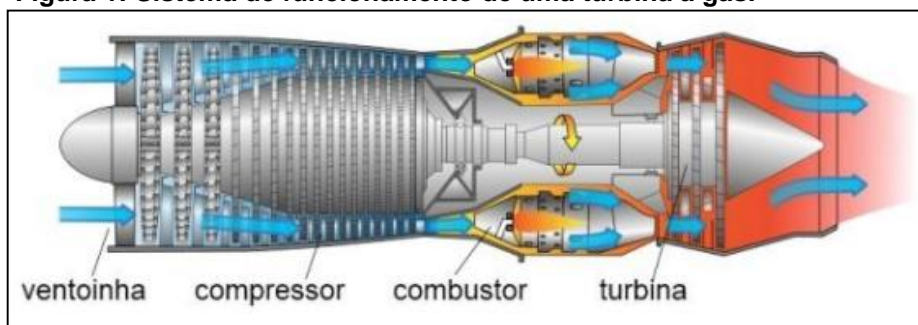
#### 2.1.1 Turbina a Gás

Por consequência das ligas apresentadas adiante, detalham-se apenas as turbinas movidas a gás. Sua construção simples e de eficiência alta, tornam a aplicação em aeronaves e produção energética extremamente recomendada.

Como é possível ver na Figura 1, o ar, retirado do ambiente, é sugado pelas pás do rotor e encaminhado por uma sequência de novos rotores de diâmetros gradativamente menores, aumentando a pressão do fluido. Após isso, o ar comprimido é impelido à câmara de combustão, onde recebe a adição de fluido combustível. O gás quente expande na turbina, gerando rotação para o eixo. A mistura que resultou da ignição do ar comprimido com o combustível é lançada para um conjunto menor de rotores que possuem seus diâmetros maiores ao longo do comprimento, diminuindo pressão e temperatura para depois serem jogados em um bocal, dando propulsão ao sistema (FRANKLIN, 2018).



**Figura 1: Sistema de funcionamento de uma turbina a gás.**



Fonte: Tecmundo.

As palhetas das turbinas estão aplicadas em um ambiente de condições adversas, visto que a alta temperatura e a corrosividade do resultado da combustão são altos, além do alto dano causado pelo oxigênio ao metal (GENTIL, 1982).

Como a temperatura age em uma seção muito pequena da palheta, é importante trabalhar com metais que possuam propriedades físicas e mecânicas aquém do esforço e do ambiente esperado (GODOY, 1996).

Godoy (1996) demonstra que os metais mais utilizados nestes componentes são resultados de ligas baseadas em Níquel e Cobalto, por suas garantidas propriedades em trabalhos em elevadas temperaturas.

## 2.2 NÍQUEL

Reiterando o que foi dito, o Níquel, que apresenta um ponto de fusão próximo dos 1450 °C, tem como algumas de suas principais funções na indústria, estar presente em ligas ferrosas ou não para aumento de resistência, servir de revestimento, aplicações em baterias e ser o metal de base para formação de superligas (ASM SPECIALITY HANDBOOK, 2000).

O site Infomet (2018) classifica o Níquel quanto à sua aplicação:

- Níquel comercialmente puro: muito utilizado em meios oxidantes e de temperatura próxima a 300°C;
- Ligas binárias: muito utilizadas em locais de muito sal, tem como principal representante a liga Ni-Cu que, por serem submetidos ao endurecimento por envelhecimento, aumentam a resistência a corrosão, se comparados ao tipo anterior;

- Ligas ternárias: com alta resistência aos meios oxidantes e redutores, possuem a vantagem de trabalhar em altas temperaturas sem perder estas propriedades;
- Ligas complexas: possuem como aplicação, meios que envolvem ácido sulfúrico ou fosfórico e, mesmo assim, têm em suas propriedades o destaque de aceitar muitos tipos de corrosão sem mudança, como a corrosão alveolar e a corrosão intergranular;
- Superligas: desenvolvidas para um ambiente de alta temperatura, contam com alto módulo de elasticidade e baixa difusão em meios extremos, possuem elementos que trazem resistência ao movimento das discordâncias e são muito aplicadas em componentes de turbinas a gás, sendo aqui representadas pela liga Waspaloy.

### 2.2.1 Superligas de Níquel

Roger Reed (2006) enumera três características principais que uma liga resistente a alta temperatura deve ter. A primeira é a de que o material deve estar apto a trabalhar próximo da temperatura de fusão. Teoricamente, para que se considere a temperatura como temperatura alta de operação, a razão entre temperatura de operação e temperatura de fusão ( $T_{operação}/T_{fusão}$ ) tem que ser maior ou superior a 0,6. A segunda característica trata da capacidade do material a resistir mecanicamente por um longo período de tempo de trabalho. Como é impossível, na prática, considerar que os elementos de uma turbina a gás não sofram deformação, o autor apresenta como ideal taxas reduzidas de deformação acumulada. A terceira característica apontada é a tolerância do sistema em operar em condições ambientais severas. Como pode ser analisado acima, na Figura 1, o combustível é queimado pouco antes de chegar na turbina. Os gases de combustão, produzidos durante a queima do combustível, possuem elementos químicos altamente corrosivos, além das impurezas do ar, que atingem as palhetas da turbina mecanicamente.

Existem alguns motivos, segundo Reed (2006), que tornam as superligas de Níquel mais vantajosas que as outras, quando utilizadas em processos de altas temperaturas. O primeiro deles considera a estrutura cristalina. O níquel, dentre os metais de transição, faz parte de uma gama de elementos que tem a sua estrutura

apresentada como Cúbica de Face Centrada, que confere uma alta taxa de energia de ativação de normalização e baixa difusividade no ponto de fusão. Essas características tornam o Níquel mais resistente e dúctil, devido a ligações fortes entre os elétrons externos. Ademais, tal elemento é estável até o ponto de fusão, o que impede o aparecimento de uma fase conhecida como fase de transformação, onde o metal sofre expansão e contração, o que é indesejado quando se trabalha em altas temperaturas. Como já descrito, o trabalho com altas temperaturas requer uma deformação pequena. Metais com baixa difusividade apresentam baixas taxas de deformação em detrimento da temperatura, o que, mais uma vez, eleva o potencial das superligas de Níquel. Como é de se esperar, a aplicação depende de custos. Se compararmos as superligas de Níquel com as de outros materiais, veremos que apenas as de Cobalto são tão aplicáveis quanto. Fato é que existem ligas de Cobalto aplicadas em sistemas de alta temperatura, no entanto, o custo destas é alto, o que retorna às ligas de Níquel, a preferência.

Outra propriedade que influencia na microestrutura das superligas em geral é a presença de mais de uma fase. As fases são formações microestruturais que correspondem à solubilização do material (REED, 2006).

A fase correspondente a base do material, também chamada de matriz, é a fase  $\gamma$ . Aqui, a predominância do elemento níquel aumenta a solubilidade da fase. Quando se adicionam outros elementos na solução sólida, há um travamento das discordâncias, conferindo maior resistência e criando a fase  $\gamma'$ . Por consequência do alto ponto de fusão dos elementos adicionados, há uma considerável mudança na resistência da matriz em altas temperaturas (GEDDES, et al, 2010).

Essa junção de elementos da fase  $\gamma'$  é intermetálica, ou seja, possui uma distribuição estequiométrica definida e fica precipitada na matriz, resultando em excelente estabilidade (REED, 2006).

As superligas ainda contam com a fase  $\gamma''$ , que é uma fase metaestável, isto é, uma fase que pode perder a estabilidade em baixas temperaturas, mas confere excelentes resultados quando a temperatura passa dos 700°C, graças a iteração que ela faz com os defeitos cristalinos (REED, 2006).

### 2.2.1.1 Waspaloy

A classificação das superligas de Níquel é grande. Para cada tipo de mistura de elementos, uma aplicação diferente. Das superligas de Níquel, o Waspaloy foi desenvolvido para trabalhar em altas temperaturas em turbinas a gás. Mais precisamente, a utilização desta superliga é constatada em discos de turbinas, servindo como base para as palhetas do equipamento e nas próprias palhetas. Sua estrutura policristalina não é tão boa se comparada a outras, com relação a deformação acumulada, porém tem como vantagem um comportamento mais estável, atingindo temperaturas da ordem de 800 °C (REED, 2006).

A Tabela 1 apresenta dados de composição de algumas superligas de Níquel, para efeito de comparação.

**Tabela 1: Composição de elementos comuns na superliga (%).**

<b>Superliga</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>Mo</b>	<b>W</b>	<b>Nb</b>	<b>Al</b>	<b>Ti</b>	<b>Ta</b>	<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>Zr</b>
<b>Astroloy</b>	15,0	17,0	5,3	---	---	4,0	3,5	---	---	0,06	0,030	---
<b>Hastelloy S</b>	15,5	---	14,5	---	---	0,3	---	---	1,0	---	0,009	---
<b>Incoloy 905</b>	---	13,0	---	---	4,7	0,03	1,5	---	42,0	0,01	---	---
<b>Inconel 740</b>	25,0	20,0	0,5	---	2,0	0,9	1,8	---	0,7	0,03	---	---
<b>Waspaloy</b>	19,5	13,5	4,3	---	---	1,3	3,0	---	---	0,08	0,006	---

Fonte: Adaptado de Reed (2006).

As ligas Waspaloy são fabricadas por forjamento, desde que os teores de alumínio, titânio e nióbio sejam baixos para que o acréscimo do custo da aspensão térmica seja justificável (REED, 2006).

## 2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Tratamentos térmicos são processos que, através do calor, modificam as estruturas e propriedades conforme a necessidade que a aplicação do metal depende (NOVIKOV, 1994).

Novikov (1994) divide os tratamentos térmicos em três tipos principais: propriamente térmico, termomecânico e termoquímico. Os tratamentos propriamente térmicos ainda são subdivididos em recozimento de primeiro tipo, recozimento de

segundo tipo, têmpera com transformação polimórfica, têmpera sem transformação polimórfica, revenido e envelhecimento.

Por consequência dos tratamentos térmicos utilizados previamente nas peças ensaiadas, neste trabalho aborda-se apenas os tratamentos térmicos de solubilização, estabilização e envelhecimento.

