



# ESCOLA NAVAL

ta tante  bi-faire



Ana Emília Novais Peixoto

## Inspeção de Superfícies a Altas Temperaturas com Correntes Induzidas

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,  
na especialidade de Engenharia Naval - Ramo de Mecânica



Alfete

2018





# ESCOLA NAVAL

talant de bifaire



**Ana Emília Novais Peixoto**

***Inspeção de Superfícies a Altas Temperaturas com  
Correntes Induzidas***

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares  
Navais, na especialidade de Engenharia Naval – Ramo de Mecânica**

**Orientação de: Professor Doutor Jorge Pamies Teixeira**

A Aluna Mestranda

---

O Orientador

---

**Alfeite**

**2018**



“O esforço é grande e o homem é pequeno.

Eu, Diogo Cão, navegador, deixei

Este padrão ao pé do areal moreno

E para diante naveguei.”

Fernando Pessoa *in* “Mensagem” (1934)



Á minha Madrinha, Maria Isabel



## **Agradecimentos**

Ao meu curso “CMG Henrique Quirino da Fonseca” e a todos os camaradas que me acompanharam ao longo desta primeira “pernada”. Sem a sua colaboração não me teria tornado a pessoa perseverante que hoje sou, na certeza de que em certas ocasiões, a única alternativa que nos resta é sermos firmes das nossas convicções.

Ao Professor Pamies Teixeira e ao Professor Telmo Santos da Faculdade de Ciências e Tecnologia, por toda dedicação e passagem de conhecimentos tanto no âmbito dos Ensaios Não Destrutivos, como também em múltiplas áreas da Engenharia. Estou certa de que levo uma bagagem bem maior para o meu futuro enquanto profissional.

Aos Engenheiros Fernando Crivellaro, Miguel Machado e Patrick Inácio da Faculdade de Ciências e Tecnologia, por toda a disponibilidade, esclarecimento de dúvidas e apoio no laboratório de Ensaios Não Destrutivos.

Ao Sr. António Campos e aos Sr. Paulo Magalhães pelo auxílio prestado na maquinação de peças para a realização deste projeto.

À minha Mãe, Ana Alexandra, pelo adágio mais lógico de todos: Mãe é Mãe!

Ao meu Pai e ao meu Padrinho, por me ensinarem que nada nesta vida é fácil ou gratuito.

A quem sempre me segurou pela mão: a Gi, a Luísa e a Irina. Agradeço-lhes por fazerem dos meus “fardos” mais leves e sobretudo, a amizade incondicional.



## **Resumo**

A presente Dissertação de Mestrado surge no âmbito dos PROJETOS DE I&DT EMPRESAS em co-promoção Hi2TRUST, financiados pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), e consiste no desenvolvimento e validação experimental de sondas de Correntes Induzidas para inspeção de defeitos em tubos sujeitos a temperaturas elevadas ( $> 300$  °C), uma vez que não existem muitos sistemas de inspeção por Correntes Induzidas a alta temperatura nos catálogos disponíveis pelos principais fabricantes de equipamentos. A investigação foi desenvolvida nas Instalações do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-NOVA) e nas instalações do Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), co-promotor do projeto. O objetivo do trabalho concebido foi a análise de superfícies a altas temperaturas através de Correntes Induzidas e para tal, foi necessário desenvolver sondas que detetem defeitos no material de ensaio e que, simultaneamente, estejam preparadas para essas temperaturas.

A investigação decorrente do projeto abrangeu diversas etapas: levantamento do estado da arte, conceção dos modelos de análise, simulações térmicas e eletromagnéticas dos mesmos e respetiva validação experimental. Algumas das configurações das sondas concebidas apresentaram bons resultados na deteção de defeitos a altas temperaturas.

A inspeção a altas temperaturas por Correntes Induzidas pode ser aplicada na análise de diversos equipamentos dos navios da esquadra da Marinha Portuguesa que se encontrem em vida útil, permitindo detetar defeitos estruturais antes de estes constituírem um prejuízo significativo.

Palavras-Chave: Altas Temperaturas, Ensaio Não Destrutivo, Correntes Induzidas, Tubos, Sondas



## ***Abstract***

*This Master's Thesis arises from Hi2TRUST PROJECTS financed by the European Regional Development Fund (ERDF), and consists of the development and experimental validation of Eddy Current probes for inspection of defects in pipes at high temperatures (>300 °C), since there are not many Eddy Current inspection systems for high temperatures, in the catalogs of the main manufacturers. The project was developed at the Department of Mechanical and Industrial Engineering of the Faculty of Science and Technology (FCT-NOVA) and at the facilities of the Institute of Welding and Quality (ISQ), co-promoter of this project. The objective was the analysis of surfaces at high temperatures through Eddy Currents and for this, it was necessary to develop probes to detect defects in the test material and prepared for those temperatures.*

*The investigation resulting from this project had several stages: survey of the state of art, design of the analysis models, thermal and electromagnetic simulations and experimental validation. Some of the configurations of the designed probes presented plausible results in the detection of defects at high temperatures.*

*The high temperature inspection by Eddy Currents can be applied to many naval components of the Portuguese Navy's fleet, allowing to detect structural defects before they can evolve to a significant damage.*

*Key-words: High temperature, Non Destructive Tests, Eddy Currents, Pipes, Probe*



## **Índice Geral**

<b>Agradecimentos .....</b>	<b>IX</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Índice Geral.....</b>	<b>XV</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>XIX</b>
<b>Índice de Tabelas .....</b>	<b>XXV</b>
<b>Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos.....</b>	<b>XXVII</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Justificação do tema .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos da Investigação .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Estrutura de Investigação .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Revisão do Estado da Arte.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Ensaio Não Destrutivo.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Correntes Induzidas .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1. Sondas CI .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.1.1. Modo de Funcionamento .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.1.2. Modo de Receção .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.1.3. Forma.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.1.4. Tipo .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3. Ensaio Não Destrutivo a Altas Temperaturas .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.1. Líquidos penetrantes .....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.2. Raios-X .....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.3. Ultrassons .....</b>	<b>32</b>

2.3.4. Termografia .....	34
2.4. Necessidades de Inspeção por Correntes Induzidas a Alta Temperatura.....	34
2.4.1. Inspeção em linha de produção de arame e varões trefilados .....	35
2.4.2. Monitorização de propagação de fissuras em soldaduras em tubagem sob pressão (Reator de Ebulição de Água).....	39
2.4.3. Controlo de tratamento térmico.....	40
2.4.4. Controlo de defeitos em materiais compósitos.....	41
3. Conceção e Produção das Sondas de CI para Alta Temperatura.....	43
3.1. Especificidades do Material de Inspeção.....	43
3.2. Requisitos Funcionais e Desenvolvimento Conceptual das Sondas .....	47
3.2.1. Materiais utilizados na Construção dos Módulos.....	48
3.2.2. Processo de Construção do Módulo para Inspeção do Material de Base... 54	
3.2.2.1. Construção das Sondas .....	54
3.2.2.2. Construção do <i>Chassi</i> .....	57
3.2.2.3. Vista Geral do Módulo .....	59
3.2.3. Processo de Construção do Módulo para Inspeção do Cordão de Soldadura .....	61
3.2.3.1. Construção da Sonda .....	61
3.2.3.2. Construção do <i>Chassi</i> .....	63
3.2.3.3. Vista Geral do Módulo .....	65
4. Simulações Numéricas.....	67
4.1. Ensaios Preliminares .....	67
4.2. Simulações Eletromagnéticas .....	69
4.2.1. Sonda Absoluta .....	69
4.2.2. Sonda Diferencial.....	71
4.3. Simulações Térmicas .....	74

<b>5. Validação Experimental.....</b>	<b>77</b>
<b>5.1. Dispositivo Experimental .....</b>	<b>77</b>
<b>5.2. Resultados Experimentais.....</b>	<b>80</b>
<b>5.2.1. Sonda Absoluta .....</b>	<b>80</b>
<b>5.2.2. Sonda Diferencial.....</b>	<b>82</b>
<b>5.2.3. Sondas Planares de Circuito Impresso .....</b>	<b>84</b>
<b>6. Conclusão e Propostas para Investigações Futuras.....</b>	<b>89</b>
<b>6.1. Conclusão .....</b>	<b>89</b>
<b>6.2. Propostas para Investigações Futuras .....</b>	<b>90</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>93</b>
<b>Anexo A – Construção do <i>Chassi</i> para Inspeção do Material de Base .....</b>	<b>99</b>
<b>Anexo B – Construção do <i>Chassi</i> para Inspeção do Cordão de Soldadura .....</b>	<b>101</b>



## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> - Exemplos de acidentes evitáveis por END.....	2
<b>Figura 2</b> - Íman N induzindo correntes circulares num metal (adaptada) .....	9
<b>Figura 3</b> - Princípio das Correntes de <i>Eddy</i> (adaptada).....	10
<b>Figura 4</b> - Representação esquemática da sonda de Correntes Induzidas, sujeita a uma tensão elétrica $U$ [V] e percorrida por uma corrente elétrica $I$ [A] .....	11
<b>Figura 5</b> - Representação gráfica do comportamento dos materiais ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos (adaptada) .....	12
<b>Figura 6</b> - Curva de Histerese (adaptada).....	13
<b>Figura 7</b> - Efeito de Bordo.....	14
<b>Figura 8</b> - Bobina de teste a percorrer o Modelo de Condutividade .....	15
<b>Figura 9</b> - Plano de impedância elétrica das CI (adaptada) .....	16
<b>Figura 10</b> - Plano de resposta da impedância elétrica das CI.....	16
<b>Figura 11</b> - Técnica de ensaio RFT .....	18
<b>Figura 12</b> - Técnica de ensaio ACFM .....	18
<b>Figura 13</b> - <i>Magnetic Flux Leakage</i> .....	19
<b>Figura 14</b> - Comportamento das CI consoante a posição do defeito.....	20
<b>Figura 15</b> - Profundidade de penetração.....	21
<b>Figura 16</b> - Sonda absoluta.....	22
<b>Figura 17</b> - Representação esquemática do modo de operação de uma sonda diferencial. .....	23
<b>Figura 18</b> - Representação da sequência de uma inspeção com sonda diferencial e sinal gráfico de “ <i>Lissajou</i> ” .....	23
<b>Figura 19</b> - Sonda do tipo <i>bridge</i> .....	24
<b>Figura 20</b> - Comparação entre sonda <i>bridge</i> diferencial e sonda de reflexão diferencial. .....	24

<b>Figura 21</b> - Sondas de reflexão .....	25
<b>Figura 22</b> - Exemplo de sonda híbrida: <i>Split D</i> .....	26
<b>Figura 23</b> - CI no interior de tubos (adaptada) .....	28
<b>Figura 24</b> - Configurações Possíveis de sondas do tipo MWM (adaptada) .....	29
<b>Figura 25</b> - Eddy Current <i>Array</i> (adaptada) .....	29
<b>Figura 26</b> - Desenho do conjunto dos elementos ativos da sonda <i>IONic</i> .....	30
<b>Figura 27</b> - <i>Phoenix ISL SSHSC 4/10</i> – Equipamento desenvolvido pela <i>Phoenix ISL</i> que permite o contacto contínuo com superfícies até 120 °C, e o contacto num período de tempo até 10 segundos com superfícies até 200 °C com refrigeração de ar forçada.....	33
<b>Figura 28</b> - Sondas para alta temperatura desenvolvidas pela <i>Olympus</i> que suportam temperaturas até 500 °C, mas apenas em contactos durante um curto intervalo de tempo .....	33
<b>Figura 29</b> - Sistema <i>TempMasterSuite3</i> sugerido pela <i>Eclipse</i> . O fabricante fornece ainda um agente acoplante resistente até 350 °C em contacto contínuo .....	34
<b>Figura 30</b> - Inspeção em linha de produção de arame .....	36
<b>Figura 31</b> - Inspeção em linha de produção de arame (adaptada) .....	36
<b>Figura 32</b> - Inspeção em linha de produção de arame (adaptada) .....	37
<b>Figura 33</b> - Classificação dos sinais em categorias .....	37
<b>Figura 34</b> - Configuração do sistema de teste através de CI .....	38
<b>Figura 35</b> - Equipamento <i>EDDY CHECK</i> do fabricante <i>Prüftechnik</i> .....	38
<b>Figura 36</b> - Equipamento <i>HOTdiscover</i> da <i>ISEND</i> .....	39
<b>Figura 37</b> - Sistema do equipamento <i>HOTdiscover</i> da <i>ISEND</i> (adaptada) .....	39
<b>Figura 38</b> - Desenvolvimento de microestrutura do material e sinal do sensor durante a endurecimento da bainite por <i>Klümper-Westkamp et al.</i> .....	40
<b>Figura 39</b> - Protótipo de <i>MWM-Array</i> de 7 canais. Sensor testado a 850 ° C sem nenhuma degradação observada.....	41
<b>Figura 40</b> - Liga de aço classe 16Mo3 .....	43

<b>Figura 41</b> - Diagrama de Fase do aço .....	44
<b>Figura 42</b> - Condutividade elétrica do aço em função da temperatura.....	45
<b>Figura 43</b> - Processo de eletroerosão realizado no aço carbono 16Mo3 .....	46
<b>Figura 44</b> - Liga de aço classe 16Mo3 colocado na mesa de inspeção .....	47
<b>Figura 45</b> - Aço 316L .....	48
<b>Figura 46</b> - Dimensões características do perfil <i>Bosch</i> 20x20 .....	49
<b>Figura 47</b> - Laminado de mica MIC-99.....	49
<b>Figura 48</b> - Isolantes cerâmicos Macor® .....	50
<b>Figura 49</b> - Núcleos ferromagnéticos <i>Fair-Rite</i> .....	50
<b>Figura 50</b> - Núcleo ferromagnético impresso em 3D .....	51
<b>Figura 51</b> - Rolo de fio de cobre <i>Block-trafo</i> CUL 100/0.15 .....	51
<b>Figura 52</b> - Ácido polilático para impressão 3D .....	52
<b>Figura 53</b> - Álcool polivinílico para o suporte de peças durante as impressões 3D.....	52
<b>Figura 54</b> - Sensor de temperatura termopar tipo K.....	53
<b>Figura 55</b> - Íman e respetivas dimensões .....	53
<b>Figura 56</b> - Família dos conectores multipolares para conexão das sondas ao equipamento medido .....	54
<b>Figura 57</b> - Vista em corte da sonda absoluta projetada.....	55
<b>Figura 58</b> - Processo de construção da sonda absoluta.....	56
<b>Figura 59</b> - Sonda diferencial <i>bridge</i> .....	57
<b>Figura 60</b> - Desenho técnico do <i>chassi</i> da sonda (3 vistas necessárias e suficientes)...	58
<b>Figura 61</b> - Perspetiva tridimensional do <i>chassi</i> da sonda .....	58
<b>Figura 62</b> - Perspetiva tridimensional do <i>chassi</i> da sonda integrado no suporte fornecido pelo ISQ.....	59
<b>Figura 63</b> - Vista geral do módulo da sonda para inspeção do material de base e mesa de ensaio prontos a serem utilizados .....	60

<b>Figura 64</b> - Detalhe do módulo da sonda para inspeção do material de base integrado no protótipo .....	60
<b>Figura 65</b> - Maquinagem do isolante térmico cerâmico retangular.....	62
<b>Figura 66</b> - Processo de construção da sonda para inspecionar o cordão de soldadura.	63
<b>Figura 67</b> - Desenho técnico do chassi da sonda (3 vistas necessárias e suficientes)..	64
<b>Figura 68</b> - Perspetiva tridimensional do <i>chassi</i> da sonda .....	64
<b>Figura 69</b> - Vista geral do módulo da sonda para inspeção do cordão de soldadura e mesa de ensaios prontos a serem utilizados.....	65
<b>Figura 70</b> - Detalhe do módulo da sonda para inspeção do cordão de soldadura integrado no protótipo .....	65
<b>Figura 71</b> - Ensaios realizados para verificação da operacionalidade da sonda concebida para inspeção do cordão de soldadura .....	68
<b>Figura 72</b> - Resultado do ensaio com início do varrimento à esquerda do defeito .....	68
<b>Figura 73</b> - Resultado do ensaio com início do varrimento à direita do defeito .....	69
<b>Figura 74</b> - Resultado do ensaio realizado com o varrimento para o qual foi desenvolvida a sonda .....	69
<b>Figura 75</b> - Desenho esquemático da sonda absoluta e do aço detentor do defeito circular realizado no software <i>Ansys</i> .....	70
<b>Figura 76</b> - Simulação a 100 kHz com defeito circular de diâmetro 2 mm.....	70
<b>Figura 77</b> - Desenho esquemático da sonda diferencial e do aço detentor do defeito circular realizado no <i>software Ansys</i> .....	71
<b>Figura 78</b> - Representação esquemática do varrimento linear efetuado pela sonda diferencial ao longo do defeito .....	73
<b>Figura 79</b> - Simulação a 100 kHz com defeito circular de diâmetro 2 mm.....	74
<b>Figura 80</b> - Protótipo das sondas concebidas para inspeção do material de base .....	75
<b>Figura 81</b> - Resultado da simulação térmica elaborada na ferramenta <i>Solidworks</i> .....	76
<b>Figura 82</b> - Dispositivo Experimental .....	77

<b>Figura 83</b> - Dispositivo Experimental .....	78
<b>Figura 84</b> - Aquisição de sinal.....	79
<b>Figura 85</b> - Preparação e análise térmica do ensaio laboratorial .....	80
<b>Figura 86</b> - Resultados obtidos para a sonda absoluta ao passar duas vezes pelo defeito retangular orientado 30° em relação à horizontal ( <i>Mentor EM Portable Eddy Current Tester</i> ).....	81
<b>Figura 87</b> - Passagem única por três defeitos sucessivos .....	82
<b>Figura 88</b> - Resultados obtidos para o defeito circular de 1 mm de raio e 0.5 mm de profundidade a 300°C .....	83
<b>Figura 89</b> - <i>Scanned surface</i> do tubo com o defeito circular padrão.....	84
<b>Figura 90</b> - Três formatos das <i>Print Circuit Board</i> .....	85
<b>Figura 91</b> - Sonda PCB com configuração <i>bridge</i> .....	85
<b>Figura 92</b> - Sistema laboratorial completo para inspeção do tubo a altas temperaturas ....	86
<b>Figura 93</b> - Resultados dos ensaios realizados a frio e a quente .....	86
<b>Figura 94</b> - Monitorização da temperatura por infravermelho a 340 °C .....	87



