

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS METALÚRGICA E
MATERIAIS

DANIEL PEREIRA

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE CORRENTES PARASITAS PARA
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E INSPEÇÃO DE DEFEITOS EM
SUPERLIGAS À BASE DE NÍQUEL**

Porto Alegre
2014

DANIEL PEREIRA

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE CORRENTES PARASITAS PARA
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E INSPEÇÃO DE DEFEITOS EM
SUPERLIGAS À BASE DE NÍQUEL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade acadêmica.

Área de concentração: Ciências e Tecnologia dos Materiais

ORIENTADOR: Prof. Dr. Thomas G.R. Clarke

Porto Alegre

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber Ten Caten

Programa de pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais.

Coordenador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador substituto: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

CIP - Catalogação na Publicação

Pereira, Daniel

AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE CORRENTES PARASITAS PARA
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E INSPEÇÃO DE
DEFEITOS EM SUPERLIGAS À BASE DE NÍQUEL / Daniel
Pereira. -- 2014.

65 f.

Orientador: Thomas G.R. Clarke.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2014.

1. superligas. 2. correntes parasitas. 3.
caracterização microestrutural. 4. detecção de
defeitos. 5. Inconel 718. I. G.R. Clarke, Thomas,
orient. II. Título.

DANIEL PEREIRA

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE CORRENTES PARASITAS PARA
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E INSPEÇÃO DE DEFEITOS EM
SUPERLIGAS À BASE DE NÍQUEL**

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciências e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke
Professor do Programa de Pós Graduação em Minas, Metalurgia e Materiais

Coordenador do PPGE3M: Prof. Dr. Telmo R. Strohaecker

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Frank Missell
Professor da Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski
Professor do Programa de Pós Graduação em Minas, Metalurgia e Materiais

Prof. Dr. Afonso Reguly
Professor do Programa de Pós Graduação em Minas, Metalurgia e Materiais

Dedico este trabalho aos meus pais, irmão e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Agradecimentos

A esta Universidade e ao programa PPGEM, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram essa conquista.

Ao professor e orientador Thomas Clarke pela confiança e por seu apoio no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos que me levaram a execução e conclusão desta dissertação.

A todos os colegas e amigos do GEND, companheiros de trabalhos que me receberam com verdadeiros amigos e que vão fazer parte da minha formação para a vida toda. Um agradecimento especial aos colegas Toni Lima, Lúcio, Baiotto, Henrique, Alberto, Wu, Conrado e Vanessa que tiveram participação direta no êxito desse trabalho.

Aos amigos Sérgio e Rubão, meu muito obrigado pelas conversas e conselhos compartilhados e pela oportunidade de ter a voz da experiência ao meu lado durante essa jornada.

A Dra. Gelsa Edith Navarro Hidalgo do LAPROM e ao pessoal do GAF pela prestatividade e ajuda nas análises.

Meus agradecimentos também a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Pensar é o trabalho mais difícil que existe, e esta é provavelmente a razão por que tão poucos se dedicam a ele.

Henry Ford

Resumo

Superligas à base de níquel vêm sendo extensivamente utilizadas em diversas aplicações nas indústrias devido ao excelente comportamento mecânico e anticorrosivo. No entanto, essas ligas possuem certas particularidades que levam à necessidade de desenvolvimento de técnicas de inspeção e caracterização metalúrgica, como forma de garantir a integridade estrutural dos componentes fabricados com essas ligas.

Neste trabalho, a técnica de correntes parasitas foi aplicada à superligas à base de níquel com duas propostas distintas: 1) Em um primeiro momento foi realizado o estudo da evolução microestrutural da liga Inconel 718 durante o processo de envelhecimento através da combinação do ensaio por correntes parasitas, análise de difração de raios-X, análise metalográfica, medidas de dureza e tamanho de grão. As medidas foram realizadas em amostras submetidas a diferentes ciclos de tratamentos térmicos variando entre 620-1035°C. Os resultados mostraram que as diferentes microestruturas do Inconel 718 têm efeitos distintos na condutividade elétrica quando medidos através da técnica de correntes parasitas. A influência da microestrutura na condutividade pode ser mostrada sendo devido à competição de dois efeitos sobre o espalhamento de elétrons: a purificação da matriz e a morfologia, distribuição e tamanho dos precipitados. A combinação dos valores de dureza e condutividade elétrica provou ser uma forma rápida e prática de determinar o nível de envelhecimento da liga; 2) Em um segundo momento foi desenvolvido um processo de otimização de sensores através de modelagem por elementos finitos (MEF). Através de uma metodologia de otimização, os parâmetros de construção e operação de um sensor foram otimizados para inspeção de defeitos superficiais e subsuperficiais esperados em materiais cladeados com Inconel 625. O sensor com a geometria ótima foi construído e testado a fim de verificar a eficiência do processo de otimização. Uma ótima correlação entre os resultados numéricos e experimentais foi encontrada e o sensor ótimo se mostrou eficiente na inspeção de pequenos defeitos superficiais e subsuperficiais na liga Inconel 625 quando operado nas frequências apropriadas.

Palavras chave: Superligas, correntes parasitas, Inconel 718, caracterização microestrutural, Inconel 625.

Abstract

Nickel-based superalloys have been extensively used in various industries due to its unique mechanical and corrosion behavior. However, these alloys show particular characteristics which lead to the need for specific inspection and metallurgical characterization techniques in order to ensure the structural integrity of components manufactured from these alloys.

In this work , the eddy current technique was applied to nickel-base superalloys with two aims: 1) Firstly, the microstructural evolution of Inconel 718 during aging processes has been studied through a combination of eddy current testing, X-ray diffraction analysis, metallography, hardness and grain size measurements. Measurements were carried out in samples subjected to different heat treatment cycles between 620-1035°C. Results show that different microstructures of Inconel 718 have a distinguishable effect on electrical conductivity when this is measured through an appropriately sensitive technique (i.e. eddy current testing). The influence of microstructure on conductivity could be shown to be due to the competition between two effects on the scattering of electrons: matrix purification and precipitate size, distribution and morphology. A combination of hardness values and electrical properties proved to be a fast and practical way of determining the stage of aging of the alloy; 2) An optimization method of eddy current sensor design was developed through finite element modeling (FEM). Through a methodology of optimization, the construction and operation parameters of the sensor were optimized for inspection of superficial and subsuperficial defect, commonly found in weld overlay Inconel 625 claddings. A prototype of this sensor with the optimum geometry was built and tested on blocks identical to those considered in the models in order to verify the efficiency of the optimization process. A very good agreement between numerical and experimental results was found. Moreover, the optimal sensor was efficient to detect small surface and subsurface defects in Inconel 625 when operated at appropriate frequencies.

Keywords: Superalloys, eddy current, Inconel 718, microstructure characterization, Inconel 625.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Princípio do ensaio por correntes parasitas: a) campo magnético primário; b) correntes induzidas no material condutor; c) campo magnético secundário gerado na peça. (Nelligan e Calderwood, 2013).....	5
Figura 2.2 - Perturbação do fluxo de correntes parasitas provocado pela presença de uma trinca.....	6
Figura 2.3 - Efeito da condutividade na diferença de fase entre as linhas da trinca e do lift-off. Adaptado de (Garcia-Martin, Gomez-Gil e Vazquez-Sanchez, 2011).....	7
Figura 2.4 - Linhas de fluxo das correntes parasitas em um condutor representado o efeito de borda (Hellier, 2001).	8
Figura 2.5 - Efeito da frequência na profundidade de penetração para diferentes materiais. Adaptado de (Hansen, 2004a).	9
Figura 2.6 - Intensidade das correntes parasita em função da profundidade de penetração no material. Adaptado de (Hansen, 2004a).....	10
Figura 2.7 - Plano de impedância mostrando indicações observadas em materiais magnéticos e não magnéticos. Adaptado de (Rosado, 2009)	10
Figura 2.8 - Sinal mostrado no plano de impedância quando um sensor é percorrido por uma série de defeitos com diferentes profundidades (Hansen, 2004a).....	11
Figura 2.9 – Sensores compostos de bobinas operando no modo absoluto e diferencial (Shull, 2002).	12
Figura 2.10 - Sensor operando no modo referencial. a) Bobina de referência no ar; b) Bobina de referência em um bloco de alumínio (Shull, 2002).	13
Figura 2.11 - Impedância absoluta ao longo do tempo do sensor sendo percorrido por uma série de defeitos com diferentes profundidades.	14
Figura 2.12– Sensores utilizando a configuração transmissão-recepção e reflexão (Shull, 2002).	15
Figura 2.13 - Classificação das principais superligas do mercado. Adaptado de (Dupont, Lippold e Kiser, 2009).	18
Figura 2.14 - Representação esquemática de diferentes defeitos em materiais cladeados por deposição. Adaptado de (Weiss <i>et al.</i> , 2001).	20
Figura 2.15 - Profundidade de penetração padrão, d , em função da frequência de operação para a liga Inconel 625 (1,40% IACS).	21

Figura 2.16 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de transmissão, da liga Inconel 718 envelhecida a 700°C por 524 horas. Adaptado de (Cozar e Pineau, 1973).....	24
Figura 2.17 - Micrografia obtida por MEV de uma amostra envelhecida a 900°C por 20 horas mostrando a fase δ em forma de plaquetas (Chandrasekar, 2013).....	25
Figura 2.18 - Imagem obtida por MEV de uma amostra solubilizada mostrando a presença de carbeto dispersos na matriz (Kuo <i>et al.</i> , 2009).	25
Figura 3.1 - Fluxograma apresentando a sequência de atividades realizadas neste estudo.	27
Figura 3.2 - Parâmetros geométricos estabelecidos para a construção das bobinas de emissão e leitura.....	28
Figura 3.3 - Diagrama TTT da liga Inconel 718 mostrando as oito condições aplicadas neste trabalho.....	30
Figura 3.4 - Configuração experimental do sensor de correntes parasitas: (a) gerador de função, (b) sensor acoplado na amostra, (c) osciloscópio, (d) pré-amplificador (e) computador.....	32
Figura 3.5 - Modelo de numérico das bobinas de emissão e leitura sobre o bloco de Inconel 625 contendo um defeito na região central	33
Figura 3.6 - Representação da geometria de partida do modelo numérico utilizado no processo de otimização.	34
Figura 3.7 - Impedância normalizada em função do deslocamento do sensor sobre o bloco passando por um entalhe, para uma determinada geometria do sensor e frequência de excitação, mostrando o valor da sensibilidade de detecção do defeito, ΔZ . b) Resposta numérica, ΔZ , em função da frequência, para uma determinada geometria de sensor, mostrando a resposta máxima do sensor, ΔZ_{max}	35
Figura 3.8 - a) Resposta, ΔZ , em função da frequência de excitação e do diâmetro externo do sensor, para um determinado defeito b) Resposta máxima, ΔZ_{max} , para cada valor de diâmetro externo do sensor, D_E , e a respectiva frequência de excitação em cada caso, F_{max}	36
Figura 3.9 - Blocos de calibração utilizados nos modelos numéricos e na etapa de validação experimental das simulações.....	37
Figura 3.10 - Diferentes respostas mostrando como os parâmetros, ΔZ , foram obtidos na: a) Análise de um defeito isolado; b) Diferenciação entre dois defeitos com diferentes profundidades; c) Resolução espacial entre dois defeitos.....	38

Figura 3.11 - Sensor com o diâmetro ótimo posicionado sobre o bloco de Inconel 625 contendo os defeitos.....	39
Figura 4.1 –Micrografia obtida por MEV a) da amostra solubilizada mostrando apenas a presença de um carboneto (2000x); b) Amostra da condição III mostrando uma quantidade pequena de fase δ nos contornos de grão (3500x). c) Amostra da condição IV mostrando uma quantidade média de fase δ nos contornos de grão (3500x). Ataque: Água régia (2:1)	42
Figura 4.2 – a) Micrografia obtida por MEV dos precipitados extraídos eletroliticamente da amostra solubilizada; b) Análise por EDS medida no ponto marcado, confirmando que os precipitados predominantes nessa amostra são carbonetos do tipo (Nb,Ti)C.....	42
Figura 4.3 –Micrografia obtida por MEV: a) Amostra da condição número V, onde o círculo contínuo indica, aparentemente, o início da mudança para o formato de placas da fase δ ; b) Amostra da condição número VI; b) Amostra da condição número VII; c) Amostra da condição número VIII; Os círculos de linhas tracejadas indicam a contínua mudança no aspecto da matriz. Ataque: Água régia (2:1)	43
Figura 4.4 – Micrografia obtida por MEV dos precipitados extraídos eletroliticamente da amostra VIII mostrando o predomínio de precipitados da fase δ (Ni_3Nb) com morfologia característica de placas.	44
Figura 4.5 - Resultados de difração de raios-X obtidos a partir dos precipitados extraídos eletroliticamente de amostras para cada condição.	45
Figura 4.6 - Resultados de condutividade, dureza e parâmetro de rede da matriz para as sequencia de condições aplicadas neste estudo.	49
Figura 4.7 – Correlação das medidas de condutividade e dureza, e setas mostrando a sequência de envelhecimento.....	51
Figura 4.8 – a) Valores de “ ΔZ_{max} ” obtidos para cada condição em função do diâmetro, “ D_E ”. b) Parâmetros de performance sem função do diâmetro, “ D_E ”, mostrando o diâmetro ótimo do sensor, $DE_{ótimo}=12mm$	52
Figura 4.9 - Comparação entre as respostas numéricas e experimentais de “ ΔZ ” em função da frequência para: a) defeitos superficiais; b) defeitos subsuperficiais.	53
Figura 4.10 - Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo dos defeitos superficiais para a frequência com máxima sensibilidade de detecção das três condições de defeitos ($F_{maxABC1}=1000$ kHz).....	54
Figura 4.11 - Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo dos defeitos subsuperficiais para a frequência com máxima sensibilidade de detecção de	

defeitos isolados e diferenciação de defeitos com profundidades distintas ($F_{\max AB2}=150$ kHz).	55
Figura 4.12 - Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo dos defeitos subsuperficiais para a frequência com máxima resolução espacial entre dois defeitos ($F_{\max C1}=550$ kHz).	56

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Principais acontecimentos históricos relacionados com correntes parasitas (Hellier, 2001).	4
Tabela 2.2 - Principais vantagens e limitações do método de correntes parasitas (Hellier, 2001; Shull, 2002; Hansen, 2004b).....	17
Tabela 2.3 - Composição química da liga 625 segundo a especificação UNS N06625. Adaptado de (ASTM International, 2011).	19
Tabela 2.4 - Composição química da liga 718 segundo a especificação API (UNS N07718). Adaptado de (API Specification 6A718, 2004).	22
Tabela 3.1 - Parâmetros geométricos do protótipo de sensor construído.....	29
Tabela 3.2 - Composição química fornecida pelo fabricante da barra de Inconel 718 utilizada na confecção dos corpos de prova (% peso).	29
Tabela 3.3 - Programas de tratamentos térmicos aplicados aos quais as amostras foram submetidas e as respectivas microestruturas esperadas.	30
Tabela 4.1 – Resumo dos resultados obtidos para cada condição de tratamento térmico. ...	46
Tabela 4.2 - Resumo dos resultados de dureza, condutividade elétrica e tamanho de grão.	47

Símbolos e Abreviações

γ'	Fase “gamma prime”
γ''	Fase “gamma double prime”
δ	Fase delta
δ (CG)	Fase delta de contorno de grão
END	Ensaio não destrutivo
MEF	Modelagem por elementos finitos
Z_o	Impedância
V_o	Tensão
I_o	Corrente
R_o	Resistência
X_o	Reatância Indutiva
$ Z $	Magnitude da impedância
φ	Ângulo de fase
ε	Força eletromotriz
$d\Phi_B$	Varição do fluxo magnético
σ	Condutividade elétrica
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
d	Profundidade de penetração padrão
e	Número de Euler
ρ	Resistividade
V_{induzido}	Tensão induzida na bobina de leitura
$I_{\text{excitação}}$	Corrente de excitação na bobina de emissão
Ni	Níquel
Ti	Titânio
Al	Alumínio
Nb	Nióbio
API	“American Petroleum Institute”

MC	Carboneto metálico
CFC	Cúbico de face centrada
TCC	Tetragonal de corpo centrado
TTT	Tempo-Temperatura-Transformação
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
EDS	“Energy Dispersive Spectroscopy”
DRX	Difração de raios-X
HCl	Ácido clorídrico
HNO ₃	Ácido nítrico
D _E	Diâmetro interno da bobina de emissão
H _E	Altura da bobina de emissão
E _E	Espessura da bobina de emissão
Ø _E	Diâmetro do fio da bobina de emissão
N _E	Número de voltas da bobina de emissão
D _L	Diâmetro interno da bobina de leitura
H _L	Altura da bobina de leitura
E _L	Espessura da bobina de leitura
Ø _L	Diâmetro do fio da bobina de leitura
N _L	Número de voltas da bobina de leitura
AWG	“American Wire Gauge”
F	Frequência de excitação da bobina de emissão
ΔZ	Sensibilidade de detecção
ΔZ _{max}	Sensibilidade máxima de detecção
F _{max}	Frequência de sensibilidade máxima de detecção
P	Parâmetro de performance
D _{Eótimo}	Diâmetro da bobina de emissão ótimo
IACS	“International Annealed Copper Standard”
GP	Guinier Peston

Sumário

Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	viii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
Símbolos e Abreviações	xv
Sumário	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos	3
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Ensaio por correntes parasitas	4
2.1.1. Histórico	4
2.1.2. Princípio físico do método.....	5
2.1.3. Fatores de influência	6
2.1.3.1. Condutividade elétrica.....	6
2.1.3.2. Permeabilidade magnética.....	7
2.1.3.3. Lift-off.....	8
2.1.3.4. Edge-Effect.....	8
2.1.3.5. Frequência e Profundidade de penetração	8
2.1.4. Plano de Impedância	10
2.1.5. Tipo de sensores	11
2.1.5.1. Modo de operação	12
2.1.5.2. Principais configurações	13
2.1.6. Design de sensores	15
2.1.7. Aplicações	16
2.1.8. Vantagens e limitações.....	17
2.2. Superligas à base de níquel	18

2.2.1.	Superligas endurecíveis por precipitação	18
2.2.2.	Superligas resistentes à corrosão.....	19
2.3.	Inspeção de superligas à base de níquel.....	20
2.3.1.	Inspeção de camadas de cladeamento.....	20
2.3.2.	Caracterização microestrutural	21
2.4.	Superligas Inconel 718	22
2.4.1.	Principais fases	23
2.4.1.1.	Fase γ	23
2.4.1.2.	Fase γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$).....	23
2.4.1.3.	Fase γ'' (Ni_3Nb)	23
2.4.1.4.	Fase δ (Ni_3Nb).....	24
2.4.1.5.	Carbetos	25
2.4.2.	Tratamentos térmicos	26
3.	Metodologia	27
3.1.	Caracterização do processo de envelhecimento da liga Inconel 718.....	28
3.1.1.	Construção do sensor.....	28
3.1.2.	Materiais e métodos	29
3.1.2.1.	Metalografia	31
3.1.2.2.	Difração de raios-X	31
3.1.2.3.	Ensaio por correntes parasitas.....	31
3.1.2.4.	Dureza	32
3.1.2.5.	Tamanho de grão.....	32
3.2.	Otimização de sensores por MEF para inspeção de defeitos em Inconel 625	32
3.2.1.	Modelagem numérica	32
3.2.2.	Parâmetros do sensor	33
3.2.3.	Etapas de otimização	34
3.2.4.	Inspeção de defeitos superficiais e subsuperficiais.....	36
3.2.4.1.	Validação dos resultados numéricos.....	39

3.2.4.2.	Aplicação prática.....	39
4.	Resultados.....	41
4.1.	Caracterização do processo de envelhecimento da liga Inconel 718	41
4.1.1.	Resultados	41
4.1.1.1.	Metalografia	41
4.1.1.2.	Difração de raios-X	44
4.1.1.3.	Ensaio por correntes parasitas.....	46
4.1.1.4.	Dureza	47
4.1.1.5.	Tamanho de grão.....	47
4.1.2.	Discussão.....	48
4.2.	Otimização de sensores por MEF para inspeção de defeitos em Inconel 625	51
4.2.1.	Inspeção de defeitos superficiais e subsuperficiais.....	51
4.2.2.	Validação dos resultados numéricos	53
4.2.3.	Aplicação prática	54
5.	Conclusão.....	57
6.	Trabalhos futuros.....	59
7.	Referências bibliográficas.....	60

1. Introdução

Superligas à base de níquel vêm sendo extensivamente utilizadas em diversas aplicações nas indústrias nucleares, aeroespaciais, petroquímicas, e mais recentemente, na fabricação de componentes críticos de plataformas e navios petroleiros, sobretudo para atender os novos desafios para perfuração de novos poços e produção de petróleo em águas profundas e ultra profundas. A seleção dessas ligas se deve ao excelente comportamento mecânico e anticorrosivo, levando a reduções consideráveis nos custos de manutenção e riscos para o meio ambiente (Smith, 2012). No entanto, essas ligas possuem certas particularidades que levam à necessidade de desenvolvimento de técnicas e procedimentos confiáveis de inspeção e caracterização metalúrgica, garantindo a integridade de estruturas e componentes de engenharia produzidos com esses materiais.

No caso das superligas endurecíveis por precipitação, as propriedades finais são alcançadas através de um tratamento térmico de envelhecimento, com a formação de precipitados endurecedores finamente dispersos, tais como γ' e γ'' (Dupont, Lippold e Kiser, 2009; Chandrasekar, 2013). Por outro lado, precipitados como a fase δ , não possuem uma morfologia favorável para o endurecimento, e sua presença é responsável por uma queda drástica na resistência mecânica da liga (Azadian, Wei e Warren, 2004). Além disso, conforme estudos de (Liu *et al.*, 2005; Santos, 2009), a fase δ esta relacionada com efeitos negativos na fragilização pelo hidrogênio, sendo considerada uma fase indesejável na maioria dos casos. Devido à elevada demanda dessa liga e a complexidade das microestruturas formadas, as empresas responsáveis pelo fornecimento desse material e pela fabricação de componentes vêm buscando alternativas confiáveis e economicamente atrativas para garantir a qualidade da matéria prima e dos tratamentos térmicos aplicados, como forma de aumentar a eficiência do processo de caracterização em relação às técnicas destrutivas convencionais.

Outro grande problema envolvendo a aplicação dessas superligas diz respeito a dificuldade de inspeção de defeitos oriundos do processo de cladeamento. Devido ao elevado custo destas superligas, uma estratégia tipicamente utilizada para diminuir o volume deste tipo de material é o processo de cladeamento por deposição. Nesse processo, o metal base de aço carbono é revestido por uma camada de solda relativamente fina do material com propriedades anticorrosivas superiores, conferindo ao componente a mesma resistência à corrosão da liga aplicada, por um custo inferior (Stevens e Ross, 1986). No entanto, a deposição por esse tipo de processo pode ocasionar inúmeros defeitos característicos do processo de soldagem, tais como, trincas de soldagem, falta de fusão, inclusões, porosidade, entre outros. Pequenos defeitos subsuperficiais próximos da

superfície podem ser considerados um desafio especial de inspeção, uma vez que não são detectáveis pela técnica de líquidos penetrantes, pois os defeitos não possuem nenhuma ligação com a superfície, nem pela técnica de partículas magnéticas, no caso de ligas não magnéticas. Além disso, esses defeitos se encontram em regiões críticas de inspeção pela técnica de ultrassom (zona morta e campo próximo), aumentando a relevância da aplicação de métodos de inspeção alternativos para o controle da qualidade do processo e da avaliação da integridade estrutural dos componentes cladeados (Bivth, Fabbri e Monjaret, 2001).

Uma técnica de END que apresenta grande potencial para inspeção desse tipo de liga é a técnica de correntes parasitas. Devido a influência da composição química e da microestrutura na condutividade elétrica, o método de correntes parasitas é bastante difundido como ferramenta industrial de controle de qualidade, sendo extensivamente utilizado na caracterização de diversos tipos de aços (Khan *et al.*, 2008b; Ghanei, Kashefi e Mazinani, 2013), ligas de alumínio (Pellegrini, 1980; Zergoug *et al.*, 2004), entre outros. Além disso, o ensaio de correntes parasitas é um método de inspeção convencional particularmente bem adequado para a detecção de diferentes tipos de defeitos superficiais e subsuperficiais. No entanto, um ponto crítico para o sucesso de inspeção desses defeitos é o emprego de sensores otimizados de acordo com as características do material e dos tipos de defeitos esperados. A utilização de sensores com design apropriados pode melhorar consideravelmente a probabilidade de detecção da técnica, como mostram os estudos de (Fitzpatrick *et al.*, 1996; Sikora *et al.*, 2004; Chady e Lopato, 2008). Neste trabalho, a técnica de correntes parasitas é aplicada à superligas à base de níquel com dois propósitos distintos: 1) caracterização do processo de envelhecimento da liga Inconel 718 e; 2) desenvolvimento de um processo de otimização de sensores para a inspeção de defeitos esperados em camadas de cladeamento da liga Inconel 625.