### 2.3.1 Solubilização

Para facilitar o envelhecimento da liga, o tratamento térmico de solubilização é necessário. Nele, as precipitações que surgiram na confecção da liga são aquecidas até uma temperatura próxima a temperatura de fusão do material de base da liga, por tempo suficientemente necessário para que todos os elementos sejam dissolvidos (CALLISTER, 2006).

O aquecimento dissolve os precipitados, mantendo os elementos liga em solução sólida, ou seja, todos estão harmonicamente estruturados na peça, reduzindo as tensões oriundas dos processos de fabricação com aglomerado (VACH, et al, 2008).

O resfriamento na solubilização tem que ser rápido, para que os elementos da mistura homogênea se destaquem na rede por não ocorrer a difusão completa, deixando a temperatura da peça igual à do ambiente (MOURA, et al, 2008).

### 2.3.2 Estabilização

A solubilização torna a rede cristalina homogênea, mas desequilibrada. Para que seja possível partir ao envelhecimento, a fase única presente na peça precisa ser estabilizada (CALLISTER, 2006).

Este tratamento consiste em adição de energia aos elementos por consequência de aumento de temperatura, para que as tensões residuais da liga possam ser dissipadas. Entretanto, essa temperatura não pode atingir a região de solubilização e pode durar pouco mais que o tratamento deste tipo (ABAL, 2018).

### 2.3.3 Envelhecimento

Merick, um dos pesquisadores americanos do grupo que primeiro estudou o envelhecimento do duralumínio, desenvolveu uma hipótese de que o endurecimento a qualquer temperatura de envelhecimento ocorre com o tempo para desenvolver os processos de difusão da solução sólida.

Assim, determinou-se que o envelhecimento é um tratamento térmico de liga submetida a têmpera sem transformação polimórfica (propriedades adquiridas das ligas em altas temperaturas fixadas em baixas temperaturas), em que o processo principal é a decomposição da solução sólida supersaturada (NOVIKOV, 1994).

O envelhecimento depende de alguns fatores, dentre eles o tempo de tratamento térmico na peça e a temperatura. As normas ASTM determinam os padrões de tratamento que devem ser utilizados para cada tipo de estudo desenvolvido.

O resultado do envelhecimento pode ser expresso em diagramas de transformação isotérmica, porém são mais comuns resultados comparativos entre o tempo de exposição e o limite de resistência, ou de dureza, ou de escoamento, por exemplo (CALLISTER, 2006).

Os precipitados resultantes do tratamento de envelhecimento são objetivos deste tipo de intervenção, visto que tem o poder endurecedor, ou seja, conferem uma maior dureza à liga.

## 2.4 REVESTIMENTOS

Segundo Callister (2006), revestimentos são aplicações superficiais para abrangência de uma das três propostas mencionadas: proteger aquilo que está sendo revestido contra um ambiente corrosivo ou deteriorador, melhorar a aparência, ou proporcionar isolamento elétrico.

O Centro de Informação Metal Mecânica (2016), divide os processos de revestimentos em três tipos principais: Aspersão Térmica, Deposição por Vapor Químico e Deposição por Vapor Físico.

#### 2.4.1 Aspersão Térmica

A aspersão térmica é uma seleção de procedimentos onde micropartículas de materiais, metálicos ou não, estruturados de forma fundida ou semifundida, são depositados sobre a superfície de uma peça, também conhecida como substrato, formando uma camada aspergida (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1985).

#### 2.4.2 Deposição por Vapor Químico (CVD)

Segundo Tatsch, o processo CVD pode ser descrito como reagentes específicos e gases inertes sendo introduzidos em uma câmara de reação. Estes gases difundem em direção a superfície da peça e formam um filme. Para que a reação se concretize, calor é utilizado no processo para liberação da energia necessária.

#### 2.4.3 Deposição por Vapor Físico (PVD)

No PVD, as moléculas de revestimento são enviadas à peça por, geralmente, evaporação, onde a fonte do material da futura camada superficial está fundida e, por pulverização ou diferencial de pressão, essas são impelidas em forma de íons (CUNHA, 2000).

Alguns tipos de materiais têm se destacado na utilização do processo PVD. O Nitreto de Titânio (TiN), o Carbonitreto de Titânio (TiCN) e o Nitreto de Titânio Alumínio (TiAlN) possuem alta dureza, excelente aderência e estabilidade (Kaiser, 1995).

A Figura 2 mostra um comparativo entre os três tipos de camada de revestimento.

**Figura 2: Propriedades selecionadas das camadas de TiN, TiCN e TiAlN.**

Camada	TiN	TiCN	TiAlN
Dureza (HV 0,05)	2.500	2.700	2.600
Espessura máxima ( $\mu\text{m}$ )	4	4	3
Estabilidade térmica ( $^{\circ}\text{C}$ )	550	450	800
Aderência *1 (N)	60	50	50
Coefficiente de atrito contra aço	0,65	0,50	0,60
Coefficiente de transmissão de calor (W/mK)	29	29	-
Cor	Dourado	Lilás	Cinza/ preto
*1 - Aderência medida indiretamente através da determinação da carga crítica no ensaio de riscamento, utilizando aço rápido temperado como substrato.			

Fonte: Kaiser, 1995.

O Nitreto de Titânio Alumínio (TiAlN) é abordado aqui pela utilização do mesmo nos corpos de prova revestidos. Segundo Wang et al (1999), o filme protetivo desta liga é muito denso e forma uma barreira contra a difusividade do oxigênio no revestimento.

Outras vantagens da aplicação do TiAlN é a baixa condutividade térmica e a resistência a temperaturas de aproximadamente  $900^{\circ}\text{C}$ , temperatura próxima àquela de trabalho de uma turbina a gás para produção de energia elétrica, que possui suas palhetas produzidas em Waspaloy e tratadas termicamente por envelhecimento.

## 2.5 ENSAIOS MECÂNICOS DESTRUTIVOS

Ensaio mecânicos visam comparar e medir propriedades dos materiais, assim como constatar as influências dos métodos de fabricação, tratamento e utilização dos materiais e determinar quais são os mais indicados para cada tipo de aplicação e solicitação (CHIAVERINI, 1986).

Algumas vezes, os ensaios podem ser feitos em lotes de peças retiradas por amostragem. Assim, a destruição de peças pode não ser tão prejudicial. Esta destruição é necessária para obtenção de propriedades como dureza, tenacidade, limites de escoamento e ruptura, entre outros, possam ser obtidos (CALLISTER, 2006).

A esses ensaios damos o nome de Ensaio Mecânicos Destrutivos. A confecção de corpos de prova com dimensões normalizadas facilita o encontro das propriedades citadas nos materiais que compõem a peça e a minimização dos efeitos da perda de produtos (CHIAVERINI, 1986).



Zolin (2010), apresentou os oito tipos de ensaios destrutivos mais comuns: os ensaios de tração, compressão, dureza, fratura frágil, dobramento e flexão, torção, fadiga e fluência. Dos oito, este material foca apenas no ensaio de microdureza Vickers, pois a dureza é um dos fenômenos que fazem variar a condutividade de uma peça ensaiada pelo método de correntes parasitas.

### 2.5.1 Ensaio de Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers é o que mais se aplica em pesquisas, graças à escala que carrega. Materiais extremamente moles podem chegar a 5 HV e materiais extremamente duros podem atingir os 1500 HV (CHIAVERINI, 1986).

Neste ensaio, o pequeno edentador de diamante piramidal de base quadrada é impelido contra a peça e, com o auxílio de um microscópio ou uma luneta, a medida da penetração da ponta de prova é determinada (CALLISTER, 2006).

O cálculo de dureza na escala Vickers relaciona a força aplicada pelo edentador P, a diagonal da impressão na peça, L e o ângulo de 136° entre as faces da pirâmide (ZOLIN, 2010). A equação resultante deste teste de dureza é:

$$HV = \frac{2.P.\text{sen} \frac{\theta}{2}}{L^2} \quad (1)$$

Há, hoje, durômetros que, além do ensaio propriamente dito, com o auxílio visual do operador, conseguem determinar rapidamente qual o valor, na escala Vickers, do material ensaiado.

### 2.5.2 Metalografia

Metalografia é o estudo da morfologia e estrutura dos metais (COLPAERT, 1994).

O ensaio metalográfico busca verificar as características estruturais de um metal e sua aplicação, fabricação e/ou outros processos em que o corpo de prova foi submetido (ROHDE, 2010).

Dentre os ensaios de metalografia estão os ensaios micrográficos e os macrográficos. Os ensaios macrográficos são utilizados quando a estrutura não precisa de grande aproximação ótica, não passando a ampliação de 50 vezes. Os

ensaios micrográficos dependem exclusivamente de lunetas ou microscópios com lentes que passam das 1000 vezes de aproximação (ROHDE, 2010).

Colpaert (1994), dividiu a técnica de ensaio micrográfico em algumas fases:

- Escolha a localização a ser estudada;
- Torne a superfície escolhida lisa e polida;
- Faça um exame microscópico para observar a superfície antes do ataque;
- Ataque a superfície com um reagente químico;
- Volte ao microscópio para analisar a superfície;
- Produza imagens da superfície estudada.

Embora o ensaio metalográfico não danifique a peça, a preparação para o mesmo, como explicou Colpaert (1994), depende da retirada de uma amostra da parte que se deseja avaliar. Esta parte é embutida para que se evitem perdas como lixas e toalhas de polimento e para que se facilite o manuseio da peça com menores chances de contaminação da área estudada.

Após o embutimento, é necessário lixar a amostra, tirando as maiores imperfeições, começando nas lixas mais grossas e indo para as mais finas. Ainda com o intuito de melhorar a superfície da amostra, é recomendado polir a mesma. É importante entender que o lixamento e o polimento também têm o poder óptico de tornar a amostra refletiva ao microscópio, não divergindo a luz enviada (COLPAERT, 1994).

A primeira avaliação microscópica serve para entender como está a amostra e também para se ter um ponto de partida.

O ataque com reagente retira as impurezas e oxidações da peça, relevando a microestrutura da amostra.

A segunda avaliação microscópica é aquela que vai apresentar a estrutura ao operador. Nela será possível observar os detalhes relevantes à pesquisa pretendida.