## **Índice de Tabelas**

<b>Tabela 1</b> - Pontos Curie de alguns elementos químicos .....	32
<b>Tabela 2</b> - Composição da liga de aço classe 16Mo3 (Valores lidos em %). .....	43
<b>Tabela 3</b> - Propriedades físicas e mecânicas da liga de aço classe 16Mo3 .....	44
<b>Tabela 4</b> - Propriedades térmicas a 400 °C da liga de aço classe 16Mo3.....	44
<b>Tabela 5</b> - Propriedades elétricas da liga de aço classe 16Mo3.....	45
<b>Tabela 6</b> - Defeito por eletroerosão utilizado nos ensaios experimentais .....	46



## **Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos**

$\mu$  - Permeabilidade Magnética [H/m]

$\sigma$  - Condutividade Elétrica [S/m]

$f$  - Frequência [Hz]

$\vec{Z}$  - Vetor de Impedância Elétrica [ $\Omega$ ]

$I$  - Intensidade da Corrente Elétrica [A]

$U$  - Tensão da Corrente Elétrica [V]

$q$  - Carga [C]

$\vec{H}$  - Vetor do Campo Magnético [A/m]

$\vec{B}$  - Densidade de Fluxo Magnético [T]

$\vec{M}$  - Vetor de Magnetização [A/m]

$\emptyset$  - Ângulo de Fase [°]

$x_L$  - Componente Indutiva da Impedância Elétrica [H]

$R$  - Componente Resistiva da Impedância Elétrica [ $\Omega$ ]

$\chi_m$  - Suscetibilidade Magnética [adimensional]

$\delta$  - Profundidade Máxima de Penetração [m]

$\vec{j}$  - Vetor da Densidade de Corrente Elétrica [A/m<sup>2</sup>]

$T_C$  - Temperatura de Curie [K]

AC - *Alternating Current*

ACFM - *Alternating Current Field Measurement*

ASNDT - *American Society for Non Destructive Tests*

CA - Corrente Alternada

CI - Correntes Induzidas

ECA - *Eddy Current Array*

ECT - *Eddy Current Testing*

EMAT - *Electromagnetic Acoustic Transducer*

EMUS - *Electromagnetic Ultrasonic*

EN - *European Norm*

END - *Ensaio Não Destrutivo*

FCT - *Faculdade de Ciências e Tecnologia*

FEM - *Força Eletromotriz*

GMR - *Giant Magneto Resistance*

IACS - *International Annealed Copper Standard*

IEC - *International Electrotechnical Commission*

ISQ - *Instituto de Soldadura e Qualidade*

IV - *Inspeção Visual*

MAG - *Metal Active Gas*

MWM - *Meandering Winding Magnetometer*

NDT - *Non Destructive Tests*

PCB - *Printed Circuit Board*

PEC - *Pulsed Eddy Currents*

PLA - *Polylactic Acid*

PVA - *Polyvinyl Alcohol*

RFT - *Remote Field Testing*

ROV - *Remotely Operated Vehicle*

SI - *Sistema Internacional*

SFL - *Soldadura por Fricção Linear*

SCGS - *Sistema Centímetro-Grama-Segundo*

SQUID - *Superconducting Quantum Interference Device*

TIG - *Tungsten Inert Gas*

TOFD - *Time of Flight Diffraction*

US - Ultra-sons

ZTA - Zona Termicamente Afetada



## **1. Introdução**

### **1.1. Justificação do tema**

Os Ensaio Não Destrutivos (END) ou *Non Destructive Tests* (NDT) consistem em inspeções realizadas em materiais, de modo a verificar a existência de descontinuidades/defeitos que os possam integrar, sem que estes se danifiquem ou alterem as suas propriedades originais. Este tipo de ensaios constitui uma das principais ferramentas na manutenção e controle de condição dos materiais, permitindo aumentar a sua fiabilidade e prevenir custos acrescidos. Os END subdividem-se em várias áreas de estudo tais como o ensaio visual, a radiografia, a termografia, a análise de vibrações e o método das Correntes Induzidas, no qual se centraliza a presente dissertação. A base de funcionamento do método de inspeção por Correntes Induzidas explica-se à luz da Lei de Faraday ou Lei da Indução Eletromagnética postulada por M. Faraday e posteriormente reforçada por F. Neumann e H. Lenz. Para a deteção dos defeitos que integram o material é utilizada uma sonda incorporada por uma bobina sujeita a uma corrente alternada (CA) que, por sua vez, percorre o material no caso de este ser condutor elétrico. Na possibilidade de existirem descontinuidades, a circulação das Correntes Induzidas no material (também denominadas por Correntes de *Eddy* ou Correntes de *Foucault*) sofre alterações, originando um decréscimo na intensidade do campo magnético e consequente variação da impedância elétrica aos terminais da bobina. O método das correntes induzidas como técnica de inspeção dos materiais apresenta bastante eficácia na deteção de defeitos à superfície dos materiais e já tem vindo a ser alvo de estudo, contudo face à inexistência de avanços tecnológicos significativos e de informação detalhada relativamente às inspeções em alta temperaturas ( $\gg 100$  °C) desenvolveram-se investigações que se enquadram na conceção de bobinas em função do tipo de defeito que se pretende analisar, sendo a temperatura a principal variável em estudo. Para análise de materiais em condições de temperatura elevada, é necessário o dimensionamento de sondas equipadas com sistemas de refrigeração para diminuir o efeito térmico que nelas é provocado e ter em linha de conta esse mesmo efeito na impedância das sondas. A pertinência desta investigação e consequente procura de soluções tecnológicas neste âmbito compreende-se pelas necessidades industriais com exigentes requisitos de

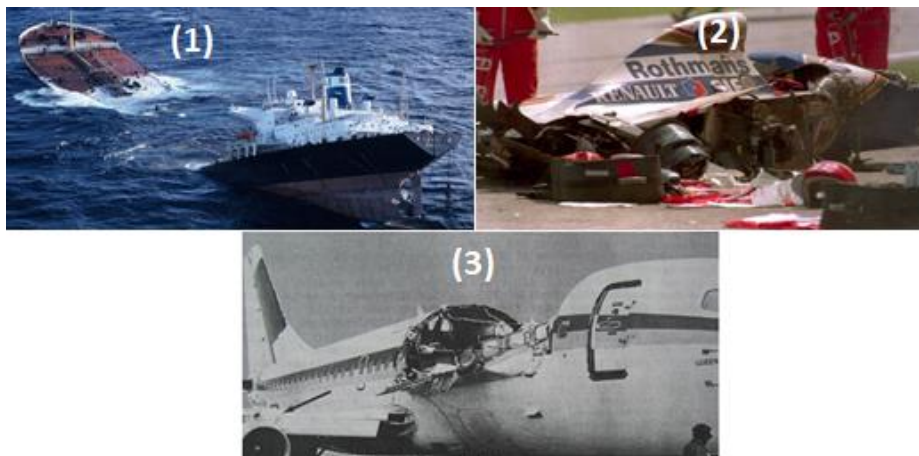
segurança e fiabilidade, onde muitas vezes os equipamentos são inspecionados em funcionamento, ou mesmo para análise da qualidade dos produtos fabricados. Por outro lado, a análise de defeitos em superfícies a altas temperaturas pode desempenhar funções de relevo na gestão da manutenção dos navios da esquadra dos da Marinha de Portuguesa, na medida em que permitem prever antecipadamente defeitos estruturais significativos e consequentemente provocar danos que envolvam custos de reparação elevados.

Eis alguns exemplos de acidentes evitáveis por Ensaio Não Destrutivo:

(1) O naufrágio do petroleiro *Prestige* ao largo da Galiza, que poderá ter resultado da acumulação de defeitos estruturais no casco e da corrosão não controlada das anteparas dos tanques de lastro. Do acidente, resultou o derrame de cerca de 50 000 toneladas de combustível das 77 000 toneladas que transportava. (novembro, 2002)

(2) O acidente mortal de Ayrton Senna, enquanto participava no Grande Prémio de *San Marino* em Ímola (Itália), resultante do choque entre seu carro e uma barreira de betão. O veio de direção possuía defeitos de soldadura, provocando a sua fratura. (maio, 1994)

(3) O acidente de aviação com *Boeing 737-100* da *Aloha Airlines* resultante da danificação da fuselagem por fadiga, levando a que parte da mesma se destacasse do avião em pleno voo. (abril, 1988)



**Figura 1** - Exemplos de acidentes evitáveis por END.

1) Naufrágio do Navio *Prestige*. 2) Carro dirigido por Ayrton Senna no GP *San Marino*. 3) *Boeing 737-100* da *Aloha Airlines*.

## **1.2. Objetivos da Investigação**

Existem diversas soluções para a inspeção de tubagens, mas poucas com recurso às Correntes Induzidas para condições de operação a alta temperatura. Deste modo, com a presente dissertação pretende-se a deteção de defeitos em superfícies de temperaturas elevadas ( $> 300$  °C) com sondas de inspeção isoladas termicamente. Embora as propriedades eletromecânicas do material (aço) a inspecionar não se alterem significativamente com as temperaturas em estudo nesta investigação, o facto de as sondas possuírem isolamento térmico acresce a dificuldade de deteção do sinal ao passar pelos defeitos devido a uma distância maior entre a sonda em si e o material de inspeção.

## **1.3. Estrutura de Investigação**

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos ao longo dos quais se descrevem os processos de conceção de sondas de Correntes Induzidas para inspeção de superfícies a altas temperaturas. No capítulo 2, descreve-se o produto resultante do do estado da arte relativo aos Ensaios Não Destrutivos, através de pesquisa bibliográfica. Posteriormente, no capítulo 3, conceberam-se alguns protótipos de sondas para inspeção de uma liga de aço a altas temperaturas, seguindo um racional proveniente das pesquisas efetuadas. No capítulo 4 realizaram-se várias simulações térmicas e eletromagnéticas, seguidas da validação experimental em ambiente laboratorial detalhada no capítulo 5. O capítulo 6 diz respeito às conclusões finais resultantes deste projeto.



## **2. Revisão do Estado da Arte**

*“A aplicação de metodologias de teste para analisar um objeto, material ou sistema, sem prejuízo das suas propriedades, performance ou utilidade futura”*

*American Society for Nondestructive Testing (ASNDT)*

O presente capítulo é o produto da pesquisa bibliográfica referente à temática dos Ensaio Não Destrutivo por Correntes Induzidas, com particular incidência sobre a inspeção de materiais com sondas resistentes a alta temperatura. Embora a técnica das Correntes Induzidas já tenha vindo a ser alvo de muita investigação, a inspeção em condições de temperatura extrema ainda se apresenta como um desafio a ultrapassar, dado a escassez de informação técnica, desenvolvimentos tecnológicos e equipamentos comerciais. Nesse sentido, este capítulo resume e consolida a informação necessária para o desenvolvimento de novas investigações tecnológicas e científicas no âmbito da presente dissertação.

### **2.1. Ensaio Não Destrutivo**

Os Ensaio Não Destrutivo são técnicas preditivas utilizadas na inspeção da integridade de diferentes tipos de material que compõem os equipamentos e os seus componentes, procurando verificar a presença de descontinuidades, defeitos, fissuras, poros e impurezas sem que estes sofram alterações a nível das suas propriedades originais e do seu desempenho. Estes processos assumem um papel relevante na monitorização da qualidade e controlo de condição dos materiais que exigem elevado grau de segurança e fiabilidade, evitando falhas catastróficas como perda de vidas humanas e reduzindo custos de manutenção. No contexto económico e social contemporâneo, as técnicas END têm sido uma mais-valia para as indústrias, uma vez que a relação entre a qualidade e a produtividade não fica comprometida, ou seja, as cadeias de produção continuam a obter resultados quantitativos satisfatórios aos quais se acresce o fator qualidade oriundo dos Ensaio Não Destrutivo implementados. Assim sendo, as técnicas NDT que até então se restringiam a indústrias de elevados requisitos de fiabilidade, como o caso da aeronáutica, aeroespacial e nuclear, têm-se alastrado de forma generalizada a outro tipo indústrias, concorrendo para mais um fator de competição entre as mesmas. [1] [2]

Os Ensaios Não Destrutivos podem aplicar-se em diferentes fases da produção de um dado equipamento ou componente: antes (controlo do material de base), durante (controlo da forma de produção) e após (controlo da qualidade do produto final), assim como durante o seu tempo de serviço, permitindo realizar atempadamente correções preventivas de danos significativos provocados pelo seu funcionamento. Outras aplicações dos Ensaios Não Destrutivos conotam-se com a análise das propriedades dos materiais e metrologia, tais como a velocidade do som e a condutividade elétrica. Existem diversas técnicas no âmbito dos Ensaios Não Destrutivos consoante o princípio físico que aplicam, sendo os principais métodos a radiologia, a inspeção visual (IV), as Correntes Induzidas (CI) e os ultrassons (US). [3]

A radiologia assume algumas variantes tais como a radiografia por raios-Xe por raios- $\gamma$ , a tomografia computadorizada, e a radiografia digital. Quando um feixe de radiação incide numa superfície, uma parte é transmitida e outra é absorvida ou dispersada. Ora quando o material apresenta descontinuidades, por inerência, conterà variações de espessura que, por sua vez, provocam variações na intensidade da componente transmitida pelo feixe de radiação incidente, permitindo assim a deteção de defeitos. [4] [5]

Os ultrassons (US) caracterizam-se por ondas sonoras com frequência superior a 20 kHz, valor limite perceptível pelo ser humano. Para a deteção de defeitos é utilizado um transdutor que, por efeito piezoelétrico, produz uma onda ultrassônica que vai percorrer a superfície a analisar. Seguidamente, efetua-se a verificação do eco que regressa pelo mesmo transdutor ou por outro diferente. Algumas variantes do método são os US convencionais de eco pulsado, US com acoplante de ar, TOFD, *Phased Array* e o *Creeping*. [6]

A inspeção visual (IV) é o método mais elementar que existe, consistindo apenas na observação de defeitos facilmente identificáveis no material, tendo em conta a sua limpeza prévia, condições de luminosidade asseguradas e ferramentas de observação adequadas consoante o tipo de inspeção visual a realizar. Este método pode ser suficiente consoante o objetivo da análise efetuada, contudo precede sempre todas as inspeções END mais aprofundadas. A inspeção visual subdivide-se em três categorias: a inspeção simples ou direta efetuada a olho nu; a inspeção assistida efetuada com recurso a ferramentas que ampliam os potenciais defeitos a analisar, como por exemplo os

microscópios e lupas; e a inspeção remota efetuada quando se pretende analisar zonas inacessíveis, como zonas interiores de peças, recorrendo-se a ferramentas como o endoscópio e o boroscópio. Algumas variantes da inspeção visual são as Partículas Magnéticas, os Líquidos Penetrantes, a Termografia, a Interferometria Holográfica e a Endoscopia. O método das Partículas Magnéticas consiste em detetar discontinuidades por atração dessas mesmas partículas para zonas de campos de fuga resultantes dos defeitos no material, quando posto em contacto com um campo magnético. Este método subdivide-se em 6 fases, sendo elas a limpeza do material a analisar, a sua magnetização, a aplicação de partículas magnéticas, a inspeção propriamente dita, a desmagnetização e a limpeza dos resíduos de partículas magnéticas. O método dos Líquidos Penetrantes aplica um líquido à superfície de um material não poroso, que por sua vez, penetra e preenche por capilaridade defeitos abertos à superfície. Como em qualquer END, a superfície deve ser previamente limpa e apresentar condições de luminosidade. Após a fase de penetração, retira-se o excesso de líquido à superfície podendo aplicar-se de seguida um revelador (produto absorvente), cujo papel é fazer sobressair a zona do defeito. A Termografia é um método que permite analisar a temperatura de um dado material através da captação de radiação infravermelha que ela emite. Quando existem defeitos no material o fluxo de calor altera-se, provocando contrastes de temperatura. A Interferometria Holográfica consiste num método que permite detetar alterações na superfície de um material quando sujeito à vibração ou deformações. Para o efeito, recorre-se a um holograma. A Endoscopia consiste na inspeção visual remota em zonas inacessíveis, tais como cavidades e interiores de objetos. [3] [4] [5] [7]

Para além dos END apresentados, existem ainda alguns ensaios que resultam da fusão de técnicas de END individuais que é o caso dos EMAT, US por laser e os *thermosonics*.

## **2.2. Correntes Induzidas**

As primeiras investigações subjacentes às Correntes de *Eddy* surgem aquando da unificação da eletricidade e do magnetismo por Hans Christian Ørsted, em 1820. Embora Ørsted tivesse concluído que um fio ao ser percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético, foi André M. Ampère que deduziu esse campo a partir da distribuição de corrente elétrica estacionária, formulando a conhecida Lei de Ampère. Esta lei apenas

tem utilidade no caso de a distribuição possuir algum tipo de simetria. Quando não existe simetria é utilizada a Lei de Bio-Savart formulada por Jean-Baptiste Biot e Félix Savart, que por sua vez, permite calcular um campo magnético a partir de uma distribuição de corrente estacionária de forma mais abrangente. Em 1824, François Arago constatou também que os corpos mais condutores podiam ser magnetizados. Em 1831, Michael Faraday e Joseph Henry descobriram separadamente o fenómeno da Indução Eletromagnética, que traduz a produção de corrente elétrica a partir da variação de campos magnéticos. Ou seja, a variação do número de linhas de um campo magnético que atravessa um circuito elétrico fechado gera corrente elétrica. Três anos mais tarde, Heinrich Lenz postulou a conhecida Lei de Lenz, que afirma que aumentando o fluxo magnético, a corrente gerada provoca um campo magnético no sentido ao oposto ao do fluxo magnético da fonte. Já quando o fluxo magnético diminui, a corrente provoca um campo magnético no mesmo sentido ao do fluxo magnético da fonte. Em 1865, James C. Maxwell fundiu as leis da eletricidade e do magnetismo dando origem às equações de Maxwell. Como resultado destas equações, Maxwell estabeleceu que a variação de campos elétricos gera campos magnéticos. A primeira abordagem das Correntes de *Eddy* em Ensaio Não Destrutivo surge em 1879 quando David E. Hughes utiliza estes princípios para realizar testes em metalurgia, provando que uma corrente elétrica alternada ao atravessar uma bobina em contacto com material de diferente permeabilidade magnética  $\mu$  [H/m] e condutividade  $\sigma$  [S/m], origina uma variação de impedância elétrica  $\vec{Z}$  [ $\Omega$ ].