Todas as atividades realizadas nesse trabalho foram desenvolvidas no grupo de ensaios não destrutivos do Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Em um primeiro momento, foi estudada a evolução microestrutural da liga Inconel 718 durante o processo de envelhecimento através de medidas de correntes parasitas realizadas com um sensor construído em laboratório. A fim de se obter diferentes níveis de envelhecimento, amostras foram submetidas a diferentes ciclos de tratamento térmico. Os resultados das medidas de correntes parasitas foram correlacionados com os resultados das análises de difração de raios-X, análise metalográfica, medidas de dureza e tamanho de grão. Os resultados mostraram que as diferentes microestruturas do Inconel 718 têm efeitos distintos na condutividade elétrica da liga e através da combinação dos valores de dureza e medidas de correntes parasitas foi sugerida uma forma rápida e prática

de determinar o nível de envelhecimento da liga. Em um segundo momento, foi desenvolvida uma metodologia de otimização de sensores através de modelagem por elementos finitos (MEF). Definida a metodologia de otimização, a mesma foi aplicada na otimização dos parâmetros de construção e operação de um sensor para inspeção de defeitos superficiais e subsuperficiais esperados em materiais cladeados com Inconel 625. A partir dos dados gerados, o sensor com a geometria ótima foi construído e testado a fim de verificar a eficiência do processo de otimização. Uma ótima correlação entre os resultados numéricos e experimentais foi encontrada e o sensor otimizado se mostrou eficiente na inspeção de pequenos defeitos superficiais e subsuperficiais na liga Inconel 625 quando operado nas frequências corretas.

1.1. Objetivos

Objetivos Principais

Neste trabalho, a técnica de correntes parasitas foi aplicada à superligas à base de níquel visando atender os seguintes objetivos principais:

- Caracterização do processo de envelhecimento da superliga Inconel 718 pelo método de correntes parasitas.
- Desenvolvimento de processo de otimização de sensores por MEF visando à inspeção de defeitos na liga Inconel 625.

Objetivos Específicos

Para atender as duas propostas principais desse estudo, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Construção de sensores de correntes parasitas para caracterização microestrutural.
- Avaliação do efeito das microestruturas envelhecidas nas propriedades elétricas da liga Inconel 718.
- Verificação da aplicabilidade da técnica como procedimento não destrutivo para a caracterização do processo de envelhecimento.
- Modelagem numérica de sensores de correntes parasitas.
- Otimização de sensor para a inspeção de trincas superficiais e subsuperficiais na liga Inconel 625.
- Verificação da eficiência do processo de otimização através da construção do sensor otimizado.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ensaio por correntes parasitas

2.1.1. Histórico

Apesar da validação do princípio físico das correntes parasitas, enunciado por Faraday, ser datada antes de 1851, com Jean Bernard Léon Foucault através da demonstração de correntes parasitas em um disco de cobre, a realização do primeiro teste gravado de correntes parasitas ocorrem em 1879 por Hughes.

Aquela época, Hughes conseguia distinguir a diferença entre alguns metais registrando a variação da indutância da bobina quando se aproximava do metal. Em 1926, o primeiro instrumento baseado nas correntes parasitas capaz de medir a espessura de metais foi desenvolvido. Durante a segunda guerra mundial e no início dos anos de 1940, outros desenvolvimentos resultaram em instrumentos de correntes parasitas melhores e mais práticos. Na Tabela 2.1 apresenta um breve resumo das principais descobertas, observações e explicações sobre os fenômenos das correntes parasitas.

Tabela 2.1 - Principais acontecimentos históricos relacionados com correntes parasitas (Hellier, 2001).

Pessoa	Ano	Descrição
H.C. Oersted	1821	Descoberta do eletromagnetismo.
J.B. Foucault	1830	Demonstração da existência das correntes parasitas
M. Faraday	1831	Descoberta da indução eletromagnética.
H. Lenz	1834	Efeitos das propriedades dos materiais na indução eletromagnética.
J. Maxwell	1864	Equacionamento das teorias do eletromagnetismo.
D. E. Hughes	1879	Aplicação do princípio na classificação metalurgia de materiais.
F. Foerster	1940's	Fundação do instituto Dr. Foerster.
F. Foerster	1960's	Desenvolvimento de uma linha completa de equipamentos.
Int. of France	1974	Desenvolvimento do método multi-frequência.

Recentemente, a influência do desenvolvimento nos campos da eletrônica, tecnologia da computação, ferramentas de simulação e processamento de sinais contribuíram para o aumento sem precedentes do desempenho dos métodos envolvendo correntes parasitas (Rosado, 2009).

2.1.2. Princípio físico do método

Correntes parasitas são correntes elétricas induzidas em um condutor elétrico através da reação com um campo magnético alternado. As correntes parasitas são circulares e perpendiculares à direção do campo magnético aplicado (Figura 2.1). A condutividade elétrica, permeabilidade magnética, geometria e homogeneidade do material analisado afetam as correntes induzidas (Khan *et al.*, 2008a).

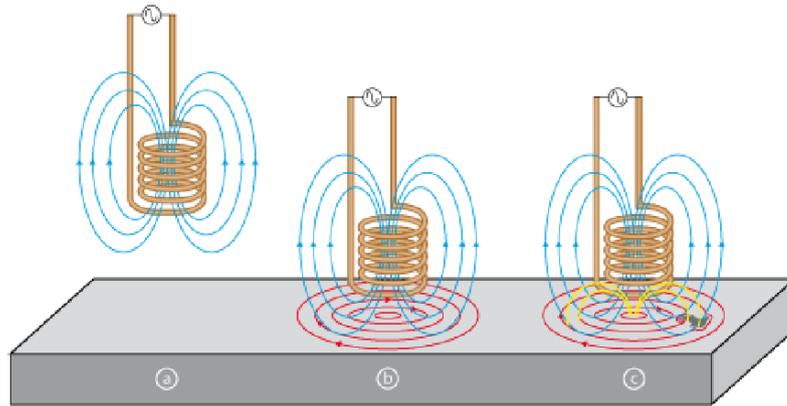


Figura 2.1 - Princípio do ensaio por correntes parasitas: a) campo magnético primário; b) correntes induzidas no material condutor; c) campo magnético secundário gerado na peça. (Nelligan e Calderwood, 2013)

Cada bobina é caracterizada pelo parâmetro impedância, Z_o , que representa a relação entre a tensão e a corrente (V_o/I_o) e pode ser expresso por um número complexo definido pela equação (1), considerando uma excitação senoidal de frequência única. A partir da equação é possível determinar a parte real, R_o , e imaginária, X_o , assim como a magnitude, $|Z|$, e a fase, φ , da impedância:

$$Z_o = \frac{V_o}{I_o} = R_o + jX_o = R_o + j2\pi fL_o = \sqrt{R_o^2 + X_o^2} \quad \varphi = \arctan(X_o/R_o) = |Z|_{\varphi} \quad (1)$$

A Inspeção por correntes parasitas é baseada na lei indução magnética de Faraday. Ele enunciou que uma variação de densidade de fluxo magnético induzido ao longo do tempo produz uma corrente induzida em um condutor elétrico. A força eletromotriz, ε , é proporcional à taxa de variação da densidade fluxo magnético induzido, $d\phi_B$, como mostra a equação (2):

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (2)$$

Quando uma bobina de impedância, Z_o , energizada alternadamente se aproxima de um material condutor não magnético, um campo magnético primário penetra o material gerando correntes parasitas contínuas e circulares. As correntes induzidas produzidas

geram um campo magnético secundário que se opõem e enfraquece o campo primário. A nova parte imaginária da impedância diminui proporcionalmente ao aumento da intensidade das correntes parasitas geradas no material em teste (Placko e Dufour, 1993).

As correntes parasitas também contribuem para o aumento do poder de dissipação de energia que alteram a parte real da impedância da bobina. Acompanhando o valor da impedância através do monitoramento do sinal de tensão elétrica e corrente, é possível relacionar os valores de impedância medidos com informações específicas do material testado, tais como condutividade e composição química (Garcia-Martin, Gomez-Gil e Vazquez-Sanchez, 2011).

Trincas e descontinuidade, ao serem percorridas pelo sensor, provocam a distorção do fluxo de correntes parasitas na peça (Figura 2.2) e conseqüentemente uma nova alteração na impedância é observada. Assim, através do acompanhamento ao longo do tempo da impedância do sensor é possível detectar e dimensionar diferentes tipos de defeitos em regiões superficiais e subsuperficiais.

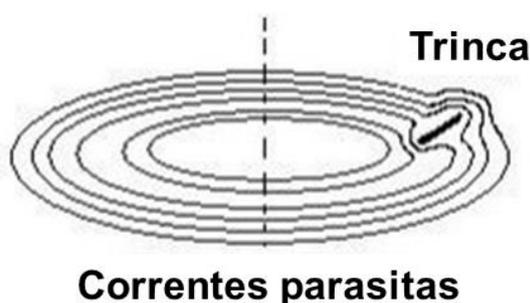


Figura 2.2 - Perturbação do fluxo de correntes parasitas provocado pela presença de uma trinca.

2.1.3. Fatores de influência

Vários fatores, além de defeitos, afetam a resposta do sensor de correntes parasitas. Uma medição satisfatória de um defeito consiste em manter os outros parâmetros constantes, ou de alguma forma eliminar seus efeitos na resposta. A eliminação dessas respostas indesejáveis consiste na base tecnológica de inspeção por correntes parasitas. Os principais fatores são:

2.1.3.1. Condutividade elétrica

Cada material tem um valor de resistência ao fluxo de corrente que é caracterizado pela condutividade elétrica, σ , ou seu inverso, $1/\sigma$, resistividade. A condutividade do material tem um efeito bastante direto no fluxo das correntes parasitas geradas: quanto maior a condutividade do material, maior o fluxo de correntes parasitas na superfície.

Materiais de alta condutividade elétrica como o cobre e alumínio geram correntes parasitas intensas na superfície de teste. As vantagens desse efeito é que trincas geram uma variação de sinal maior e o diferença de fase entre as linhas da trinca e do lift-off é maior para esses materiais (Figura 2.3). A desvantagem é que materiais de alta condutividade possuem profundidades de penetração padrão menores para uma frequência fixa do que matérias com baixa condutividade. Fatores como temperatura da peça, composição química, tensões residuais, tratamentos térmico exercem influência na condutividade elétrica e podem ser medidas pelo método de correntes parasitas.

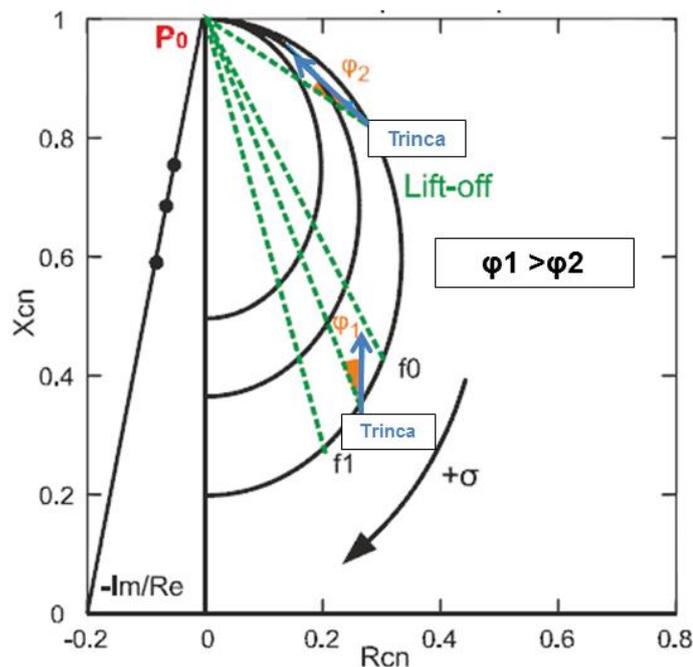


Figura 2.3 - Efeito da condutividade na diferença de fase entre as linhas da trinca e do lift-off.

Adaptado de (Garcia-Martin, Gomez-Gil e Vazquez-Sanchez, 2011).

2.1.3.2. Permeabilidade magnética

Permeabilidade magnética pode ser definida como a facilidade de um material ser magnetizado. Para metais não magnéticos como cobre, alumínio e aço inox austenítico a permeabilidade magnética é a mesma que de o ar, logo, sua permeabilidade relativa μ_r é 1. Para metais ferrosos a permeabilidade relativa pode chegar algumas centenas, e isso é muito significativo na resposta das correntes parasitas. A alta permeabilidade magnética faz a profundidade de penetração padrão diminuir sendo necessária a utilização de frequências de inspeção menores. Além disso, a permeabilidade pode variar consideravelmente em determinadas regiões do metal analisado devido a tensões localizadas, segregações, tratamentos térmicos, etc. Em alguns casos, é feita a magnetização do material testado até alcançar a saturação, com o objetivo tornar constante a permeabilidade em todo o material e eliminar o efeito das variações de permeabilidade (Hansen, 2004a).

2.1.3.3. *Lift-off*

Quando uma bobina superficial energizada alternadamente é mantida no ar acima de um condutor, a impedância da bobina tem um determinado valor. Conforme a bobina se aproxima do condutor, o valor inicial da impedância é alterado devido à interação do fluxo magnético produzido, com o material teste. Pelo fato do campo magnético ser maior perto da bobina, o valor da impedância vai mudar continuamente até a bobina estar diretamente em cima do condutor. Uma vez a bobina em cima do condutor, qualquer pequena variação de aproximação entre a bobina e o condutor vai alterar a impedância da bobina. O efeito do “lift-off” é tão pronunciado que pequenas variações de aproximação pode mascarar muitas indicações.

2.1.3.4. *Edge-Effect*

Quando a bobina teste se aproxima de uma borda ou a parte final de um elemento sendo inspecionado, as correntes parasitas começam a ser distorcidas, produzindo uma falsa indicação conhecida como “Edge-Effect” ou efeito de borda (Figura 2.4). Para o circuito de leitura, a borda se comporta como um buraco ou uma trinca grande. Essa resposta marcara outras variáveis que podem estar presentes, limitando a aplicação do método nessas regiões. Com a utilização de bobinas e, conseqüentemente, campos magnéticos menores, regiões mais próximas das bordas podem ser inspecionadas sem o “Edge-Effect” (Shull, 2002).

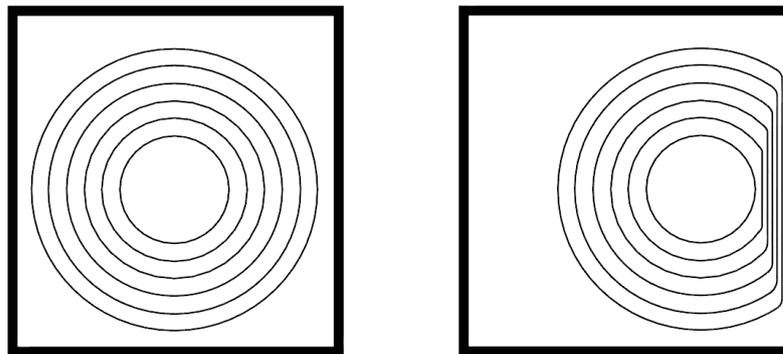


Figura 2.4 - Linhas de fluxo das correntes parasitas em um condutor representado o efeito de borda (Hellier, 2001).

2.1.3.5. *Frequência e Profundidade de penetração*

A frequência de inspeção em correntes parasitas é um parâmetro fundamental para a inspeção de falhas. Conforme a frequência é aumentada, a sensibilidade a trincas superficiais aumenta, permitindo a detecção de descontinuidades consideravelmente

menores. Com a diminuição da frequência, a penetração das correntes parasitas no material aumenta, possibilitando que defeitos subsuperficiais possam ser detectados.

A frequência para a obtenção de uma penetração adequada para um dado material pode ser estimada através de equações ou através de diagramas contendo a profundidade de penetração padrão em função da frequência para diversos materiais (Garcia-Martin, Gomez-Gil e Vazquez-Sanchez, 2011), como exemplifica a Figura 2.5.

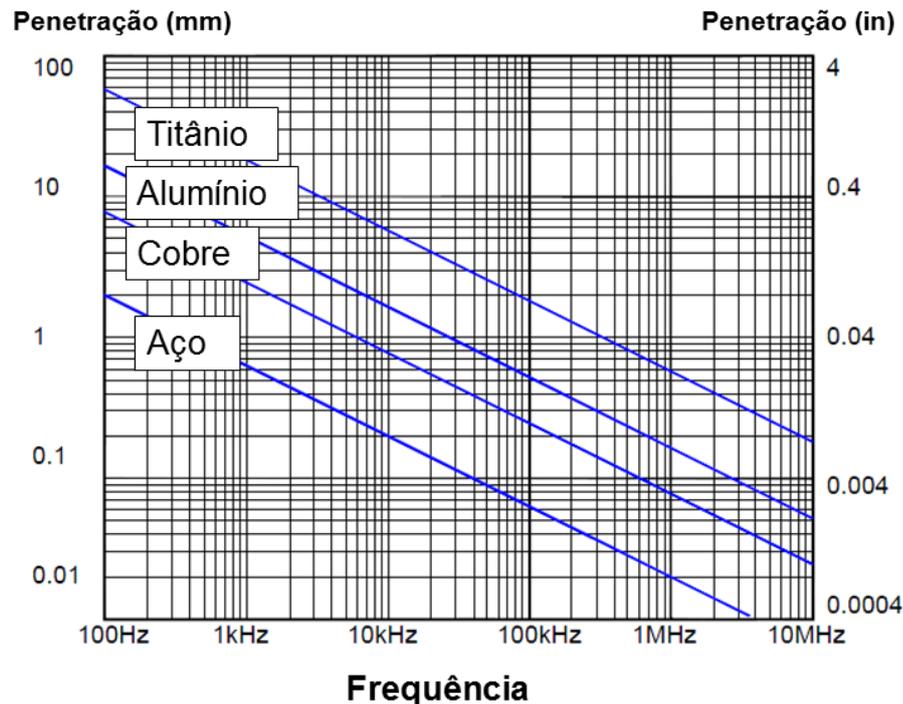


Figura 2.5 - Efeito da frequência na profundidade de penetração para diferentes materiais. Adaptado de (Hansen, 2004a).

A profundidade de penetração padrão, d , é definida como a profundidade na qual o decréscimo da densidade de corrente é de $1/e$ (37%) em relação à superfície do material, onde, e , é o logaritmo natural (Figura 2.6). A profundidade de penetração em milímetros é calculada pela equação (3):

$$d = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}} \quad (3)$$

Onde ρ é a resistividade em $m\Omega \cdot cm$, f é a frequência em Hz e μ_r é a permeabilidade magnética relativa do material (Hansen, 2004a).

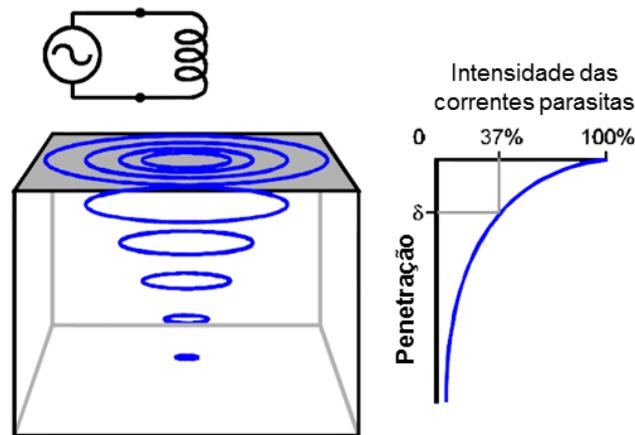


Figura 2.6 - Intensidade das correntes parasita em função da profundidade de penetração no material. Adaptado de (Hansen, 2004a).

Além de três vezes dessa profundidade, d , a densidade de correntes parasitas é muito pequena e produz um sinal praticamente desprezível. Para um valor de cinco vezes, o valor da densidade de corrente é de apenas 0,0067% e o material já pode ser considerado como infinito (Hellier, 2001).

2.1.4. Plano de Impedância

Trinca e descontinuidades no material teste modificam as correntes parasitas e conseqüentemente a medida da impedância da bobina de medição. O plano de impedância permite uma fácil interpretação dos resultados de inspeção e o efeito de diferentes fontes de perturbação como mostra a Figura 2.7.

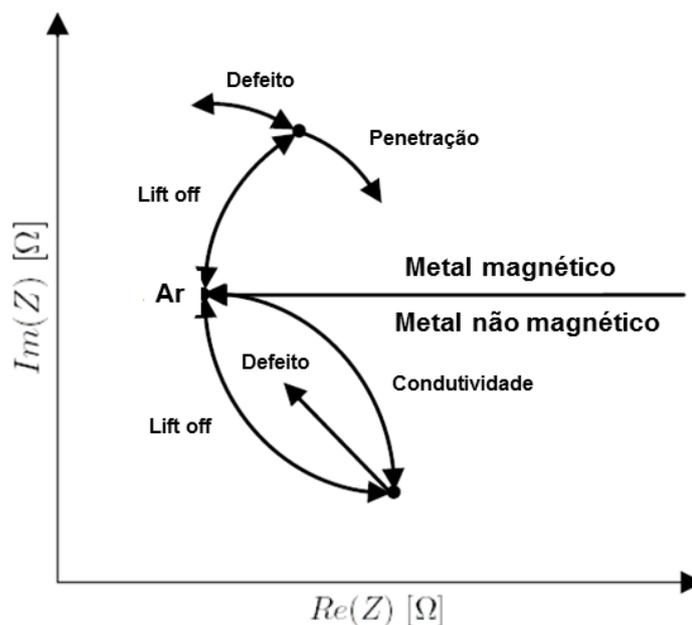


Figura 2.7 - Plano de impedância mostrando indicações observadas em materiais magnéticos e não magnéticos. Adaptado de (Rosado, 2009)

Quando a bobina é movida do ar para o metal não magnético, a componente real da impedância aumenta devido à retirada de energia da bobina com a geração das correntes parasitas. Isso acontece porque o material não é um condutor perfeito. Além disso, o campo magnético na bobina é reduzido pelas correntes parasitas assim como a parte imaginária da impedância. Com a presença de uma trinca no material, menos correntes parasitas serão geradas aumentando a parte imaginária e diminuindo a parte real da impedância.

Quando a bobina se aproxima de materiais ferromagnéticos o comportamento em partes é diferente. Ao contrário dos materiais não ferromagnéticos, ocorre um aumento da componente imaginária da impedância devido a um efeito de concentração de campo magnético. A componente real, devido à resistividade do material, aumenta da mesma forma que nos matérias não ferromagnéticos (Rosado, 2009).

O display de um instrumento típico de inspeção por correntes parasitas representa uma “janela” do plano de impedância, que pode ser girada ou ampliada conforme a necessidade da aplicação. O esquema da Figura 2.8 representa uma sonda sendo percorrida sobre o alumínio e sua representação no plano de impedância.

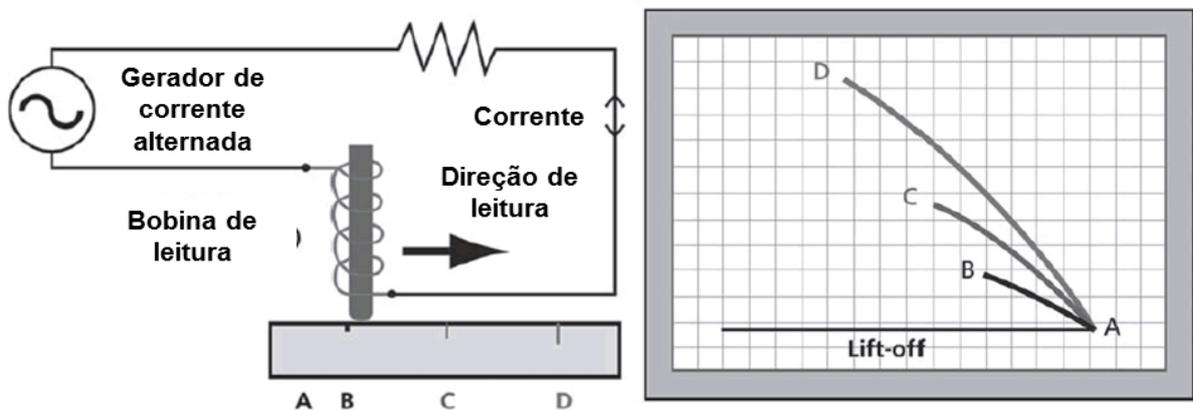


Figura 2.8 - Sinal mostrado no plano de impedância quando um sensor é percorrido por uma série de defeitos com diferentes profundidades (Hansen, 2004a).

2.1.5. Tipo de sensores

Os sensores utilizados na inspeção por correntes parasita podem ser classificados de diferentes maneiras, sendo frequentemente divididos de acordo com o modo de operação e configuração das bobinas utilizadas no sistema de medição. O modo de operação determina como a bobina interage com a amostra (absoluto, diferencial ou referência) e a configuração determina como as bobinas estão fisicamente montadas para acessar a peça.

2.1.5.1. Modo de operação

Absoluto

O modo absoluto utiliza uma única bobina sobre o material teste, sendo capaz de detectar qualquer fator que afete o fluxo de corrente parasita. Por ser extremamente sensível, esse modo de operação também é suscetível a sinais indesejáveis, tais como, lift-off e variações de temperatura.