Existe, ainda, um método conhecido como Microscopia Eletrônica de Varredura, o MEV. Ele utiliza um feixe de elétrons, resolvendo o problema da luz branca nos métodos por microscópio óptico (DEDAVID, et al, 2007).

Por conta de as ondas dos elétrons serem muito menores que as ondas de luz, é possível aumentar a aproximação em quase 300.000 vezes, enquanto um microscópio óptico está limitado às 2.000 vezes de aumento (DEDAVID, et al, 2007).

Além do melhor aproveitamento em se tratando de detalhamento, o MEV consegue entregar ao pesquisador, resultados quanto a quantidade de cada elemento presente na amostra, aumentando o grau de detalhamento e a relevância da pesquisa (DEDAVID, et al, 2007).

## 2.6 ENSAIOS MECÂNICOS NÃO DESTRUTIVOS

Os métodos de ensaios não destrutivos (END) estão entre as principais ferramentas de controle da qualidade nas mais variadas áreas de aplicação. Eles possuem como objetivo principal a melhoria de bens e serviços, reduzindo custos e preservando os equipamentos e o meio ambiente em que estes estão inseridos (ABENDI, 2017).

Dentre os inúmeros métodos, os ensaios eletromagnéticos podem ser destacados, graças ao princípio de criar perturbações no campo eletromagnético de um sistema em detrimento da presença de um objeto nesse campo, auxiliando, assim, na detecção de condições inerentes ao processo de fabricação ou utilização do objeto (SOARES, 2009).

### 2.6.1 Correntes Parasitas

O ensaio não destrutivo por correntes parasitas é considerado uma das principais técnicas na classe dos eletromagnéticos, graças a sua ampla faixa de aplicação e facilidade de processo (SOARES, 2009). Ele consiste em um campo magnético gerado por uma bobina alimentada por corrente alternada, que produz correntes induzidas no objeto a ser ensaiado (MENDES, 2009).

A principal utilização do método de ensaio por correntes parasitas se refere a avaliações em materiais de pequena espessura, como tubos. Isso se deve ao poder de penetração das correntes secundárias na composição da peça ensaiada (SOARES, 2009).

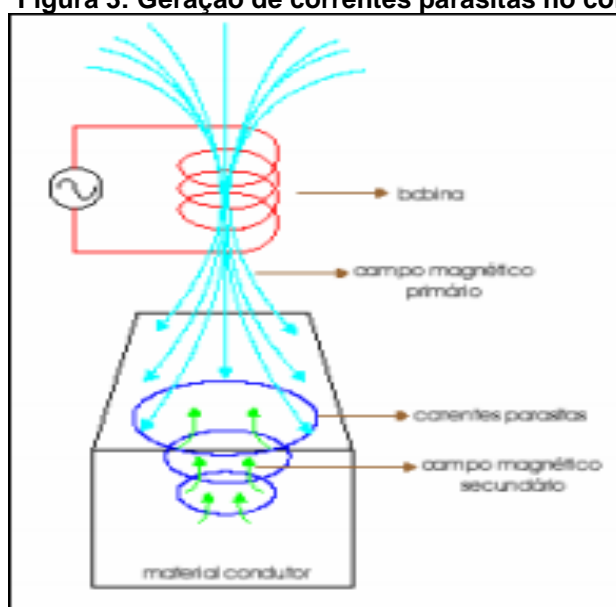
#### 2.6.1.1 Fundamentos do Ensaio

O ensaio por correntes parasitas pode ser aplicado tanto em materiais ferromagnéticos como em não ferromagnéticos e tem sido largamente utilizado na

indústria, detectando trincas ou pontos de corrosão em componentes. Além disso, tem-se aplicado o método para a obtenção de discontinuidades, determinação de características, medição de espessura de camadas e diferenciando os materiais em função de sua composição química, microestrutura e dureza (OLIVEIRA, 2016).

Para se efetuar o ensaio, uma bobina alimentada por corrente alternada é colocada sobre a superfície do corpo de prova (encostada ou não, dependendo da necessidade e geometria da peça). Na região do entorno da bobina é gerado um campo magnético, conhecido como campo primário. Este campo induz um campo secundário, que tem sentido oposto ao primário e dá origem as correntes parasitas, como visto na Figura 3 (MENDES, 2009).

**Figura 3: Geração de correntes parasitas no corpo de prova.**



**Fonte: Mendes (2009).**

A lei de indutância de Faraday enuncia que uma variação de densidade de fluxo magnético induzido ao longo do tempo, produz uma corrente induzida em um condutor elétrico (PEREIRA, 2014).

Assim, há, nessa região induzida, uma superposição dos campos magnéticos, onde o campo secundário se opõe ao primário, contribuindo para a geração de um sinal que carrega informações como as características elétricas, magnéticas e geométricas do corpo de prova (SOARES, 2009).

A Impedância de uma bobina, ou seja, a relação entre tensão e corrente da mesma, que pode ser definida por um número complexo (com parte real e imaginária), pode ter sua parte real alterada pelo aumento da dissipação de energia. É com os

valores desse parâmetro que se consegue relacionar informações essenciais como condutividade e composição do material estudado (GARCIA-MARTIN, et. al., 2011).

#### 2.6.1.2 Propriedades Que Afetam as Correntes Parasitas

É possível afirmar que este sinal medido na unidade (bobina + peça), é dependente direto das características geométricas da bobina, da frequência da corrente de excitação, das propriedades elétricas e magnéticas e da geometria do corpo de provas e da existência ou não de descontinuidades no mesmo (SOARES, 2009).

##### 2.6.1.2.1 Condutividade Elétrica

A caracterização elétrica de um material se dá pela facilidade de conduzir elétrons desse material. Materiais de alta condutividade elétrica são mais sensíveis a trincas, no entanto a varredura é feita mais superficialmente (PEREIRA, 2014).

O fenômeno de condução de elétrons é chamado de condutividade elétrica e tem como principal sistema de medida o I.A.C.S. (*International Annealed Copper Standard* – Norma Internacional de Cobre Puro Recozido). Nele, o material que dá o nome é considerado como um condutor ideal – mesmo que já se tenha encontrado materiais mais condutores que o cobre recozido (SOARES, 2009).

Alguns fatores podem se destacar em ensaios com as correntes parasitas, medindo-se a condutividade elétrica do corpo ensaiado. A temperatura da peça, a composição química, as tensões residuais dos processos a que a peça foi submetida e possíveis tratamentos térmicos podem ser encontrados ao usarmos o ensaio (PEREIRA, 2014).

Seguindo a norma I.A.C.S., os materiais são dimensionados baseados em qual a porcentagem de condutividade do cobre puro recozido que será conduzida pelo material em questão, a uma temperatura de 20°C. A Tabela 2 apresenta dados de condutividades de alguns materiais utilizados na indústria (SOARES, 2009).

**Tabela 2: Condutividade de materiais.**

<b>Material</b>	<b>Condutividade (% IACS)</b>
Prata	105
Cobre Recozido	100
Ouro	70
Alumínio	61
Ligas de Alumínio	
6061 – T6	42
7075 – T6	32
2024 – T4	30
Bronze fosforoso	11
Aço Inox 304	2,5

**Fonte: Adaptado de Soares (2009).**

Outra forma de se avaliar a condutividade elétrica é por meio da resistividade do meio, apresentada na Tabela 3. No Sistema Internacional (SI), a condutividade é dada por Siemens por metro ( $S/m$ ), que é o inverso da resistividade ( $1/\Omega.m$ ) (SOARES, 2009).

**Tabela 3: Resistividade de materiais.**

<b>Material</b>	<b>Condutividade (<math>\mu.\Omega.cm</math>)</b>
Prata	1,63
Cobre Recozido	1,74
Ouro	2,46
Alumínio	2,82
Ligas de Alumínio	
6061 – T6	4,10
7075 – T6	5,38
2024 – T4	5,73
Bronze fosforoso	15,6
Aço Inox 304	68,8

**Fonte: Adaptado de Soares (2009).**

Diretamente conectadas a condutividade elétrica, as ligas, que são combinações de diversos materiais e/ou elementos químicos com um metal de base, são responsáveis por uma variedade de sinais em apenas uma medição. Isso se deve ao fato de o material ter uma heterogeneidade em sua composição. Entretanto, o

ensaio consegue realizar a determinação dos metais da liga variando os sinais conforme as respectivas resistividades elétricas (SOARES, 2009).

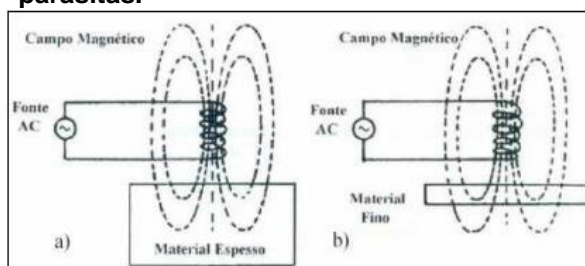
Em muitas áreas, há o revestimento com material condutor. Tal feito implica em mudança na condução do material de base. Soma-se a isso, a possível diferença na camada de revestimento aplicada, o que cria uma variação no sinal das correntes parasitas no decorrer do ensaio (SOARES, 2009).

#### 2.6.1.2.2 Dimensão e Forma do Objeto

A espessura do material está diretamente atrelada a densidades das correntes induzidas. Além disso, a profundidade de penetração das correntes é inversamente dependente da condutividade, da frequência de ensaio e da permeabilidade magnética do material. A Figura 4 (a) mostra que em certos casos, o campo magnético induzido não será suficiente para detectar as discontinuidades em toda a peça. Entretanto, um aumento da profundidade da peça não influenciará no sinal emitido (SOARES, 2009).

A situação inversa também acontece, como visto na Figura 4 (b), quando o corpo a ser ensaiado é muito fino. Nesse caso, as correntes secundárias atravessam a largura da peça, havendo um excesso de intensidade de campo magnético sendo avaliado. Caso a espessura da peça varie, o sinal indicará que pode ter havido uma mudança na condutividade elétrica do material (SOARES, 2009).

**Figura 4: Efeito da espessura do material nos ensaios por correntes parasitas.**



Fonte: Mendes (2009).