O princípio das Correntes de *Eddy* pode ser facilmente ilustrado por um íman N que induz correntes circulares num metal que se move com uma velocidade  $\vec{v}$  [m/s] para a direita, conforme a Figura 2. À medida que o material se movimenta, o fluxo magnético que atravessa o metal vai-se modificando e, na zona metálica sob o bordo condutor (1) do íman N, o campo magnético  $H$  [A/m] que atravessa o metal vai aumentando assim que se vai aproximando do íman ( $\frac{dH}{dt} > 0$ ). À luz da lei de Faraday<sup>1</sup>, este aumento induz um

---

<sup>1</sup>A lei de Faraday ou lei da Indução Eletromagnética relaciona a força eletromotriz  $\varepsilon$  gerada entre os terminais de um condutor sujeito à variação de fluxo magnético  $\Phi$  [Wb], com o módulo da variação do fluxo em função de um intervalo de tempo em que esta variação acontece. A força eletromotriz (FEM) expressa-se matematicamente por  $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$ . A direção da FEM é dada pela lei de Lenz: o sinal negativo da expressão diz que a corrente induzida tem um sentido que gera um fluxo induzido oposto ao fluxo indutor.

campo elétrico circular à volta das linhas do campo magnético no sentido anti-horário, que pela lei de Lenz cria o seu próprio campo magnético (seta azul dirigida para cima na Figura 2) que se opõe ao campo do íman N. De forma semelhante, no bordo oposto (2) o campo magnético que atravessa o metal decresce, provocando corrente no sentido horário ( $\frac{dH}{dt} < 0$ ) e um campo magnético (seta azul dirigida para baixo), que origina uma força retardadora, tal como na situação anterior. Por outras palavras, pode dizer-se que os eletrões que se encontram no metal movimentam-se para a direita pelo que o campo magnético exerce uma força lateral sobre eles, graças à Força de Lorentz uma vez que a velocidade  $\vec{v}$  [m/s] dos eletrões se direciona para a direita e o campo magnético  $H$  se direciona para baixo. De acordo com a regra da mão direita, a força de Lorentz que atua nas cargas positivas direciona-se para trás<sup>2</sup>. Isto origina uma corrente elétrica  $I$  [A] para a retaguarda, que circula no sentido horário na parte direita do metal e no sentido anti-horário na parte esquerda. Os eletrões, portadores de carga móvel no metal, possuem uma carga  $q$  [C] negativa e o seu movimento é oposto à direção convencional representada na Figura 2. Conforme a lei de Ampère, cada uma dessas correntes circulares provoca um campo magnético (setas azuis) que consoante a lei de Lenz, se opõe ao campo magnético que o provocou. [8]

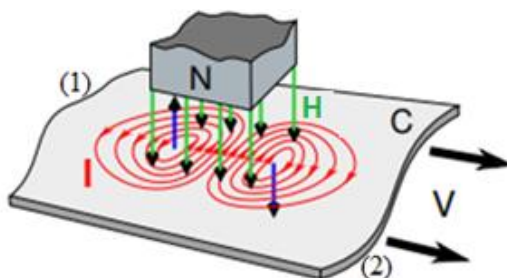


Figura 2 - Íman N induzindo correntes circulares num metal (adaptada). [8]

<sup>2</sup>A força de Lorentz é a força exercida numa partícula carregada devido à existência de um campo eletromagnético. Pode ser considerada como a sobreposição da força devida ao campo elétrico  $\vec{E}$  [N/C] e da força devida ao campo magnético  $\vec{H}$ .

Matematicamente, a força de Lorentz é dada pela expressão:

$$F_{Lorentz} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{H}), \text{ onde:}$$

$q$  - Carga [C];  $\vec{E}$  - Campo elétrico [N/C];  $\vec{H}$  - Campo magnético;  $\vec{v}$  - Velocidade dos eletrões.

Na prática, quando a bobina espiral helicoidal de uma sonda fica sujeita a uma corrente elétrica alternada, cria-se um campo magnético primário  $H_p$  [A/m]<sup>3</sup> que, por sua vez, induz uma corrente elétrica num material condutor elétrico e/ou magnético colocado nas suas proximidades. A corrente elétrica induzida no material condutor cria um campo magnético secundário  $H_s$  que se opõe a  $H_p$  e induz uma corrente na bobina que integra a sonda. Na verdade, tudo se resume a um transformador elétrico, em que a bobina de excitação é o enrolamento primário e o material condutor é o enrolamento secundário. No caso de existir algum defeito nesse material a corrente induzida apresentará mais dificuldade em circular, provocando a diminuição de  $H_s$ . Esta diminuição vai repercutir-se no  $H_p$  do enrolamento primário no qual se efetuam as medições indiretas de  $H_s$  com base na impedância elétrica dos seus terminais.

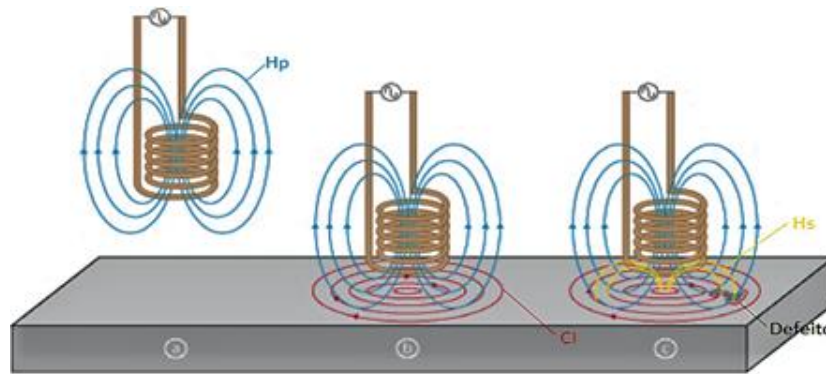
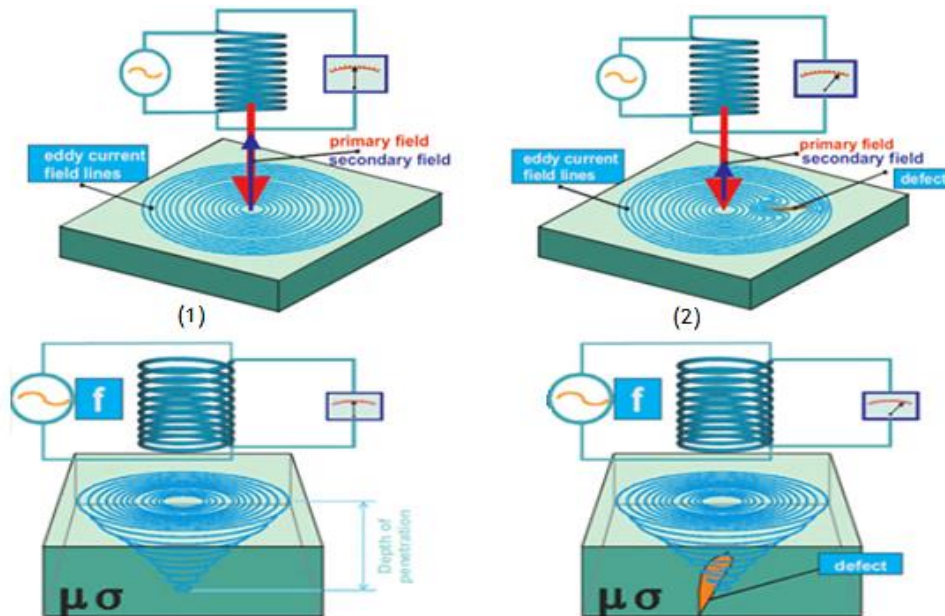


Figura 3 - Princípio das Correntes de Eddy (adaptada). [9]

Aplicando a designação correta ao método das Correntes Induzidas, esta deveria ser denominada por “Tensões Induzidas” já que estas não dependem das propriedades do material e dos seus possíveis defeitos. As tensões aparecem sempre no meio material e podem ou não provocar correntes elétricas, consoante a condutividade elétrica  $\sigma$  do mesmo. As correntes induzidas circulam perpendicularmente a  $H_p$  e  $H_s$ , e paralelamente à superfície do meio material. O método pode ser aplicado a materiais ferromagnéticos ou não ferromagnéticos, desde que estes sejam condutores elétricos. Além da deteção de defeitos, as Correntes Induzidas permitem ainda verificar a dureza e a condutividade de certos materiais e ainda realizar a medição de espessura de camadas de materiais não condutores, como tintas e outros revestimentos superficiais. O comportamento das

<sup>3</sup>O campo magnético primário criado pela bobina possui a mesma frequência que a corrente elétrica alternada a que fica sujeita.

correntes induzidas depende de diversas variantes, sendo estas a frequência de excitação, a permeabilidade magnética do material a analisar, a sua condutividade elétrica, o efeito de bordo e o *lift-off*<sup>4</sup>. [5]



**Figura 4** - Representação esquemática da sonda de Correntes Induzidas, sujeita a uma tensão elétrica  $U$  [V] e percorrida por uma corrente elétrica  $I$  [A]. [10]

1) O material não possui defeitos. 2) O material possui um defeito.

A permeabilidade magnética  $\mu$  [H/m] é a capacidade de um material originar um campo magnético e define-se matematicamente<sup>5</sup>, como produto entre a permeabilidade no vácuo  $\mu_0$ <sup>6</sup>, e a permeabilidade relativa  $\mu_r$ . A permeabilidade magnética é uma constante de proporcionalidade que relaciona a indução magnética ( densidade de fluxo magnético) num ponto de um meio material, em função do campo magnético que existe nesse ponto, sendo a sua expressão matemática dada por  $\mu = \frac{B}{H}$ , em que  $B$  [T] representa a densidade de fluxo magnético no material e  $H$  [A/m] representa a intensidade do campo magnético exterior aplicado. Quanto maior a permeabilidade magnética, maior é a capacidade de induzir um campo magnético. [11] Nos materiais ferrosos, como por exemplo o aço ou ligas de níquel e cobalto, a permeabilidade relativa  $\mu_r$  é maior que a

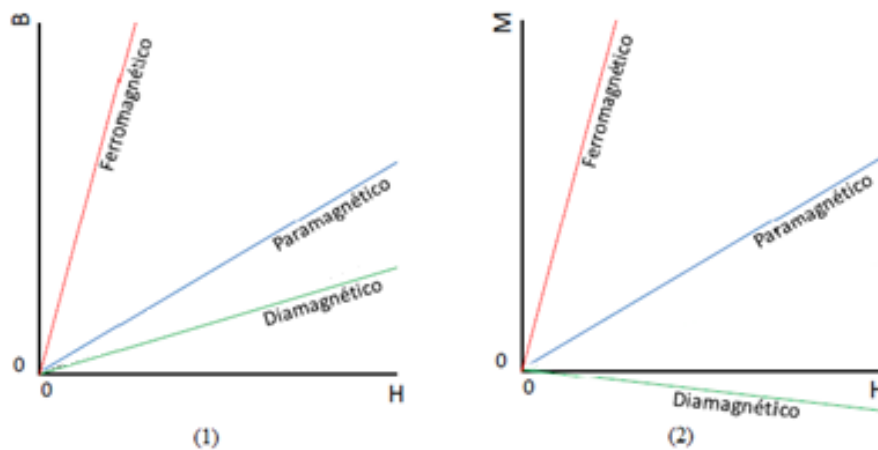
<sup>4</sup> O *lift-off* corresponde à distância entre a bobina e o material a analisar.

<sup>5</sup>  $\mu = \mu_0 \times \mu_r$ .

<sup>6</sup> A permeabilidade magnética do vácuo, também conhecida como constante magnética é definida por  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T.m.A^{-1}$  (ou H/m).

unidade ( $\mu_r > 1$ ) e nos não ferrosos, como o alumínio, cobre, latão ou aços inoxidáveis austeníticos, a permeabilidade relativa é a mesma que no ar ( $\mu_r \approx 1$ ).

Existem uma série de fatores que condicionam a permeabilidade magnética tais como a composição química, tratamento térmico e dureza. Os materiais podem ser classificados em 3 categorias distintas: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Um material diamagnético possui uma permeabilidade relativa menor que a unidade ( $\mu_r < 1$ ), suscetibilidade magnética  $X_m$  menor que zero ( $X_m < 0$ )<sup>7</sup> e amplitude do campo magnético induzido  $B$  menor que a do vácuo. Por sua vez, o paramagnetismo é a capacidade dos momentos se alinharem quando sujeitos a um campo magnético externo. Possui  $\mu_r > 1$ ,  $X_m > 0$  e amplitude do campo magnético induzido  $B$  maior que a do vácuo.



**Figura 5** - Representação gráfica do comportamento dos materiais ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos. (adaptada). [12]

1)  $B \times H$ . 2)  $M \times H$ .

Onde,

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2.1)$$

Num material ferromagnético, a magnetização  $M$  [A/m] é consideravelmente maior do que nos materiais paramagnéticos e diamagnéticos e a relação entre  $M$  e  $H$  não é linear. Conforme a Figura 6, à medida que  $H$  aumenta,  $M$  vai aumentando mais gradualmente,

<sup>7</sup>A suscetibilidade magnética  $X_m$  mede a capacidade de um material em magnetizar-se sob a ação de um campo magnético ao qual este é submetido.

atingindo um ponto em que se mantém constante, ou seja atinge a saturação. No entanto, se H diminuir, a magnetização não retorna pelo mesmo trajeto que tinha seguido até à saturação. Se for levada até a saturação contrária e seguidamente até ao ponto de saturação anterior, forma uma curva designada por Curva de Histerese, que descreve o comportamento da magnetização em função do campo para cada material. [2] [12]

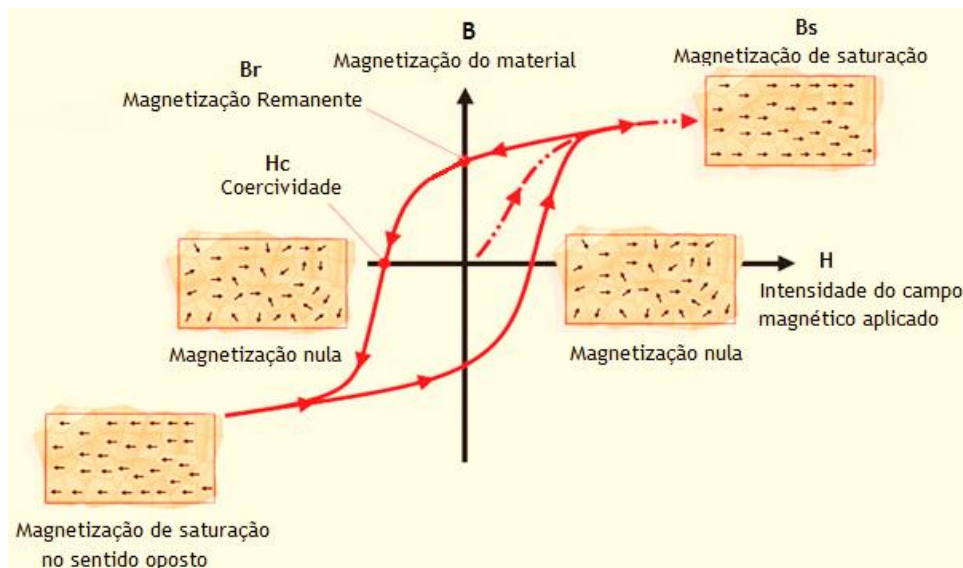
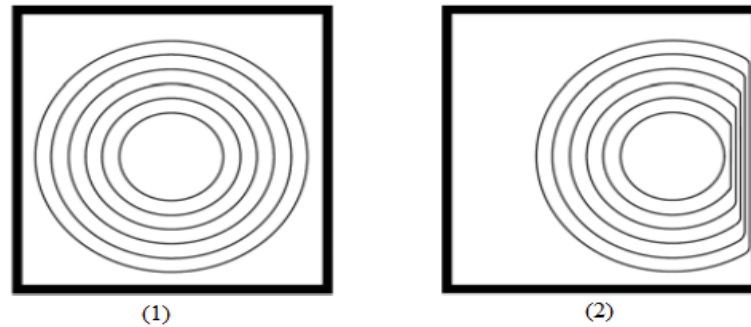


Figura 6 - Curva de Histerese (adaptada). [13]

A condutividade elétrica  $\sigma$  [S/m] de um material é a sua capacidade de conduzir ou transmitir corrente elétrica. Quanto maior a condutividade elétrica  $\sigma$ , maior será a densidade de corrente para uma dada diferença de potencial aplicada. Os materiais classificam-se consoante a sua condutividade, podendo ser condutores (os metais são os condutores de excelência), semicondutores e isolantes ou dielétricos. Para a geração de correntes induzidas o material tem de ser necessariamente condutor. Sob o ponto de vista científico, o valor da condutividade elétrica depende da capacidade que os eletrões possuem para se moverem dentro da rede molecular do material. Por exemplo, o cobre permite o movimento livre dos eletrões dentro da sua rede, pelo que é altamente condutor. Quando os eletrões são mantidos firmes dentro da estrutura molecular do material, possuem um baixo nível de condutividade elétrica, sendo necessário níveis significativos de energia para os libertar. [14] [15]

O efeito de bordo é um fenómeno que ocorre quando a sonda de inspeção se aproxima das extremidades da amostra a analisar, provocando distorções nas correntes

semelhantes às provocadas pela existência de defeitos, uma vez que a permeabilidade magnética do ar passa a interferir na forma como as linhas de campo incidem na sonda. Por outras palavras, pode dizer-se que as correntes induzidas se comportam como um fluido compressível quando atingem os bordos da amostra. Este fenómeno tem de ser tido em linha de conta, uma vez que os defeitos próximos dos bordos podem ser dissimulados, já que este provoca sinais de grande amplitude. [15]



**Figura 7** - Efeito de Bordo. [4]

- 1) Comportamento das CI antes de intersectar os bordos. 2) Comportamento das CI quando intersectam um dos bordos.