Diferencial

Sensores operando no modo diferencial utilizam a comparação do sinal entre duas bobinas idênticas, enroladas em sentidos opostos. Esse modo elimina os fatores que afetem as duas bobinas, tais como, lift-off, variações de espessura e temperatura. Por outro lado, fatores sensíveis por apenas uma das bobinas são facilmente detectáveis. A principal desvantagem desse modo é falta de sensibilidade de trinca longas ou graduais, sendo detectado apenas o início e o final do defeito. Além disso, a interpretação dos resultados é mais difícil do que o modo absoluto (Hellier, 2001). A Figura 2.9 apresenta uma representação de sensores compostos de bobinas operando no modo absoluto e diferencial.

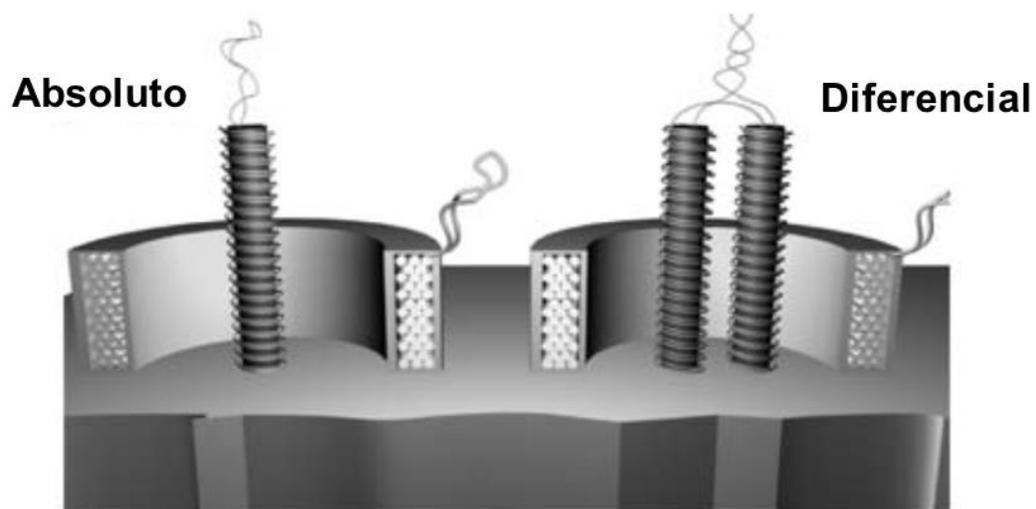


Figura 2.9 – Sensores compostos de bobinas operando no modo absoluto e diferencial (Shull, 2002).

Referência

O modo referencial combina aspectos do modo absoluto e diferencial, utilizando uma bobina diretamente no material teste e outra bobina acoplada em um padrão de referência ou no ar (Figura 2.10). Esse modo fornece indicações sobre a diferença entre o material teste e o a referência.

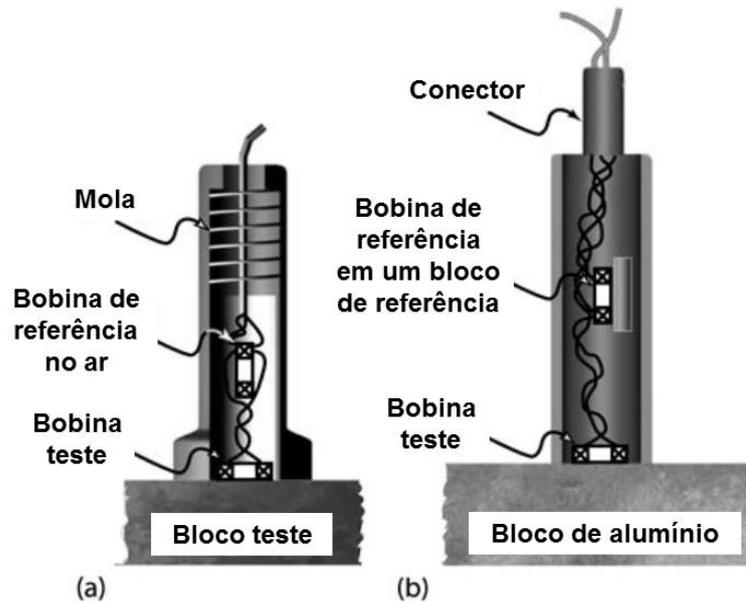


Figura 2.10 - Sensor operando no modo referencial. a) Bobina de referência no ar; b) Bobina de referência em um bloco de alumínio (Shull, 2002).

2.1.5.2. Principais configurações

Bobinas superficiais possuem uma variedade maior de configurações quando comparados com bobinas envoltentes ou internos. Por esse motivo, nesta seção serão descritas as principais configuração desse tipo de sensor. De maneira geral, as bobinas superficiais são construídas para serem utilizadas manualmente e utilizando um acoplamento capaz de escanear a superfície dos materiais. (Hellier, 2001).

Bobinas superficiais são fabricadas nas mais variadas configurações de acordo com a aplicação desejada. Na configuração mais simples, uma única bobina é responsável pela geração e recepção do fluxo de correntes parasitas na peça. Por outro lado, outras configurações mais elaboradas utilizam bobinas diferentes para emissão e recepção do sinal (Figura 2.12), tais como:

Transmissão-recepção

Uma configuração de bobinas bastante utilizada em sensores é a transmissão-recepção, onde o sistema é composto por duas bobinas, uma delas é responsável por induzir correntes parasitas no material teste (bobina de emissão) e a outra é responsável por medir o somatório dos campos magnéticos gerados (bobina de leitura) (Garcia-Martin, Gomez-Gil e Vazquez-Sanchez, 2011). A vantagem dessa configuração é que a impedância da bobina de emissão pode ser ajustada para produzir um campo magnético forte e homogêneo, através configuração de parâmetros como diâmetro, diâmetro do fio, número de turnos, etc. Da mesma forma, a bobina de recepção pode ser configurada para minimizar as fontes de ruído e o seu tamanho pode ser ajustado ao tamanho dos defeitos (Lopes et

al., 2009). Devido à possibilidade de diferentes combinações entre os parâmetros das bobinas de emissão e leitura, essa configuração é particularmente bastante adequada para a inspeção de defeitos superficiais e subsuperficiais. Além disso, esse tipo bobina é adequado para medidas de condutividade, uma vez que penetrações satisfatórias são facilmente atingidas.

A bobina externa (bobina de emissão) é responsável pela criação do campo magnético a partir de sua excitação por uma tensão senoidal, e a bobina interna (bobina de leitura) é responsável pela leitura da tensão induzida devido ao campo magnético resultante do sistema sensor-peça. Cada bobina é caracterizada por um determinado valor de impedância, que se combinam, resultam na impedância, Z , do sistema. A magnitude e a fase da impedância do sistema pode ser calculada através da relação entre a tensão induzida na bobina de recepção, V_{induzido} , e a corrente na bobina emissão, $I_{\text{emissão}}$, (Equação 4).

$$Z = \frac{V_{\text{induzido}}}{I_{\text{emissão}}} \quad (4)$$

A frequência de excitação do sensor é um dos mais importantes parâmetros, junto com as características geometrias das bobinas, uma vez que a combinação desses fatores determinam a resolução espacial e a profundidade de inspeção do sensor. A Figura 2.11 mostra um típico sensor configurado como transmissão-recepção e os resultados esperados da inspeção de uma peça contendo defeitos com diferentes profundidades. É possível observar que para uma determinada frequência de operação, defeitos mais superficiais apresentam indicações menores quando comparados com defeitos mais profundos, onde a distorção do fluxo de correntes parasitas é mais intensa.

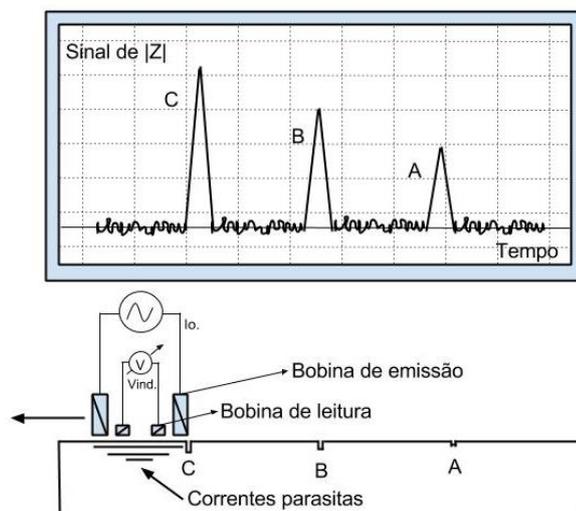


Figura 2.11 - Impedância absoluta ao longo do tempo do sensor sendo percorrido por uma série de defeitos com diferentes profundidades.

Reflexão

As bobinas de reflexão utilizam dois sistemas de bobinas em uma única carcaça. Uma bobina maior é montada externamente com o objetivo de excitar um sistema de recepção interno composto por duas bobinas menores. As bobinas internas são enroladas uma seguida da outra e em sentidos contrários, por isso o termo “reflexão”. A bobina externa induz um fluxo de correntes no material. O campo magnético secundário gerado na peça interage com a bobina interna localizada mais próxima da superfície, causando um desbalanço no sinal medido pelo sistema de medição. A principal vantagem dessa configuração é eliminar o efeito da temperatura (Hellier, 2001).

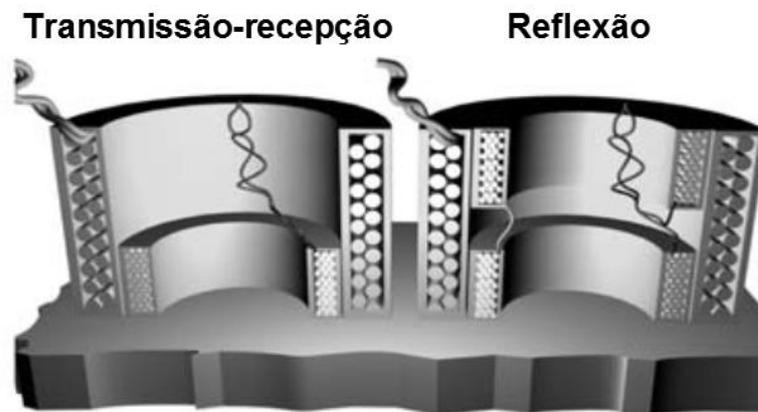


Figura 2.12– Sensores utilizando a configuração transmissão-recepção e reflexão (Shull, 2002).

Transmissão

Essa configuração utiliza uma bobina de emissão e uma de recepção em lado oposto do material teste. Essa configuração permite a inspeção de descontinuidade em grandes profundidades. No entanto, a localização do defeito em termos de profundidade não é determinada, uma vez que essa técnica não traz informações sobre a fase.

2.1.6. Design de sensores

Tradicionalmente o método de correntes parasitas utiliza bobinas para medição do campo magnético e em alguns casos sensores de efeito Hall, “*Giant Magneto Resistors*” (GMR) ou outros tipos de dispositivos. A utilização de bobinas como transdutores oferece como vantagem o fato de serem bastante precisas, robustas, e de fácil construção, além de apresentarem boa uma relação sinal/ruído (Garcia-Martin e Gomez-Gil, 2013).

A sensibilidade de uma bobina para inspeção de determinado defeito está diretamente ligada ao formato do campo de correntes parasitas gerado na peça, sendo afetada principalmente pelos fatores geométricos, que podem competir entre si. Por exemplo, para detecção de pequenas trincas, é necessário que o campo de correntes parasitas seja suficientemente compacto para que a descontinuidade cause o máximo de

distorção. Por outro lado, uma penetração satisfatória necessita-se que o campo seja grande o suficiente para se estender até a profundidade desejada. Como regra geral, pode-se dizer que a profundidade alcançada por uma bobina é limitada por um valor igual ao seu diâmetro, enquanto uma sensibilidade satisfatória requer que o diâmetro não ultrapasse o tamanho do defeito a ser detectado (Hellier, 2001). A maior parte das bobinas superficiais é projetada para que o eixo da bobina seja perpendicular à superfície do material, sendo sensíveis a defeitos e descontinuidade orientados perpendicularmente a superfície do material teste. Bobinas superficiais grandes permitem uma inspeção bastante rápida e atinge penetrações maiores, sendo bastante utilizado para inspeção de defeitos subsuperficiais e medidas de condutividade, pois evitam efeitos de variações localizadas de condutividade uma vez que o valor medido é uma média da região analisada.

Para materiais e tipos de defeitos específicos, a utilização de sensores com design apropriados pode melhorar consideravelmente a probabilidade de detecção da técnica. A modelagem por elementos finitos (MEF) é uma ferramenta poderosa para o aprimoramento do design de sensores. A aplicação dessa técnica para o desenvolvimento de sensores eletromagnéticos teve início na década de 1980 com modelos bidimensionais (Palanisamy e Lord, 1980; Ida, Palanisamy e Lord, 1983). Nos últimos anos, diversos pesquisadores desenvolveram trabalhos aplicando MEF para resolução de problemas envolvendo inspeção por correntes parasitas (Bakhtiari e Kupperman, 1999; Yusa *et al.*, 2005).

2.1.7. Aplicações

As diversas aplicações desenvolvidas para o método de correntes parasitas se devem à sensibilidade da técnica frente às seguintes fatores (Hellier, 2001):

- Variações de condutividade
- Inspeção de descontinuidades
- Espessura de componentes
- Espessuras de camadas depositadas sobre material base
- Espaçamento entre sensor e peça (variação de lift-off)
- Variações de permeabilidade

A grande versatilidade apresentada pelo método resultou em uma larga gama de aplicação desta técnica. No entanto, podem-se destacar como principais áreas de atuação a inspeção de tubulações e componentes da indústria nuclear, químicas e petroquímicas, assim como na inspeção de motores e estruturas da indústria aeroespacial. Além disso, o

método é amplamente utilizado controle de qualidade de diferentes peças, tubulações, barras e arames da indústria metalúrgica.

2.1.8. Vantagens e limitações

A principal vantagem do método é a sensibilidade a diversas variáveis, tais como condutividade e espessura do material, dimensões dos defeitos superficiais e subsuperficiais, camadas de revestimento ou cladeamento no metal base, espaçamento entre a bobina e a peça (lift-off), variações de permeabilidade, etc. Isso também pode ser considerada a principal desvantagem da técnica, uma vez que a resposta dessas variáveis são vetorialmente somadas e a bobina leitora detecta mais de uma variável ao mesmo tempo, ficando difícil de interpretar separadamente cada variável presente. Uma correta interpretação das variáveis separadamente depende de conhecimento e treinamento avançados por parte do usuário da técnica (Hellier, 2001). A

Tabela 2.2 apresenta um resumo das principais vantagens e desvantagens do método de correntes parasitas.

Tabela 2.2 - Principais vantagens e limitações do método de correntes parasitas (Hellier, 2001; Shull, 2002; Hansen, 2004b).

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção rápida e segura. • Não necessita necessariamente contato entre o sensor e a peça • Sensível a uma variedade de parâmetros relativos a condutividade, permeabilidade magnética, e geometria (ex. trincas, espessura, revestimentos, dureza e proximidade) • Opera numa faixa larga de temperatura. • Sensores e equipamentos leves, pequenos e portáteis. • Permite utilização de tecnologias “arrays”. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspecciona apenas materiais condutores elétricos • Detecta apenas defeitos superficiais e subsuperficiais, em regiões próximas à superfície, principalmente se tratando de materiais com elevada permeabilidade magnética. • Sensibilidade a mais de uma variável ao mesmo tempo. • Uso de padrões de calibração é necessário na maioria dos casos. • Sensível a variações de lift off e efeito de borda.

2.2. Superligas à base de níquel

Superligas à base de níquel são ligas resistentes à alta temperatura e que exibem uma combinação de resistência mecânica e resistência à degradação. As primeiras aplicações dessas ligas foram em turbinas de aeronaves, câmaras de combustão, turbinas de plantas de energia, veículos espaciais, sistemas nucleares, componentes da indústria petroquímica, etc. A classificação das principais superligas do mercado são apresentadas na Figura 2.13.

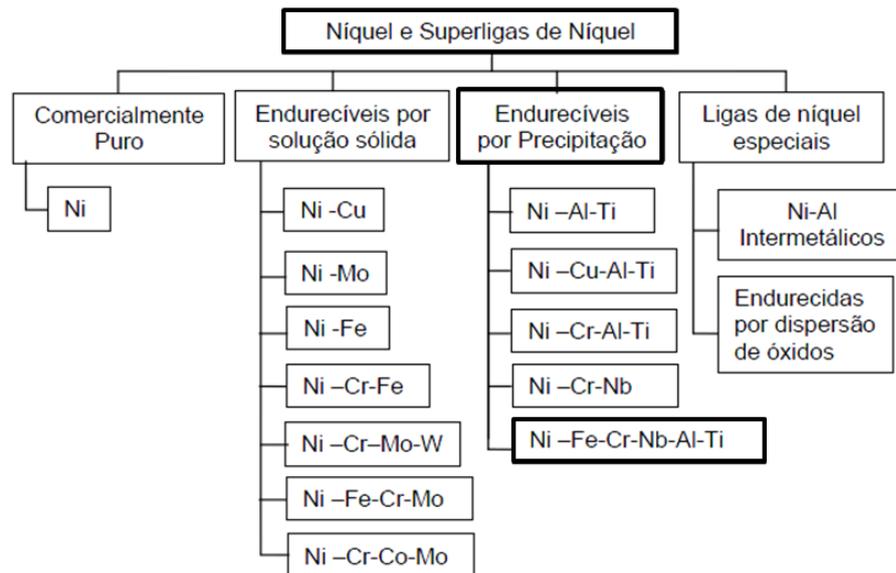


Figura 2.13 - Classificação das principais superligas do mercado. Adaptado de (Dupont, Lippold e Kiser, 2009).

As primeiras superligas a base de níquel possuíam 80% de níquel e 20% de cromo. Desde então, diversos elementos de liga como titânio, alumínio, tungstênio, nióbio, etc. foram adicionado para melhorar as propriedades mecânicas. As superligas modernas possuem, além de uma composição química complexa, uma microestrutura intrigante e uma variedade de fases e precipitados (Gustafsson, 2010).

2.2.1. Superligas endurecíveis por precipitação

Na maioria dos casos, as ligas endurecíveis por precipitação possuem adição de titânio, alumínio e nióbio como elementos de liga. Através de tratamentos térmicos apropriados, esses elementos são responsáveis pela formação dos precipitados finamente dispersos pela matriz. Esses precipitados, tais como γ' - Ni₃ (Ti, Al) e γ'' - Ni₃Nb dificultam o movimento das discordâncias e conseqüentemente aumentam a resistência mecânica do material. Por se precipitarem de forma coerente com a matriz, o nível de endurecimento gerado é muito maior que simplesmente por endurecimento por dispersão. Através da otimização do tratamento térmico, essas ligas podem alcançar limites de resistência

mecânica que ultrapassam 1380 MPa. As ligas endurecíveis por precipitação são frequentemente chamadas de “superligas”, termo baseado nas excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Esse termo tem sido aplicado erroneamente para diversas outras ligas de alta resistência, mas na maioria dos casos o termo “superliga” é utilizado para descrever ligas a base de níquel com propriedades mecânicas superiores devido a precipitados γ' e γ'' (Dupont, Lippold e Kiser, 2009; Chandrasekar, 2013). Entre as superligas comercialmente disponíveis, a superliga 718 é predominantemente produzida, representando até 45% das ligas forjadas à base de níquel e 25% dos produtos fundidos à base de níquel (Choudhury e El-Baradie, 1998).

2.2.2. Superligas resistentes à corrosão

A aplicação de ligas à base de níquel para o controle da corrosão vem sendo extensivamente utilizada em sistemas de petróleo e gás, uma vez que apresentam uma infinidade de benefícios. A seleção correta de materiais para a construção desses sistemas gera um ambiente extremamente seguro, livre de vazamentos por longos períodos. Embora o investimento inicial muitas vezes pareça ser elevado, existem grandes economias nos custos operacionais, já que as despesas de inspeção e manutenção são reduzidas consideravelmente em comparação com um sistema de aço carbono. Além disso, existem grandes economias a serem feitas se levarmos em consideração o aumento da vida útil das estruturas (Smith, 2012).

Nesse sentido, a liga Inconel 625 merece destaque no mercado das superligas devido à sua excelente resistência a corrosão, mesmo em níveis de severidades não usuais e temperaturas elevadas. A liga é composta basicamente de Ni, Cr, Mo, Nb e Fe, portanto, sua resistência mecânica liga se deve ao efeito do molibdênio e nióbio na sua matriz de níquel e cromo, dispensando a necessidade de tratamentos térmicos para promover o endurecimento por precipitação. A combinação desses elementos também torna a liga uma excelente opção para ambientes contendo cloreto, devido sua excelente resistência a corrosão localizada (pitting), corrosão fadiga e corrosão sob tensão. Dessa forma, a liga 625 vem sendo utilizado ao longo de anos em navios, trocador de calor, tanques, tubulações e numa variedade de instalações de manuseio e armazenamento de materiais (Stevens e Ross, 1986). A Tabela 2.3 apresenta a composição química da liga 625 segundo a especificação UNS N06625.

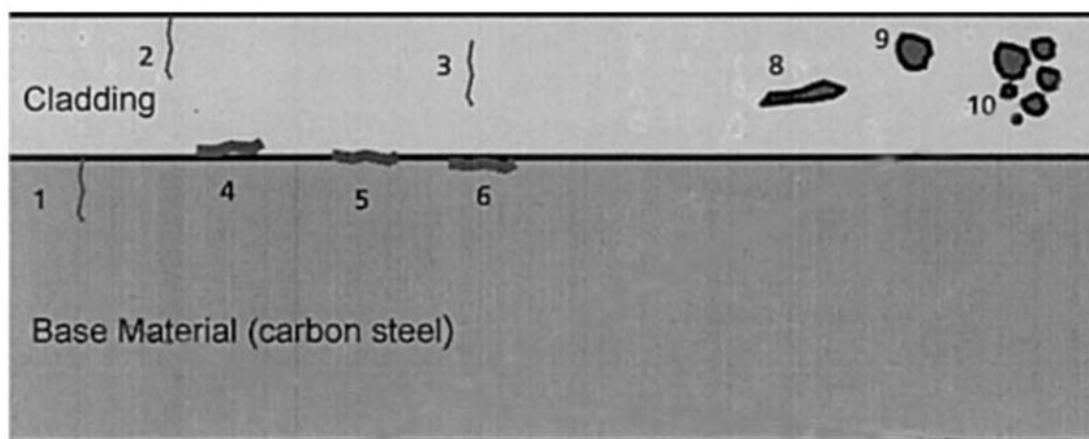
Tabela 2.3 - Composição química da liga 625 segundo a especificação UNS N06625. Adaptado de (ASTM International, 2011).

Elemento	Ni	Fe	Cr	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co	C
[%peso]	58.0	5.0	20.0-23.0	3.15-4.15	8.0-10.0	0.40	0.40	1.0	0.10
	min	max				max.	max.	max.	max.

2.3. Inspeção de superligas à base de níquel

2.3.1. Inspeção de camadas de cladeamento

Uma estratégia tipicamente utilizada para diminuir o volume de materiais de elevado custo em plantas industriais e plataformas de petróleo é o processo de cladeamento por deposição. Nesse processo, o metal base de aço carbono é revestido por uma camada de solda relativamente fina de uma liga com propriedades anticorrosivas superiores (por exemplo, superligas à base de níquel), conferindo ao componente a mesma resistência à corrosão da liga aplicada, por um custo inferior (Stevens e Ross, 1986). A deposição dessas ligas por esse tipo de processo pode ocasionar inúmeros defeitos característicos do processo de soldagem, tais como, trincas de soldagem, falta de fusão, inclusões, porosidade, entre outros (Figura 2.14). Portanto, a inspeção através de métodos não destrutivos é fundamental no ponto de vista do controle da qualidade do processo e da avaliação da integridade estrutural desses componentes (Bivth, Fabbri e Monjaret, 2001).



- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| 1 Trinca no material base | 5 Falta de fusão |
| 2 Trinca superficial à quente | 6 Trinca à quente na interface |
| 3 Trinca subsuperficial à quente | 8 Inclusão |
| 4 Trinca à frio na interface | 9 Porosidade |
| | 10 Porosidade em clusters |

Figura 2.14 - Representação esquemática de diferentes defeitos em materiais cladeados por deposição. Adaptado de (Weiss *et al.*, 2001).

Pequenos defeitos subsuperficiais próximos da superfície podem ser considerados um desafio especial de inspeção, uma vez que não são detectáveis pela técnica de líquidos penetrantes, pois os defeitos não possuem nenhuma ligação com a superfície, nem pela técnica de partículas magnéticas, no caso de ligas não magnéticas. Além disso, esses defeitos se encontram em regiões críticas de inspeção por ultrassom (zona morta e campo próximo), aumentando a relevância da aplicação de métodos alternativos para a inspeção desse tipo de defeito.