#### 2.6.1.2.3 Permeabilidade Magnética

A permeabilidade é a caracterização do comportamento magnético do material, em outras palavras, é o poder do material alterar as linhas de força do campo magnético (STEGEMANN, 1990).

Quando há uma variação do campo magnético, mesmo que pequena, há outra variação, muito maior, na impedância da bobina. Esta variação muito grande pode esconder as características que estão sendo avaliadas. Esta variação pode ser maior ainda se a peça conter tensões localizadas ou ter passado por tratamento térmico, por exemplo (HANSEN, 2004).

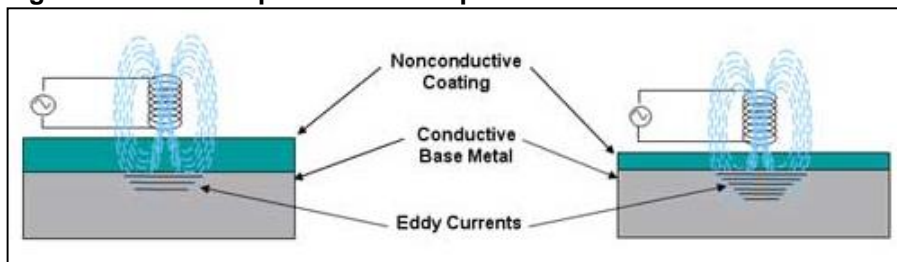
O problema pode ser resolvido (dependendo da geometria da peça), magnetizando o material utilizando-se de outra bobina, só que agora alimentada por corrente contínua, saturando a peça magneticamente e eliminando a variação do campo magnético (MENDES, 2009).

#### 2.6.1.2.4 Espaçamento Entre a Peça e a Bobina

Para ensaiar uma peça superficialmente, descrevemos o efeito da variação do espaçamento entre a peça e a bobina pela expressão inglesa (e sem tradução para o português), “*lift-off*” (SOARES, 2009).

O *lift-off* é utilizado para medir a camada não condutora da superfície da peça. Para tanto, faz-se necessário saber que, quando a bobina se encontra energizada, no ar, ela emite uma impedância, que apresenta um determinado sinal de resposta no equipamento. Assim, quanto mais a bobina se aproxima da peça condutora, o sinal emitido varia, até que o equipamento encoste na superfície ensaiada. A Figura 5 esquematiza o efeito “*lift-off*” em uma peça com camada não condutora na superfície. O sinal recebido pelo material não condutor varia de forma diferente do material condutor e, quanto mais próxima a bobina da superfície, maior a penetração do campo, havendo alteração da impedância quando esta atinge a parte condutora da peça (SOARES, 2009).

**Figura 5: Correntes parasitas em superfície com camada não condutora**



Fonte: NDT Resource Center (2017)

#### 2.6.1.2.5 Frequência de Trabalho



A frequência de trabalho do ensaio é usualmente próxima de seus limites de atuação, 50 Hz e 10 MHz. Ela está diretamente ligada a sensibilidade às descontinuidades da superfície e, quanto maior a primeira, maior a segunda (OLIVEIRA, 2016).

Para que a penetração do material aumente, a frequência de aplicação precisa ser menor, assim como a velocidade de varredura da bobina (HELLIER, 2003).

#### *2.6.1.2.6 Dureza*

A dureza também afeta as análises, visto que as mudanças de microestrutura no material afetam a condutividade do corpo ensaiado. Para tanto, o ensaio, auxiliado de bom leitorista, consegue determinar se o tratamento térmico foi inadequado ao proposto (SOARES, 2009).

A variação microestrutural é uma das responsáveis pela mudança de comportamento condutivo e é a partir dela que se consegue detectar se o tratamento térmico foi adequado ao material, por exemplo (PEREIRA, 2014).

#### *2.6.1.2.7 Tensões residuais*

As tensões residuais alteram os índices de condução da peça, analogamente ao ensaio com temperatura controlada, entender previamente o que aconteceu com a peça pode facilitar a leitura dos sinais. Elas servem como um histórico do material e nem sempre podem ser definidas previamente. Apesar disso, o ensaio consegue detectar as mudanças de condutividade que são resultantes deste fenômeno (SOARES, 2009).

#### *2.6.1.2.8 Camada condutora*

Ao se adicionar uma camada condutora de revestimento sobre a peça, o ensaio entenderá que houve uma mudança na condutividade da peça, semelhante ao acréscimo de materiais na liga avaliada. Caso haja variação de espessura deste revestimento, também haverá variação na condutividade do objeto ensaiado.

### 2.6.1.3 Aplicações do Método

O método de correntes parasitas pode determinar a microestrutura e microdureza de metais, como aços e alumínio tratados termicamente, apenas pela variação da impedância. As frequências mais baixas proporcionaram melhor diferenciação nas condições estudadas (ZERGOUG, et al, 2004).

O ensaio por correntes parasitas fornece informações que auxiliam no controle da degradação a que os equipamentos estão submetidos. Alencar (2006), ensaiou tubos de trocadores de calor e conseguiu determinar a espessura de parede em regiões de descontinuidades. Essa avaliação permite, ainda, definir a necessidade de substituição do componente (MENDES, 2009).

Alguns estudiosos também analisaram diferentes aplicações para as correntes parasitas:

Dybiec (1998), e seu grupo de pesquisa conseguiu aplicar o método para caracterizar o estado de tensões em materiais ferromagnéticos.

Boucherou (2008), identificou, por correntes parasitas, as zonas de transição elasto-plásticas e de ruptura para determinadas amostras.

A equipe liderada por X. Ma (2006), conseguiu estimar, ao mesmo tempo, a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética em metais porosos.

De modo geral, segundo Mendes (2009), entende-se como aplicação do método de ensaio não destrutivo por correntes parasitas:

- Detecção de descontinuidades em metais ferrosos e não ferrosos;
- Medição de condutividade elétrica em metais não-magnéticos;
- Medição de espessuras de camadas não condutivas sobre metais condutores não magnéticos;
- Medição de espessuras de camadas não magnéticas sobre metais magnéticos;
- Separação de materiais pela composição química ou estrutural, onde há alteração elétrica ou magnética no material testado;
- Medição de espessuras de chapas, paredes de tubos de materiais condutores;
- Medição de camada endurecida por tratamentos térmicos em aços e suas ligas;

Existem outras aplicações do ensaio que vêm se popularizando, principalmente em equipamentos onde os ensaios destrutivos são caros e muitas vezes os prejuízos às peças são enormes.

#### 2.6.1.4 Vantagens e desvantagens

A facilidade e segurança da inspeção é algo notório e traz ao ensaio uma forma alternativa de se testar um corpo de prova. Análogo a isso, a sensibilidade para com vários parâmetros também confere maior vantagem ao equipamento dentre outros métodos de ensaio.

A utilização em tubos de caldeiras ou palhetas de turbinas requer o deslocamento do aparelho ao local do corpo de prova. Por ser leve e portátil, o equipamento de correntes parasitas reitera as vantagens de uso, sendo recomendado em análises fora de laboratório (SOARES, 2009).

Como infortúnios, o ensaio carrega a característica de ser utilizado apenas em materiais eletro condutores. A perícia do operador se faz necessária quando lembramos que a sensibilidade do equipamento está diretamente ligada a vários fatores que podem estar contidos no corpo de estudo simultaneamente (MENDES, 2009).

Junto com o equipamento deve-se carregar sempre um conjunto de padrões de calibração, pois é a partir deles que se entenderão os padrões produzidos pela bobina (SOARES, 2009).

Finalmente, as desvantagens convergem para a detecção de falhas e defeitos superficiais e/ou subsuperficiais, destacando-se àqueles eletricamente muito permeáveis (SOARES, 2009).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentam-se informações de como o ensaio foi feito, detalhando os materiais e os métodos utilizados em cada passo para que os resultados adiante possam ser replicados na íntegra.

#### 3.1 MATERIAIS

Para realização do ensaio não destrutivo por correntes parasitas foram utilizadas 9 amostras de Waspaloy UNS N07001, sendo uma amostra como recebido, 4 amostras somente tratadas termicamente e 4 amostras tratadas termicamente e revestidas. A primeira amostra foi retirada de uma barra como recebida, sem tratamento ou qualquer tipo de intervenção (Figura 6), teve sua seção transversal ensaiada.

**Figura 6: Barra de Waspaloy sem tratamento.**



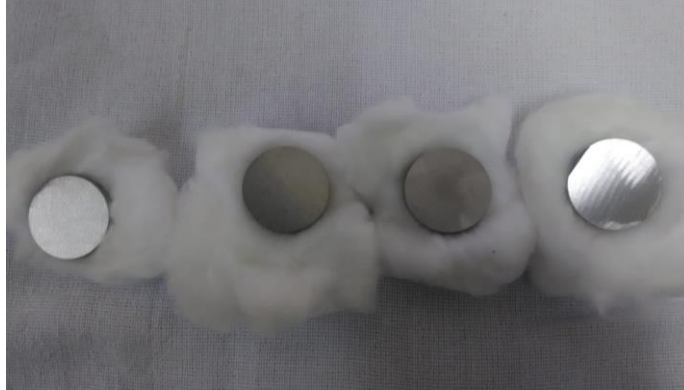
**Fonte: Autoria própria.**

Oito corpos de prova, também de Waspaloy UNS N07001 (Figura 7), foram submetidos a um tratamento térmico dividido em três ciclos de aquecimento e resfriamento controlado, conforme a sequência descrita a seguir:

1. Tratamento de solubilização à 996 °C por 2 horas, seguido de resfriamento ao ar;
2. Tratamento de estabilização à 843 °C por 4 horas, seguido de resfriamento ao ar;

3. Tratamento de endurecimento por precipitação à 760 °C por 16 horas, seguido de resfriamento ao ar.

**Figura 7: Corpos de prova tratados termicamente.**



Fonte: Autoria própria.

Dos oito corpos de prova tratados, quatro corpos de prova foram revestidos pelo processo PVD com TiAlN (nome comercial Lumena®) na empresa X, polidos e são apresentados na Figura 8.

**Figura 8: Corpos de prova tratados e revestidos com Lumena®.**



Fonte: Autoria própria.