O *lift-off* corresponde à distância entre a bobina e a amostra a analisar. O seu efeito é a variação da posição da sonda em relação à amostra a inspecionar que, por sua vez, origina variação de impedância. Quando esta variação é superior à variação provocada pela existência de defeitos, a deteção dos mesmos torna-se difícil (ruído do *lift-off*), podendo mascarar informações relevantes ao ensaio. Mesmo quando a distância entre a bobina e a amostra é suficientemente grande a ponto de não induzir correntes no material, a bobina sujeita a uma corrente alternada terá um valor de impedância associado. Este efeito tem particular realce na análise de amostras com formatos complexos devido à diminuição da sensibilidade do ensaio face às variações de distância entre a bobina e a amostra. Apesar de todos os entraves provocados pelo efeito do *lift-off*, este possui algumas vantagens, como por exemplo, ser utilizado na medição da espessura de revestimentos não condutores. Conforme se verifica na Figura 8, o traço horizontal apresentado no gráfico corresponde ao efeito do *lift-off*, enquanto que o traço curvo corresponde ao sinal relativo ao defeito. O tamanho do traço é diretamente proporcional à profundidade do defeito. [15] [16]

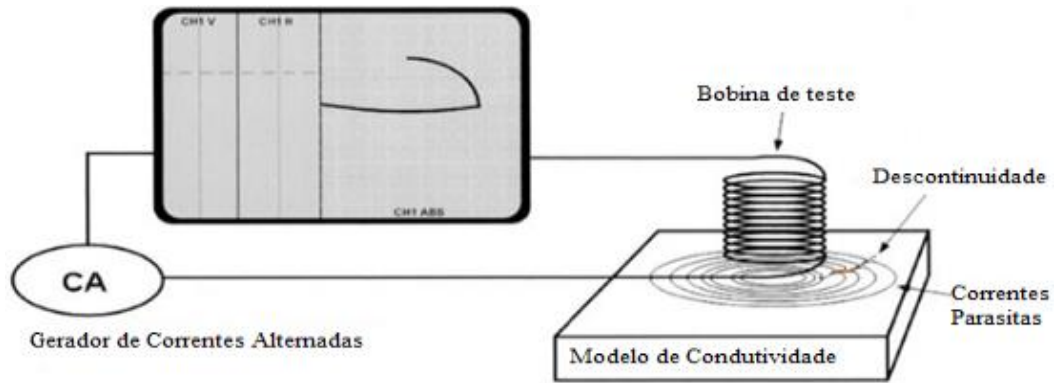


Figura 8 - Bobina de teste a percorrer o Modelo de Condutividade. [16]

O efeito pele das correntes induzidas apenas permite que estas circulem à superfície da peça, sendo somente possível detetar defeitos superficiais ou subsuperficiais. Apesar desta limitação, este efeito permite uma maior sensibilidade na deteção de defeitos, sendo que para o aumento da profundidade de penetração podem utilizar-se frequências menores por parte do operador. Neste caso, a sensibilidade na deteção de defeito, que é tanto maior quanto a frequência aplicada, vai ser sacrificada em prol da deteção de defeitos de maior profundidade. Geralmente, na inspeção de materiais ferromagnéticos, são selecionadas frequências baixas, uma vez que esses materiais costumam apresentar penetrações de pequena profundidade. [4] [17]

As sondas apresentam um plano de impedância como resposta ao ensaio efetuado. O plano de impedância elétrica  $\vec{Z}$  possui uma parte real, medida em Ohm [ $\Omega$ ] e representada no eixo do  $xx$  (componente resistiva  $R$ ), e uma parte imaginária, medida em Henry [H] e representada no eixo  $yy$  (componente indutiva  $x_L$ ). O ângulo  $\emptyset$  [ $^\circ$ ] designa-se por ângulo de fase. A impedância elétrica e o ângulo de fase, são calculados pelas equações 2.2 e 2.3, respetivamente.

$$Z = \sqrt{R^2 + x_L^2} \quad (2.2)$$

$$\tan \emptyset = \frac{x_L}{R} \quad (2.3)$$

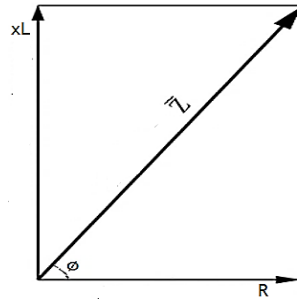


Figura 9 - Plano de impedância elétrica das CI (adaptada). [18]

Como foi já referido anteriormente, a corrente induzida na amostra cria um campo magnético secundário  $H_s$  que vai contrariar o campo primário  $H_p$  e induz uma corrente na bobina. A redução de  $H_p$  origina um aumento da resistência e alteração da indutância  $x_L$ , conforme a trajetória definida na Figura 10. Quando surgem discontinuidades na amostra condutora, estas vão limitar a trajetória das correntes e consequentemente  $H_s$ , que por sua vez diminuirá a sua oposição a  $H_p$ , sendo que a impedância na bobina irá variar. Conforme a Figura 10, a existência de um defeito no alumínio provocará o aumento da indutância e a diminuição da resistência. À medida que a sonda se movimenta na superfície de inspeção e encontra defeitos, observa-se a variação do sinal no plano de impedância. É através deste diagrama que se avalia a presença de defeitos no material e a curva da variação de impedância dos diferentes materiais na presença de um defeito assume trajetórias distintas, o que se explica pelos diferentes valores da permeabilidade relativa  $\mu_r$ . [18]

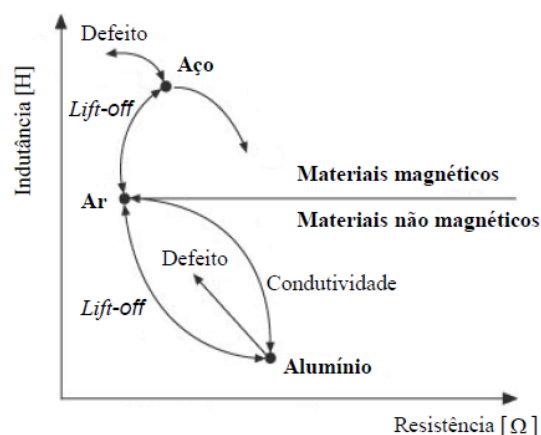


Figura 10 - Plano de resposta da impedância elétrica das CI. [30]

Para além do método convencional das Correntes Induzidas de corrente alternada sinusoidal anteriormente descrito, destacam-se por exemplo, as Correntes Induzidas

pulsadas ou *Pulsed Eddy Currents* (PEC), o *Remote Field Testing* (RFT), o *Alternating Current Field Measurement* (ACFM), o *Magnetic Flux Leakage* (MFL), as correntes medidas com *Giant Magneto Resistance* (GMR) e com *Superconducting Quantum Interference Device* (SQUID). As correntes induzidas pulsadas (PEC) são amplamente utilizadas em diversas aplicações, tais como a detecção de defeitos de corrosão e outras discontinuidades em equipamentos industriais e aeronaves sujeitos à degradação química e mecânica, como é o caso da corrosão e da fadiga. O ensaio com correntes induzidas pulsadas é basicamente o mesmo que o ensaio convencional, contudo diferem no modo de excitação utilizados e no método da análise do sinal. Deste modo, em vez de a bobina ser excitada por uma corrente sinusoidal como no ensaio convencional, vai ser excitada através de um sinal de entrada que é um pulso ou onda quadrada de voltagem ou de corrente, possibilitando um longo espectro de frequência. Este permite aumentar a profundidade de penetração em 10 % relativamente aos métodos convencionais. Para além do aumento da profundidade de penetração, a vasta quantidade de frequências permite obter mais informações sobre as peças ensaiadas e maior eficácia contra a interferência. As informações relativas aos defeitos que se encontram mais à superfície são obtidas no domínio do tempo, as relativas à profundidade do defeito são obtidas através do tempo de pico e o seu tamanho através da altura do pico. No entanto, a relação sinal-ruído não é o pretendido, já que o tempo médio necessário para as sucessivas excitações pode ser demorado, pois a energia de excitação disponível encontra-se amplamente distribuída a grande banda de frequências. [19] [20] [21]

O *Remote Field Testing* (RFT) consiste em “varrer” toda a superfície interior e exterior de tubos, utilizando sondas constituídas por uma bobina emissora e uma recetora. O campo magnético criado pela bobina emissora circula radialmente e axialmente no interior e no exterior do tubo, devendo atravessar a parede do mesmo, em direção ao recetor. Este campo magnético é atenuado pelo volume do material na deslocação entre o emissor e o recetor. Existem duas ligações entre as bobinas emissoras e a recetora, sendo elas a ligação direta que ocorre dentro do tubo e que é atenuada pelas Correntes de *Eddy* tangenciais induzidas dentro da parede do tubo, e a ligação indireta que se origina no campo magnético emissor que, por sua vez, se difunde radialmente para fora através da parede tubo. Na parede externa, o campo espalha-se rapidamente e com pouca atenuação ao longo do tubo. Quando existem anomalias em qualquer lugar da ligação indireta,

ocorrem alterações na magnitude e na fase do sinal recebido e, portanto, podem ser usadas na detecção de defeitos. A RFT possui grande sensibilidade às variações de espessura da parede tubo e possui igual sensibilidade quer na superfície externa, quer interna. [18] [22] [23]

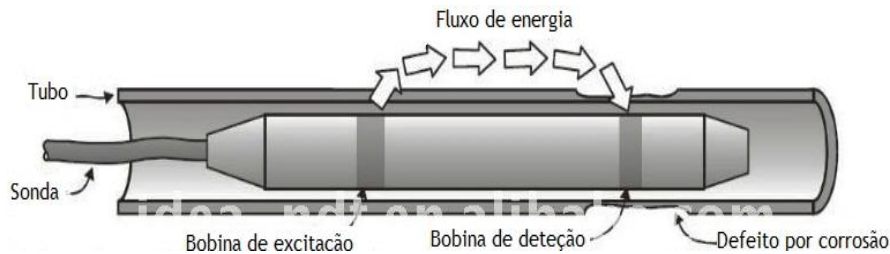


Figura 11 - Técnica de ensaio RFT. [4]

O *Alternating Current Field Measurement (ACFM)* é utilizado em vários setores industriais e tem particular interesse em ambiente submersos, podendo ser usado por ROV's ou mergulhadores. Este método caracteriza-se por uma corrente alternada que flui à superfície de um meio condutor. Se existir alguma descontinuidade na superfície, essa corrente sofre perturbações, deixando de ser uniforme. Quando ocorrem estas perturbações na corrente elétrica, o campo magnético associado ao campo elétrico perturbado também sofre distúrbios que podem ser medidos através de sensores de campo magnético. Conforme se pode verificar na Figura 12, o campo elétrico é perturbado à superfície devido à existência de uma fenda. [22] [24]

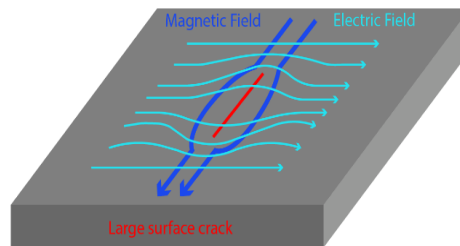
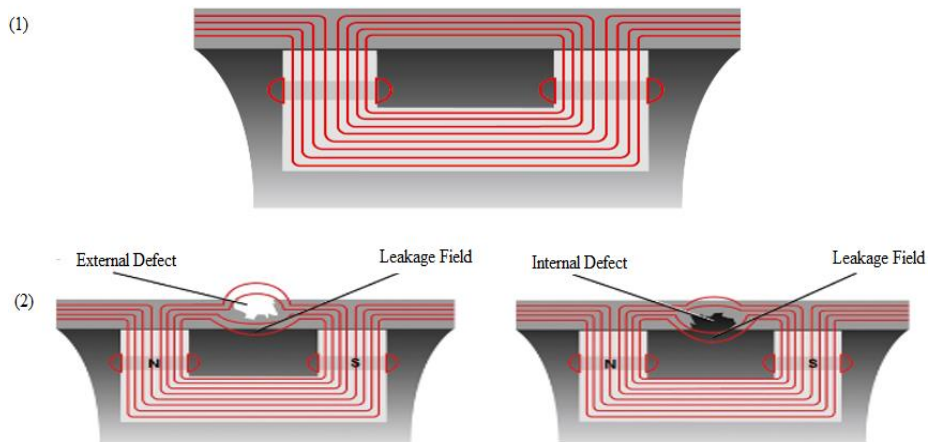


Figura 12 - Técnica de ensaio ACFM. [25]

O *Magnetic Flux Leakage (MFL)* é basicamente um método que utiliza um ímã capaz de criar um campo magnético suficientemente forte para saturar as paredes de um material, principalmente aço. Quando existem perdas de espessura, corrosão ou outro tipo de falha, o campo magnético “escorrega” pelas paredes do material. Para detetar a localização do “escorregamento” do campo, coloca-se uma bobina diferencial entre os

pólos do íman As principais vantagens deste método é a inspeção de tanques e tubos aletados corroídos e parcialmente encrustados. [22] [26]

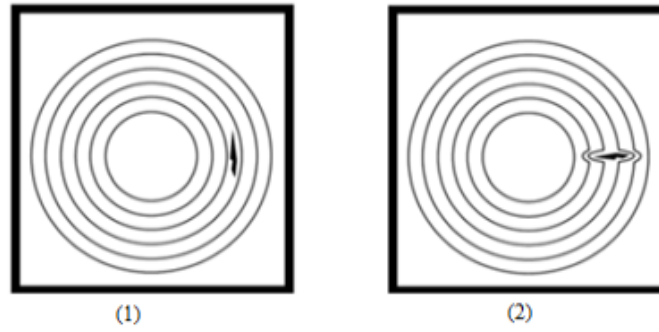


**Figura 13** - *Magnetic Flux Leakage*. [26]

- 1) Fluxo magnético a circular sem a existência de defeitos. 2) Fluxo magnético a circular na presença de defeitos externos ou internos e localização do respectivo “escorregamento”.

As Correntes Induzidas com sondas *Superconducting Quantum Interference Device* SQUID e *Giant Magneto Resistance* (GMR) possuem diferenças em relação ao método convencional, somente no que toca à medição do sinal de receção, que neste caso é efetuado por magnetómetros *Superconducting Quantum Interference Device* resistências magnéticas GMR, respetivamente. Estas sondas têm a vantagem de possuir altos desempenhos de sensibilidade na variação do campo magnético em relação ao desempenho das sondas clássicas. [27]

As correntes induzidas que circulam no material concentram-se perto da sua superfície (efeito de pele) e os defeitos posicionados perpendicularmente a estas são de mais fácil deteção em relação aos posicionados paralelamente, pois têm um maior efeito de perturbação.



**Figura 14** - Comportamento das CI consoante a posição do defeito. [4]

- 1) Comportamento das CI num defeito posicionado paralelamente a estas. 2) Comportamento das CI num defeito posicionado perpendicularmente a estas.

Estas correntes vão-se tornando cada vez menos intensas com o aumento da profundidade, até desaparecerem totalmente. A equação 2.1 traduz o valor da densidade da corrente  $I$  em função da profundidade  $x$ .

$$I_x = I_0 e^{-x(\pi f \sigma)^{1/2}} \quad 2.1$$

Onde,

$I_x$  representa a densidade da corrente  $I$  em função da profundidade

$x$  representa a profundidade [m]

$I_0$  representa a densidade de corrente à superfície [ $A \cdot m^{-2}$ ]

$f$  representa a frequência de excitação [ $s^{-1}$ ]

$\mu$  representa a permeabilidade magnética [ $H \cdot m^{-1}$ ]

$\sigma$  representa a condutividade elétrica [% IACS]<sup>8</sup>

A profundidade máxima de penetração  $\delta$  [m] convencionou-se como sendo a profundidade para qual o valor da densidade de corrente ( $I_x$ ) corresponde a  $e^{-1}$  ( $\approx 31\%$ ) da densidade de corrente à superfície do material ( $I_0$ ).

Deste modo,

<sup>8</sup> IACS: medição de condutividade elétrica como percentagem da condutividade de um padrão de cobre puro a 25°C, o que equivale a  $5.8 \times 10^7$  S/m

$$\frac{I_x}{I_0} = e^{-1} \approx 37\% \Leftrightarrow x(\pi f \mu \sigma)^{1/2} = 1 \quad 2.2$$

De onde resulta a equação 2.3

$$\delta_{(f,\mu,\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad 2.3$$

A partir da equação 2.3, obtém-se a frequência de funcionamento da sonda para a profundidade de penetração pretendida, num material com os valores de  $\mu$  e  $\sigma$  conhecidos. [28]

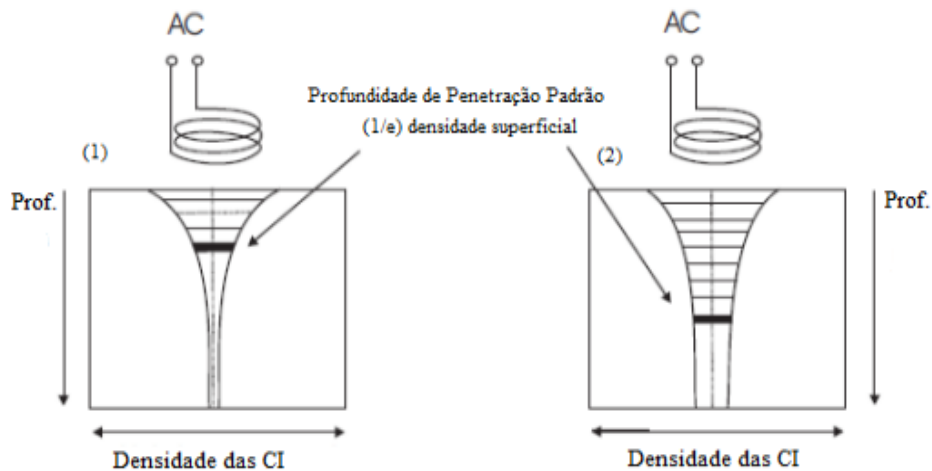


Figura 15 - Profundidade de penetração. [4]

1) Profundidade de penetração para frequência, condutividade e permeabilidade altas. 2) Profundidade de penetração para frequência, condutividade e permeabilidade baixas.