O ensaio de correntes parasitas é um método de inspeção convencional particularmente bem adequado para a detecção de diferentes tipos de defeitos superficiais e subsuperficiais quando utilizado adequadamente. Além das características geométricas do sensor, um parâmetro importante para se levar em consideração é a frequência de operação, a qual está fortemente relacionada com o tipo de material a ser inspecionado, tipo e localização dos defeitos, e profundidade de penetração do ensaio. A Figura 2.15 apresenta a curva de profundidade de penetração padrão, d , em função da frequência de operação para a liga Inconel 625 (1,40% IACS).

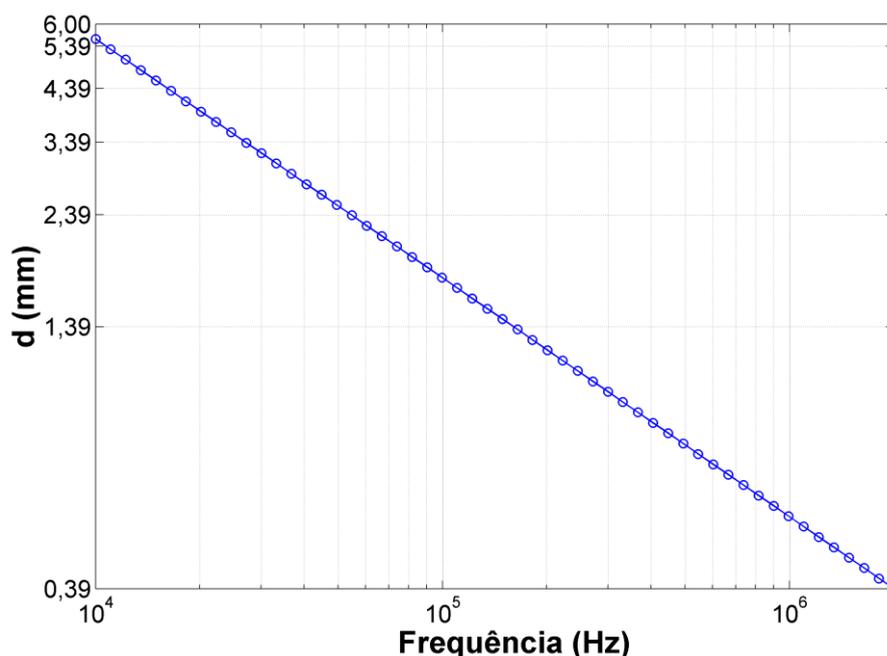


Figura 2.15 - Profundidade de penetração padrão, d , em função da frequência de operação para a liga Inconel 625 (1,40% IACS).

2.3.2. Caracterização microestrutural

Atualmente, a aplicação de métodos não destrutivos não se limita a inspeção de defeitos e trincas. Devido a influencia da composição química e da microestrutura na condutividade elétrica, o método de correntes parasitas é bastante difundido como ferramenta industrial de controle microestrutural e de propriedades físicas dos materiais (Shull, 2002; Hellier, 2013), resultando em economia de tempo e energia, e permitindo o controle de qualidade de 100% do volume de produção (Kashefi e Kahrobaee, 2010). Dessa forma, a técnica vem sendo extensivamente utilizado na caracterização de diversos tipos de aços (Khan *et al.*, 2008b; Ghanei, Kashefi e Mazinani, 2013), ligas de alumínio (Pellegrini, 1980; Zergoug *et al.*, 2004), entre outros materiais. Entretanto, a busca realizada na literatura apresentou uma escassez de trabalhos envolvendo a caracterização de superligas a base de níquel através de técnicas não destrutivas.

2.4. Superligas Inconel 718

O Inconel 718 é uma superliga endurecível por precipitação e extensivamente utilizada para a produção de componentes críticos das indústrias aeronáutica, aeroespaciais, petrolíferas e químicas devido ao excelente comportamento mecânico, físico e anticorrosivo (Sui *et al.*, 2011).

Considerada revolucionária na história das superligas, a liga Inconel 718 foi inventada por Eiselstein no final da década 1950. O alto teor de nióbio presente nesta liga possibilitou a precipitação de uma nova fase endurecedora, γ'' (Ni_3Nb), adicionalmente à fase γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$), principal fase endurecedora das ligas de níquel até então. A Inconel 718 foi patenteada em 1963, se tornando a principal superliga do mercado. Atualmente, é a liga mais utilizada nos componentes de turbinas a gás e em diversos componentes na indústria nuclear e petroquímica, representando 50% do total de superligas comercializadas (Decker, 2006). A composição dos principais componentes da liga 718, de acordo com a especificação de petróleo e gás é apresentada na Tabela 2.4.

O cromo contribui para a resistência a corrosão desse material, cristalizando como estrutura austenítica (cúbica de face centrada) graças à presença de elevados teores de níquel. O nióbio é adicionado para formação de precipitados endurecedores γ'' , através da formação de uma fase intermetálica metaestável Ni_3Nb , de estrutura tetragonal de corpo centrado. Titânio e alumínio são adicionados para a formação de precipitados intermetálicos γ' ($\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$, estrutura cúbica simples). Estes possuem efeito endurecedor inferior ao da fase γ'' . O carbono também é adicionado para a precipitação de carbeto MC ($\text{M}=\text{Ti}$ ou Nb). A quantidade de carbono precisa ser suficientemente pequena para possibilitar a formação dos precipitados γ'' e γ' . O molibdênio é frequentemente adicionado para aumentar a resistência mecânica através de endurecimento por solução sólida. Finalmente, uma fase δ (intermetálica Ni_3Nb) também pode aparecer. É uma fase estável não endurecedora com estrutura ortorrômbica (Thomas *et al.*, 2006).

Tabela 2.4 - Composição química da liga 718 segundo a especificação API (UNS N07718). Adaptado de (API Specification 6A718, 2004).

Elemento	Ni	Fe	Cr	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co	C	Mn
[%peso]	50-55	Bal.	17-21	4,87-5,20	2,8-3,3	0,8-1,15	0,4-0,6	1,0 max.	0,045 max.	0,35 max.

Apesar da ótima resistência mecânica atribuída a precipitação da fase γ'' , são elas que definem a temperatura de operação da liga em aproximadamente 650°C. Acima desta temperatura a fase γ'' pode se transformar em fase δ , eliminando o efeito endurecedor (Gustafsson, 2010).

2.4.1. Principais fases

2.4.1.1. Fase γ

Matriz cúbica de face centrada (CFC) à base de níquel, com elevados teores de ferro e cromo. Possui grande tolerância à adição de elementos de liga em solução sólida e apresenta boa ductilidade e conformabilidade devido ao elevado número de planos de deslizamento (Chandrasekar, 2013).

2.4.1.2. Fase γ' ($Ni_3(Al, Ti)$)

Possui estrutura cristalina bastante semelhante com a matriz. Exerce um importante papel endurecedor em diversas ligas. Na liga Inconel 718, é responsável pelo endurecimento por precipitação em menor grau que a fase γ'' (Ni_3Nb). É responsável pela grande resistência e à fluência a elevadas temperaturas desse material. De forma geral, nucleia-se homoganeamente na matriz de níquel com morfologia esférica podendo ter variações na morfologia de acordo com a composição química da liga e ciclos térmicos aplicados (ASM International, 2000).

2.4.1.3. Fase γ'' (Ni_3Nb)

Principal endurecedora da liga 718, é uma fase metaestável de estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC) precipita de forma coerente com a matriz apresentando morfologia de discos alongados. Tanto a fase γ'' quanto a γ' se precipitam entre aproximadamente 600 e 900°C, em pequenas partículas uniformemente distribuídas na matriz (Oradei-Basile e Radavich, 1991). Na condição envelhecida, a relação da fração volumétrica de fase γ'' em relação à fase γ' é entre 2,5 e 4, sendo a fase γ'' menos estável, se transformando em fase δ (Ni_3Nb) em temperaturas acima de 700°C por longos períodos (Han, Deb e Chaturvedi, 1982). A Figura 2.16 mostra uma imagem obtida por microscopia eletrônica de transmissão na liga Inconel 718 onde é possível observar as fases γ' e γ'' e suas respectivas morfologias.

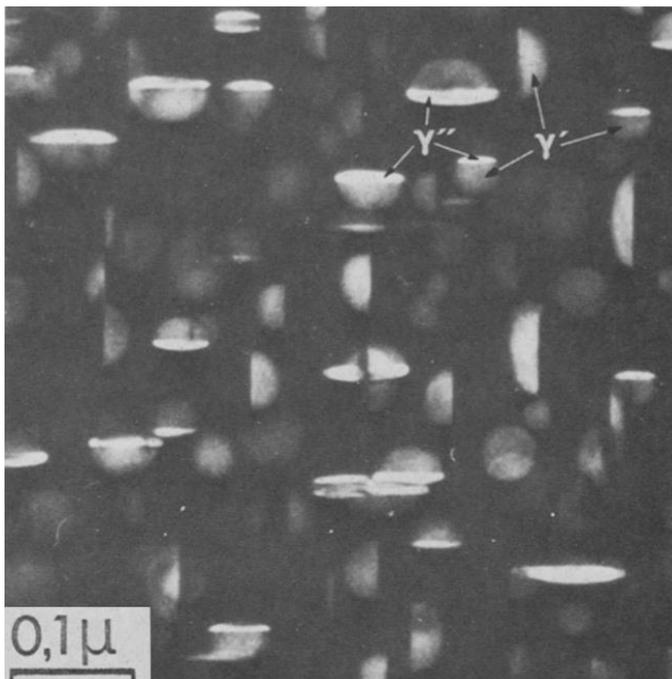


Figura 2.16 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de transmissão, da liga Inconel 718 envelhecida a 700°C por 524 horas. Adaptado de (Cozar e Pineau, 1973).

2.4.1.4. Fase δ (Ni_3Nb)

Forma termodinamicamente estável da fase γ' , possui estrutura cristalina ortorrômbica e se forma aproximadamente entre 650 e 980°C. A fase δ não possui uma morfologia favorável para o endurecimento e sua presença elimina o efeito endurecedor da fase γ' , uma vez que a precipitação da fase δ resulta na dissolução correspondente da fase γ' , já que ambas são constituídas de nióbio (Azadian, Wei e Warren, 2004). Se mantido entre 800 a 900°C por longos períodos, elevadas taxas de precipitação da fase δ são observadas, geralmente ocorrendo nos contornos de grão e frequentemente com crescimento de placas para dentro do grão com formato acicular (Figura 2.17). Na presença da fase γ' , a nucleação pode ocorrer de forma intragranular (Slama e Abdellaoui, 2000).

A queda drástica de resistência mecânica devido à precipitação da fase delta pode tornar as propriedades da liga 718 inadequadas para suas aplicações convencionais. Além disso, conforme estudos de (Liu *et al.*, 2005; Santos, 2009), a fase δ está relacionada com efeitos negativos na fragilização pelo hidrogênio da liga e faz com que seja considerada uma fase indesejada. Por outro lado, a presença de certa quantidade de fase δ pode ser benéfica para algumas propriedades mecânicas da liga ao limitar o crescimento de grão.

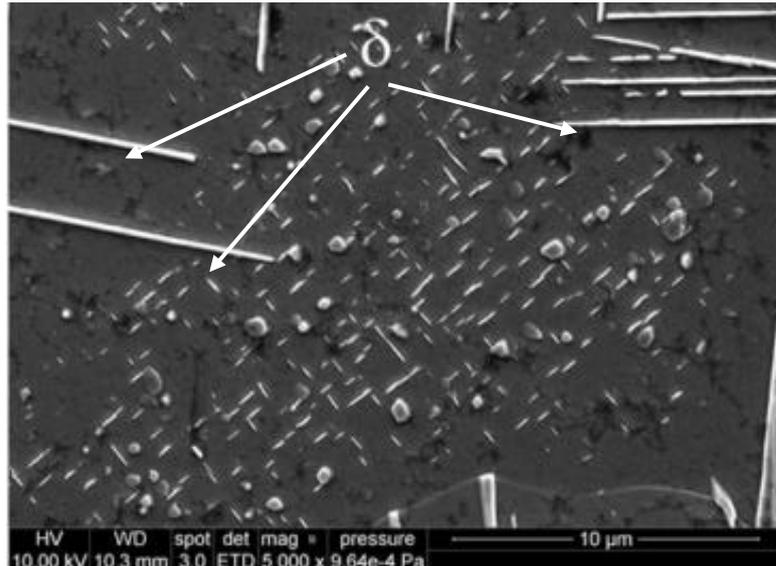


Figura 2.17 - Micrografia obtida por MEV de uma amostra envelhecida a 900°C por 20 horas mostrando a fase δ em forma de plaquetas (Chandrasekar, 2013).

2.4.1.5. Carbetos

Os carbetos são formados nas ligas de níquel com o objetivo de promover o refino da microestrutura durante o processo de fabricação e tratamentos térmicos através do controle do crescimento de grão. Além disso, os carbetos precipitados nos contornos de grão aumentam consideravelmente a resistência mecânica dificultando o deslizamento dos contornos de grãos. Os carbetos do tipo MC - (Nb, Ti)C são os encontrados nas ligas Inconel 718 devido ao uso da fusão a vácuo no processo de fabricação desse material (Figura 2.18). Esses carbetos se precipitam em altas temperaturas durante o processo de solidificação e são muito estáveis até temperaturas de 1200°C (Valle, 2010).

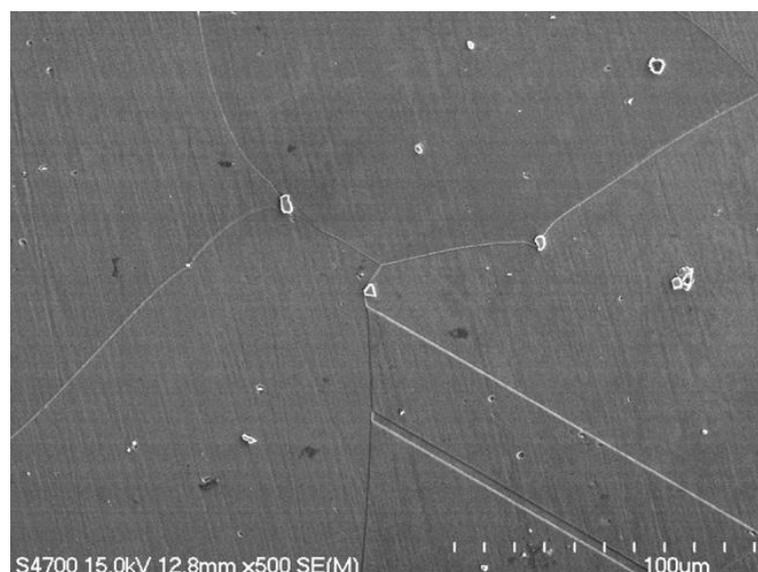


Figura 2.18 - Imagem obtida por MEV de uma amostra solubilizada mostrando a presença de carbetos dispersos na matriz (Kuo *et al.*, 2009).

2.4.2. Tratamentos térmicos

O principal objetivo dos tratamentos térmicos é adequar as propriedades das superligas para uma determinada aplicação através da otimização das características mecânicas e da resistência a elevadas temperaturas e a ambientes corrosivos. Dependendo do nível exigido pela aplicação, diferentes parâmetros de tratamentos térmicos são aplicados, influenciando diretamente na microestrutura formada. Atualmente, existem normas técnicas que descrevem detalhadamente os parâmetros e procedimentos dos tratamentos térmicos aplicados nas ligas 718. Em aplicações relacionadas com a indústria do óleo e gás, a liga é desenvolvida com pequenos ajustes nos tratamentos térmicos e composição química, uma vez que os níveis de resistência exigidos são inferiores aos das aplicações aeroespaciais (Valle, 2010).

Os tipos de tratamentos térmicos tradicionalmente aplicados para esse tipo de liga podem ser divididos em solubilização e envelhecimento. Segundo a norma do “*American Petroleum Institute*” (API Specification 6A718, 2004), no processo de solubilização o material é aquecido entre a temperatura de 1021°C - 1052°C por uma a duas horas e meia, seguido de resfriamento ao ar ou taxa superior. Esta etapa serve para solubilizar precipitados deletérios na resistência mecânica e na resistência à corrosão e/ou para homogeneizar a microestrutura para um tratamento posterior.

Na etapa de envelhecimento o material é aquecido entre as temperaturas de 774°C e 802°C e mantida durante o período de 6 a 8 horas com resfriamento realizado ao ar ou taxa mais elevada. Esse processo tem o objetivo de formar altos teores de fase γ'/γ'' maximizando a resistência mecânica. Os parâmetros de envelhecimento são fundamentais para que seja determinada a quantidade, distribuição e morfologia dos precipitados (ASM International, 2000).

Em situações onde a resistência do material não é um fator determinante, tais como aplicações nucleares, o processo de envelhecimento pode ser eliminado, utilizando a liga 718 na condição apenas solubilizada. Dessa forma, evita-se a formação dos precipitados endurecedores γ' e γ'' , promovendo uma significativa melhora na ductibilidade (Choudhury e El-Baradie, 1998).

3. Metodologia

A fim de atender cada um dos objetivos principais estabelecidos, a metodologia deste trabalho foi dividida em duas partes, mostradas na Figura 3.1. Em um primeiro momento, para atender a proposta de caracterização microestrutural pelo método de correntes parasitas, um protótipo de sensor foi construído para a obtenção das medidas de condutividade em amostras envelhecidas e devidamente caracterizadas da liga Inconel 718. Devido aos requisitos relativamente simples deste tipo de análise, um sensor com sensibilidade adequada foi construído com sucesso, utilizando apenas as informações revisadas na literatura (capítulo 2.1.6).

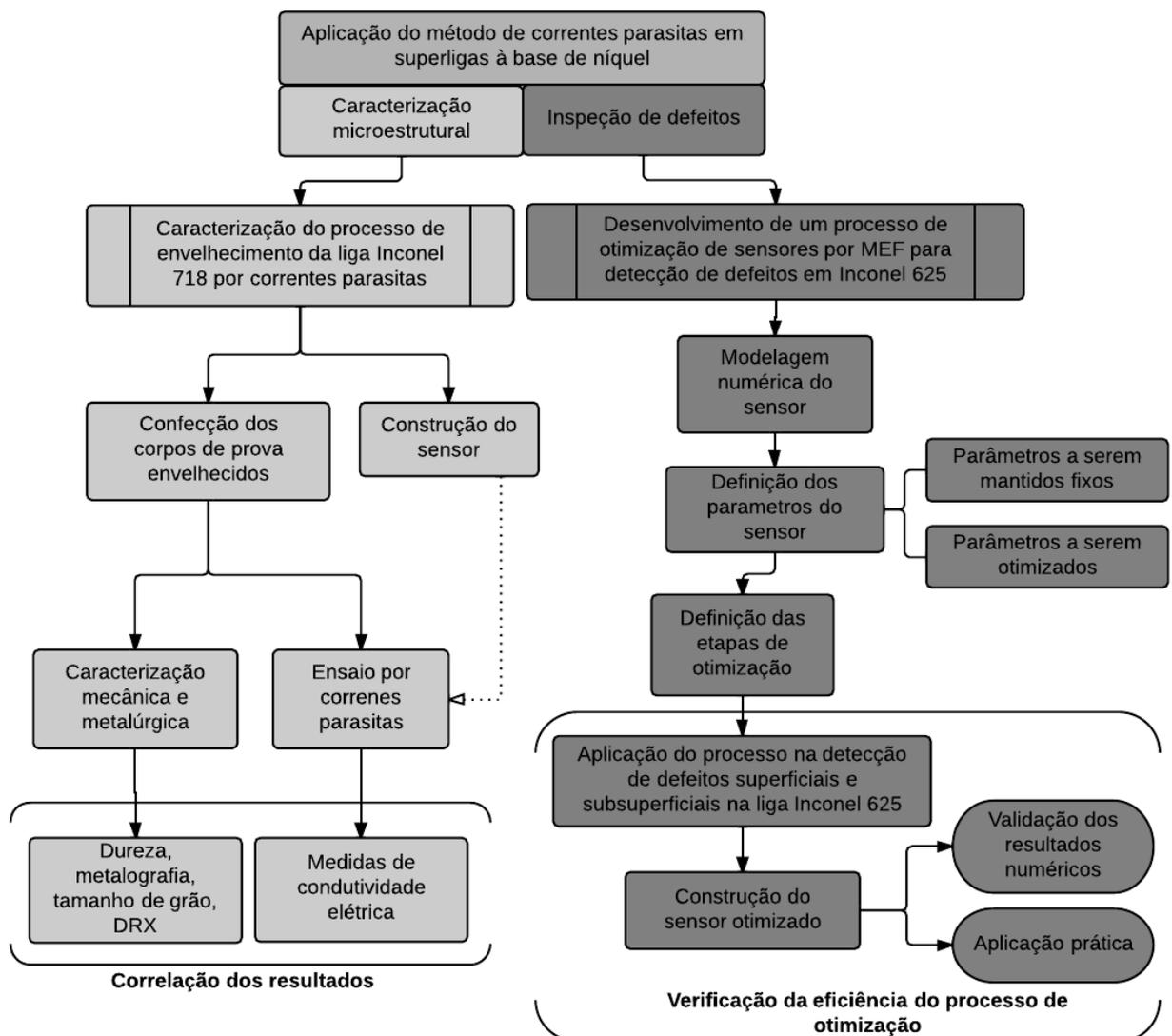


Figura 3.1 - Fluxograma apresentando a sequência de atividades realizadas neste estudo.

Por outro lado, a partir de pré-testes, constatou-se que o sensor construído possuía limitações quanto à sensibilidade de detecção e resolução espacial de determinados tipos de defeitos. Portanto, em um segundo momento, foi proposto o desenvolvimento de um

processo de otimização de sensores através de modelagem por elementos finitos (MEF), sendo aplicado para a inspeção de defeitos superficiais e subsuperficiais esperados em camadas de cladeamento da liga Inconel 625. A verificação da eficiência do processo de otimização foi realizada através da construção e teste experimental do sensor com as características ótimas.

3.1. Caracterização do processo de envelhecimento da liga Inconel 718

3.1.1. Construção do sensor

Para viabilizar a realização do ensaio de correntes parasitas nas amostras de Inconel 718, um sensor superficial utilizando a configuração transmissão-recepção foi construído. Essa configuração foi selecionada uma vez que ela atende as necessidades da aplicação e apresentar diversas vantagens de construção e operação, conforme revisado anteriormente na literatura (capítulo 2.1.5.2). A disposição das bobinas e os respectivos parâmetros geométricos estabelecidos para a construção do sensor são mostrados na Figura 3.2.

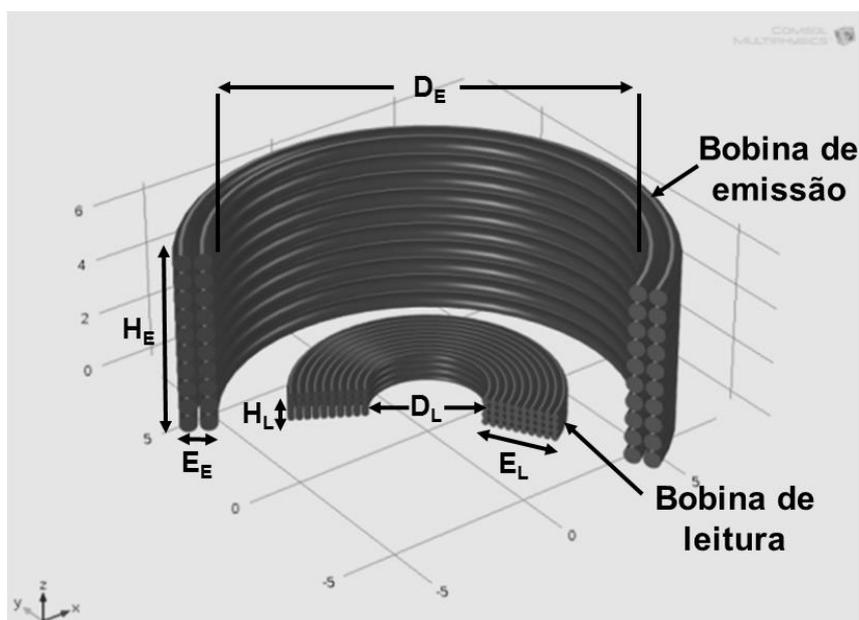


Figura 3.2 - Parâmetros geométricos estabelecidos para a construção das bobinas de emissão e leitura.

O protótipo do sensor foi construído utilizando filamentos de cobre revestidos com resina polimérica, e enrolados em um núcleo polimérico. A Tabela 3.1 contém os valores dos parâmetros geométricos utilizados na construção das bobinas e os respectivos símbolos utilizados. Através de testes preliminares, constatou-se que o sensor construído tem

potencial para detectar pequenas variações de condutividade, portanto, não foram necessárias melhorias no projeto inicial.

Tabela 3.1 - Parâmetros geométricos do protótipo de sensor construído.

	Parâmetros	Símbolo	Sensor construído
Bobina de emissão	Diâmetro interno (mm)	D_E	9
	Altura (mm)	H_E	2,5
	Espessura (mm)	E_E	0,4
	Diâmetro do fio (AWG*)	Φ_{fioE}	34
	Número de voltas	N_E	30 voltas
Bobina de leitura	Diâmetro interno (mm)	D_L	3,2
	Altura (mm)	H_L	1
	Espessura (mm)	E_L	2
	Diâmetro do fio (AWG ^a)	Φ_{fioL}	40
	Número de voltas	N_L	150 voltas

^a "American Wire Gauge"

3.1.2. Materiais e métodos

A análise de composição química da liga utilizada neste estudo foi fornecida pelo fabricante (Tabela 3.2), se mostrando de acordo com a especificação da norma UNS N07718 (ASTM International, 2010).