### 3.2 ENSAIOS POR CORRENTES PARASITAS

O ensaio não destrutivo de correntes parasitas comparou a condutividade das amostras sem tratamento, tratadas e tratadas com revestimento.

#### 3.2.1 Equipamentos utilizados

O equipamento de correntes parasitas utilizado foi o Olympus Nortec® 500D, ilustrado na Figura 9-a.

**Figura 9: Olympus Nortec® 500D (a) e barra de calibração Olympus (b)**



Fonte: Autoria própria.

Acoplada ao equipamento de correntes parasitas, foi utilizada uma sonda de superfície (Figura 10-a) Olympus SL 300Hz-10kHz ligada ao aparelho por um cabo (Figura 10-b) Olympus CL/SC/6.

**Figura 10: Sonda de superfície (a) e cabo (b) marca Olympus**



Fonte: Autoria Própria

Os passos a seguir são referentes a execução do ensaio e descritos a partir da preparação do equipamento.

- a. Foi conectada a sonda de superfície no cabo e este conectado ao equipamento Nortec® 500D. Logo o equipamento reconheceu a sonda e a tela com as funções de medição de condutividade apareceram na tela.
- b. Pressionou-se a tecla **FREQ**, no canto superior direito da tela e, girando o **SmartKnob™** até 4kHz, foi possível chegar próximo a metade do intervalo de frequência da sonda de superfície.
- c. Seguindo a coluna na descendente, foi selecionado o valor de  $0,0^\circ$ , também girando-se o **SmartKnob™**, para definição do ângulo da curva de condutividade (**ANGLE**).

- d. Continuando, trabalhou-se com o GAIN, botão que, com a variação do SmartKnob™, muda o ganho, que pode ser considerado como a sensibilidade do equipamento. Os valores selecionados foram 66,5dB na horizontal e 66,9dB na vertical.
- e. Para ajustar as curvas com uma melhor visualização, foi necessário, por meio da função DISP, na base do aparelho, escolher a tecla SCREEN SETUP e com o SmartKnob™ programar as posições horizontais e verticais, por meio das teclas H POS e V POS.
- f. Para voltar à tela onde ocorrem as medições, foi necessário apertar a tecla MAIN, na base, do lado esquerdo do equipamento.
- g. Com o intuito de limpar a tela de ruídos provenientes das mudanças exercidas, foi apertada a tecla NULL.
- h. Conectou-se o aparelho a um computador, por um cabo USB, para que não se perdesse a qualidade das imagens geradas pela sonda, utilizando o software EddyMaster500 para avaliação.
- i. De posse das imagens, foi necessário utilizar o programa SolidWorks® 2018 e, com as ferramentas de linha e de medições, mensurou-se os ângulos de fase com relação a horizontal, exemplificado na Figura 11.

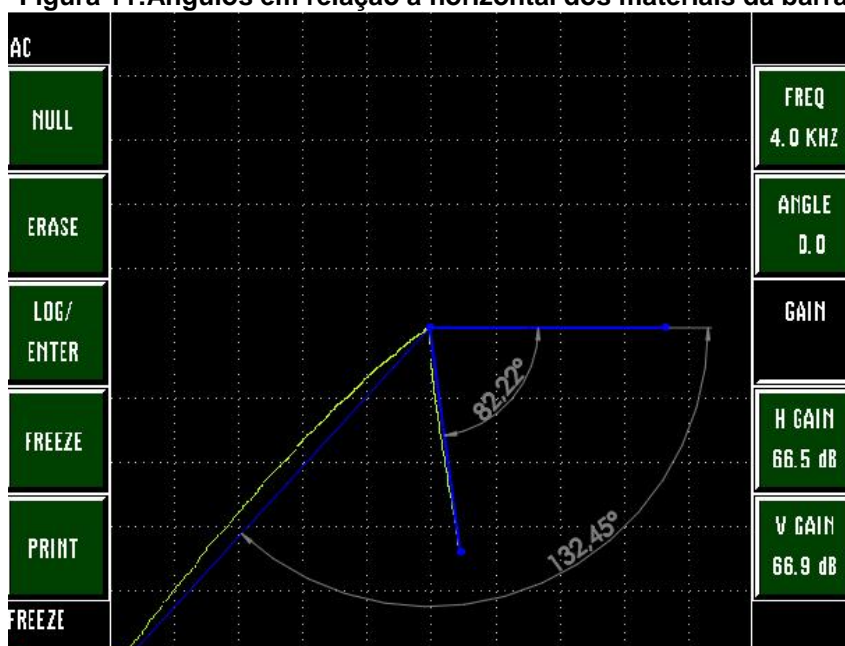
Com todas estas etapas seguidas, foi possível começar o comparativo entre as amostras.

Para se ter um meio de avaliar as curvas representadas, foi utilizada uma barra de calibração (Figura 9-b) com cinco materiais e suas respectivas classificações IACS.

Seguindo a literatura, utilizou-se dois materiais que contemplassem a condutividade do Waspaloy em seu intervalo. Mediu-se as curvas dos materiais e, com a ajuda do software, foi possível capturar a imagem do equipamento diretamente no computador.

Após a medição entre os dois materiais da tabela, foi possível comparar os valores dos ângulos de fase criados entre o material de 1,10% IACS e o de 29,84% IACS, como mostra a Figura 11.

Figura 11: Ângulos em relação a horizontal dos materiais da barra de calibração.



Fonte: Autoria própria

Os valores dos ângulos de condutividade puderam se comparados, agora, com os valores da amostra de Waspaloy, sem tratamento algum. Para isso, posicionou-se a sonda de superfície no material de 1,10% IACS da calibração, apertou-se ERASE, no canto esquerdo do equipamento, retirou-se a sonda e a reposicionou-se na área da seção transversal da barra sem tratamento, apertando a tecla FREEZE, também do lado esquerdo do equipamento. No computador, de posse do programa EddyMaster500, clicou-se em “Capture Instrument Screen to Bitmap”, capturando a imagem e depois clicando em “Copy Bitmap to Clipboard”, autorizando o envio para o programa Microsoft Word®, onde foram salvas as imagens.

O mesmo procedimento foi utilizado para comparar a amostra de Waspaloy sem tratamento com o material de 29,84% IACS.

Para conferir se a seção transversal da barra tinha as mesmas medidas, foi seguidamente colocada e tirada a sonda de superfície, criando um padrão de comparação entre as curvas e, apertando a tecla FREEZE para que nenhuma outra medida fosse plotada na tela. Os passos seguintes foram feitos no computador da mesma maneira que os anteriores.

O comparativo entre a amostra de Waspaloy sem tratamento térmico e o primeiro corpo tratado foi feito posicionando a sonda de superfície na área de seção transversal do primeiro corpo tratado, em seguida apertou-se a tecla ERASE,



levantou-se a sonda colocando a mesma na área de seção transversal da amostra de Waspaloy sem tratamento. Os passos no computador foram os mesmos já utilizados.

Da mesma forma que com a amostra de Waspaloy sem tratamento, foi aproximada e afastada a sonda seguidas vezes para comparar os diferentes pontos do primeiro corpo de prova tratado.

Para garantir a repetibilidade entre os resultados dos diferentes corpos de prova tratados, foram feitas comparações entre eles. Começando com a sonda no primeiro corpo de prova, apertou-se o ERASE e, levantando a sonda de superfície e aproximando da área de seção transversal do segundo corpo de prova tratado e, seguindo os passos de comparação entre o primeiro corpo de prova tratado e a amostra de Waspaloy sem tratamento, foi possível comparar os dois corpos tratados.

Seguiu-se os mesmos passos para comparação entre o segundo corpo de prova tratado e o terceiro e entre o terceiro corpo de prova tratado e o quarto.

Para comparar com algum dos materiais da tabela, da mesma forma que foi feita a comparação com a amostra de Waspaloy sem tratamento, foi plotada uma imagem com as curvas referentes ao primeiro corpo de prova tratado e o material de 1,10% IACS.

Foi comparada, da mesma maneira que as outras, a curva de condutividade entre a amostra de Waspaloy sem tratamento e o primeiro corpo de prova tratado e revestido. Em seguida foram comparados os corpos de prova tratados e revestidos da mesma maneira que os corpos de prova tratados.

Para verificar a homogeneidade, seguidas vezes foi aproximada a sonda de superfície da área de seção transversal do primeiro corpo de prova tratado e revestido.

### 3.3 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Devido aos resultados do ensaio de correntes parasitas, que serão expostos no decorrer do trabalho, foram selecionadas para o ensaio de microdureza duas amostras previamente embutidas em baquelite não condutor. Essas duas amostras foram separadas em sem tratamento e com tratamento térmico.

### 3.3.1 Equipamentos utilizados

Antes da realização do ensaio de microdureza Vickers, houve a necessidade de preparação das superfícies dos corpos de prova.

Com as amostras, que já haviam sido tratadas e embutidas, foi necessário, apenas, lixar e polir para que não houvessem imperfeições no ensaio.

Para a primeira etapa, foram usadas, nesta ordem, as lixas com 240, 400, 600 e 1200 mesh, devidamente utilizadas na lixadeira APD4, da fabricante Arotec S.A. Industria e Comércio, apresentada na Figura 12.

**Figura 12: Lixadeira APD4.**



**Fonte: Autoria própria.**

A segunda etapa foi realizada na máquina de polimento Buheler Beta Grinder-Polisher, equipada com um cabeçote Buehler Vector® Power Head (Figura 13).

**Figura 13: Politriz Buehler Beta Grinder com cabeçote Buehler Vector® Power Head.**



**Fonte: Autoria própria.**

Para o polimento, foi utilizado, em um primeiro passo, um pano de polimento com 3  $\mu\text{m}$  de altura. O fluido polidor utilizado, também de 3  $\mu\text{m}$ , foi o com diamantes em suspensão Diapoly SGB *Diamond Suspension Polycrystalline* da fabricante Schneider.

Primeiro foi indicado o tempo de polimento de 10 minutos. Depois, foi estipulada uma força de 15 Newtons no cabeçote de polimento. O cabeçote também conferiu uma força com aplicação uniforme ao disco de rotação que prende as amostras. A rotação selecionada foi a contrária, ou seja, enquanto as amostras no disco do cabeçote rodavam no sentido horário, a base, com o pano de polimento, girava no sentido anti-horário. A rotação do pano de polimento foi determinada em 200 RPM.