## 2.2.1. Sondas CI

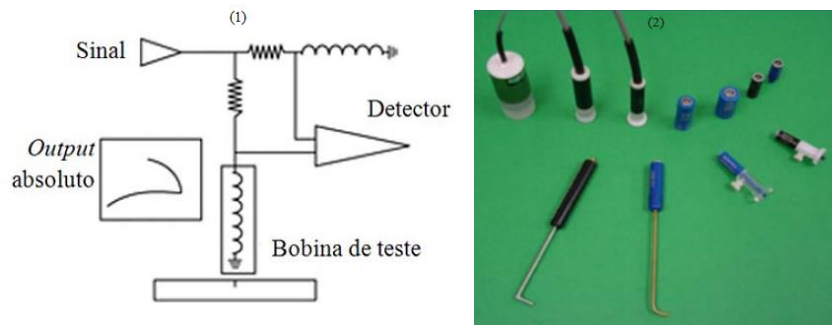
Atualmente, existem diversos protótipos de sondas, consoante a inspeção que se pretende realizar. Existem diversos tipos de sondas de Correntes Induzidas que são classificadas de acordo a configuração da bobina e o modo de funcionamento. Os arranjos mais comuns são: absoluto, diferencial, *bridge*, reflexão, híbrida (diferencial + reflexão), entre outros.

### 2.2.1.1. Modo de Funcionamento

- Sondas absolutas

As sondas absolutas possuem uma única bobina que funciona simultaneamente como elemento de excitação e receção, sendo alimentada com uma corrente alternada para gerar correntes induzidas. Em geral, este tipo de sonda possui um núcleo de ferrite,

conhecido como entreferro, que auxilia a transmissão das linhas de fluxo magnético à amostra inspecionada. Este tipo de sonda analisa a variação de impedância total da bobina e também possui uma bobina de referência para compensar as variações de temperatura do ambiente, que pode estar na caixa da sonda, no conector do cabo ou num adaptador à parte. Possuem grande sensibilidade à permeabilidade, ao *lift-off* e à condutividade e são utilizadas para a deteção de defeitos, diagnóstico de espessura de revestimento e caracterização de materiais. [28]



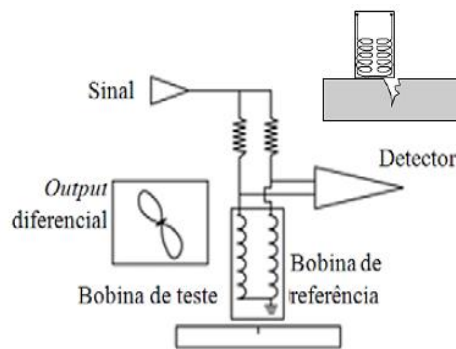
**Figura 16** - Sonda absoluta. [4] [28]

1) Representação esquemática do modo de operação de uma sonda absoluta. 2) Imagem de algumas sondas absolutas.

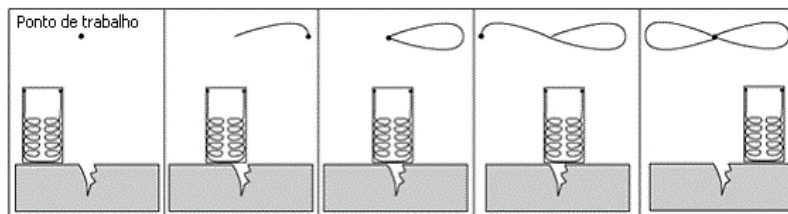
- Sondas Diferenciais

As sondas em arranjo diferencial são compostas por duas bobinas, cuja resposta é o resultado da comparação entre a variação de impedância das duas bobinas, estando uma delas com polaridade invertida em relação à outra, já que possuem o mesmo número de enrolamentos, mas em sentidos opostos. Assim sendo, os campos gerados por ambas as bobinas possuem o mesmo valor em módulo, mas apresentam sentidos contrários. Os dois enrolamentos são construídos lado a lado, permitindo comparar uma região “limpa” e outra imediatamente adjacente, detentora de um defeito. Quanto mais próximos os enrolamentos se encontrarem, maior a sensibilidade da sonda na deteção de discontinuidades localizadas de dimensões muito reduzidas, como por exemplo corrosão por “*pitting*” e fissuras de comprimentos muito pequenos. Quando a sonda está a analisar uma região homogénea a sua resposta é zero, já que os dois enrolamentos anulam o efeito um do outro. Ao se aproximar uma zona defeituosa, a primeira bobina em contacto com a discontinuidade, possuirá valores de impedância diferentes em relação à bobina que ainda se encontra na região homogénea, sendo que o sinal de resposta da sonda será diferente de zero. Contudo, quando as discontinuidades são de maiores dimensões, o seu

comprimento pode ultrapassar a dimensão do espaçamento entre os enrolamentos, e o sinal de resposta no interior do defeito será zero, uma vez que as bobinas possuem simultaneamente a mesma resposta relativamente à descontinuidade. Assim sendo, apenas os bordos dos defeitos serão detetados, provocando a falsa sensação da existência de dois defeitos mais pequenos ao invés de um defeito grande.



**Figura 17** - Representação esquemática do modo de operação de uma sonda diferencial. [28]



**Figura 18** - Representação da sequência de uma inspeção com sonda diferencial e sinal gráfico de “Lissajou”. [28]

A Figura 18 representa esquematicamente a sequência de uma sonda de arranjo diferencial quando atravessa um defeito. Inicialmente, na zona “limpa”, o ponto de trabalho encontra-se em zero. Assim que um dos enrolamentos atinge o defeito, o ponto de trabalho desloca-se, dado que a diferença entre o sinal das bobinas já não é zero. Quando as bobinas estão ambas sobre o defeito o ponto de trabalho retorna a zero, já que o sinal de resposta das bobinas é novamente igual. Posteriormente, quando um dos enrolamentos se desloca para fora do defeito, o mesmo procedimento volta a repetir-se, mas agora o sinal da diferença entre as bobinas é no sentido contrário, já que a resposta do defeito é obtida pelo enrolamento com polaridade invertida. O sinal obtido na sequência total possui a forma de um “laço”, é conhecido como “Lissajou” e é característico das sondas diferenciais. [28] [29] [30]

- Sondas *bridge*

Este tipo de sondas é comumente confundido com as sondas diferenciais, contudo as sondas do tipo *bridge* produzem o sinal apenas por uma bobina, apresentando uma reta horizontal de *lift-off* e uma única curva, conforme pode verificar na Figura 19. As bobinas formam uma ponte elétrica e a mesma bobina que gera as correntes CI, deteta as alterações de impedância causadas pela existência de descontinuidades.

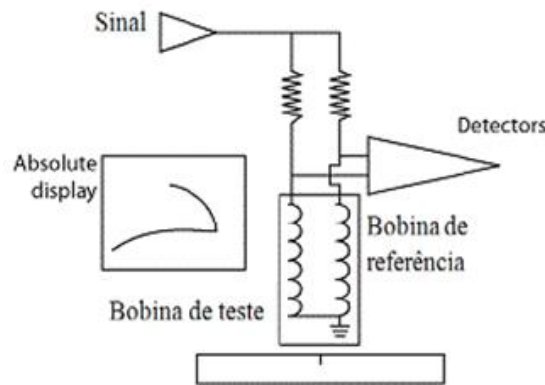


Figura 19 - Sonda do tipo *bridge*. [31]

A confusão entre sonda *bridge* e sonda diferencial surge quando as bobinas são ligadas diferencialmente. A confusão com esta definição é que as bobinas também podem ser ligadas diferencialmente com um sistema de reflexão, usando duas bobinas de recepção. Neste caso, as duas bobinas de recepção estão posicionadas perto uma da outra, conforme a Figura 20. De modo a evitar estas ambiguidades é necessário designar mais especificamente a sonda em tipo *bridge*, *bridge* diferencial, reflexão ou reflexão diferencial. [3] [32]

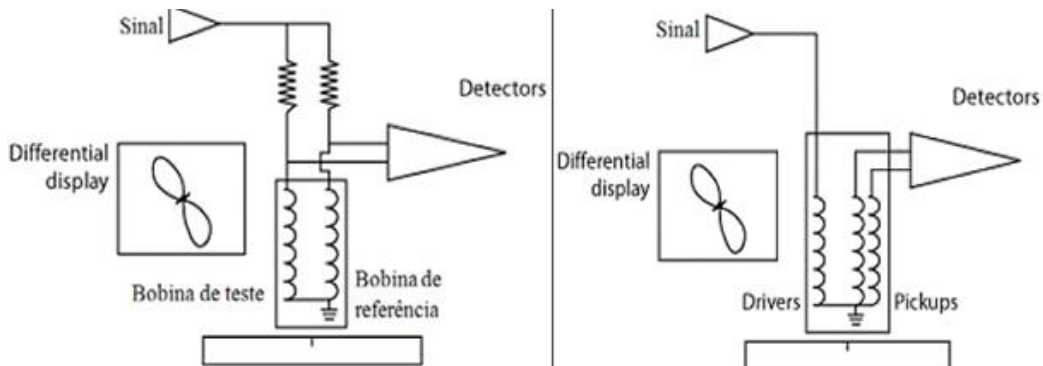
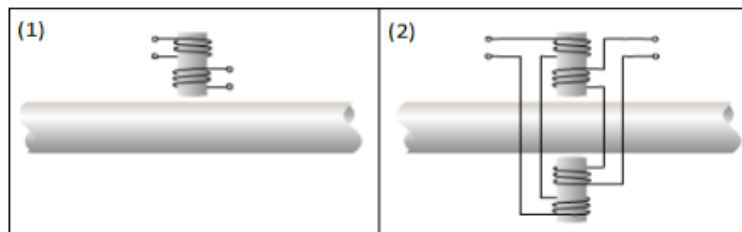


Figura 20 - Comparação entre sonda *bridge* diferencial e sonda de reflexão diferencial. [31]

1) Sonda *bridge* diferencial. 2) Sonda de reflexão diferencial

- Sondas de reflexão

As sondas de reflexão são constituídas por duas bobinas, que ao contrário das sondas diferenciais, cada uma possui uma função específica. Uma bobina é utilizada para induzir correntes no meio a analisar e a outra para verificar as variações nesse meio. Este tipo de sondas também é designado por *driver pick up*. As sondas de reflexão são mais difíceis de fabricar que as sondas *bridge* e embora sejam mais caras, permitem uma gama de frequências mais ampla, já que estas não necessitam de equilibrar as duas bobinas tal como acontece nas sondas *bridge*. A bobina de receção deteta as correntes induzidas e apresenta o sinal respetivo, desde que a bobina de excitação gere essas mesmas correntes. [28] [32]



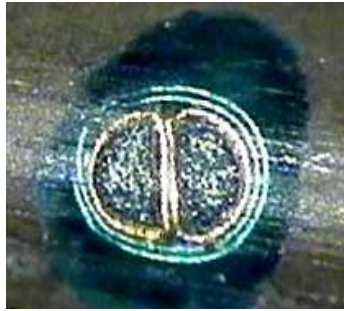
**Figura 21** - Sondas de reflexão. [28]

1) Sonda de reflexão clássica, onde um enrolamento atua para a excitação e a outra para a receção. 2) Sonda utilizada para analisar duas faces da mesma amostra em simultâneo.

- Sondas híbridas

Este tipo de sondas é o resultado da combinação entre dois ou vários arranjos de bobinas. É bastante comum a combinação de sondas diferenciais com sondas de reflexão, na qual os enrolamentos utilizados na deteção estão dispostos diferencialmente e envoltos na bobina de excitação. Um exemplo de uma sonda híbrida é a *split D*, conforme a Figura 22. Esta sonda possui uma bobina excitação que envolve duas bobinas de deteção em formato de D. Funciona no modo de reflexão, e simultaneamente, as bobinas de deteção funcionam em modo diferencial. Este tipo de sonda é muito sensível a fendas superficiais. Outro exemplo de uma sonda híbrida é aquela que utiliza uma bobina convencional para gerar correntes de *Eddy* no material, mas utiliza um tipo de sensor diferente para detetar variações à superfície e dentro do material de teste. Para além das sondas já referidas, existem outros exemplos tais como sensor de efeito *Hall*, SQUID e GMR. De uma forma

geral, estes sensores são desenvolvidos para uma aplicação específica e dependem da criatividade do inspetor. [9] [18] [28]



**Figura 22** - Exemplo de sonda híbrida: *Split D*. [33]

### **2.2.1.2. Modo de Recepção**

Quanto ao modo de recepção as sondas podem classificar-se como sondas de dupla função e sondas de emissão-recepção. As sondas de dupla função apresentam apenas uma bobina que é responsável por introduzir as CI no material, e simultaneamente, detetar alterações na circulação das mesmas. Por sua vez, as sondas de emissão-recepção caracterizam-se pela existência de duas bobinas distintas, sendo que é uma responsável por induzir as CI no material, e outra para detetar as variações na sua circulação. [4]

### **2.2.1.3. Forma**

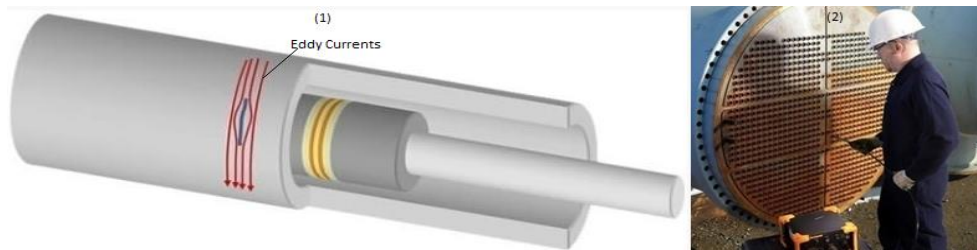
Quanto à forma, as sondas de Correntes Induzidas subdividem-se em sondas helicoidais cilíndricas e sondas espirais planas. As primeiras, são as mais utilizadas e possuem aplicações para a deteção de defeitos superficiais na sua generalidade, sendo por norma absolutas de dupla função e detentoras de um núcleo de ferrite. Por sua vez, as sondas espirais planas possuem menor resolução espacial, mas permitem maior proximidade com a superfície. Perante as limitações das sondas convencionais, efetuou-se um estudo comparativo entre estes dois tipos de sonda ao nível dos seus desempenhos na deteção de defeitos. [34] Nesse estudo foram produzidos três protótipos de sondas com bobinas espirais planas: circular de 20 espiras, circular de 10 espiras, quadrada de 10 espiras. Estas sondas são bastante sensíveis à deteção de defeitos devido à maior proximidade entre a bobina e o material a analisar (menor *lift-off*), possibilitam uma inspeção facilitada no caso da superfície do material a analisar possuir formatos complexos e são relativamente fáceis de fabricar. O trabalho efetuado consistiu em

analisar as curvas de condutividade para Cu-100% IACS, AA2024-T351-37.8% e Pb-8.1% e analisar as curvas de impedância sob condições padrão de variação do *lift-off* (entre 70 e 3000  $\mu\text{m}$ ). Para a caracterização das sondas CI, a maior variação de impedância face à alteração de condutividade possui maior relevo do que a variação de impedância face às variações de *lift-off*, uma vez que este está relacionado com o ruído que dissimula os sinais originados pelos defeitos, ao contrário do primeiro cujo comportamento está relacionado com a existência de defeitos no material. Mediante os resultados obtidos no estudo efetuado retiraram-se algumas seguintes conclusões: as sondas helicoidais cilíndricas apresentam curvas de impedância tipicamente logarítmicas ao contrário de todas as sondas espirais planas que apresentam uma curva parabólica de impedância; as curvas de *lift-off* e condutividade evoluem perpendicularmente entre si o que facilita a distinção entre as mesmas durante um ensaio NDT, enquanto que nas sondas helicoidais cilíndricas essa evolução é praticamente paralela; a sonda circular helicoidal possui uma elevada proximidade entre as curvas de *lift-off* e de condutividade, o que dificulta a distinção entre o sinal proveniente de uma descontinuidade e o ruído; a sonda circular helicoidal é bastante sensível à variação angular da sua posição, embora apresente valores de impedância absoluta superiores, face à sua elevada indutância. [34]

#### **2.2.1.4. Tipo**

As sondas podem ainda classificar-se quanto ao tipo, existindo sondas do tipo interno e externo. As sondas externas aplicam-se no exterior de veios ou tubos, enquanto que as sondas internas se aplicam na inspeção no interior de furos e tugiabens, como por exemplo nos permutadores de calor em que deteção de defeitos no interior dos tubos é crucial já que as possíveis fugas podem provocar perdas da sua pressão interna, comprometendo a sua eficiência. Existem várias técnicas para inspeção de tubos tais como o RFT e o MFL, (empregues em materiais ferromagnéticos) e o *Eddy Current Testing* (normalmente dedicados a tubos não ferromagnéticos ou levemente ferromagnéticos, tais como aços inoxidáveis austeníticos, cobre, ligas de cobre, titânio, etc). Possui diversas vantagens entre as quais: a aquisição rápida de dados, podendo atingir 2 m/s; melhoram o dimensionamento face à utilização de múltiplas de frequências; possuem fatores de enchimento entre 85 e 90 %, principalmente para danos internos.