Tabela 3.2 - Composição química fornecida pelo fabricante da barra de Inconel 718 utilizada na confecção dos corpos de prova (% peso).

Produto	Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co	C	Mn	Si
Inconel 718 - Barra Ø27mm	53,20	18,62	18,45	5,02	2,97	0,98	0,54	0,07	0,018	0,03	0,03

O material foi recebido no formato de barra com 26 mm de diâmetro na condição solubilizada. Amostras com o diâmetro da barra e 15 mm de altura foram cortadas e submetidas a oito condições de tratamentos térmicos, com o objetivo de produzir microestrutura com diferentes tipos e quantidades de precipitados secundários, apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Programas de tratamentos térmicos aplicados aos quais as amostras foram submetidas e as respectivas microestruturas esperadas.

Amostras	Condições ^a	Microestruturas esperadas ^b
I-SO	Solubilizada (1035°C/1h)	Carbonetos distribuídos pela matriz
II-EV	Envelhecida (630°C/10h)	Precipitados γ'/γ'' finamente distribuídos
III-EV	Envelhecida (774°C/6h)	Precipitados γ'/γ'' finamente distribuídos e fase δ (CG)
IV-EV	Envelhecida (802°C/8h)	
V-SE	Superenvelhecida (802°C/18h)	Coalescimento dos precipitados γ'/γ'' e δ (CG); mudança gradual da fase δ para morfologia de placas
VI-SE	Superenvelhecida (835°C/18h)	
VII-SE	Superenvelhecida (865°C/18h)	
VIII-SE	Superenvelhecida (900°C/18h)	Predomínio de fase δ com morfologia de placas

^aTodas as amostras foram inicialmente solubilizadas a 1035°C por uma hora.

^bCarbonetos metálicos distribuídos pela matriz em todas as microestruturas.

Os parâmetros dos tratamentos térmicos foram selecionados a partir do diagrama de Tempo-Temperatura-Transformação (TTT) da liga Inconel 718 proposto por (Xie et al., 2005). A Figura 3.3 apresenta o diagrama TTT da liga, onde estão marcadas as oito condições utilizadas neste estudo.

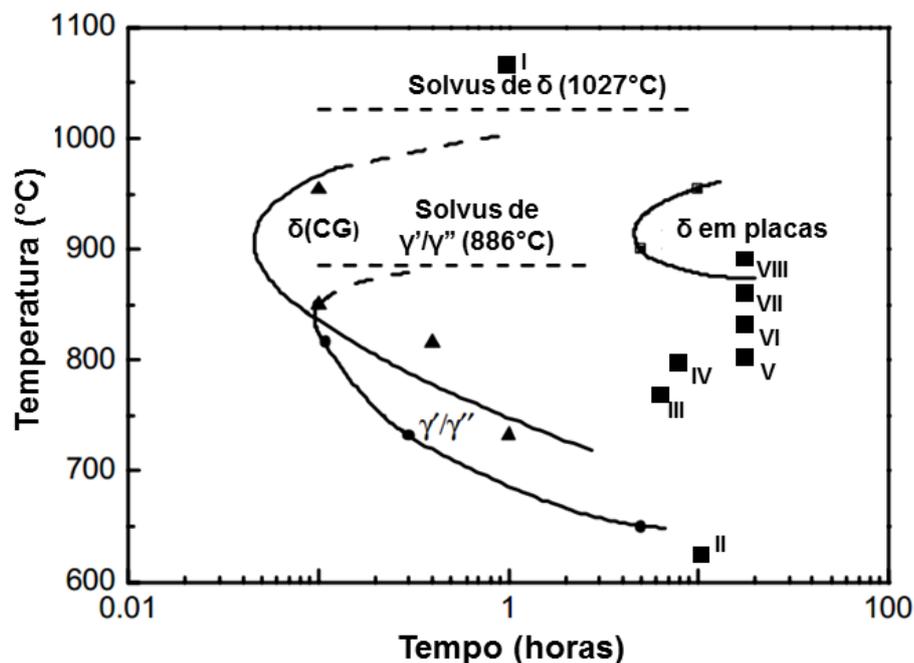


Figura 3.3 - Diagrama TTT da liga Inconel 718 mostrando as oito condições aplicadas neste trabalho.

3.1.2.1. Metalografia

Com o objetivo de confirmar as microestruturas esperadas, foi realizada análise metalográfica por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram preparadas através de procedimentos metalográficos convencionais e atacadas com solução de Água Régia (200 ml HCl e 100 ml HNO₃).

3.1.2.2. Difração de raios-X

Análise de difração de raios-X (DRX) nos corpos de prova tratados termicamente foi feita utilizando um difratômetro Siemens D500 operando com tubo de cobre e monocromador secundário de grafite. Um intervalo de 2θ entre 35 e 80° com passo angular de 0.05° e contagem de 10 segundo/passos foi utilizado. O parâmetro de rede da matriz de cada condição e a quantificação de fases em algumas condições foi extraída a partir de análises realizadas no software Philips XPert. Para identificação separada dos precipitados, eles foram extraídos eletroliticamente das amostras antes da análise de raios-X seguindo o procedimento da norma ASTM E963 (ASTM International, 2010). A solução utilizada para a extração dos precipitados consiste em 10% de HCl em metanol, e foi aplicada corrente de 0,75A/cm² por 2 a 4 horas. O pó foi recolhido através do processo de filtração utilizando uma membrana de policarbonato que foi posteriormente colada em um substrato de vidro amorfo e analisada no mesmo equipamento de difração de raios-X utilizando os mesmos parâmetros.

3.1.2.3. Ensaio por correntes parasitas

Cinco medidas de correntes parasitas foram realizadas em três amostras de cada condição utilizando um sensor construído neste trabalho. A configuração experimental é apresentada na Figura 3.4, onde a bobina de emissão do sensor foi excitada por uma tensão senoidal (V_0) de 5 Volts e 100 kHz através de um gerador de funções da marca Agilent, modelo 33521A. A medida da corrente de alimentação da bobina de emissão ($I_{\text{emissão}}$) e da tensão induzida na bobina de leitura (V_{induzido}) foi feita através de um osciloscópio da marca Agilent, modelo DSO8064A. A tensão induzida na bobina de leitura foi amplificada com um ganho de 20 dB, através de um pré-amplificador. Os sinais brutos foram enviados para um computador através de uma conexão USB onde foram processados com o auxílio do software MATLAB (Mathworks, 2011) para o cálculo da impedância. A descrição mais detalhada do cálculo da impedância para essa configuração de bobinas foi revisada na literatura (capítulo 2.1.5.2).

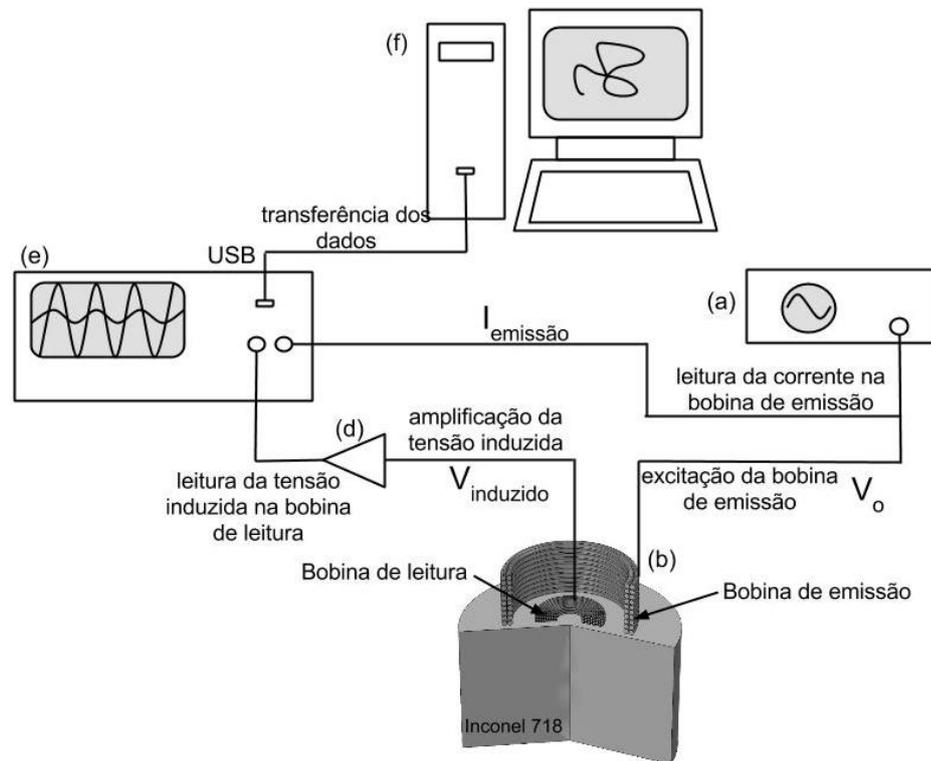


Figura 3.4 - Configuração experimental do sensor de correntes parasitas: (a) gerador de função, (b) sensor acoplado na amostra, (c) osciloscópio, (d) pré-amplificador (e) computador.

3.1.2.4. Dureza

Medidas de dureza Vickers foram realizadas com um equipamento Tukon 2100 B, em três amostras de cada condição, com dez indentações por amostra e carga de 1kg.

3.1.2.5. Tamanho de grão

Com o objetivo de verificar a possibilidade do efeito do tamanho de grão nas medidas de condutividade, medidas foram feitas utilizando o método de interseção linear de Heyn conforme descrito na norma ASTM E-112 (ASTM International E 112, 2012), não sendo observadas maiores variações entre as amostras.

3.2. Otimização de sensores por MEF para inspeção de defeitos em Inconel 625

3.2.1. Modelagem numérica

Com o objetivo introduzir a ferramenta de simulação numérica no processo de otimização, foi realizada a modelagem numérica de um sensor superficial de correntes parasitas na configuração transmissão-recepção. Para simular a resposta do sensor sobre

um material condutor, um modelo numérico 3D foi desenvolvido utilizando um software de simulação numérica (COMSOL Multiphysics, 2012). No modelo, o material teste consiste em bloco retangular (10x30x45mm) com as propriedades eletromagnéticas da liga Inconel 625 ($\sigma=1,40\%$ IACS e $\mu=1,010$) e contendo um defeito na região central. As bobinas de emissão e de leitura foram modeladas como dois anéis cilíndricos concêntricos contendo as propriedades eletromagnéticas do cobre e as mesmas dimensões do sensor construído para a caracterização microestrutural (Tabela 3.1). Tanto o sensor quanto a peça foram construídos em um volume contendo as propriedades eletromagnéticas do ar. Uma malha tetraédrica com elementos de tamanho de 0,05 nas regiões mais refinadas foi utilizada. A Figura 3.5 apresenta o modelo de numérico das bobinas de emissão e leitura sobre o bloco de Inconel 625 contendo um defeito na região central. As simulações foram processadas em um computador Dell, modelo R815 com quatro processadores e 256 Gb de memória.

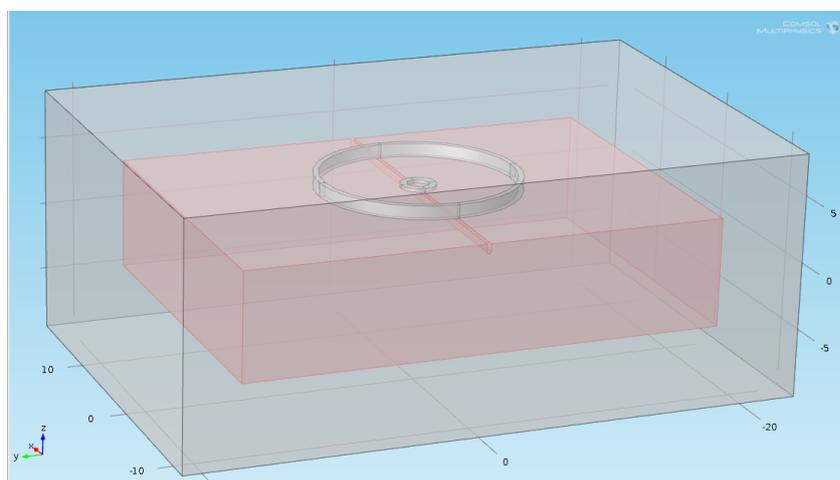


Figura 3.5 - Modelo de numérico das bobinas de emissão e leitura sobre o bloco de Inconel 625 contendo um defeito na região central

3.2.2. Parâmetros do sensor

Através de simulações preliminares, foi possível uma melhor compreensão da influência dos parâmetros de construção e operação do sensor na capacidade de inspeção de defeitos, permitindo a definição dos parâmetros a serem mantidos fixos e os parâmetros a serem otimizados do sensor. Os parâmetros da bobina de leitura foram mantidos fixos com os menores valores possíveis considerando a viabilidade de construção, pois se observou que quanto menores as dimensões, maior era a sensibilidade de detecção e a resolução espacial, tanto para defeitos superficiais, quanto para defeitos subsuperficiais. O diâmetro da bobina de excitação, D_E , e a frequências de excitação, F , foram definidos como parâmetros a serem otimizados, uma vez que apresentaram grande influência na

sensibilidade de detecção e resolução espacial de defeitos superficiais e subsuperficiais. Os demais parâmetros da bobina de emissão não mostraram influência significativa na sensibilidade de inspeção e foram mantidos fixos com os valores do sensor construído inicialmente. O número de voltas das bobinas de emissão e leitura, N_E e N_L , foram definidos proporcionalmente à secção das bobinas e aos respectivos diâmetros dos filamentos utilizados. A tensão de alimentação (V_o), também se mostrou insensível à sensibilidade e foi mantida constante. A Figura 3.6 apresenta a geometria de partida do modelo numérico utilizado no processo de otimização.

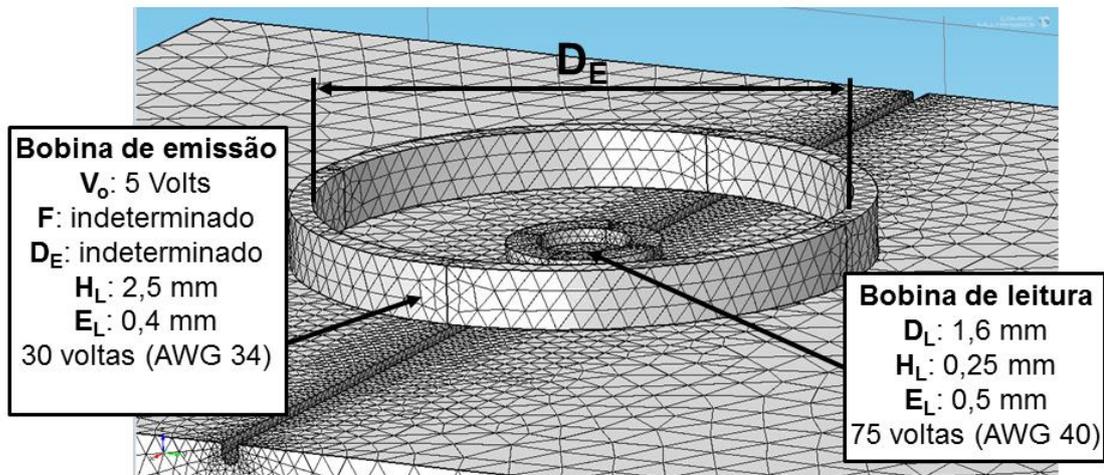


Figura 3.6 - Representação da geometria de partida do modelo numérico utilizado no processo de otimização.

3.2.3. Etapas de otimização

O processo de simulação foi dividido em diferentes etapas de otimização. Inicialmente, a magnitude da impedância normalizada, $|Z|$, foi calculada para uma série de pontos ao longo de uma linha perpendicular passando pelo defeito, neste caso, um defeito superficial isolado. A partir desses dados foi possível calcular a sensibilidade de detecção do defeito, ΔZ , através da subtração do valor da impedância medido no centro da trinca pelo valor em uma região sem defeito, conforme apresentado na Figura 3.7a. O mesmo procedimento é repetido para uma da faixa de frequência de interesse, resultando em uma resposta, ΔZ , em função da frequência, como mostra a Figura 3.7b. A frequência de excitação que gera a resposta máxima (ΔZ_{max}) para um dado defeito, F_{max} , pode ser facilmente encontrada.

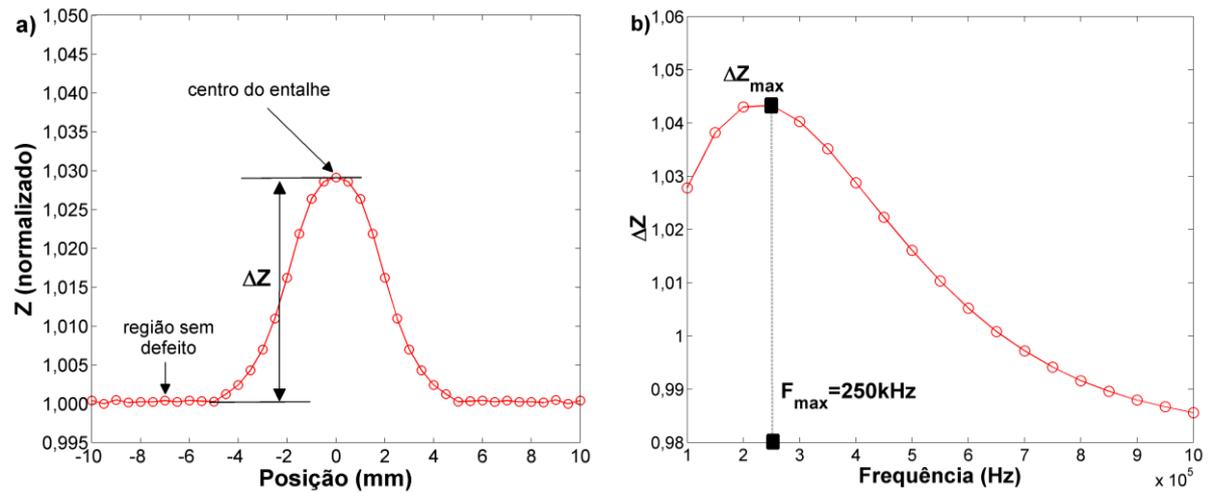
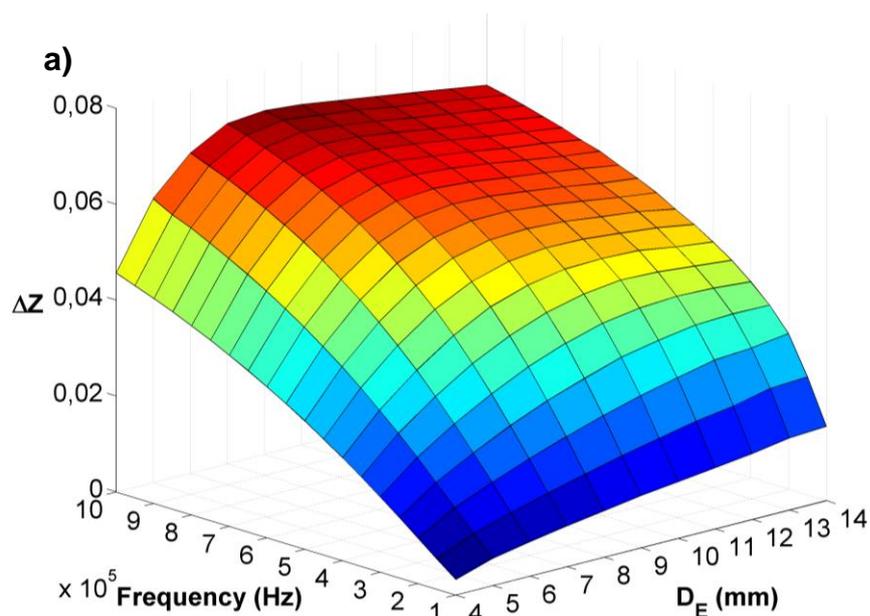


Figura 3.7 - Impedância normalizada em função do deslocamento do sensor sobre o bloco passando por um entalhe, para uma determinada geometria do sensor e frequência de excitação, mostrando o valor da sensibilidade de detecção do defeito, ΔZ . b) Resposta numérica, ΔZ , em função da frequência, para uma determinada geometria de sensor, mostrando a resposta máxima do sensor, ΔZ_{max} .

Variando, além da frequência, o diâmetro externo do sensor, D_E , os valores, ΔZ , podem ser obtidos para a combinação desses dois parâmetros, como mostra a Figura 3.8a. A partir do conjunto de dados obtido na Figura 3.8a, podem-se obter a sensibilidade de detecção máxima, ΔZ_{max} , em função do valor de diâmetro externo, D_E , e as frequências de excitação, F_{max} , em cada valor que ΔZ_{max} ocorre, como mostra a Figura 3.8b. Esse tipo de gráfico pode ser utilizado como guia para a seleção adequada da geometria do transdutor e da frequência de excitação para um determinado defeito, neste caso uma trinca superficial.



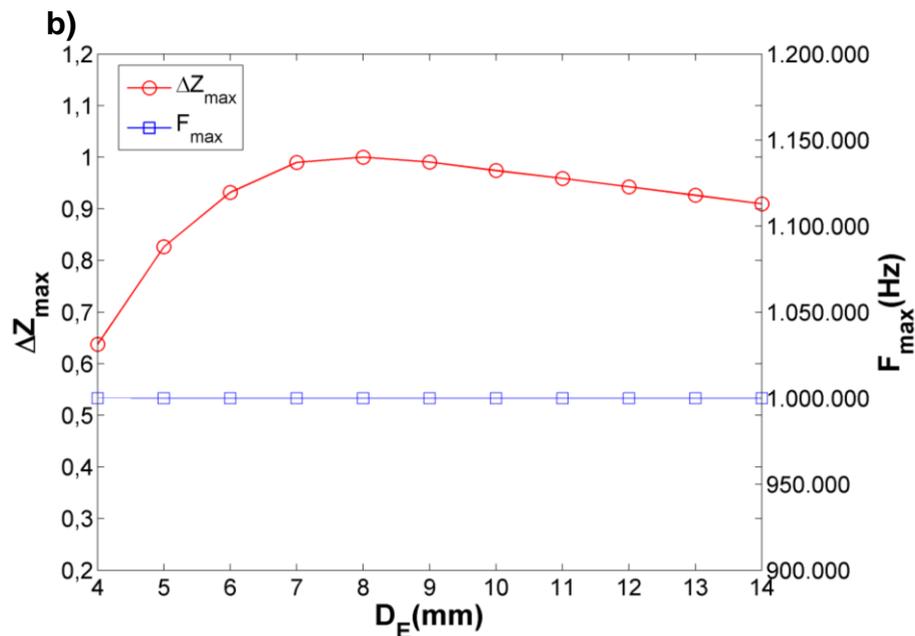


Figura 3.8 - a) Resposta, ΔZ , em função da frequência de excitação e do diâmetro externo do sensor, para um determinado defeito b) Resposta máxima, ΔZ_{max} , para cada valor de diâmetro externo do sensor, D_E , e a respectiva frequência de excitação em cada caso, F_{max} .

3.2.4. Inspeção de defeitos superficiais e subsuperficiais

A otimização de um sensor para a inspeção de defeitos superficiais e subsuperficiais se deu através da aplicação das etapas de otimização a três diferentes critérios de análise: (A) Sensibilidade de detecção de defeito isolado; (B) Diferenciação entre defeitos com profundidades diferentes. (C) Resolução espacial entre defeitos. Os três critérios foram aplicados para trincas superficiais e subsuperficiais. A Figura 3.9 mostra uma representação dos blocos de calibração utilizados nos modelos numéricos e na etapa de validação experimental das simulações. Na figura, cada critério de análise é identificado pela letra correspondente e um número indicando se o defeito é superficial (1) ou subsuperficial (2). As dimensões dos entalhes superficiais foram escolhidas para reproduzir trincas de soldagem ou fadiga, de modo que a abertura do entalhe foi limitada pelo método de usinagem disponível. Para os entalhes subsuperficiais, as dimensões foram selecionadas com o objetivo de simular inclusões, trincas internas, ou falta de fusão entre as camadas de deposição. Além disso, os entalhes foram dimensionados suficientemente pequenos e próximos da superfície com o objetivo de simular a localização na “zona morta” ou “campo próximo” dos sensores de ultrassom tradicionais. Mais detalhes sobre a inspeção de camadas cladeadas estão descritos na revisão bibliográfica (capítulo 2.3.1). Vale ressaltar que as dimensões dos entalhes podem ser facilmente alteradas de acordo com os tipos de

defeitos esperados e critérios de aceitação dimensional, uma vez que a repetição da rotina é relativamente simples depois de implementada adequadamente.