Após o polimento com o pano de polimento e fluido com diamante em suspensão de 3  $\mu\text{m}$ , para um melhor acabamento, foi utilizado um pano de polimento com 0,25  $\mu\text{m}$  e o fluido com diamante em suspensão Diapoly SWB *Diamond Suspension Polycrystalline*, da Schneider, também de 0,25  $\mu\text{m}$ .

O procedimento para o pano de polimento e fluido em suspensão de 0,25  $\mu\text{m}$  foi o mesmo do polimento anterior, com apenas a mudança de tempo de execução para 20 minutos e força de polimento de 20 Newtons.

Após a verificação, concluiu-se o polimento das amostras.

As amostras polidas foram levadas ao equipamento de ensaio de microdureza Vickers.

Neste equipamento as amostras são colocadas e a área de aplicação do edentador é selecionada por meio de um microscópio.

Semelhante como foi feito com os parâmetros da politriz, o equipamento de ensaio de dureza também precisou ter seus parâmetros previamente determinados.

- a. Após ligar o equipamento, edita-se o nome da peça que será avaliada. No caso, a peça chamou-se WL N07001 ST e o primeiro ensaio aconteceu com a amostra de Waspaloy sem tratamento térmico.
- b. A aplicação da força teve sua duração determinada em 15 segundos.
- c. À cada aplicação da força, duas linhas paralelas no microscópio deviam estar dispostas de forma a marcar as extremidades da marca piramidal oriunda do edentador, definindo a distância entre as extremidades e, neste caso chamando de L1 na Figura 14.
- d. Foram realizadas 15 identações.
- e. Respeitando determinação de norma técnica, estipulou-se um valor de 80  $\mu\text{m}$  de distância entre um local ensaiado do próximo.
- f. Foi estabelecida uma margem de valores e a média foi recalculada.

A peça de Waspaloy com tratamento térmico seguiu exatamente o mesmo procedimento.

**Figura 14: Display com valores L1, L2 e dureza em HV.**



Fonte: Autoria própria.

### 3.4 MICROSCOPIA ÓTICA

Com a intenção de caracterizar as microestruturas da liga antes e depois do tratamento térmico, foi feita em ambas as amostras uma análise no microscópio ótico Lenz® Axio Imager A2m, da Figura 15.

**Figura 15: Microscópio ótico Lenz® Axio Imager A2m**



**Fonte: Autoria própria.**

Foi verificado que as duas amostras ainda continham riscos e, por isso, foi necessário refazer o polimento em toalha de 0,25  $\mu\text{m}$  com fluido com diamantes em suspensão também de 0,25  $\mu\text{m}$ .

Após isso, seguiu-se os passos:

- Levou-se a amostra com tratamento térmico ao microscópio ótico para uma primeira inspeção com zoom de 1000 vezes.
- Determinado o foco e avaliada a superfície, foi encaminhada a amostra à capela, para a utilização do reagente de revelação Waterless Kallins **composição**.
- Contou-se 15 segundos enquanto a amostra era agitada no reagente.
- Após os 15 segundos, imediatamente, a amostra foi colocada em água corrente, para a retirada do reagente.
- Em seguida a amostra foi lavada com álcool e seca cor ar quente.
- A amostra foi levada até o microscópio ótico, onde foi feita nova inspeção com zoom de 1000 vezes e constatou-se a não revelação dos contornos de grão.
- Para o novo ataque químico, retornou-se ao passo b.

h. Ao alcançar o passo f pela segunda vez, foi possível ver as particularidades microestruturais da amostra.

Os mesmos passos foram replicados à amostra sem tratamento térmico. No entanto, a amostra precisou de mais 15 segundos de agitação no reagente de revelação Waterless Kallings para que sua microestrutura fosse revelada.

### 3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Para aprofundar ainda mais o detalhamento da pesquisa, foi necessário enviar as amostras ao equipamento de microscopia eletrônica de varredura X-Act, da Oxford Instruments da Figura 16, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa.

**Figura 16: Microscópio Eletrônico de Varredura X-Act Oxford Instruments**



**Fonte: Autoria Própria.**

As amostras, que foram preparadas para o método de microscopia ótica, seguiram sem intervenções para o equipamento de MEV e manipuladas conforme segue:

- a. Prendeu-se a amostra com tratamento térmico na base móvel do aparelho;
- b. Colocou-se a base na câmara de ensaio;
- c. Com o auxílio do software VejaTC, nomeou-se a peça ensaiada e, ajustando-se as configurações específicas, iniciou-se o ensaio.

- d. Com as configurações determinadas, foi possível buscar o melhor foco de partes importantes da peça.
- e. Depois do foco ajustado, foram feitas imagens com aproximações variadas, analisando as mais produtivas.

Os mesmos passos foram repetidos para a amostra sem tratamento térmico.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Apresentam-se, neste item, resultados das medições produzidas pelo ensaio de correntes parasitas e ensaio de microdureza Vickers e as discussões acerca do tema abordado.

A Tabela 4 apresenta as comparações feitas na prática entre os valores medidos de condutividade e os ângulos de cada amostra analisada, em relação ao eixo horizontal. Por meio de interpolação linear, foi possível determinar a porcentagem, referente a escala IACS, de condutividade para cada corpo ensaiado.

É possível analisar uma variação pequena entre os corpos de prova que foram submetidos ao mesmo procedimento. Essa homogeneidade entre as peças permite escolher um representante para cada etapa.



**Tabela 4: Valores encontrados e comparados durante o ensaio de correntes parasitas.**

<b>Corpo ensaiado</b>	<b>Ângulo com relação a horizontal (graus)</b>	<b>Valor de condutividade (IACS)</b>
Material 1 - barra de calibração	82,22°	1,10%
Material 2 - barra de calibração	132,45°	29,84%
Material 1 - barra de calibração	81,33°	1,10%
Amostra de Waspaloy sem tratamento	85,84°	3,64%
Amostra de Waspaloy sem tratamento	85,91°	3,69%
Material 2 - barra de calibração	132,17	29,84%
Amostra de Waspaloy sem tratamento	Entre 85,64° e 86,58°	Entre 3,54% e 4,07%
Amostra de Waspaloy sem tratamento	85,88°	3,67%
Corpo de prova 1 com tratamento	82,02°	1,49%
Corpo de prova 1 com tratamento	Entre 81,59° e 82,59°	Entre 1,25% e 1,81%
Corpo de prova 1 com tratamento	82,55°	1,79%
Corpo de prova 2 com tratamento	82,17°	1,57%
Corpo de prova 2 com tratamento	82,17°	1,57%
Corpo de prova 3 com tratamento	82,17°	1,57%
Corpo de prova 3 com tratamento	82,33°	1,66%
Corpo de prova 4 com tratamento	82,33°	1,66%
Corpo de prova 1 com tratamento	82,57°	1,80%
Material 1 - barra de calibração	82,18°	1,10%
Corpo de prova 1 tratado e revestido	81,96°	1,47%
Amostra de Waspaloy sem tratamento	85,74°	3,60%
Corpo de prova 1 tratado e revestido	82,29°	1,65%
Corpo de prova 2 tratado e revestido	82,29°	1,65%
Corpo de prova 2 tratado e revestido	82,53°	1,79%
Corpo de prova 3 tratado e revestido	82,53°	1,79%
Corpo de prova 3 tratado e revestido	82,26°	1,64%
Corpo de prova 4 tratado e revestido	82,26°	1,64%
Corpo de prova 1 tratado e revestido	Entre 81,69° e 82,57°	Entre 1,31% e 1,81%

**Fonte: Autoria própria.**

A Tabela 5 mostra os valores médios obtidos por cada etapa em que as amostras foram submetidas e ensaiadas.

**Tabela 5: Valores médios de ângulo e condutividade por fase de processo.**

Fase do processo	Ângulo com relação a horizontal (graus)	Valor médio de condutividade (IACS)
Sem tratamento	85,82°	3,64%
Apenas com tratamento térmico	82,38°	1,69%
Com tratamento térmico e revestimento	82,36°	1,69%

**Fonte: Autoria própria.**

Considerando o livro *Electrical Properties of Materials and Their Measurement at Low Temperatures*, de Fickett (1982), o valor de resistividade do cobre recozido, em temperatura ambiente (22 °C), é de 1,696  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , ou  $1,696\cdot 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$ .

Ainda segundo a literatura, a condutividade é o inverso da resistividade, ou seja, a condutividade do cobre recozido é de  $58,96\cdot 10^6 \text{ } 1/\Omega\cdot\text{m}$ .

Com tudo o que foi mencionado, a Tabela 6 traz valores absolutos de resistividade das médias das amostras avaliadas por correntes parasitas.

**Tabela 6: Valores de condutividade e resistividade absolutos para as amostras ensaiadas.**

Fase do processo	Valor médio de condutividade ( $1/\Omega\text{m}$ )	Valor médio de resistividade ( $\Omega\cdot\text{m}$ )
Sem tratamento	$2,146\cdot 10^6$	$0,466\cdot 10^{-6}$
Apenas com tratamento térmico	$0,996\cdot 10^6$	$1,003\cdot 10^{-6}$
Com tratamento térmico e revestimento	$0,996\cdot 10^6$	$1,003\cdot 10^{-6}$

**Fonte: Autoria própria.**

Após constatada a mudança de resistividade por meio do tratamento térmico, foi necessário conferir a variação de dureza entre as amostras e entender seu comportamento. A Tabela 7 apresenta os valores encontrados no ensaio para a amostra sem tratamento e a amostra com tratamento térmico.

Tabela 7: Valores medidos no ensaio de microdureza Vickers.