Conforme se pode verificar na Figura 23, os defeitos tangenciais são paralelos às correntes induzidas e por isso, produzem sinais nulos ou pouco significativos. Por sua vez, os defeitos axiais são transversais à direção das correntes induzidas, produzindo sinais de fácil deteção. Para a minimização da limitação das sondas convencionais na deteção de defeitos tangenciais, pode utilizar-se bobinas inclinadas que, consoante os ângulos utilizados, originam correntes induzidas numa direção intermédia entre a tangencial e a axial.



**Figura 23** - CI no interior de tubos (adaptada). [16]

1) Sondas convencionais para inspeção CI no interior de tubos. 2) Inspeção CI realizada num permutador de calor.

Existem vários tipos de sondas, das quais se destacam a sondas do tipo *Meandering Winding Magnetometer* (MWM), *Eddy Currents Array* e a *IONic*. As sondas do tipo *Meandering Winding Magnetometer* são compostas por um enrolamento primário de excitação e por dois enrolamentos secundários de receção para detetar a resposta, colocados junto ao enrolamento primário em planos paralelos ou coincidentes. Assim sendo, os campos magnéticos elevados provenientes do enrolamento primário abrangem a zona definida pelos enrolamentos secundários, permitindo o aumento da sensibilidade da sonda. Pode ser produzido em várias configurações, como por exemplo em *array*, e possui grandes vantagens na deteção e avaliação de microdefeitos em Soldadura por Fricção Linear (SFL).

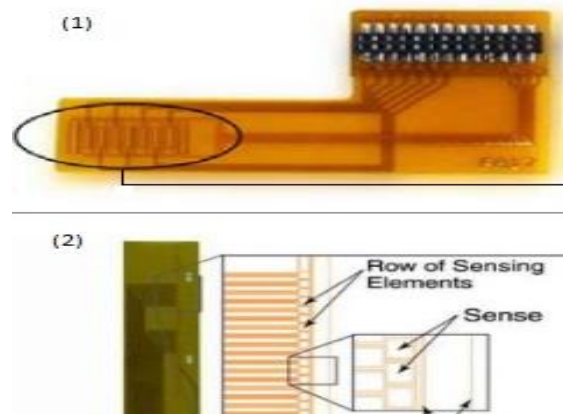


Figura 24 - Configurações possíveis de sondas do tipo MWM (adaptada). [30]

A variante *Eddy Currents Array* consiste numa técnica que permite conduzir eletronicamente várias bobinas dispostas sucessivamente, formando uma só sonda. Para a aquisição de dados realiza-se uma operação capaz de transmitir várias comunicações distintas através de um único canal físico. Este processo designa-se por multiplexação e permite limitar a indutância mútua entre cada bobina. Esta técnica permite uma maior área de inspeção com alta resolução em relação às sondas convencionais e pode assumir configurações complexas. Uma única passagem pelo defeito permite obter resultados através de um gráfico *C-Scan*. [22] [30] [35]

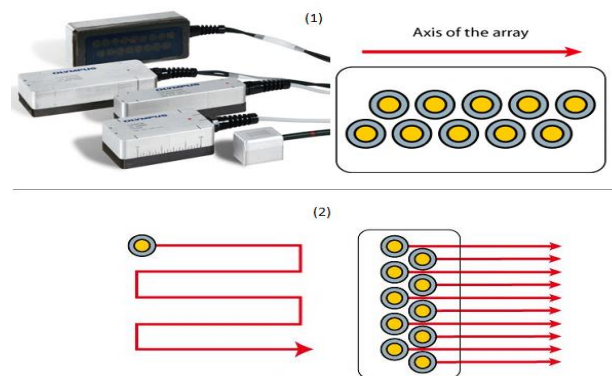


Figura 25 - Eddy Current Array (adaptada). [30]

1) Olympus manufactures R/D Tech Eddy Currents Arrays. 2) Comparação entre a análise convencional e a análise em array.

A sonda *IONic* é um conceito de sondas CI que tem como objetivo a eliminação do efeito do *lift-off* e minimizar a distância entre a sonda e a superfície do material, aumentando a capacidade de deteção de defeitos difíceis de detetar pelos métodos convencionais. Conforme se pode observar na Figura 26, este tipo de conceção é construído por 5 componentes: bobina de excitação toroidal (1), bobina sensível espiral

plana (2), suporte das bobinas (3), suporte da bobina de excitação (4), terminais das bobinas sensíveis (5). A bobina sensível espiral plana encontra-se perpendicular à bobina de excitação toroidal e paralela à superfície do material, o que facilita a localização de defeitos que de outra forma, seriam dissimulados pelo ruído do *lift-off*, minimizando o ruído proveniente da variação da posição da sonda em relação ao material a analisar. Se as discontinuidades forem de dimensões reduzidas, a variação de impedância criada pelo *lift-off* pode ser maior do que a variação provocada pela diminuição de condutividade pela existência dessa discontinuidade, pelo que o sinal do defeito pode ser absorvido pelo sinal do *lift-off*. Para além disso, a sonda possibilita a inspeção dos bordos do meio material e permite a deteção de defeitos com qualquer tipo de orientação, dado que utiliza um método de análise do sinal durante um movimento de rotação de 360° da sonda em torno de si mesma. Deste modo, a sonda *IONic* permite que o sinal da sonda e o campo das correntes induzidas num material totalmente isento de defeitos, seja independente. Para isto, é necessária a obtenção de um sinal constante aos terminais da sonda, independentemente da posição da mesma em relação à superfície a analisar e da sua condutividade global. [36]

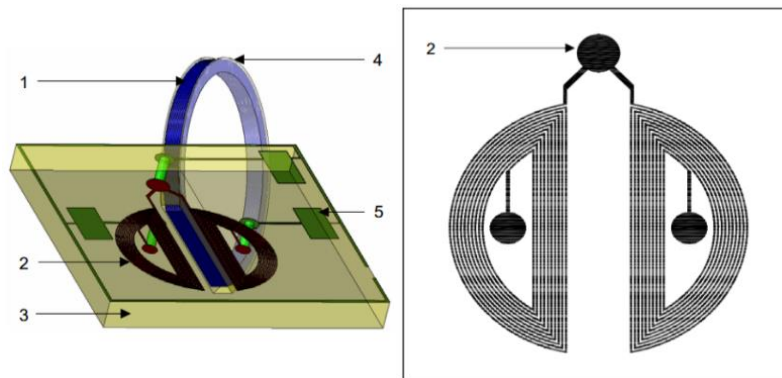


Figura 26 - Desenho do conjunto dos elementos ativos da sonda *IONic*. [36]

Nomenclatura: Bobina de excitação toroidal (1); Bobina sensível espiral plana (2); Suporte das bobinas (3); Suporte da bobina de excitação (4); Terminais da bobina sensível (5).

### 2.3. Ensaio Não Destrutivo a Altas Temperaturas

Nos finais do século XIX, Pierre Curie mostrou um dado material ferromagnético perde as suas propriedades magnéticas quando atinge valores superiores a uma determinada temperatura, temperatura esta que ficou conhecida como ponto de Curie.

Num átomo cada elétron possui um momento de dipolo magnético de *spin* e um momento de dipolo magnético orbital que se conjugam vectorialmente. A sua resultante vai combinar-se com todas as resultantes dos outros elétrons existentes nesse átomo. Por sua vez, a resultante de cada átomo combina-se com os restantes átomos que compõem o material. Deste modo, se a combinação de todos estes momentos produzir um campo magnético, pode dizer-se que o meio material em questão é magnético. Como foi já referido na presente dissertação, podem classificar-se três tipos gerais de magnetismo:

**Diamagnetismo:** presente em grande parte dos materiais, mas possui uma intensidade fraca, podendo não ser notado se o material em questão também possuir magnetismo dos outros tipos. Quando o material é sujeito a um campo magnético externo  $\vec{B}$ , produzem-se fracos momentos de dipolo magnético, que se combinam e fornecem ao material um campo magnético resultante de baixa intensidade. Os momentos de dipolo desaparecem assim que  $\vec{B}$  é retirado.

**Paramagnetismo:** presente em materiais que contêm elementos de transição na tabela periódica, como os actínídeos, etc. Cada átomo do material possui um momento de dipolo resultante permanente, contudo todos os momentos estão orientados de forma aleatória, exibindo um campo magnético resultante nulo. O campo magnético externo  $\vec{B}$  pode alinhar parcialmente esses dipolos atômicos, originando assim um campo magnético que desaparece assim que  $\vec{B}$  é retirado.

**Ferromagnetismo:** presente em materiais como o ferro, o cobalto, o níquel. Alguns elétrons que constituem o material exibem momentos de dipolo resultante alinhados, originando zonas com fortes momentos de dipolo. Quando um campo  $\vec{B}$  externo é aplicado, pode alinhar os momentos magnéticos das ditas zonas, induzindo um campo magnético intenso. Quando  $\vec{B}$  é retirado, o campo permanece parcialmente.

A magnetização  $\vec{M}$  é igual ao momento de dipolo magnético por unidade de volume, e obtém-se através do produto do momento magnético  $\vec{m}$  pelo número de átomos por unidade de volume  $N$ . Quando a temperatura de um material ferromagnético atinge valores elevados, a agitação térmica leva a que os momentos magnéticos deixem de estar ordenados e passem a orientar-se de forma aleatória, passando o material em questão a

classificar-se como paramagnético. A temperatura a que este fenómeno ocorre é o conhecido Ponto de Curie. [37]

Material	Ponto Curie [K]
Fe	1043
Co	1388
Ni	627

**Tabela 1** - Pontos Curie de alguns elementos químicos.

Seguidamente, apresentam-se vários tipos de ensaios não destrutivos a altas temperaturas, embora o número de aplicações e estudos subjacentes à mesma sejam consideravelmente menores em relação aos Ensaios Não Destrutivos em condições de temperatura normal. [38]

### **2.3.1. Líquidos penetrantes**

Os Ensaios Não Destrutivos através de líquidos penetrantes aplicam-se a defeitos superficiais em materiais não porosos. Pode afirmar-se que a temperatura ótima para aplicação do penetrante ronda os 20 °C, não devendo estar abaixo dos 10 °C nem acima dos 52 °C, uma vez que a temperaturas mais elevadas, aumenta a evaporação dos componentes voláteis do penetrante, conduzindo à sua escassez. Para além disso, acima de determinado valor (> 100 °C) há probabilidade de este inflamar. Existem líquidos penetrantes adaptados para resistir às temperaturas mais elevadas, capazes manter o estado líquido à temperatura requerida. Esta técnica tem diversas aplicações como é o caso de cordões de soldadura e válvulas de pressão de vapor. [39]

### **2.3.2. Raios-X**

A técnica de inspeção por difração de raios-x possibilita a deteção de defeitos tanto superficiais como internos, sendo sensíveis à orientação do defeito e permitindo inspecionar zonas inacessíveis do material. É possível realizar estes ensaios a altas temperaturas, contudo apresenta custos elevados e riscos de segurança. [40]

### **2.3.3. Ultrassons**

Embora a maior parte da análise de defeitos seja realizada a temperaturas normais, existem casos em que é necessária a inspeção de materiais com temperaturas elevadas,

como no caso de indústrias de processamento onde os materiais são testados antes da refrigeração, na inspeção de reservatórios sob pressão, tubagens e inspeção de soldaduras. Os transdutores convencionais de ultrassons toleram temperaturas até cerca de 50 °C, já que a temperaturas superiores podem sofrer danos irreversíveis resultantes da expansão térmica. Ao aplicar esta técnica de inspeção em condições de temperaturas superiores a 50 °C deve ser tido em linha de conta o gradiente de temperatura do encapsulamento do transdutor, já que este conduz a variações de velocidade que quando desconsideradas induzem erros na fase obtida e também, o efeito da temperatura no transdutor assim como no acoplante utilizado. Deste modo, para ensaios a temperaturas superiores a 50 °C, utilizam transdutores especialmente adaptados para estes valores de temperatura. Dos equipamentos existentes no mercado, podem subdividir-se dois grupos diferentes: sondas adaptadas para altas temperaturas detentoras de um transdutor de US adequadamente isolado para suportar temperaturas elevadas num curto período de tempo e, equipamentos completos para manutenção automatizada que englobam transdutor, sistema de refrigeração e acoplantes que resistam a altas temperaturas. [41] [42]

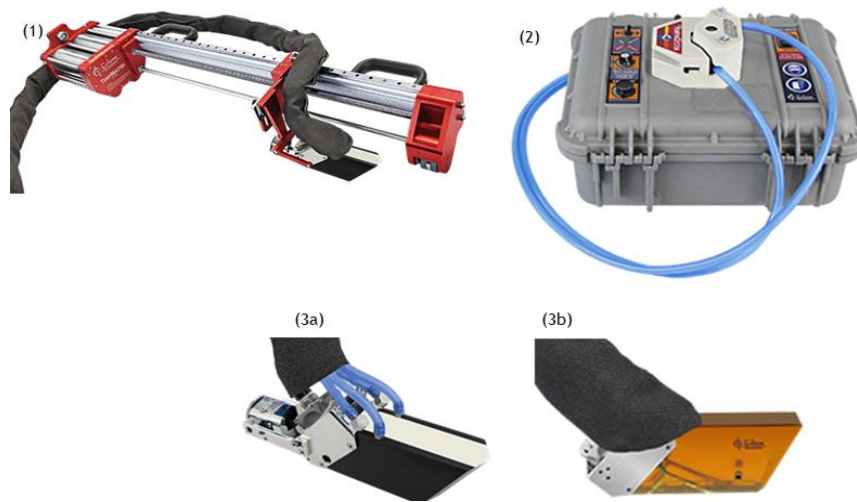


**Figura 27** - *Phoenix ISL SSHSC 4/10* – Equipamento desenvolvido pela *Phoenix ISL* que permite o contacto contínuo com superfícies até 120 °C, e o contacto num período de tempo até 10 segundos com superfícies até 200 °C com refrigeração de ar forçada. [42]



**Figura 28** - Sondas para alta temperatura desenvolvidas pela *Olympus* que suportam temperaturas até 500 °C, mas apenas em contactos durante um curto intervalo de tempo. [42]

1) U8450007. 2) U8450008. 3) U8450009. 4) U8450016. 5) U8450017.



**Figura 29** - Sistema *TempMasterSuite3* sugerido pela *Eclipse*. O fabricante fornece ainda um agente acoplante resistente até 350 °C em contacto contínuo. [42]

- 1) Sistema *scanner* automatizado. 2) Opção de refrigeração forçada a água (modelo *Black*) ou ar (modelo *Gold*) em sistema fechado. 3a) Sistema *Black* que permite inspeção contínua até uma temperatura de 350 °C. 3b) Modelo *Gold* até 150 °C.

#### 2.3.4. Termografia

A termografia é uma técnica de inspeção indicadora da existência de defeitos no material, na qual a distribuição de temperaturas de uma dada superfície é apresentada sob a forma de imagem térmica registada através de uma câmara com a capacidade de detetar radiações eletromagnéticas na faixa dos infravermelhos. A inspeção termográfica pode ser realizada até temperaturas de 900 °C, como é o caso do sistema PCE-TC4 desenvolvida pela PCE Ibérica S.L. É um instrumento ideal para inspeção de equipamentos que funcionam a elevadas temperaturas, como por exemplo a indústria metalúrgica ou de vidro, na construção de caldeiras e no sector de alta tensão na produção de energia. O PCE-TC 4 oferece dois intervalos de funcionamento: entre -10 °C e +250 °C e entre +50 °C e 900 °C, sendo que para este último é necessária a adaptação de um filtro. [43]

#### 2.4. Necessidades de Inspeção por Correntes Induzidas a Alta Temperatura

A informação técnica relativa à inspeção por Correntes Induzidas a altas temperaturas, bem como os respetivos equipamentos comerciais e recursos tecnológicos ainda se apresenta escassa, contudo a tendência nos dias de hoje é realizar inspeções no

material quente durante a produção, permitindo o controlo da qualidade do produto desde o início, evitando o dispêndio de energia e recursos em produtos defeituosos em fases posteriores do processo. Podem ser dimensionadas aplicações para a inspeção de materiais em condições de temperatura elevada, tendo em consideração os efeitos da temperatura na impedância  $Z$  da sonda e adequando um sistema de refrigeração de modo a minimizar as consequências do efeito térmico na mesma.

#### **2.4.1. Inspeção em linha de produção de arame e varões trefilados**

O projeto INCOSTELL, no seguimento do *Research Fund for Coal and Steel*, propõe a inspeção de fios de arame quente para controlo de qualidade. O projeto teve como ambição detetar defeitos com dimensões de 5 mm de comprimento, 0.2 mm de largura e 0.1 mm de profundidade com altas velocidades de varrimento. A temperatura de trabalho das sondas situa-se entre 900 °C e 1200 °C, o que levou à utilização de um sistema de refrigeração a água em circuito fechado e de um revestimento em cerâmica de vidro com alta resistência a temperaturas elevadas, o Macor®, que suporta temperaturas máximas de serviço contínuo até 800 °C. O teste efetuado abrangeu diversos protótipos de sondas de diferentes geometrias, por forma a maximizar a deteção dos dois tipos defeitos pretendidos: transversais e longitudinais ao comprimento do arame. As sondas de superfície apresentaram menos sensibilidade em relação as restantes sondas, estando estas sob dependência da geometria apresentada, contudo dispunham de melhores desempenhos na deteção de defeitos longitudinais. O design utilizado apenas permitiu a deteção de defeitos até 0.5 mm de profundidade. Para além da configuração escolhida para a realização deste projeto foram ainda realizados trabalhos onde foram estudadas outras alternativas. Rahman et al. evidencia o cruzamento das informações obtidas pela inspeção por correntes induzidas com a informação fornecida pela inspeção com sondas eletromagnéticas ultrassónicas (EMUS). Neste caso o arame a altas temperaturas é aço inoxidável com diâmetro entre os 6 mm e os 42 mm, que é conduzido através de bobinas a uma temperatura entre 1000 °C e 1200 °C, valores acima do ponto de Curie. Na Figura 30 estão representados os típicos defeitos longitudinais e transversais existentes nos arames. No estudo em questão podem detetar-se defeitos até ao comprimento de 5 mm, largura de 0.2 mm e profundidade de 0.1 mm. Na investigação efetuada são considerados dois tipos de sensores: sondas de Correntes Induzidas e transdutores eletromagnéticos

ultrassônicos (EMUS). A Figura 31 mostra um sensor de Correntes Induzidas com bobinas circulares em torno do arame quente e a Figura 32 uma visão esquemática de um transdutor EMUS que opera com ondas de *Rayleigh*. Este transdutor é constituído por pequenos ímanes permanentes que geram um campo magnetostático bem definido, e por uma bobina-RF (RF-Coil) para induzir uma corrente de *Eddy* transitória no arame condutor a altas temperaturas. Ambos são necessários para a excitação de um campo de onda ultrassônico. [44] [45] [46].