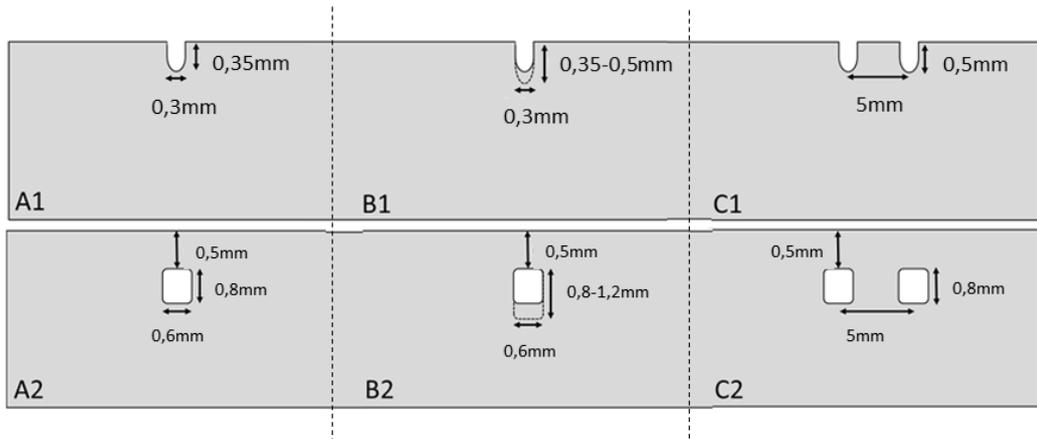
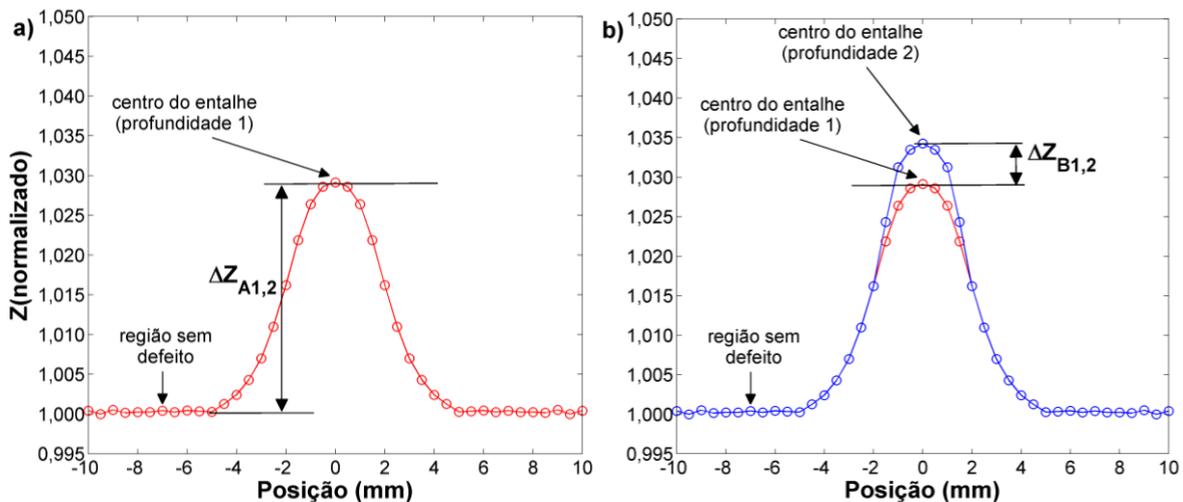


Figura 3.9 - Blocos de calibração utilizados nos modelos numéricos e na etapa de validação experimental das simulações.

Em cada caso, foi medida uma resposta diferente, ΔZ_{A1} , ΔZ_{B1} , ΔZ_{C1} , ΔZ_{A2} , ΔZ_{B2} e ΔZ_{C2} . Os parâmetros ΔZ_{A1} e ΔZ_{A2} representam a sensibilidade de detecção de um defeito isolado, sendo obtidos através da subtração do valor da impedância medido no centro da trinca pelo valor em uma região sem defeito, como mostra a Figura 3.10a (mesmo caso exemplificado nas etapas de simulação). Os parâmetros ΔZ_{B1} e ΔZ_{B2} representam a capacidade de diferenciação entre defeitos com profundidades diferentes e são obtidos através da subtração da resposta de um defeito pelo outro (Figura 3.10b). Os parâmetros ΔZ_{C1} e ΔZ_{C2} representam a resolução espacial entre defeitos e são obtidos pela diferença entre o pico de resposta encontrado no centro da trinca e o valor mínimo encontrado entre os dois defeitos (Figura 3.10c). Em todos os casos, quanto maior o valor do parâmetro melhor o desempenho do sensor.



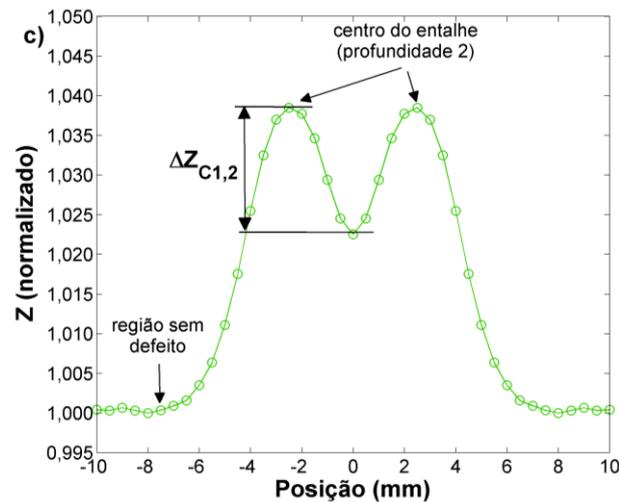


Figura 3.10 - Diferentes respostas mostrando como os parâmetros, ΔZ , foram obtidos na: a) Análise de um defeito isolado; b) Diferenciação entre dois defeitos com diferentes profundidades; c) Resolução espacial entre dois defeitos.

A sequência de etapas de análise descritas na seção anterior foi aplicada aos seis diferentes defeitos estabelecidos. Frequências de excitação entre 100kHz e 1000kHz com intervalo de 50 kHz foram utilizadas. O diâmetro externo da bobina de excitação, D_E , foi variado de 4 à 14 mm, a cada 1 mm. Com o objetivo de combinar a resposta de cada defeito considerado, um parâmetro de performance, P , foi utilizado. O parâmetro pode ser definido separadamente para as trincas superficiais, P_1 , para as trincas superficiais, P_2 , ou para a combinação de todos os defeitos, P_{ALL} , como é mostrado pelas equações a seguir:

$$P_1 = \Delta Z_{\max A1} * \Delta Z_{\max B1} * \Delta Z_{\max C1} \quad (2)$$

$$P_2 = \Delta Z_{\max A2} * \Delta Z_{\max B2} * \Delta Z_{\max C2} \quad (3)$$

$$P_{ALL} = \Delta Z_{\max A1} * \Delta Z_{\max B1} * \Delta Z_{\max C1} * \Delta Z_{\max A2} * \Delta Z_{\max B2} * \Delta Z_{\max C2} \quad (4)$$

O resultado final dessa análise resultou em um gráfico contendo cada um dos parâmetros de performance, P , em função do diâmetro externo do sensor, D_E . Através desse gráfico foi determinado o diâmetro externo com melhor desempenho, $D_{E\text{ótimo}}$, considerando a performance de todas as análises, P_{ALL} .

3.2.4.1. Validação dos resultados numéricos

Com o objetivo de verificar os resultados gerados ao final das etapas de otimização, um novo sensor com diâmetro externo ótimo, $D_{E\acute{o}t\text{imo}}$, foi construído e utilizado para inspecionar um bloco de Inconel 625 contendo os seis defeitos listados anteriormente (Figura 3.9), produzidos através do processo de eletroerosão. Através de uma mesa de posicionamento bidimensional, o sensor foi posicionado sobre centro de cada defeito e entre os defeitos (no caso da resolução espacial entre dois defeitos), onde a impedância foi medida e comparada com a medida de uma região sem defeito para o cálculo das sensibilidades de detecção, ΔZ . O procedimento foi repetido para um range de frequência entre 100 kHz e 1000 kHz, como intervalo de 50 kHz, utilizando tensão de excitação alternada de 5V de amplitude pico a pico. Dessa forma, os valores de resposta, ΔZ_{A1} , ΔZ_{B1} , ΔZ_{C1} , ΔZ_{A2} , ΔZ_{B2} e ΔZ_{C2} , em função da frequência de excitação foram obtidos experimentalmente e comparados com os valores numéricos. As respectivas frequências onde a sensibilidade é máxima para cada defeito, F_{max} , também puderem ser obtidas. A Figura 3.11 mostra o sensor com o diâmetro ótimo posicionado sobre o bloco de Inconel 625 contendo os defeitos.

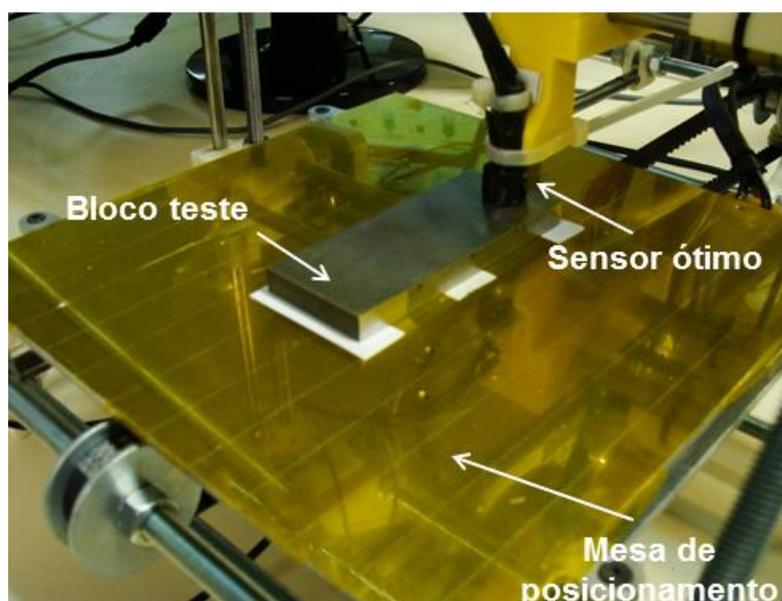


Figura 3.11 - Sensor com o diâmetro ótimo posicionado sobre o bloco de Inconel 625 contendo os defeitos.

3.2.4.2. Aplicação prática

Com o objetivo de avaliar mais detalhadamente o comportamento do sensor ótimo, foi realizada a varredura dos defeitos utilizando as frequências onde a sensibilidade é máxima para cada defeito, F_{max} , obtidas a partir dos dados da validação dos resultados numéricos (capítulo 4.2.2). Para obtenção das medidas, o sensor foi percorrido sobre o

bloco de Inconel 625, perpendicularmente ao longo dos seis defeitos, com passo de 0,5 mm e lift-off constante de 0,2 mm. Sessenta e dois pontos foram adquiridos através de uma mesa de posicionamento bidimensional (Figura 3.11).

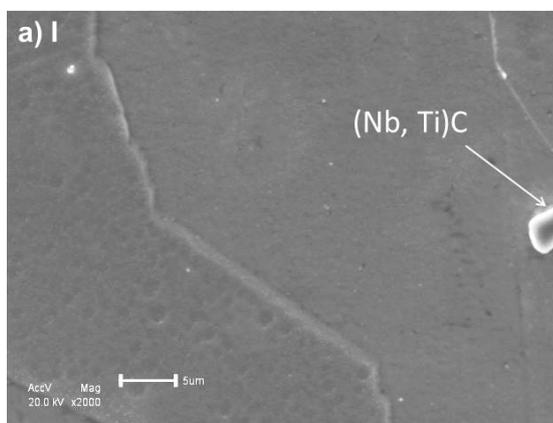
4. Resultados

4.1. Caracterização do processo de envelhecimento da liga Inconel 718

4.1.1. Resultados

4.1.1.1. Metalografia

A partir das análises metalográficas, é possível observar a presença de carbonetos metálicos distribuídos pela matriz em todas as amostras, mesmo na condição solubilizada, onde outros precipitados não foram observados, como mostra a Figura 4.1a. As micrografias das amostras da condição II também apresentaram uma microestrutura sem nenhuma evidência de fase δ nos contornos de grão, enquanto amostras das condições III e IV apresentaram uma quantidade pequena de fase δ nos contornos de grão, como indicado pela seta da Figura 4.1b (condição III) e Figura 4.1c (condição IV). Precipitados intragranulares não foram detectados pelas análises de MEV dessas amostras, provavelmente devido ao pequeno tamanho e natureza coerente. Entretanto, para as amostras das condições V ao VIII, um gradual crescimento dos precipitados intragranulares pode ser observado.



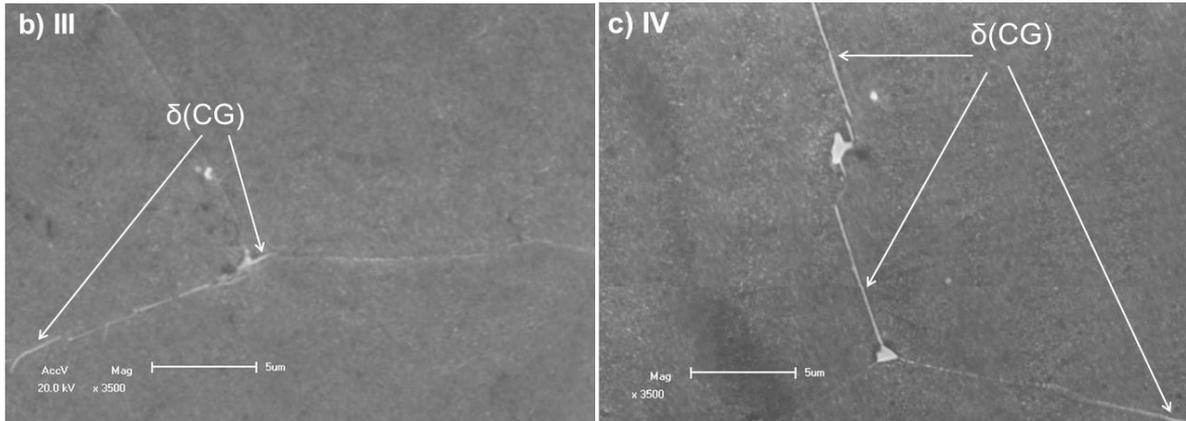


Figura 4.1 –Micrografia obtida por MEV a) da amostra solubilizada mostrando apenas a presença de um carboneto (2000x); b) Amostra da condição III mostrando uma quantidade pequena de fase δ nos contornos de grão (3500x). c) Amostra da condição IV mostrando uma quantidade média de fase δ nos contornos de grão (3500x). Ataque: Água régia (2:1)

A Figura 4.2a apresenta a micrografia dos precipitados extraídos eletroliticamente das amostras solubilizadas, mostrando a predominância de precipitados de diferentes tamanhos, porém com morfologia bastante semelhante. A análise de EDS realizada no ponto marcado na micrografia evidencia que os precipitados predominantes nessa amostra são carbonetos do tipo (Nb,Ti)C, uma vez que é possível observar apenas os picos de energia do carbono, nióbio e titânio (Figura 4.2b). Foram realizadas medidas em diferentes pontos dessa da imagem, e todos apresentaram resultados similares.

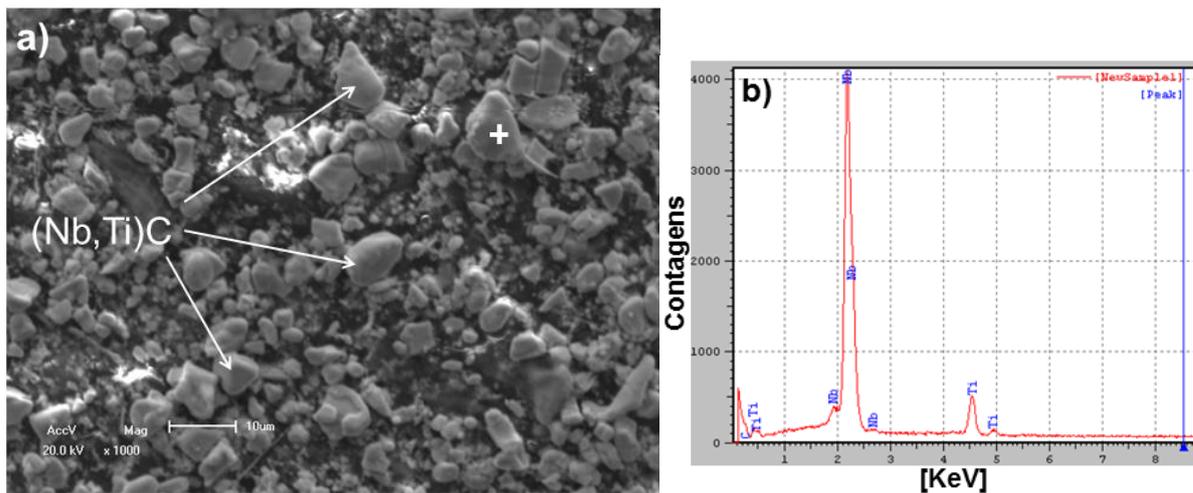


Figura 4.2 – a) Micrografia obtida por MEV dos precipitados extraídos eletroliticamente da amostra solubilizada; b) Análise por EDS medida no ponto marcado, confirmando que os precipitados predominantes nessa amostra são carbonetos do tipo (Nb,Ti)C.

A Figura 4.3a mostra uma micrografia da amostra da condição V, onde as setas indicam a presença precipitados de fase delta globular no contorno de grão. O círculo contínuo nessa figura indica uma região no contorno de grão em que a morfologia da fase δ parece estar iniciando uma mudança para o formato de placas. Na micrografia referente à condição VI, pode-se observar um aumento na quantidade de fase δ no contorno de grão com mudança clara para o formato de placas (Figura 4.3b). Note também coalescimento dos precipitados intragranulares em relação à condição anterior, indicado pelo círculo de linhas tracejadas das figuras. Amostras das condições VII e VIII mantiveram o crescimento da quantidade de fase δ , com morfologia bem característica de placas. A Figura 4.3c e Figura 4.3d mostram imagens das amostras da condição VII e VIII, respectivamente, onde em ambas a estruturas em formato de placas podem ser vistas acompanhadas de um claro aumento dos precipitados intragranulares (indicado pelo círculo com linhas tracejadas).

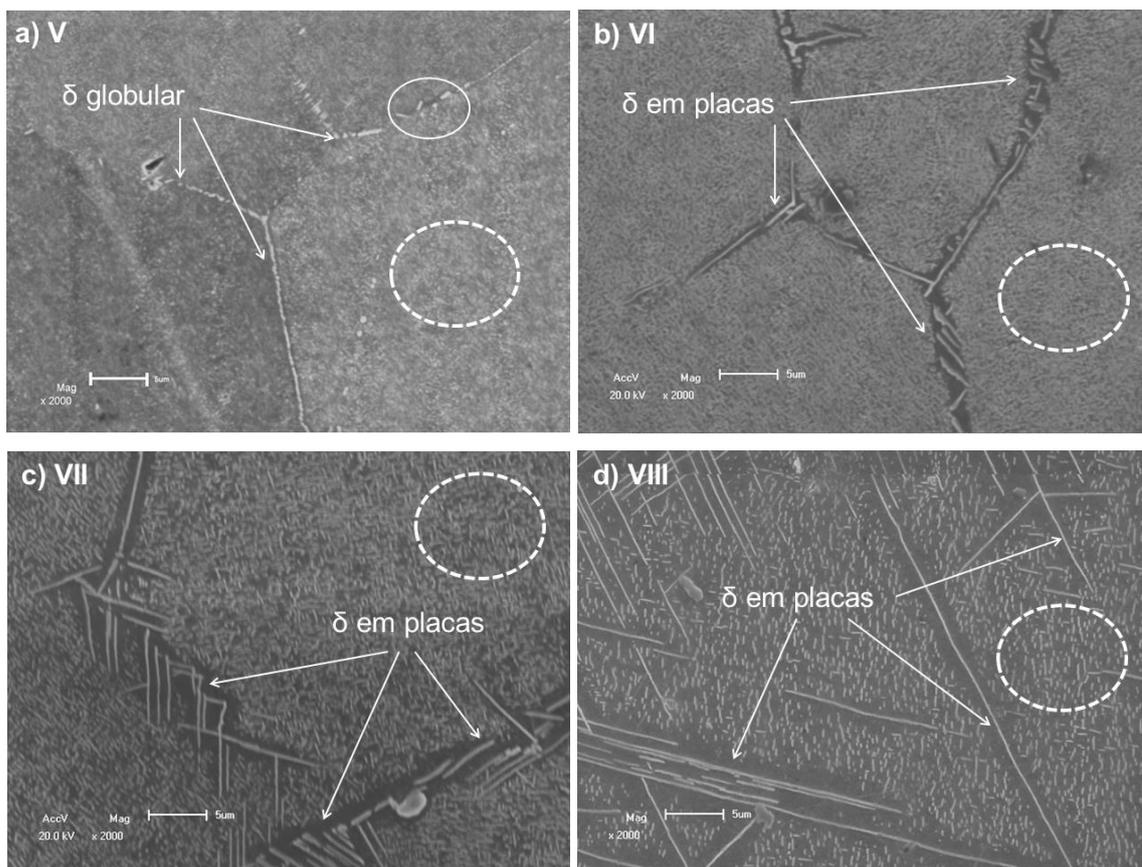


Figura 4.3 –Micrografia obtida por MEV: a) Amostra da condição número V, onde o círculo contínuo indica, aparentemente, o início da mudança para o formato de placas da fase δ ; b) Amostra da condição número VI; b) Amostra da condição número VII; c) Amostra da condição número VIII; Os círculos de linhas tracejadas indicam a contínua mudança no aspecto da matriz. Ataque: Água régia (2:1)

A Figura 4.4 apresenta uma imagem dos precipitados extraídos eletroliticamente da amostra VIII, comprovando o predomínio de precipitados da fase δ (Ni_3Nb) com morfologia característica de placas esperado para essa condição.

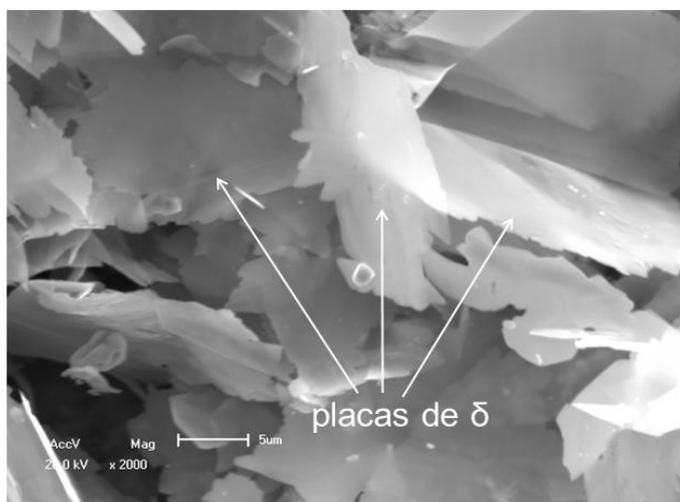


Figura 4.4 – Micrografia obtida por MEV dos precipitados extraídos eletroliticamente da amostra VIII mostrando o predomínio de precipitados da fase δ (Ni_3Nb) com morfologia característica de placas.

4.1.1.2. Difração de raios-X

Os resultados de difração de raios-X obtidos a partir dos precipitados extraídos eletroliticamente são mostrados na Figura 4.5 para as amostras de todas as condições. Carbonetos do tipo $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$ foram detectados em todas as amostras. Para as condições I e II, foi observada uma intensidade relativamente alta dos picos de difração, que pode ser explicada devido à pequena quantidade de precipitados das outras fases presentes nessas condições. A fase γ'' também foi detectada em todas as condições, exceto no primeiro e último condição, como esperado. A linha de difração da fase γ'' em $49,2^\circ$ mostra um efeito de alargamento de pico para a amostra da condição IV. Esse efeito decresce gradativamente até a amostra da condição VII, onde o pico encontra-se menos alargado. Isso se deve provavelmente ao aumento do tamanho dos precipitados da fase γ'' conforme o tempo e temperatura do tratamento térmico aumentam (ASM International, 2000). As primeiras linhas de difração da fase δ foram identificadas na amostra da condição V, e um crescimento gradual da intensidade foi observado nos difratogramas das condições VI, VII e VIII.