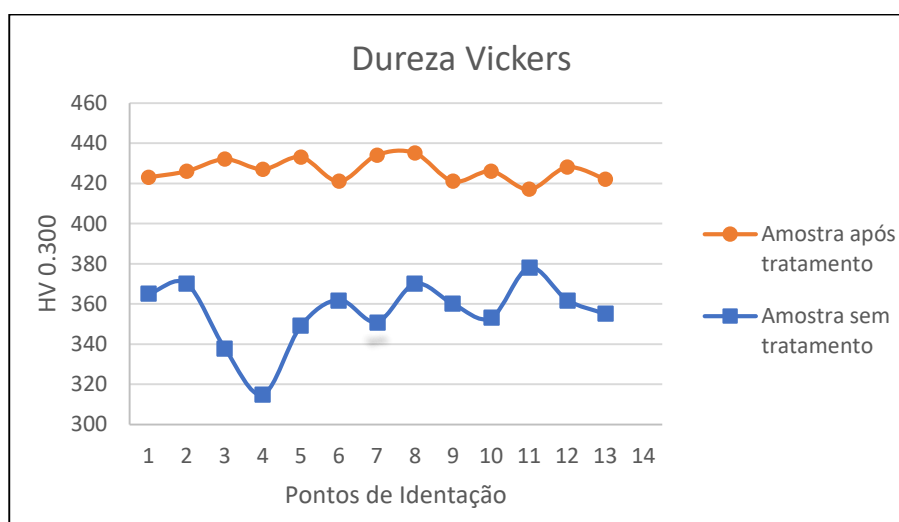
Medição	Amostra sem tratamento térmico (HV)	Amostra com tratamento térmico (HV)
1	365	423
2	370	426
3	338	432
4	315	427
5	349	433
6	362	421
7	351	434
8	370	435
9	360	421
10	353	426
11	378	417
12	362	428
13	355	422

Fonte: Autoria própria.

Dos 15 ensaios produzidos em cada amostra, dois foram retirados por se encontrarem muito longe da média dos dados relevantes.

O Gráfico 1 representa a variação dos valores de dureza para cada uma das amostras ensaiadas.

Gráfico 1: Comparação dos ensaios de dureza Vickers nas amostras.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 8 apresenta os valores médios e desvio padrão de dureza na escala Vickers para a amostra não tratada e a tratada termicamente.

**Tabela 8: Valores médios e desvio padrão de dureza para as amostras ensaiadas.**

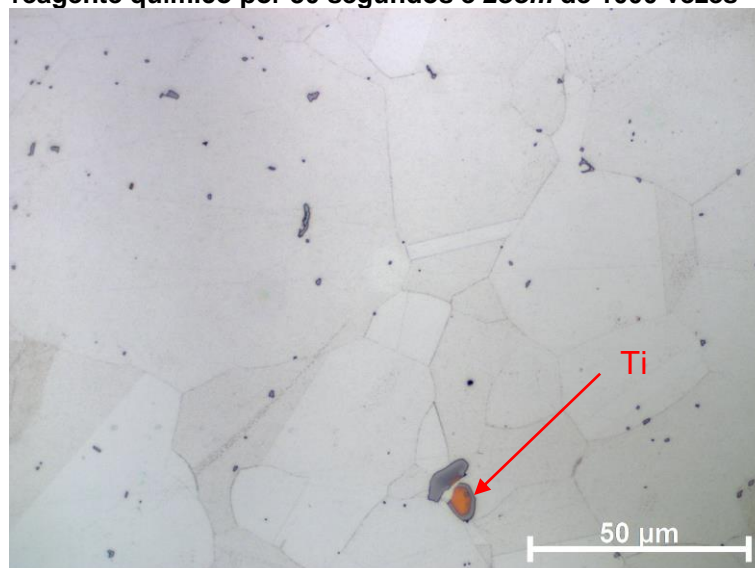
Amostra	Valor médio dureza (Vickers)	Desvio padrão
Sem tratamento térmico	356,00	15,5
Com tratamento térmico	426,54	5,5

Fonte: Autoria própria.

No ensaio de microdureza Vickers não foi utilizada amostra com revestimento. Isso se deve ao revestimento ter sido feito com uma película de apenas 6  $\mu\text{m}$ . Além do fato de o ensaio de correntes parasitas estar voltando ao comportamento microestrutural das amostras, ou seja, o revestimento, já anotado nas tabelas 5 e 6 como não sendo um fator determinante na mudança de condutividade elétrica das peças.

A Figura 17, mostra como é a microestrutura do Waspaloy sem tratamento térmico.

**Figura 17: Amostra de Waspaloy, sem tratamento térmico, atacada com reagente químico por 30 segundos e zoom de 1000 vezes**



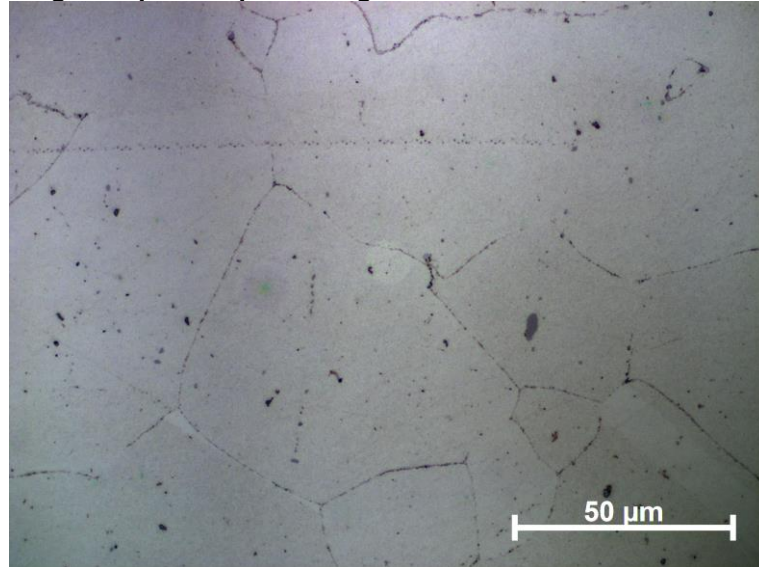
Fonte: Autoria própria.

É possível perceber os precipitados oriundos da solubilização de forma desorganizada. Há também um grande precipitado de titânio, de cor alaranjada, conforme verificado por EDS.

Observa-se, também, a distribuição heterogênea e aleatória dos precipitados no interior dos grãos.

Na Figura 18, os precipitados, anteriormente dispersos, agora apresentam-se refinados e melhor distribuídos na matriz, agrupando-se preferencialmente na região dos contornos de grão e dando um aspecto mais escuro à liga.

**Figura 18: Amostra de Waspaloy após tratamento térmico, atacada com reagente químico por 30 segundos e zoom de 1000 vezes.**



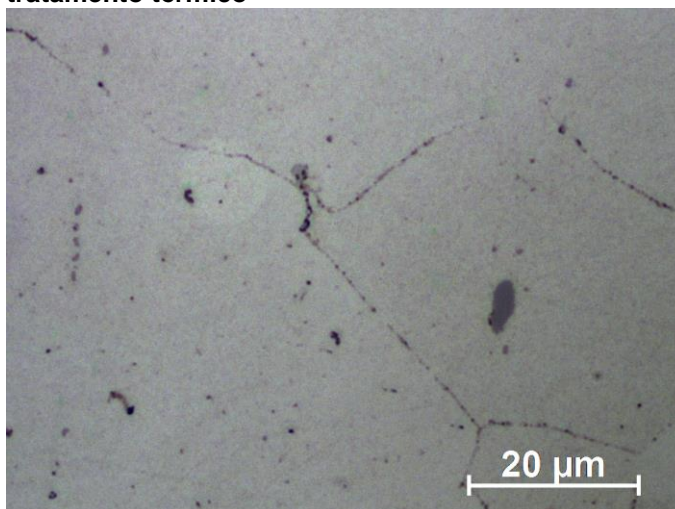
**Fonte: Autoria própria.**

Os precipitados que foram para o contorno de grão, influenciarão na dureza da peça, visto que a fase intermetálica presente interage com os defeitos microestruturais, impedindo a movimentação de discordâncias. Ainda, por muitos precipitados serem de materiais intermetálicos, a grande quantidade deles no contorno de grão pode representar mudança na resistividade da peça.

Aqueles que não se alteraram não atingiram a temperatura de mudança de fase necessária ou não foram afetados tão fortemente pela energia do tratamento para que pudesse se descolar aos contornos de grão.

A Figura 19 apresenta uma aproximação de uma das regiões do contorno de grão da Figura 18. Os precipitados ficam evidentes nesta região, possibilitando a visualização.

**Figura 19: Aproximação de uma região de contorno de grão após tratamento térmico**

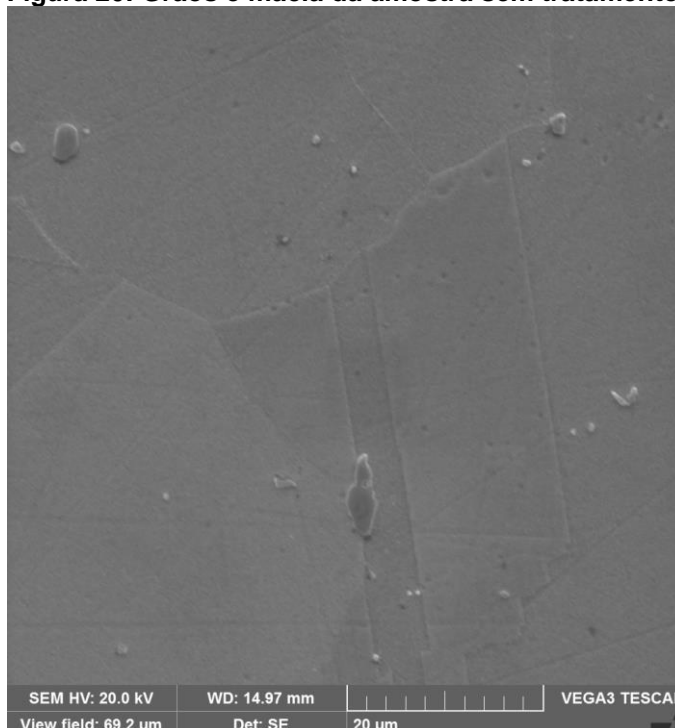


**Fonte: Autoria própria.**

No ensaio com o microscópio eletrônico de varredura, a diferença entre as amostras ficou ainda mais evidente.

A Figura 20 apresenta uma região com contorno de macla e a divisão entre grãos, uniforme e com uma aproximação de 2000 vezes.