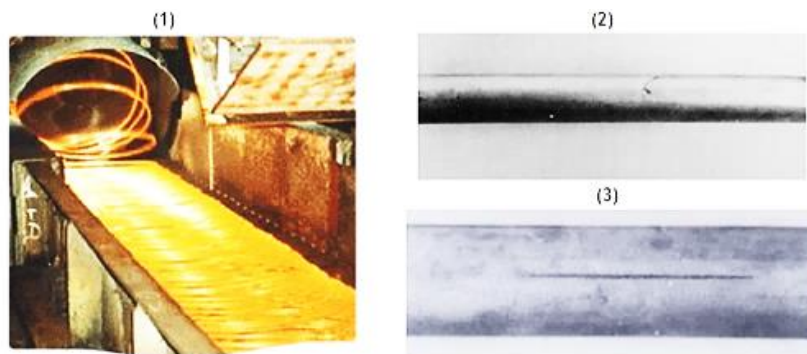


Figura 30 - Inspeção em linha de produção de arame. [45]

1) Arame de aço quente em linha de produção. 2) Defeito transversal. 3) Defeito longitudinal.

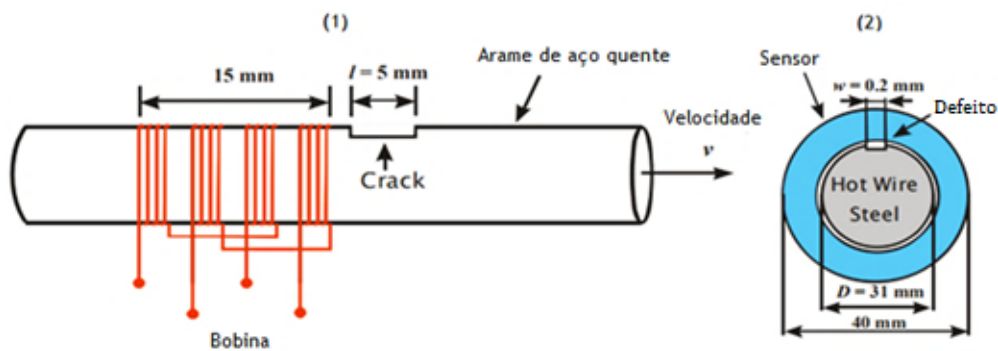


Figura 31 - Inspeção em linha de produção de arame (adaptada). [45]

1) Arame de aço quente envolvido na bobina. 2) Vista da seção transversal do arame.

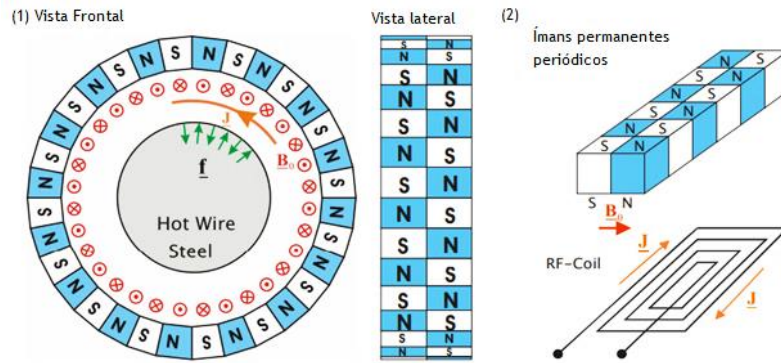


Figura 32 - Inspeção em linha de produção de arame (adaptada). [45]

1) Esboço de uma sonda EMUS de onda *Rayleigh* para inspeção do arame quente. 2) Esboço de um ímã permanente periódico para gerar o campo magnetostático e de uma bobina-rf para excitar correntes de *Eddy* transitórias.

Sven Kling descreve também um sistema totalmente automatizado de inspeção de arame e varões de aço a alta temperatura em linha de produção nos laminadores tubulares (*Rolling Mill*). Os defeitos resultam de uma variedade de causas, como a má qualidade do varão e peças desgastadas, etc. A dimensão dos defeitos detetáveis é de 0.15 mm ou superior dependendo do diâmetro e grau do aço. A característica principal do controlo de processo é a deteção de defeitos periódicos. A inspeção por Correntes Induzidas é capaz de detetar defeitos que se repetem periodicamente, identificando a que frequência eles ocorrem. Quando duas bobinas consecutivas têm a mesma frequência, o sistema gera um alarme e o laminador para de funcionar, para que o varão seja substituído. A inspeção efetua-se a velocidades de cerca de 120 m/s e com comprimentos de bobina superiores a 10 km. Os sinais são avaliados através de três limites A, B e C. Os picos que excedem esses limites são categorizados em um desses três grupos, conforme a Figura 33 e a qualidade geral da peça é determinada a partir do número de defeitos em cada categoria. [47]

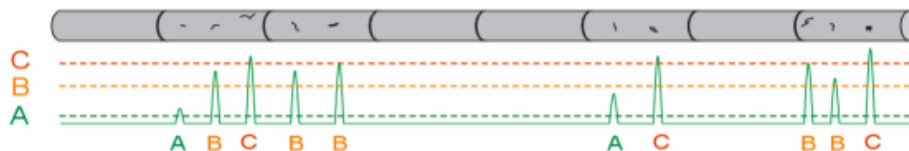


Figura 33 - Classificação dos sinais em categorias. [47]

O sistema de teste consiste em num sistema refrigerado e várias ferramentas de *software* que, em conjunto, formam um sistema completo e totalmente automatizado e que pode ser integrado na rede de controlo do laminador. O sistema refrigerado é instalado atrás do

bloco de rolamento final antes da seção arrefecimento e é constituído por água. É através deste que o material quente passa assim que sai do mecanismo. Podem ser testados varões com diâmetro entre os 5 e os 125 mm.

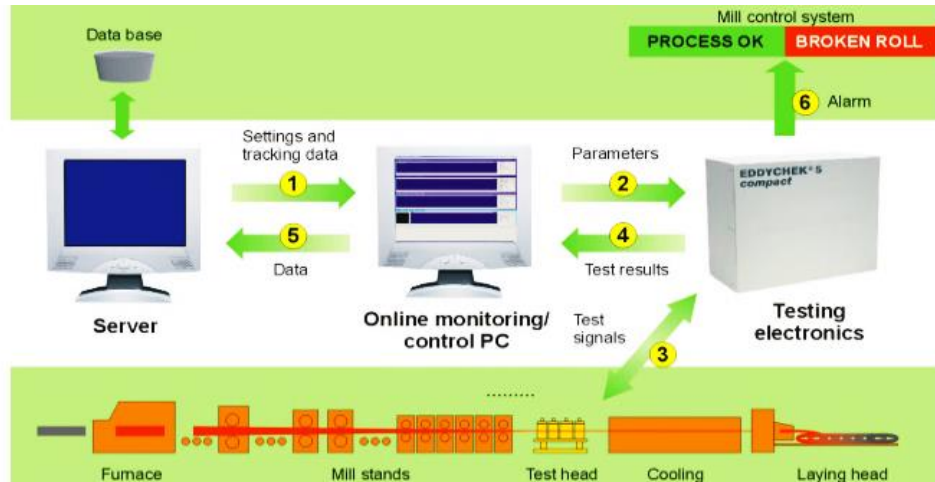


Figura 34 - Configuração do sistema de teste através de CI. [47]

No contexto da inspeção de arame trefilado ainda existem os equipamentos comerciais abaixo descritos, que foram encontrados nos catálogos dos principais fabricantes de equipamentos de Correntes Induzidas

O equipamento *Prüftechnik- Eddy Check* do fabricante *Prüftechnik* permite a inspeção de arame/varões trefilados até 1200 °C a uma velocidade máxima de 200 m/s, analisando várias dimensões de diâmetro entre 4 mm e 115 mm. O arrefecimento das sondas efetua-se através de um circuito fechado de circulação de um fluido refrigerante. Além disso, o sistema ainda realiza a integração em rede para controlo em linha de produção. [48]



Figura 35 - Equipamento EDDY CHECK do fabricante *Prüftechnik*. [48]

O equipamento *HOTdiscover* da ISEND dispõe de uma gama de soluções *HOTdiscover* para a deteção dos defeitos mais comuns (cerca de 90 %) no processo de laminação (*Rolling mill*) a quente dos materiais. A tecnologia utiliza o método das Correntes Induzidas através de bobinas concêntricas altamente sensíveis e refrigeradas por um

fluido refrigerante num circuito fechado, permitindo inspeção de metais até temperaturas próximas da temperatura de fusão (1200 °C) e a altas velocidades (até 200 m/s). O fabricante indica que a detecção de defeitos inferiores a 1 mm ocorre a velocidades iguais ou inferiores a 150 m/s. O Sistema *HOTdiscover* apresenta duas versões diferentes no sentido de atender as necessidades dos seus utilizadores: o *HOTdiscover* BASIC, focado no controlo de qualidade em linha e o *HOTdiscover* PRO, com ferramentas avançadas de análise indicadas para a otimização do processo de produção. [49]



Figura 36 - Equipamento *HOTdiscover* da ISEND [49]

- 1) Base refrigerada do equipamento *HOTdiscover*.
- 2) Sistema de refrigeração de bobinas do equipamento *HOTdiscover*.

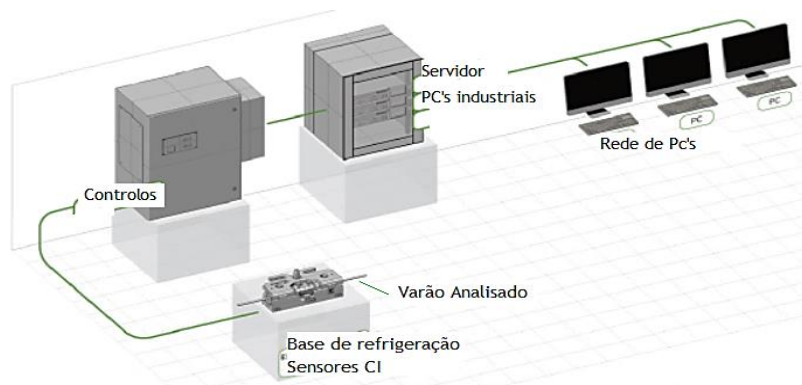


Figura 37 - Sistema do equipamento *HOTdiscover* da ISEND (adaptada). [49]

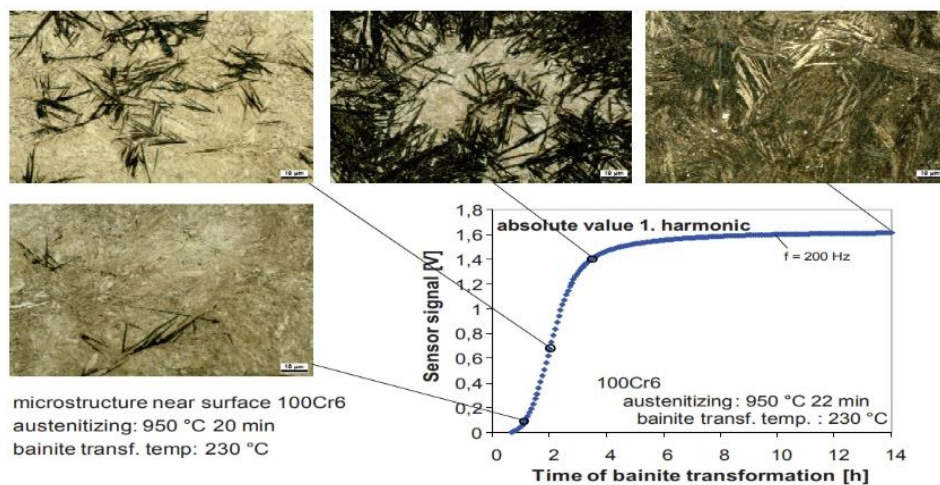
#### 2.4.2. Monitorização de propagação de fissuras em soldaduras em tubagem sob pressão (Reator de Ebulição de Água)

Kasuya et al., com o objetivo de monitorizar a propagação de fissuras em juntas soldadas de tubos de aço austenítico 304, 304L e 316L, desenvolveu uma matriz de sondas de correntes induzidas. Os tubos em questão possuíam um diâmetro interno de 50 mm e um diâmetro externo de 58 mm. Os defeitos iniciais tinham como dimensões 2 mm de profundidade e 0.23 mm de largura, sendo o seu comprimento desconhecido. As sondas construídas consistiam em pares de duas bobinas de excitação e duas bobinas

sensíveis. As fissuras foram preparadas nas zonas termicamente afetadas (ZTA) e nas linhas de soldadura a partir da superfície interna da amostra do tubo. As sondas foram dispostas na superfície externa do tubo nas posições em que as fendas foram introduzidas. Posteriormente ao ensaio experimental, foi realizada a simulação numérica dos sinais das Correntes Induzidas com base nas condições experimentais. Como resultado da comparação entre os sinais experimentais e numéricos, conclui-se que sistema de Correntes Induzidas *in situ* permite detetar a propagação de fissuras nas soldaduras em tubagens sob pressão. Este sistema permitiu a deteção da propagação destes defeitos a uma temperatura de 288 °C. [50] [51]

### 2.4.3. Controlo de tratamento térmico

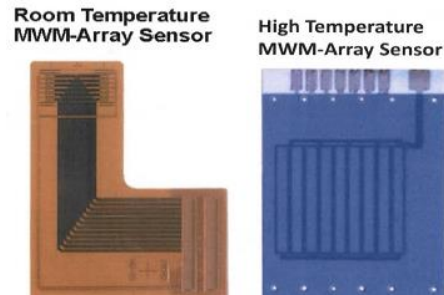
Na investigação desenvolvida Klümper-Westkamp et al. foi construída uma sonda de correntes induzidas para o controlo térmico até 500 °C, encapsulada por um aço austenítico e isolado com um material cerâmico. Este sensor resistente a altas temperaturas serve para monitorização *in situ* do desenvolvimento de microestrutura de ligas de aço durante o tratamento térmico. As medições durante o tratamento oferecem muito mais informações sobre o processo, uma vez que para além dos resultados do estado final, também mostram todas as variações durante o tratamento térmico monitorizadas de forma contínua. No mesmo âmbito, Dickinson et al desenvolveu uma sonda em H isolada em Duratec® (isolante térmico) para monitorizar a transformação de fase de provetes de aço até temperaturas de 1000 °C. [52] [53]



**Figura 38** - Desenvolvimento de microestrutura do material e sinal do sensor durante a endurecimento da bainite por Klümper-Westkamp et al. [52]

#### **2.4.4. Controlo de defeitos em materiais compósitos**

O sensor *Meandering Winding Magnetometer* possui a versão *MWM-Array* projetada para operar em contínuo até 1000 °C na avaliação de defeitos em materiais compósitos, embora ainda necessite de uma cablagem com melhor adaptação as altas temperaturas. [35]



**Figura 39** - Protótipo de *MWM-Array* de 7 canais. Sensor testado a 850 °C sem nenhuma degradação observada. [35]

Para além dos sistemas anteriormente mencionados, não foram encontrados mais sistemas de inspeção por correntes induzidas a alta temperatura nos catálogos disponíveis pelos principais fabricantes de equipamentos.



### 3. Conceção e Produção das Sondas de CI para Alta Temperatura

No presente capítulo estão expostos os requisitos funcionais e soluções construtivas das sondas para altas temperaturas para inspeção de um tubo de aço, bem como todo o processo de conceção a elas associado: desde o projeto até à produção.

#### 3.1. Especificidades do Material de Inspeção

A superfície de inspeção é uma liga de aço classe 16Mo3 detentora de dois cordões de soldadura MAG. Possui um diâmetro de 350 mm, espessura de 20 mm e largura de 495 mm. Face à sua resistência à deformação e propriedades mecânicas melhoradas (até 500 °C), a liga de aço 16Mo3 é particularmente recomendada para uso em temperaturas de serviço elevadas, propriedade obtida através da liga de molibdénio. Conforme se pode observar na Tabela 5, o material apresenta uma condutividade elétrica,  $\sigma$  [% IACS], relativamente baixa (13.2 %) o que implica o uso de frequências elevadas na excitação das sondas devido ao efeito de pele.



Figura 40 - Liga de aço classe 16Mo3.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	N
0.12 - 0.2	0.35	0.4 - 0.9	0.025	0.010	0.3	0.3	0.25 - 0.35	0.3	0.012

Tabela 2 - Composição da liga de aço classe 16Mo3 (valores lidos em %).