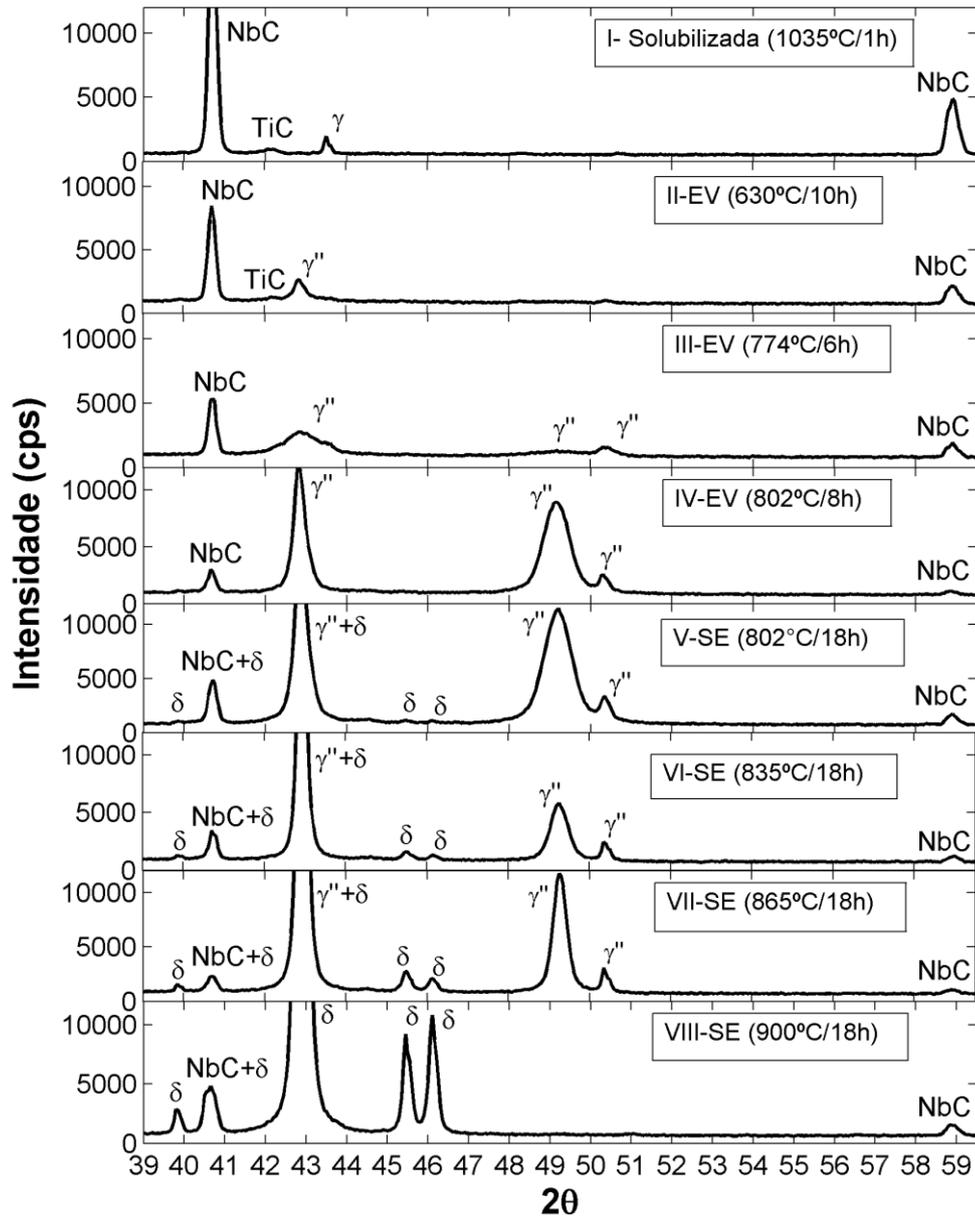


Figura 4.5 - Resultados de difração de raios-X obtidos a partir dos precipitados extraídos eletroliticamente de amostras para cada condição.

As linhas de difração da matriz obtidas a partir das análises realizadas nas amostras sólidas foram utilizadas para a obtenção dos parâmetros de rede da matriz. A Tabela 4.1 apresenta um resumo desses resultados, assim como a quantificação das fases para algumas das condições.

Tabela 4.1 – Resumo dos resultados obtidos para cada condição de tratamento térmico.

Condições	Microestruturas observada ^b	Precipitados identificados (DRX)	Parâmetro de rede (Å)	Quantidade das fases (% peso) ^d		
				γ	γ''	δ
I-SO (1035°C/1h)	Microestrutura homogênea livre de precipitados	NbC; TiC	3,6055	96,3	ND	ND
II-EV (620°C/10h)	Precipitados γ'/γ'' finamente distribuídos intragranularmente	NbC; TiC; γ''	3,6037	-		
III-EV (774°C/6h)	Coalescimento dos precipitados γ'/γ'' intragranulares; fase δ (CG) residual	NbC; γ''	3,5995	-		
IV-EV (802°C/8h)		NbC; γ''	3,6001	91,4	7,9	ND
V-SE (802°C/18)	Coalescimento dos precipitados γ'/γ'' intragranulares e da fase δ (CG); mudança gradual da fase δ para morfologia de placas	NbC; γ'' ; δ	3,5990	-		
VI-(SE) (835°C/18)		NbC; γ'' ; δ	3,5930	-		
VII-SE (865°C/18)	Predomínio de fase δ com morfologia de placas	NbC; γ'' ; δ	3,5932	-		
VIII-SE (900°C/18)		NbC; δ	3,5911	80,5	ND	17,9

^aTodas as amostras foram inicialmente solubilizadas a 1035°C por uma hora.

^bForam observados carbonetos metálicos distribuídos pela matriz em todas as amostras.

^c δ (CG): fase delta no contorno de grão.

^dObtido a partir da análise de difração realizada com as amostras sólidas. ND: não detectado.

4.1.1.3. Ensaio por correntes parasitas

As medidas de correntes parasitas foram convertidas para valores de condutividade elétrica. As amostras da condição II apresentaram a menor condutividade (1,44% IACS), 3% menor do que as amostras solubilizadas (1,48% IACS). Os valores das condições III e IV apresentaram praticamente a mesma condutividade, 1,58% IACS e 1,59% IACS, respectivamente. Amostras da condição V obtiveram o maior valor de condutividade, 1,63% IACS, enquanto amostras da condição VI até VIII mostraram um decréscimo contínuo, reduzindo até 1,54% IACS. A Tabela 4.2 apresenta um resumo das medidas de correntes parasitas, dureza e tamanho de grão para cada condição de tratamento térmico.

Tabela 4.2 - Resumo dos resultados de dureza, condutividade elétrica e tamanho de grão.

Condições	Dureza (HV1)	Condutividade elétrica (%IACS)	Tamanho de grão ASTM
I-SO (1035°C/1h)	184,0±7,0	1,48±0,004	5,5
II-EV (620°C/10h)	340,2±7,7	1,44±0,002	5,5
III-EV (774°C/6h)	388,5±9,7	1,58±0,004	5
IV-EV (802°C/8h)	379,8±7,4	1,59±0,002	5
V-SE (802°C/18)	353,1±8,9	1,63±0,002	5
VI-(SE) (835°C/18)	315,8±16,7	1,61±0,002	5
VII-SE (865°C/18)	293,7±10,9	1,57±0,003	5
VIII-SE (900°C/18)	284,7±9,7	1,54±0,003	4,5

4.1.1.4. Dureza

Como esperado, os valores de dureza das amostras das condições III e IV foram os mais altos, provavelmente devido às suas elevadas quantidades de precipitados γ'' (Slama e Abdellaoui, 2000; Xie *et al.*, 2005; Chang, 2009). Os valores de dureza das amostras das condições II e V foram ligeiramente menores em relação às amostras envelhecidas conforme a norma (III e IV), enquanto as amostra da condição VI até VIII foram substancialmente menores. Em todos os casos, exceto na condição II, isso pode ser explicado pelos diferentes níveis de transformação da fase γ'' em δ (Sundararaman, Mukhopadhyay e Banerjee, 1988; Azadian, Wei e Warren, 2004). Os resumo dos resultados das medidas de dureza estão apresentados na Tabela 4.2.

4.1.1.5. Tamanho de grão

As medidas de tamanho de grão mostraram valores substancialmente parecidos, entre ASTM 4,5 e 5,5. Embora as amostras das condições V-VIII terem sido sujeitas a longos períodos de envelhecimento a temperaturas elevadas, isso não provocou aumento significativo no tamanho de grão. Esse fato pode estar relacionado com o efeito de ancoramento devido à precipitação da fase δ nos contornos de grão durante o tratamento térmico (Cai *et al.*, 2003). Os resultados das medidas de tamanho de grão estão apresentados na Tabela 4.2.

4.1.2. Discussão

A explicação das variações de condutividade das amostras envelhecidas em relação às solubilizadas está no conceito de purificação da matriz e espalhamento de elétrons pelos precipitados, efeito que também foi medido através do método de correntes parasitas em (Metcalf, 1988), em ligas de alumínio. Na liga solubilizada, elementos como cromo, ferro, nióbio, titânio e alumínio estão presentes em solução sólida na matriz de níquel e diferem no diâmetro atômico entre 1 e 13% em relação ao níquel (Mishima, Ochiai e Suzuki, 1985). A presença desses elementos causa certa deformação na matriz, que pode ser estimada através da medida do parâmetro de rede, como mostrado no trabalho de Liu (Liu *et al.*, 1997). Essa deformação reduz a condutividade elétrica do material relativa ao níquel puro devido ao efeito de espalhamento dos elétrons. Durante o processo de envelhecimento, a concentração desses elementos na matriz é reduzida devido à precipitação das fases γ'/γ'' e δ ; Isso gera o efeito de purificação da matriz que tende a aumentar a condutividade do material. Por outro lado, o aumento da quantidade de precipitados γ'/γ'' e δ intensifica o espalhamento de elétrons gerados pelos próprios precipitados e tende a reduzir a condutividade do material. Portanto, pode-se dizer que para cada condição de tratamento térmico, existe uma combinação desses dois efeitos, que irá resultar no aumento ou diminuição da condutividade.

Para facilitar o entendimento, a Figura 4.6 apresenta os resultados de condutividade elétrica, dureza e parâmetro de rede da matriz em função da sequência de tratamentos térmicos aplicados. Na condição II, é possível observar uma queda significativa de condutividade em relação à condição solubilizada (condição I), enquanto o decréscimo no valor do parâmetro de rede é relativamente pequeno, sugerindo que o efeito de purificação da matriz na condição II é limitado. Dessa forma, as zonas de GP e os finos precipitados formados nos estágios iniciais de envelhecimento (condição II) parecem causar um efeito de espalhamento de elétrons grande o suficiente para sobrepor o efeito de purificação da matriz e conseqüentemente diminuir a condutividade, um efeito que foi observado similarmente em (Metcalf, 1988) para medidas de condutividade em ligas de alumínio. Nas condições subsequentes, devido ao aumento do volume de precipitados formados, é observado um decréscimo mais pronunciado no parâmetro de rede da matriz. Pode-se dizer que o efeito de purificação da matriz passa a ser dominante sobre o efeito de espalhamento de elétrons pelos precipitados, levando a um aumento de condutividade em relação à amostra solubilizada para todas as outras condições de envelhecimento (III-VIII). Nas amostras da condição V, é observado um valor máximo de condutividade. Isso se deve, provavelmente, devido ao nível considerável de coalescimento dos precipitados intragranulares e a fase δ nos contornos de grão se encontra com morfologia globular (Figura 4.3a), o que

provavelmente diminui o efeito de espalhamento de elétrons pelos precipitados elevando a condutividade para um valor máximo, já que a matriz se encontra com nível de purificação avançado. O decréscimo de condutividade para as próximas condições (VI até VIII) parece estar relacionado com a elevação da quantidade de precipitados δ em formas de placas. Nesses casos, o espalhamento de elétrons devido aos precipitados se torna mais intenso, embora a condutividade se mantenha acima das amostras solubilizada, devido ao alto nível de purificação de matriz (evidenciado pelo baixo valor do parâmetro de rede da matriz).

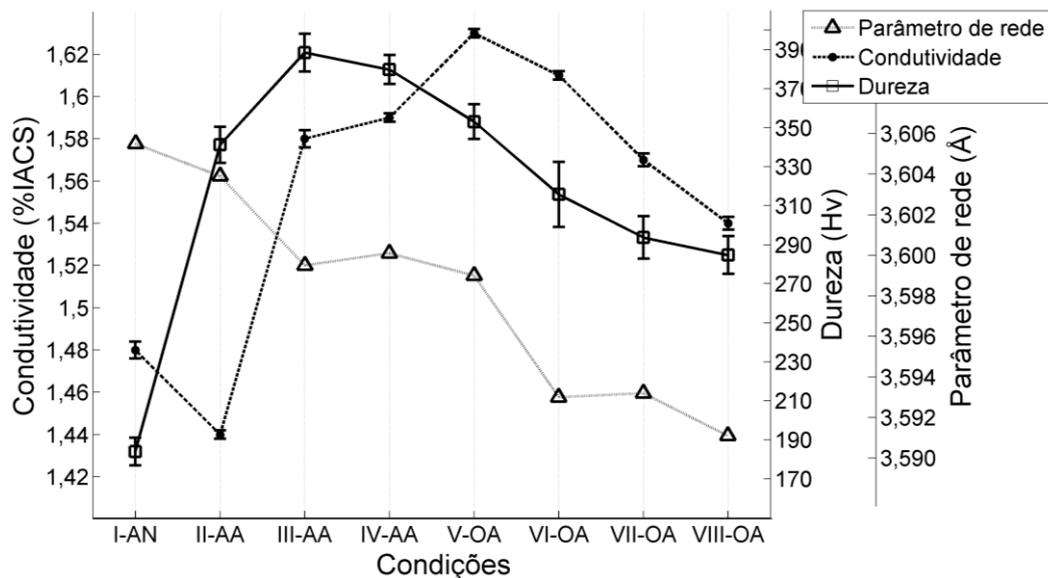


Figura 4.6 - Resultados de condutividade, dureza e parâmetro de rede da matriz para as sequencia de condições aplicadas neste estudo.

Os resultados da quantificação de fase a partir da análise de difração das amostras sólidas estão apresentados na Tabela 4.1 para as condições I, IV e VIII, e parecem concordar com as interpretações anteriores. Apenas três condições foram escolhidos devido à complexidade da análise. A condição I foi escolhido pela quantidade elevada de matriz presente, a condição IV devido à quantidade elevada de fase γ'' esperada e a condição VIII devido alto teor de fase δ esperado. Comparando com as amostras da condição I, as amostras da condição IV apresentaram uma pequena redução na quantidade de matriz, acompanhado da precipitação de cerca de 8% de fase γ'' . A elevada dureza e relativamente baixa quantidade de precipitados secundários sugerem que os precipitados são pequenos e bem distribuídos pela matriz. Mesmo assim, o nível de espalhamento de elétrons por esses precipitados parece ser baixo o suficiente, de modo que, junto com um nível de purificação intermediário da matriz (estimado pelo parâmetro de rede), essa condição apresenta valores de condutividade próximos do máximo. Nas amostras da condição VIII, a purificação da

matriz está no seu máximo, porém a quantidade total de matriz diminuiu para aproximadamente 80% (ver quantificação de fase na Tabela 4.1). Um significativo coalescimento dos precipitados da fase δ também pode ser observado, chegando a aproximadamente 18%, com morfologia predominantemente de placas. Desta forma, o caminho livre dos elétrons é significativamente reduzido, e o espalhamento de eletros pelos precipitados parecer se tornar o efeito dominante, reduzindo o valor de condutividade mesmo com a matriz apresentando um nível de purificação elevado.

Como esperado, as medidas de condutividade elétrica sugerem que essa propriedade sozinha não é suficiente para determinar o nível de envelhecimento da liga Inconel 718, uma vez que um valor específico de condutividade pode estar relacionado com microestruturas em diferentes condições de envelhecimento. Por exemplo, o valor de condutividade medido em torno de 1,57% IACS, pode estar relacionado com uma microestrutura resultante de um envelhecimento conforme a norma (condição IV) ou uma microestrutura resultante de um superenvelhecimento (condição VII), como mostra a Figura 4.6. Da mesma forma, valores de dureza sozinhos também não são suficientes para garantir esse tipo de caracterização. Entretanto, vale ressaltar, que um mínimo de informação sobre a condição de uma determinada condição é conhecida durante a produção, portanto, em alguns casos, medidas de uma das técnicas podem ser suficientes para determina o seu estado microestrutural.

Entretanto, mesmo em situações onde não existam informações disponíveis, a correlação das duas medidas (dureza e condutividade), aliada ao desenvolvimento de padrões de referência adequados, pode levar a correta caracterização do processo de envelhecimento da liga Inconel 718, como mostra a Figura 4.7. Naturalmente, a composição química da liga tem um efeito nos limites desse gráfico, e a representatividade e os erros associado a cada medida precisam ser estimados, com o propósito de estabelecer as corretas tolerâncias. No entanto, acredita-se isto pode levar a uma forma rápida e confiável de caracterização da conformidade microestrutural, especialmente, combinando uma técnica de medição da condutividade eléctrica precisa (ensaio de correntes parasitas) com medidas rápidas de dureza (dureza Vickers por impedância acústica).

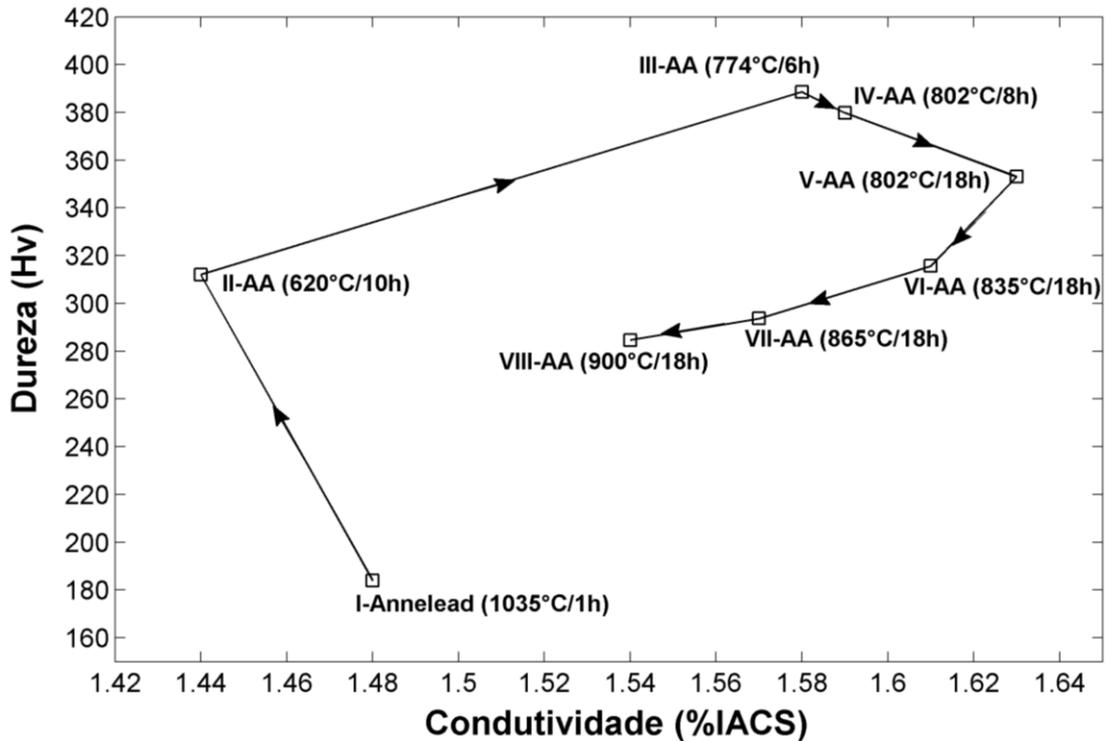


Figura 4.7 – Correlação das medidas de condutividade e dureza, e setas mostrando a sequência de envelhecimento.

4.2. Otimização de sensores por MEF para inspeção de defeitos em Inconel 625

4.2.1. Inspeção de defeitos superficiais e subsuperficiais

Os resultados do processo de otimização numérica para a inspeção de defeitos superficiais e subsuperficiais são apresentados nesta seção. Os valores, ΔZ_{\max} , foram obtidos para cada condição em função do diâmetro, D_E , como mostra a Figura 4.8a. Em cada curva é possível estabelecer a melhor geometria de sensor para a inspeção do defeito correspondente.

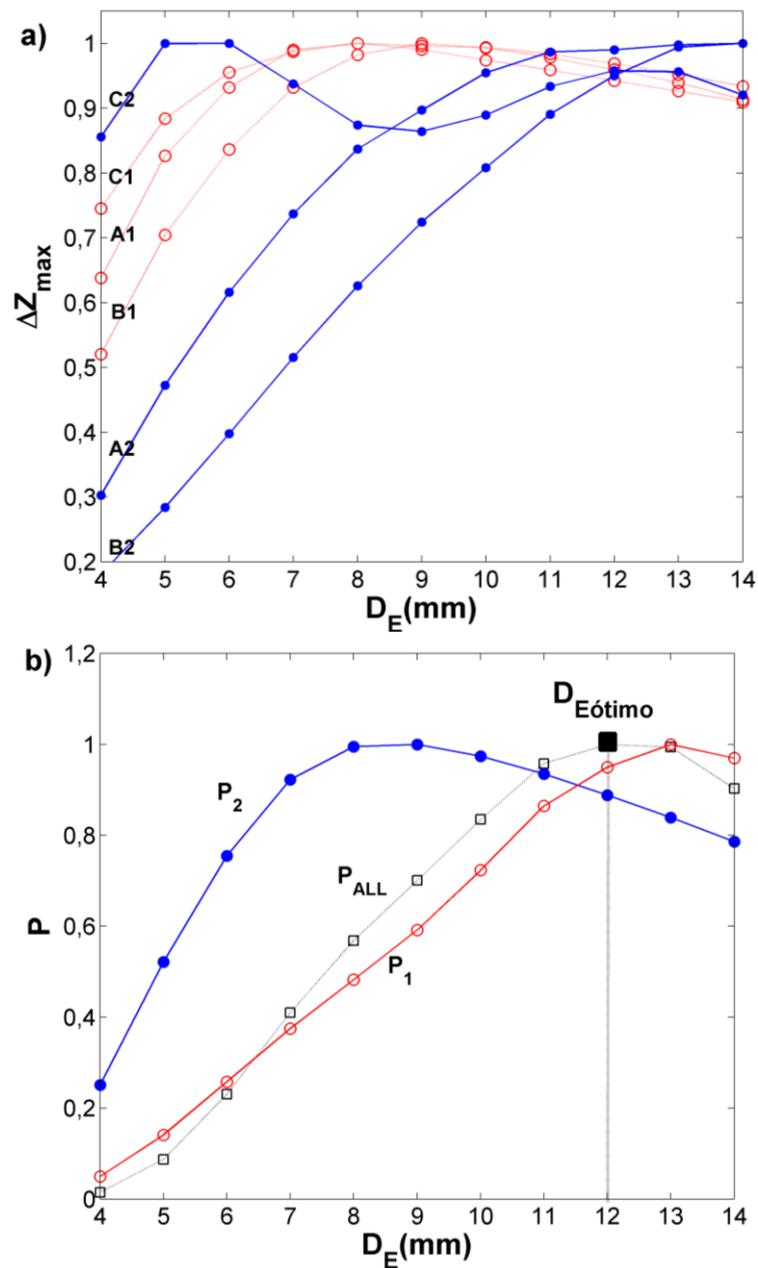


Figura 4.8 – a) Valores de “ ΔZ_{max} ” obtidos para cada condição em função do diâmetro, “ D_E ”. b) Parâmetros de performance sem função do diâmetro, “ D_E ”, mostrando o diâmetro ótimo do sensor, $D_{E\acute{o}timo}=12\text{mm}$.

A Figura 4.8b mostra os resultados dos três parâmetros de performance, P_1 , P_2 e P_{ALL} , em função do diâmetro do sensor. Além disso, é determinado o diâmetro do sensor ótimo ($D_{E\acute{o}timo} = 12$ mm), ou seja, o sensor que possui melhor performance considerando a sensibilidade a todos defeitos (P_{ALL}). Para todos os defeitos analisados, os resultados obtidos apresentaram uma variação bastante significativa de desempenho dos sensores em função do diâmetro, evidenciando a importância do processo de otimização. Vale ressaltar que para materiais ou outros tipos de defeitos, diferentes respostas podem ser analisadas, assim como diferentes parâmetros de performance podem ser estabelecidos. Em outras

palavras, o método pode ser adaptado para outras condições envolvendo a inspeção de defeitos.

4.2.2. Validação dos resultados numéricos

Os resultados do processo de validação experimental são apresentados na Figura 4.9, mostrando a comparação entre as respostas numéricas e experimentais de ΔZ_{A1} , ΔZ_{B1} , ΔZ_{C1} , ΔZ_{A2} , ΔZ_{B2} e ΔZ_{C2} em função da frequência, para o sensor com $D_E=12$ mm. Uma ótima correlação é observada em todos os casos, exceto para baixas frequências na inspeção do defeito C2 (resolução espacial entre defeitos subsuperficiais), onde uma discrepância maior foi observada. Entretanto, mesmo nesse caso existe uma tendência similar no comportamento das duas curvas.