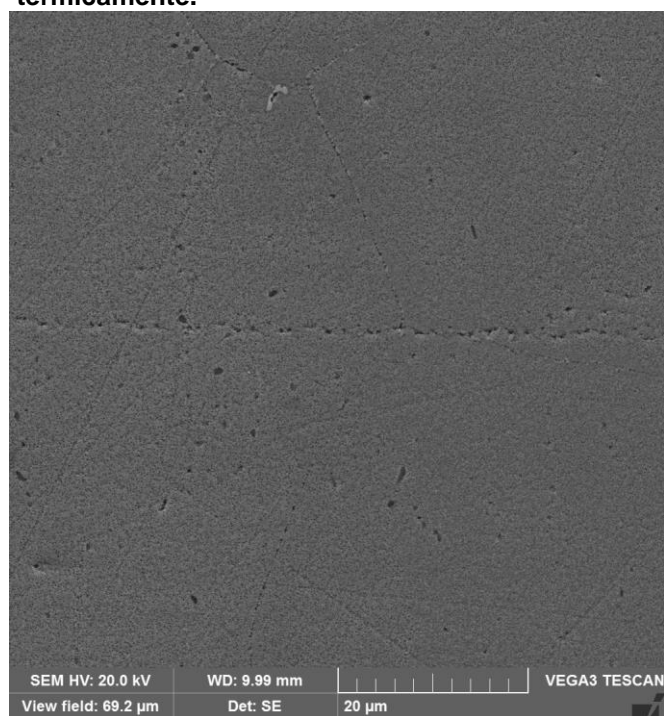
**Figura 20: Grãos e macla da amostra sem tratamento térmico.**



**Fonte: Autoria própria.**

De forma comparativa, temos a Figura 21, que apresenta uma região com precipitados em linha e, no topo da imagem, contornos de grão bem definidos com aproximação de 2000 vezes.

**Figura 21: Contornos de grão e precipitação na amostra tratada termicamente.**



**Fonte: Autoria própria.**

Para melhorar a visualização, foi aproximada em 10.000 vezes a região do topo da Figura 21, resultando no detalhamento dos contornos de grão da Figura 22.

**Figura 22: Detalhamento dos contornos de grão da amostra tratada termicamente.**



**Fonte: Autoria própria.**

É possível perceber que a amostra tratada termicamente (Figuras 21 e 22) está carregada de precipitados. Estes precipitados são de fases  $\gamma'$  e  $\gamma''$ , enquanto a solução sólida na amostra sem tratamento térmico não possui a diferenciação das fases tão evidente.

Na Figura 22 é possível ver que há, sim, uma concentração de precipitados na região de contorno de grão, confirmando a Figura 19 e detalhando que, apesar da concentração ser maior, há muitos precipitados no interior dos grãos.

Todos estes precipitados são intermetálicos, ou seja, uma combinação de metais que acarreta em propriedades específicas, comprovado por micrografia eletrônica de varredura.



## 5 CONCLUSÃO

O tratamento térmico ao que as amostras foram submetidas causou alteração microestrutural na superliga de níquel Waspaloy e esta alteração pôde ser observada microscopicamente.

Através do ensaio de correntes parasitas, as amostras com tratamento térmico obtiveram redução do valor médio de condutividade elétrica na faixa de 46,41%. Conseqüentemente, a resistividade elétrica teve um aumento de 2,15 vezes.

As amostras que foram tratadas termicamente e revestidas com nitreto de titânio alumínio, por PVD de aproximadamente 6  $\mu\text{m}$  não obtiveram resultados diferentes das sem revestimento. Isto possivelmente ocorreu motivado pela pequena espessura depositada.

Os ciclos de aquecimento e resfriamento promoveram às amostras um ganho médio de dureza da magnitude de 19,81%.

Os precipitados intermetálicos presentes na amostra com tratamento térmico conferiram uma diminuição da condutividade elétrica da amostra quando apresentados nos contornos de grão.

O ensaio de correntes parasitas mostrou-se sensível às mudanças microestruturais, relacionando a alteração da dureza à da condutividade elétrica da superliga Waspaloy, validando sua aplicação.

## REFERÊNCIAS

ABAL; **Têmperas**. 2017. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/temperas/#accordion5>>. Acesso em: 10 out 2018.

ABENDI. **Ensaaios não destrutivos e inspeção**. 2017. Disponível em: <<http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

ALENCAR, D.; FERRAZ, W. **O ensaio de correntes parasitas utilizado no controle de composição química de fabricação de combustíveis nucleares**, XXIV Congresso Nacional de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção, CONAEND 016. São Paulo, 2006.

AMERICAN WELDING SOCIETY; **Thermal Spraying: practice, theory and applications**. Miami, FL, USA: [s.n], 1985.

ASM INTERNATIONAL. **Handbook of Thermal Spray Technology**. Thermal Spray Society, 2004.

BOUCHEROU, N.; ZERGOUG, M.; KAMEL, G. **Mechanical stress analysis by eddy current method**. The Journal of American Science, 2008.

CALLISTER, W. D.; **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2 ed, Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CHIAVERINI, V.; **Tecnologia Mecânica**. 2 ed, São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.

CIMM; **Descrição dos processos de revestimento por adição de camadas**. 2016. Disponível em: < [https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6376-descricao-dos-processos-de-revestimento-por-adicao-de-camadas#.W-np75NKjIV](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6376-descricao-dos-processos-de-revestimento-por-adicao-de-camadas#.W-np75NKjIV)>. Acesso em 10 out 2018.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Edgar Blucher, 1994.

CUNHA, L. A. C. G.; **Estudo dos mecanismos de degradação em revestimentos PVD baseados em nitretos metálicos no processamento de materiais plásticos.** 2000. Tese (Doutorado), Universidade do Minho, Braga, 2000.

DAVIS, J. R.; **ASM Speciality handbook: Cobalt, and Their Alloys.** Ohio, USA: ASM International, 2000.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DYBIEC, C.; WLODARCZYK, S.; DYBIEC, M. **Measurement of own stress using the eddy current method.** ECNDT, vol. 3, 1998.

FICKETT, F. R.; **Electrical properties of materials and their measurement at low temperatures.** Colorado: National Bureau of Standards Boulder, 1982.

FRANKLIN, E. M.; **Turbinas a gás.** Disponível em <[http://www.fem.unicamp.br/~franklin/ES672/pdf/turbina\\_gas.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~franklin/ES672/pdf/turbina_gas.pdf)> Acesso em 15 nov 2017.

GARCIA-MARTIN, J.; GÓMEZ-GIL, J.; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, E.; **Non-destructive techniques based on eddy current testing,** Sensors 2011 (2011), p 2525-2565

GEDDES, B.; LEON, H.; HUANG, X.; **Superalloys: Alloying and Performance.** Ohio: ASM International, 2010.

GENTIL, V.; **Corrosão.** Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

GODOY, J.; **Tubrinas a gás.** Rio de Janeiro: IBP, 1996.

HANSEN, J.; **Back to basics: The eddy current inspection method,** Parts 1-4, Insight Vol. 46 No. 5-8

HELLIER, C. J. **Handbook of nondestructive evaluation.** New York: Macgraw-hill, 2003.

MA, X.; PEYTON, A.; ZHAO, Y. **Eddy current measurements of electrical conductivity and magnetic permeability of porous metals.** NDT&E International, 2006.

MENDES, G. M. **Separação de diferentes composições químicas de aço pelo método de correntes parasitas: Otimização dos parâmetros de ajuste.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

MOURA, V.; KINA, A. Y.; TAVARES, S. S. M.; et al; **Influence of stabilization heat treatments on microstructure, hardness and intergranular corrosion resistance of the AISI 321 stainless steel.** Journal of Materials Science. Vol 43, paginas 536-540, 2008.

NDT RESOURCE CENTER. **Thickness Measurements of Nonconducting Coatings on Conductive Materials.** Disponível em: <<https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Applications/thicknessmeasurements2.htm>>. Acesso em 15 nov. 2017.

NOVIKOV, I.; **Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1994.

OLIVEIRA, C. R. L. **Utilização dos ensaios de ultrassom e correntes parasitas no acompanhamento da oxidação em revestimento TBC com NiCrAl e YSZ sobre liga de Inconel 718 e Hastelloy X.** 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

PENG, William W.; **Fundamentals of turbomachinery.** New Jersey: John Willey & Sons, 2008.

PEREIRA, D.; **Avaliação do método de correntes parasitas para caracterização microestrutural e inspeção de defeitos à base de níquel.** 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2014.

REED, R. C.; **The Superalloys: Fundamentals and Applications.** Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

ROHDE, R. A.; **Metalografia preparação de amostras: uma abordagem prática.** Vol 3. Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais. Santo Ângelo, 2010.

SOARES, A. **Correntes Parasitas.** 2 ed. São Paulo: ABENDI, 2009.

STEGEMANN, D. **Fundamentos do método de correntes parasitas.** 1 ed. Junnich, 1990.

TATSCH, P. J.; **Deposição de filmes finos.** Disponível em: <<https://www.ccs.unicamp.br/cursos/ee941/download/cap11.pdf>>. Acesso em 12 out 2018.

TECMUNDO. **Como funciona um motor com turbina a gás de um avião [infográfico].** Disponível em <<https://www.tecmundo.com.br/aviao/33110-como-funciona-um-motor-com-turbina-a-gas-de-um-aviao-infografico-.htm>> Acesso em 15 nov 2017.

VACH, M.; KUNIKOVA, T.; DOMANKOVA, M.; ŠEVC, P.; ČAPLOVIČ, L.; GOGOLA, P.; JANOVEC, J.; **Evolution of secondary phases in austenitic stainless steels during long-term exposures at 600, 650 and 800 C.** Materials Characterization, vol 59, número 12, páginas 1792-1798, 2008.

WANG, D. Y.; LI, Y-M.; CHANG, C-L.; HO, W-Y.; **Deposition of high quality (Ti, Al)N hard coating by vacuum arc evaporation process.** 1999.

ZERGOUG, M.; LEBAILI, S. **Relation between mechanical micrhardness and impedance variations in eddy current testing.** NDT&E International, 2004.

ZOLIN, I.; **Curso técnico em automação industrial: ensaios mecânicos e análise de falhas.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2010.