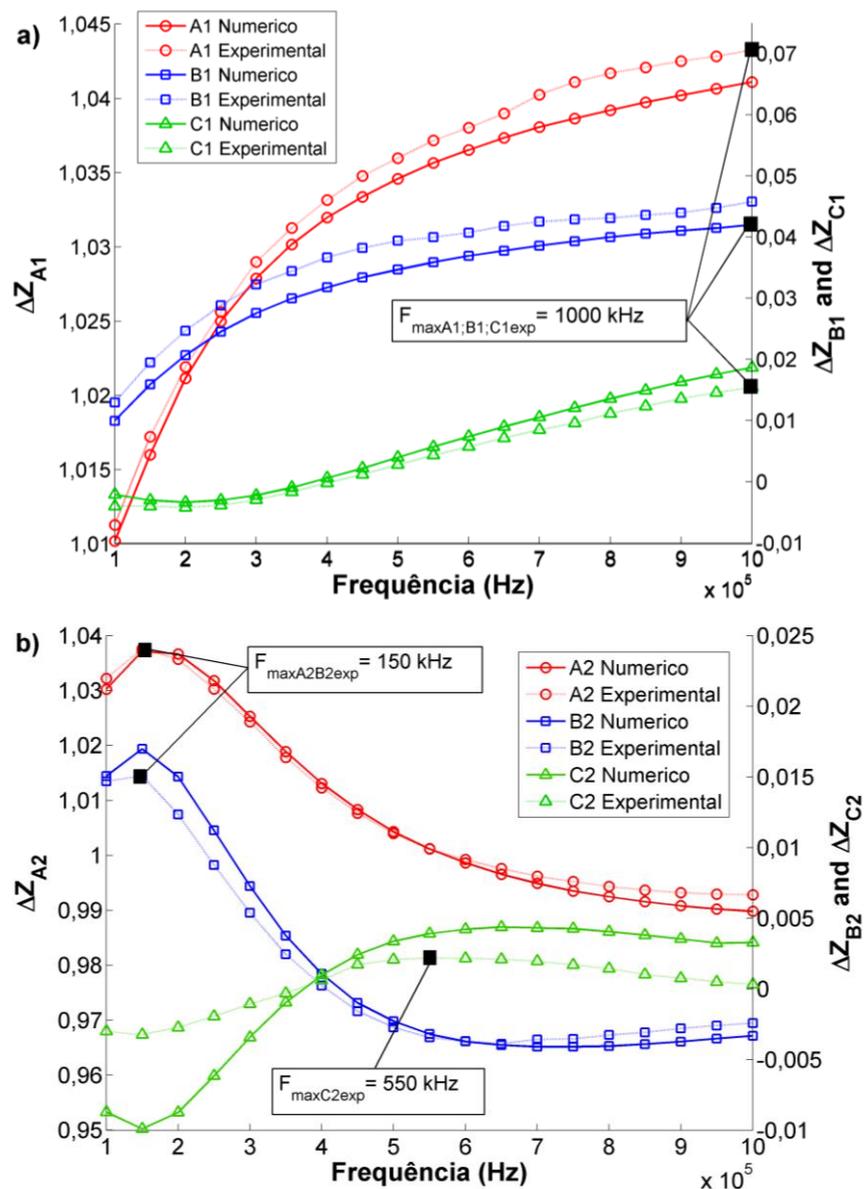


Figura 4.9 - Comparação entre as respostas numéricas e experimentais de “ ΔZ ” em função da frequência para: a) defeitos superficiais; b) defeitos subsuperficiais.

Para os defeitos superficiais (1), a maior sensibilidade foi na frequência de excitação de 1000 kHz para os três defeitos (A1, B1 e C1), tanto para os resultados numéricos quanto para os experimentais (Figura 4.9a). Na análise dos defeitos subsuperficiais (2), a detecção de defeitos isolados (A2) e a diferenciação de defeitos com profundidades distintas (B2) apresentaram máxima sensibilidade na frequência de 150 kHz para os dados numéricos e experimentais, enquanto para a resolução espacial entre defeitos (C2), a frequência com máxima sensibilidade foi 650 kHz para os resultados numéricos e 550 kHz para os resultados experimentais, diferença que pode ser considerada pequena para os níveis de sensibilidade analisados (Figura 4.9b). Dessa forma, a consistência apresentada pelos resultados experimentais em relação aos numéricos confirma a efetividade do processo de otimização desenvolvido.

4.2.3. Aplicação prática

Os valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo dos defeitos superficiais são apresentados na Figura 4.10 para a frequência de 1000 kHz ($F_{\max ABC1}$). Como esperado, é possível observar com clareza a detecção do primeiro defeito isolado (ΔZ_{A1}), a diferenciação entre os defeitos com profundidades diferentes (ΔZ_{B1}), e a resolução espacial entre os defeitos (ΔZ_{C1}). Em uma situação real, o sensor com as características ótimas teria condições de identificar, dimensionar e separar defeitos superficiais utilizando apenas a frequência de 1000kHz.

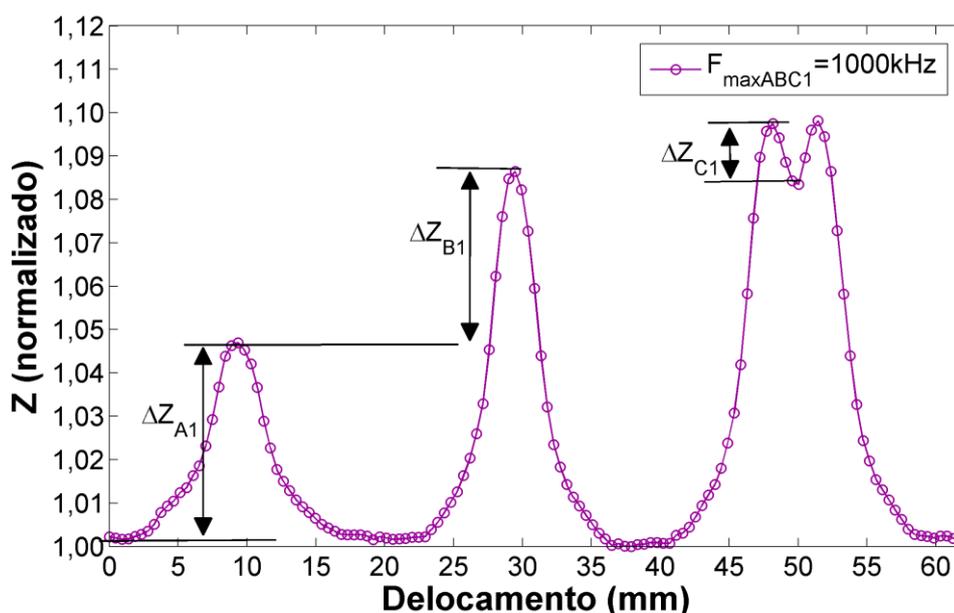


Figura 4.10 - Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo dos defeitos superficiais para a frequência com máxima sensibilidade de detecção das três condições de defeitos ($F_{\max ABC1} = 1000 \text{ kHz}$).

A Figura 4.11 apresenta os valores de impedância do sensor em função do deslocamento para os defeitos subsuperficiais na frequência de 150 kHz ($F_{\max AB2}$). O primeiro defeito isolado (ΔZ_{A2}), a diferenciação entre os defeitos com profundidades diferentes (ΔZ_{B2}) são identificados facilmente, enquanto que a resolução espacial (ΔZ_{C2}), não possui sensibilidade para distinguir os dois defeitos. Em uma situação real, o sinal poderia ser interpretado erroneamente como um único defeito grande.

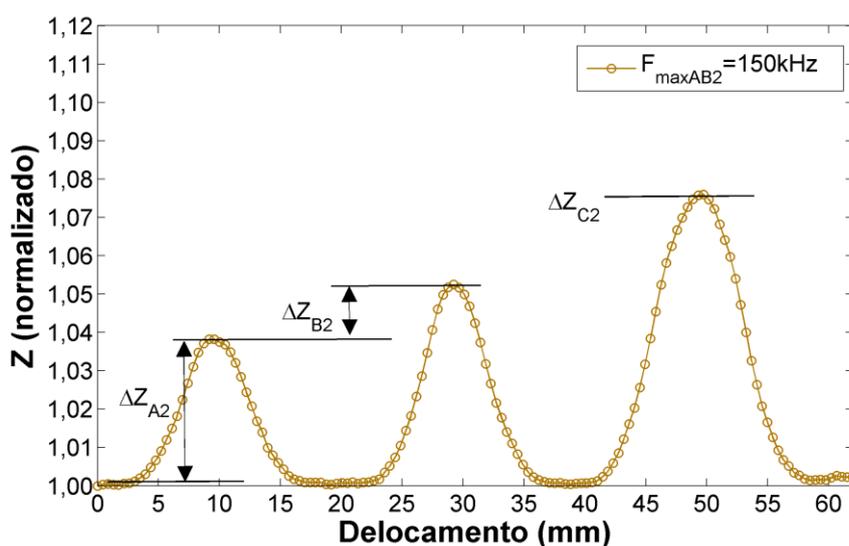


Figura 4.11 - Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo dos defeitos subsuperficiais para a frequência com máxima sensibilidade de detecção de defeitos isolados e diferenciação de defeitos com profundidades distintas ($F_{\max AB2}=150$ kHz).

A Figura 4.12 apresenta os valores da impedância do sensor em função do deslocamento para a frequência de 550 kHz ($F_{\max C2}$). Neste caso, apesar de ser possível a identificação dos defeitos isolados (ΔZ_{A2}), a sensibilidade é significativamente menor do que na frequência de 150 kHz e praticamente não existe sensibilidade para a diferenciação entre os defeitos com profundidades diferentes (ΔZ_{B2}). Por outro lado, a resolução espacial (ΔZ_{C2}) possui sensibilidade para distinguir facilmente os dois defeitos em sequência. Pode-se concluir que o sensor ótimo possui a capacidade esperada para a inspeção dos seis defeitos analisados, desde que as frequências certas sejam utilizadas em cada defeito.

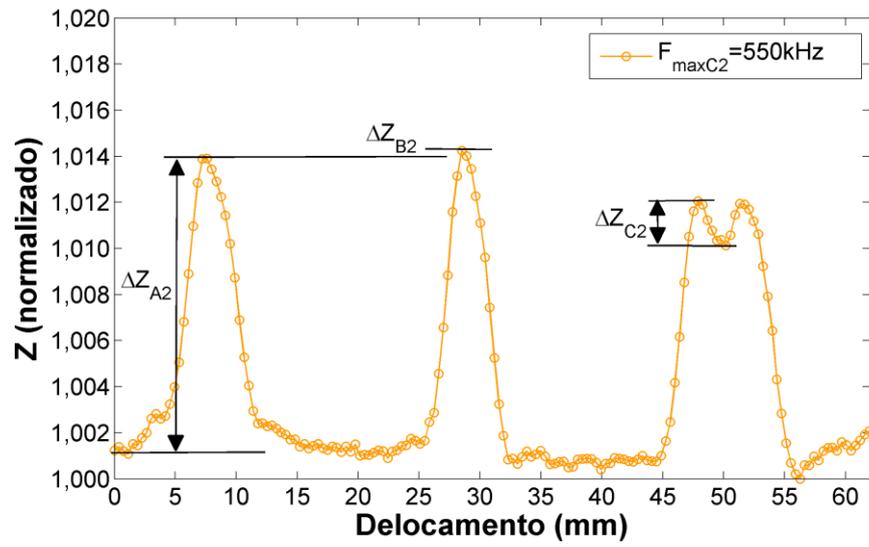


Figura 4.12 - Valores de impedância do sensor em função do deslocamento ao longo dos defeitos subsuperficiais para a frequência com máxima resolução espacial entre dois defeitos ($F_{\max C1} = 550$ kHz).

5. Conclusão

O sensor construído se mostrou eficiente para medição de pequenas variações de condutividade e, portanto, pode ser considerado adequado para a caracterização do processo de envelhecimento do Inconel 718. Os resultados da obtidos a partir do ensaio de correntes parasitas realizado com o sensor mostraram que as alterações microestruturais na liga possuem efeitos distintos na condutividade elétrica. A influência da microestrutura na condutividade pode ser explicada como sendo uma competição entre dois efeitos no espalhamento dos elétrons, a purificação da matriz e o tamanho, morfologia e distribuição dos precipitados. O menor valor de condutividade foi apresentado pela amostra sub-envelhecida (condição II), a qual contém pequenas zonas de GP e precipitados finamente distribuídos, e nas quais o efeito de purificação da matriz se mostra limitado comparado às amostras envelhecidas adequadamente, parecendo indicar que o efeito de espalhamento de elétrons devido a características dos precipitados é predominante. Um claro aumento nos valores de condutividade foi encontrado para todas as outras condições de envelhecimento e superenvelhecimento. Além disso, um máximo no valor de condutividade foi identificado quando o coalescimento dos precipitados intragranulares, associados com o aumento na densidade de precipitados globulares nos contornos de grão, parece ter causado um pico na sobreposição do efeito purificação da matriz no efeito de espalhamento de elétrons por esses precipitados. Por outro lado, grandes quantidades de precipitados de fase δ em formato de placas, típicos de amostras superenvelhecidas, parece exercer um efeito consideravelmente forte no espalhamento de elétrons, e, eventualmente, esse efeito se sobrepõe ao efeito de purificação de matriz, levando assim a diminuição nos valores de condutividade. Devido aos efeitos acima, valores de condutividade sozinhos se mostraram insuficiente para caracterizar o processo de envelhecimento da liga Inconel 718. Por razões semelhantes, foi visto que o mesmo pode ser dito de medidas de dureza. No entanto, foi sugerido que a combinação das duas técnicas pode levar a uma forma rápida e prática para determinar o nível de envelhecimento de uma condição com um grau de confiabilidade adequado.

A partir de pré-testes, constatou-se que as exigências do sensor para a inspeção de defeitos são maiores devido ao elevado número de parâmetros envolvidos nesse tipo de análise e a competição entre eles. Através do software de simulação, foi possível reproduzir com sucesso um sensor de correntes parasitas em um modelo tridimensional simulando as condições práticas de inspeção, permitindo uma melhor compreensão da influência dos parâmetros de construção e operação do sensor na capacidade de inspeção de defeitos. Os parâmetros da bobina de leitura foram fixados como os menores valores possíveis, enquanto a frequência de excitação, F , e o diâmetro da bobina externa, D_E , foram definidos

como parâmetros a serem otimizados, uma vez que apresentaram grande influência na inspeção de defeitos. Uma sequência de etapas de otimização rápida e precisa foi desenvolvida e aplicada com sucesso a seis tipos de defeitos, mostrando uma variação bastante significativa no desempenho dos sensores em função dos parâmetros analisados (D_E e F). O sensor que obteve a melhor desempenho considerando a performance dos seis defeitos (P_{ALL}) foi o sensor com diâmetro de 12 mm ($D_{E\text{ótimo}}$), denominado sensor ótimo. A validação experimental dos resultados numéricos a partir da construção do sensor ótimo apresentaram uma ótima correlação, provando eficiência do processo de otimização desenvolvido. Além disso, através da aplicação prática do sensor na varredura dos seis defeitos, foi comprovada a necessidade da utilização das frequências de sensibilidade máxima (F_{max}) como forma de garantir níveis de sensibilidade satisfatórios e permitir uma interpretação adequada da resposta do sensor.

6. Trabalhos futuros

Este estudo deixa como trabalhos a serem realizados:

- Quantificação de fases pelo método de difração de raios-x em todas as condições e correlação dos resultados com as medidas de condutividade e dureza.
- Verificação da eficiência do processo de otimização para diferentes tipos de defeitos, material teste e configurações de bobinas.

7. Referências bibliográficas

API Specification 6A718. Specification of Nickel Base Alloy 718 (UNS N07718) for Oil and Gas Drilling and Production: American Petroleum Institute 2004.

ASM International. ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys. Materials Park, OH. #06178G 2000.

ASTM International. Standard Practice for Electrolytic Extraction of Phases from Ni and Ni-Fe Base Superalloys Using a Hydrochloric-Methanol Electrolyte 2010.

ASTM International. Standard Specification for Precipitation-Hardening Bolting (UNS N07718) for High Temperature Service 2010.

ASTM International. Standard Specification for Nickel-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloys (UNS N06625 and UNS N06852) and Nickel-Chromium-Molybdenum-Silicon Alloy (UNS N06219) Pipe and Tube. 2011.

ASTM International E 112. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size: ASTM International: p. 1- 27 p. 2012.

AZADIAN, S.; WEI, L. Y.; WARREN, R. Delta phase precipitation in Inconel 718. **Materials Characterization**, v. 53, n. 1, p. 7-16, Sep 2004.

BAKHTIARI, S.; KUPPERMAN, D. S. Modeling of eddy current probe response for steam generator tubes. **Nuclear Engineering and Design**, v. 194, n. 1, p. 57-71, Nov 1999.

BIVTH, M.; FABBRI, L.; MONJARET, J. L. **Effect of cladding on inpection results**. 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. New Orleans. 6 2001.

CAI, D. Y. et al. Dissolution kinetics and behavior of delta phase in Inconel 718. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 13, n. 6, p. 1338-1341, Dec 2003.

CHADY, T.; LOPATO, P. Eddy current differential transducer for nondestructive evaluation of aluminum plates. **Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 27a and 27b**, v. 975, p. 328-335, 2008.

CHANDRASEKAR, R. **Swept frequency eddy current (SFEC) measurements of Inconel 718 as a function of microstructure and residual stress.** 2013. (Graduate Theses and Dissertations). Iowa State University

CHANG, S. H. In situ TEM observation of gamma ', gamma '' and delta precipitations on Inconel 718 superalloy through HIP treatment. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 486, n. 1-2, p. 716-721, Nov 3 2009.

CHOUDHURY, I. A.; EL-BARADIE, M. A. Machinability of nickel-base super alloys: a general review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 77, n. 1-3, p. 278-284, May 1 1998.

COMSOL Multiphysics. 4.3 2012.

COZAR, R.; PINEAU, A. Morphology of Y' and Y'' Precipitates and Thermal-Stability of Inconel 718 Type Alloys. **Metallurgical Transactions**, v. 4, n. 1, p. 47-59, 1973.

DECKER, R. F. The evolution of wrought age-hardenable superalloys. **Jom**, v. 58, n. 9, p. 32-36, Sep 2006.

DUPONT, J. N.; LIPPOLD, J. C.; KISER, S. D. **Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys.** Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2009. xiv, 440 p. ISBN 9780470087145 (cloth)
0470087145 (cloth).

FITZPATRICK, G. L. et al. Detection of cracks under cladding using magneto-optic imaging and rotating in-plane magnetization. **Nondestructive Evaluation of Utilities and Pipelines**, v. 2947, p. 106-116, 1996.

GARCIA-MARTIN, J.; GOMEZ-GIL, J. Comparative evaluation of coil and hall probes in hole detection and thickness measurement on aluminum plates using eddy current testing. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, v. 49, n. 8, p. 482-491, Aug 2013.

GARCIA-MARTIN, J.; GOMEZ-GIL, J.; VAZQUEZ-SANCHEZ, E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. **Sensors**, v. 11, n. 3, p. 2525-2565, Mar 2011.

GHANEI, S.; KASHEFI, M.; MAZINANI, M. Eddy current nondestructive evaluation of dual phase steel. **Materials & Design**, v. 50, p. 491-496, Sep 2013.

GUSTAFSSON, D. **Constitutive and fatigue crack propagation behaviour of Inconel 718**. 2010. Department of Management and Engineering, Division of Solid Mechanics, Linköping University, Linköping, Sweden.

HAN, Y. F.; DEB, P.; CHATURVEDI, M. C. Coarsening Behavior of Gamma"-Particles and Gamma'-Particles in Inconel Alloy-718. **Metal Science**, v. 16, n. 12, p. 555-561, 1982.

HANSEN, J. The eddy current inspection method - Part 1. History and electrical theory. **Insight**, v. 46, n. 5, p. 279-281, May 2004a.

_____. The eddy current inspection method - Part 4. Applications, practical testing and advanced concepts. **Insight**, v. 46, n. 8, p. 480-483, Aug 2004b.

HELLIER, C. **Handbook of nondestructive evaluation**. New York: McGraw-Hill, 2001. ISBN 0070281211.

_____. **Handbook of nondestructive evaluation**. 2nd. New York: McGraw-Hill, 2013. ISBN 9780071777148 (alk. paper).

IDA, N.; PALANISAMY, R.; LORD, W. Eddy-Current Probe Design Using Finite-Element Analysis. **Materials Evaluation**, v. 41, n. 12, p. 1389-1394, 1983.

KASHEFI, M.; KAHROBAEE, S. **On the application of non-destructive eddy current method for quality control of heat treated parts**. 21st IFHTSE Congress Rio de Janeiro, Brazil 2010.

KHAN, S. H. et al. Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction. **Computational Materials Science**, v. 43, n. 4, p. 623-628, Oct 2008a.

_____. Pearlite determination in plain carbon steel by eddy current method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 200, n. 1-3, p. 316-318, May 8 2008b.

KUO, C. M. et al. Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy. **Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing**, v. 510-11, p. 289-294, Jun 15 2009.

LIU, L. F. et al. Study of the effect of delta phase on hydrogen embrittlement of Inconel 718 by notch tensile tests. **Corrosion Science**, v. 47, n. 2, p. 355-367, Feb 2005.

LIU, W. C. et al. Relationship between the lattice constant of gamma phase and the content of delta phase, gamma'' and gamma' phases in Inconel 718. **Scripta Materialia**, v. 37, n. 1, p. 59-64, Jul 1 1997.

LOPES, R. A. et al. **Eddy Current Inspection of a Duralumin Plate**. International Instrumentation and Measurement Technology Conference

Singapore: IEEE. 978-1-4244-3353-7/09/\$25.00 ©2009 IEEE 2009.

MATHWORKS. **MATLAB**. R2011b 2011.

METCALFE, G. R. The Use of Eddy-Current Flaw Detectors with Meter Display for Measuring the Conductivity of Aluminum-Alloy Structures. **British Journal of Non-Destructive Testing**, v. 30, n. 3, p. 164-169, May 1988.

MISHIMA, Y.; OCHIAI, S.; SUZUKI, T. Lattice-Parameters of Ni(Gamma), Ni₃Al(Gamma') and Ni₃Ga(Gamma') Solid-Solutions with Additions of Transition and B-Subgroup Elements. **Acta Metallurgica**, v. 33, n. 6, p. 1161-1169, 1985.

NELLIGAN, T.; CALDERWOOD, C. OLYMPUS - Equipamentos de correntes de Foucault. 2013.

ORADEI-BASILE, A.; RADAVIDICH, J. F. **A current T-T-T diagram for wrought alloy 718**. School of Materials Engineering, Purdue University West Lafayette 1991.

PALANISAMY, R.; LORD, W. Finite-Element Analysis of Eddy-Current Phenomena. **Materials Evaluation**, v. 38, n. 10, p. 39-43, 1980.

PELLEGRINI, H. V. Assessing Heat Damage in Aluminum-Alloys with an Eddy-Current Testing Technique. **Metal Progress**, v. 117, n. 4, p. 60-63, 1980.

PLACKO, D.; DUFOUR, I. A Focused-Field Eddy-Current Sensor for Nondestructive Testing. **Ieee Transactions on Magnetics**, v. 29, n. 6, p. 3192-3194, Nov 1993.

ROSADO, L. F. S. G. **Non-Destructive Testing Based on Eddy Currents**. 2009. (Master's Degree). Electronics Engineering, Universidade Técnica de Lisboa

SANTOS, T. S. R. D. **Study of the effects of hydrogen on mechanical properties of 718 alloy in different aging conditions** 2009. (Master Dissertation). COPPE

SHULL, P. J. **Nondestructive evaluation : theory, techniques, and applications.** New York: M. Dekker, 2002. xxiv, 841 p. ISBN 0824788729.

SIKORA, R. et al. High sensitivity eddy current probe for inspection of low conductivity materials. **Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vols 23a and 23b**, v. 23, p. 382-389, 2004.

SLAMA, C.; ABDELLAOUI, M. Structural characterization of the aged Inconel 718. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 306, n. 1-2, p. 277-284, Jun 23 2000.

SMITH, L. **Engineering with CLAD STEEL** 2012.

STEVENS, C. E.; ROSS, R. W. Production, Fabrication, and Performance of Alloy 625 Clad Steel for Aggressive Corrosive Environments **Journal of Materials for Energy System**

v. 8, p. 1-16, 1986.

SUI, F. L. et al. Processing map for hot working of Inconel 718 alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 3, p. 433-440, Mar 1 2011.

SUNDARARAMAN, M.; MUKHOPADHYAY, P.; BANERJEE, S. Precipitation of the Delta-Ni₃Nb Phase in 2 Nickel-Base Superalloys. **Metallurgical Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 19, n. 3, p. 453-465, Mar 1988.

THOMAS, A. et al. High temperature deformation of Inconel 718. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 177, n. 1-3, p. 469-472, Jul 3 2006.

VALLE, L. D. C. M. **Effect of solution and aging heat treatment in microstructural and mechanical properties of Inconel 718.** 2010. (Master Dissertation). COPPE, Rio de Janeiro - Brazil.

WEISS, R. et al. Qualification of the LF-eddy current technique for the inspection of stainless steel cladding and applications on the reactor pressure vessel. **Nuclear Engineering and Design**, v. 206, n. 2-3, p. 311-323, Jun 2001.

XIE, X. S. et al. Ttt diagram of a newly developed nickel-base superalloy - Allvac (R) 718Plus (TM). **Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives, Proceedings**, p. 193-202, 2005.

YUSA, N. et al. Application of eddy current inversion technique to the sizing of defects in Inconel welds with rough surfaces. **Nuclear Engineering and Design**, v. 235, n. 14, p. 1469-1480, Jun 2005.

ZERGOUG, M. et al. Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing. **Ndt & E International**, v. 37, n. 1, p. 65-72, Jan 2004.