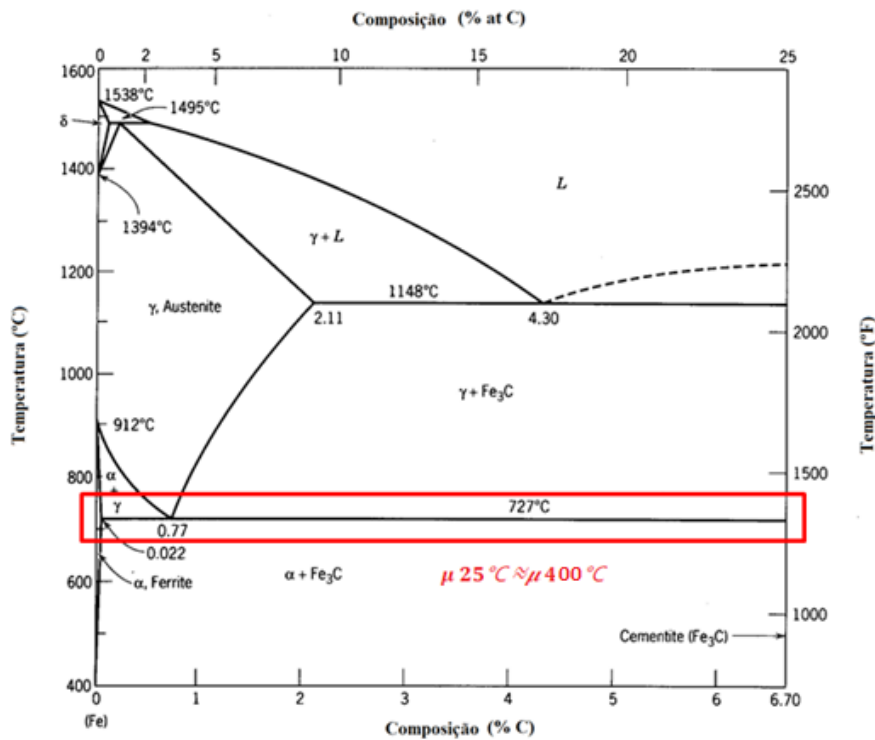
Densidade	7.85 kg/dm <sup>3</sup>
Dureza HB30	130-170 (máximo 60 mm)
Tensão de Rotura	440 Mpa
Tensão de Limite de Cedência	250 Mpa
Módulo de Elasticidade	190 Gpa
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.29
Módulo de Elasticidade à Torção	73 Gpa

**Tabela 3** - Propriedades físicas e mecânicas da liga de aço classe 16Mo3.

Condutividade térmica	39.9 W/mK
Calor específico	538 J/kgK
Coefficiente de expansão térmica	13.5×10 <sup>-6</sup> /K

**Tabela 4** - Propriedades térmicas a 400 °C da liga de aço classe 16Mo3.

Tanto a permeabilidade magnética  $\mu$ , como a condutividade magnética do aço  $\sigma$ , variam consoante a temperatura, contudo para o gradiente de temperaturas considerado nos ensaios desta investigação (até 400 °C), podem assumir-se constantes, conforme verificável nas Figuras 41 e 42.



**Figura 41** - Diagrama de Fase do aço.

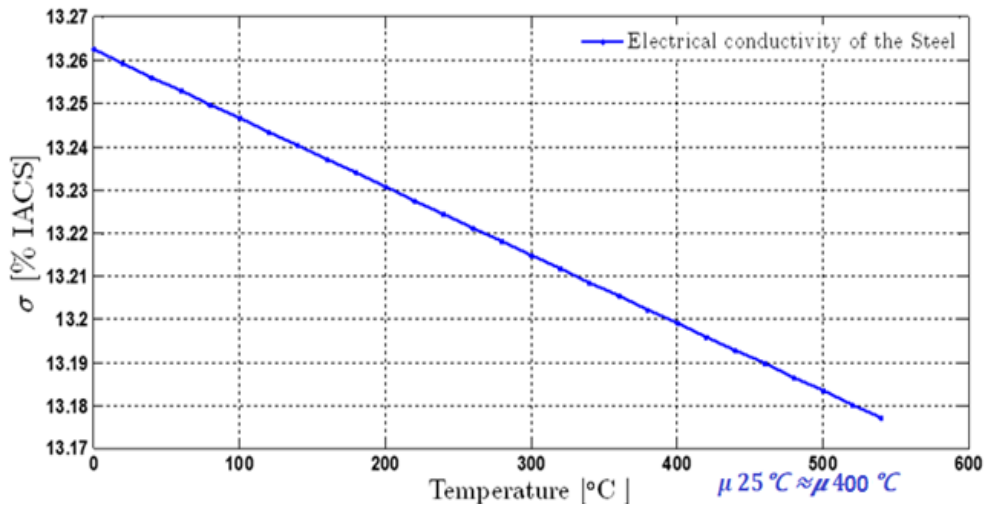


Figura 42 - Condutividade elétrica do aço em função da temperatura.

Condutividade elétrica <sup>9</sup>	$7.6923 \times 10^6$ S/m
Permeabilidade magnética relativa	100

Tabela 5 - Propriedades elétricas da liga de aço classe 16Mo3.

O aço a inspecionar possui vários defeitos circulares, tendo sido escolhido como objeto principal de estudo o defeito circular padrão de raio 1 mm e de profundidade 0.5 mm. A permeabilidade magnética relativa  $\mu_r$  do aço carbono 16Mo3 é cerca de 100 vezes a permeabilidade do ar ( $\mu_r=1$ ) e, como os defeitos são preenchidos por ar, existirá uma grande variação do campo magnético quando este encontra o defeito. Foram ainda realizados defeitos retangulares por eletroerosão para se poderem analisar várias configurações de defeitos. A eletroerosão é um mecanismo de erosão de peças que se baseia na destruição de partículas metálicas por meio de descargas elétricas e que ocorre através de um eléctrodo e a peça que se pretende erudir. A ferramenta que produz os defeitos na peça é o eléctrodo e para que o processo ocorra, a peça e o eléctrodo devem ser bons condutores elétricos. O eléctrodo é ligado a uma fonte de corrente contínua e possui polaridade negativa, sendo que a peça irá possuir polaridade positiva. Ao ser ligado o interruptor da fonte, produz-se uma tensão elétrica entre o eléctrodo e a peça, originando-

<sup>9</sup>A condutividade elétrica  $\sigma = 7.6923 \times 10^6$  [S/m] equivale a 13.2 % IACS.

$$(\sigma_{\%IACS} = \frac{7.6923 \times 10^6}{5.8 \times 10^7} \times 100 = 13.2 \%).$$

se uma “ponte” de iões entre ambos. Por sua vez, o material vai sobreaquecer dentro do campo de descarga, fundindo-se. Conforme se pode verificar na Figura 43, a fonte de corrente contínua para a execução dos defeitos apresentava uma tensão de 30.8 V e uma intensidade de 2.04 A. O eléctrodo foi banhado em água salgada, que é um bom condutor elétrico.

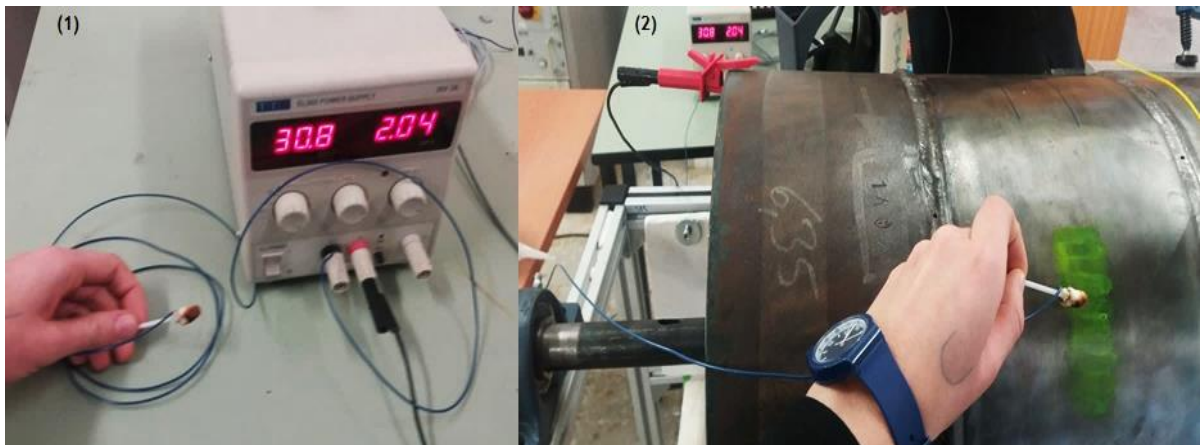


Figura 43 - Processo de eletroerosão realizado no aço carbono 16Mo3.

1) Fonte de CC utilizada. 2) Realização dos defeitos.

Defeito	Comprimento [mm]	Profundidade [mm]	Largura [mm]	
Horizontal	10	0.4	0.5	
Vertical	10	0.4	0.5	
Ângulo 30° c/Horizontal	13	0.4	0.5	

Tabela 6 – Defeitos resultantes da eletroerosão utilizados nos ensaios experimentais.

### **3.2. Requisitos Funcionais e Desenvolvimento Conceptual das Sondas**

Foram desenvolvidas duas soluções construtivas de sondas a altas temperaturas para a inspeção da liga de aço descrita no capítulo 3.1. Uma das soluções construtivas foi desenvolvida com o objetivo de inspecionar o material de base, enquanto que a segunda foi desenvolvida para análise dos respectivos cordões de soldadura. Ambas as sondas devem detetar os defeitos axiais, que são os defeitos de melhor deteção por se encontrarem perpendiculares às correntes induzidas, o que provoca grande distorção das mesmas; devem detetar os defeitos circulares, que por norma são mais difíceis de detetar em relação aos defeitos retangulares, uma vez que provocam menor distorção nas correntes; devem apresentar uma configuração geométrica das bobinas de excitação e receção por forma a que as correntes induzidas sejam suficientemente distorcidas, mesmo na existência de defeitos orientados tangencialmente às correntes, já que estes são de mais difícil deteção por se encontrarem na direção das correntes; devem possuir grande sensibilidade na deteção de defeitos muito reduzidos que passam muitas vezes por despercebidos face às suas dimensões; devem ser capazes de suportar temperaturas até 400 °C, sendo necessário o seu dimensionamento com sistemas de refrigeração para diminuir o efeito térmico provocado quer na sua impedância  $Z$ , quer na sua estrutura. Para além disso, ambas as sondas são acompanhadas por um *chassi*, adaptável à liga de aço e à mesa de ensaios onde este vai ser sujeito ao gradiente de temperatura.

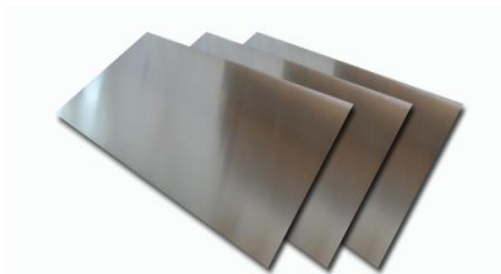


**Figura 44** - Liga de aço classe 16Mo3 colocado na mesa de inspeção.

### **3.2.1. Materiais utilizados na Construção dos Módulos**

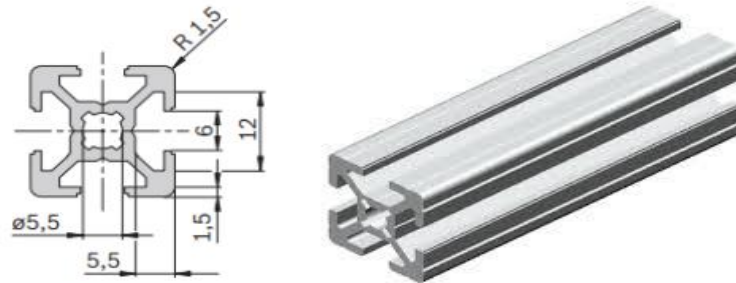
Foram utilizados diversos tipos de materiais para ser possível a implementação prática dos módulos (*chassi* + sonda) de Correntes Induzidas, conforme as necessidades da aplicação final.

**Aço 316L** - liga de ferro cromo-níquel molibdênio não temperável e inoxidável austenítico com baixos teores de carbono e densidade 8. Não possui propriedades magnéticas, embora possa apresentar vestígios de ferrite. É imune à precipitação de carboneto de limite de grão, o que o torna favorável à soldadura. Apresenta uma temperatura de fusão de 1400 °C, resistência à corrosão intercrystalina até 300 °C e resistência à oxidação até 870 °C. Possui maior resistência à tração e tensão de ruptura em altas temperaturas quando comparados com os restantes aços inoxidáveis austeníticos de cromo-níquel, sendo que a sua tensão máxima de ruptura é de 380 N/mm<sup>2</sup> a 600 °C. Também é mais fácil de maquinar em comparação com o aço inoxidável 316 devido ao menor teor de carbono. Este material foi utilizado na construção dos *chassis* das sondas. Composição Química: C (0.03 %), Cr (16 a 18 %), Ni (10 a 14%), Mo (2 a 3 %), N<sub>2</sub> (10 %), S (0.03 %), P (0.045 %), Mn (2 %), Si (1 %).



**Figura 45** - Aço 316L.

**Perfis Bosch 20x20** - perfil estrutural em alumínio série 2000, cujo cobre é o principal elemento de liga deste grupo. Possuem um peso de 0.4 kg/m e um ponto de fusão de aproximadamente 550 °C. Foram utilizados nos *chassis* das sondas.



**Figura 46** - Dimensões características do perfil Bosch 20x20.

**Isolantes laminados** - laminado de mica rígido (ca.90 %, IEC 371-2) com espessura de 1 mm utilizado para fornecer isolamento em casos de temperatura extremamente elevada. Apresenta condições favoráveis de serviço contínuo até 500 °C e intermitente até 800 °C. Possui uma permissividade relativa  $\epsilon_r$  no intervalo entre 4 e 9. Foi utilizada nos *chassis* das sondas.



**Figura 47** - Laminado de mica MIC-99.

**Isolantes cerâmicos** - cerâmica de vidro maquinável Macor® com alta resistência a temperaturas elevadas, suportando até 800 °C de temperatura em serviço contínuo. Possui um coeficiente de expansão térmica de  $112 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$  (25 °C a 600 °C), uma constante dielétrica de 6,01@1 kHz/5,64@8,5 GHz a 25 °C, e uma permeabilidade magnética relativa  $\mu_r$  equivalente à do vácuo e do ar, ou seja, igual a 1. Na Figura 48 estão expostas duas peças maquinadas para serem utilizadas na confecção das sondas. Composição Química: SiO<sub>2</sub> (46 %), MgO (17 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (16 %), K<sub>2</sub>O (10 %); B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7 %) e F (4 %).

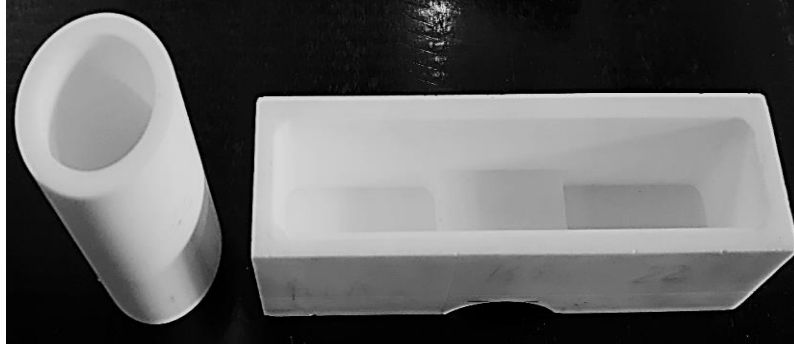


Figura 48 - Isolantes cerâmicos Macor®.

**Núcleos ferromagnéticos** - núcleos nos quais os fios de cobre são enrolados, formando as bobinas das sondas. Um dos materiais utilizados é indicado para operar em frequências até 500 kHz e possui permeabilidade magnética relativa inicial  $\mu_i$  de 2300@B<10 Gauss, densidade de fluxo B de 4800 Gauss@H=5 Oersted, fator de perda  $\tan(\delta/\mu_i)$  de 4.5@0.1 MHz, coeficiente de temperatura da permeabilidade inicial TC de 1%/°C, além de uma temperatura de Curie  $T_C > 200$  °C. A barra ferromagnética utilizada (referência 3078990871 *Fair-Rite*) possui um diâmetro de 3 mm, comprimento de 25 mm e permeabilidade magnética relativa ( $\mu_{ROD}$ ) de 36.

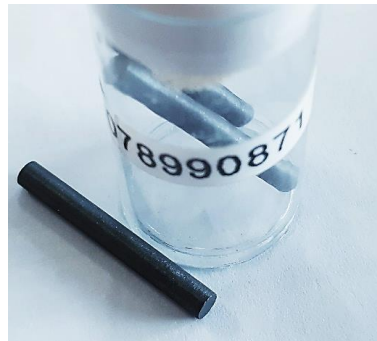
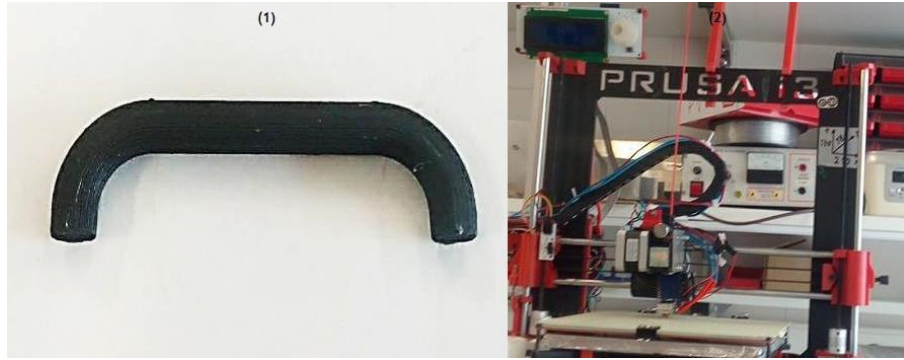


Figura 49 - Núcleos ferromagnéticos *Fair-Rite*.

Outro material utilizado como núcleo ferromagnético é uma composição de ferro e ácido poliático (PLA). Este material permite a criação de geometrias específicas através de impressão 3D e apresenta permeabilidade magnética relativa  $\mu_r$  5-8@1 MHz. A Figura 50 apresenta o núcleo impresso e utilizado na construção das sondas, bem como a impressora na qual este foi produzido.



**Figura 50** - Núcleo ferromagnético impresso em 3D.

1) Núcleo após impresso. 2) Impressora 3D.

**Fios de cobre** - fios de diâmetro de 0.10 mm e 0.15mm, com capacidade de corrente até 0.03 A e 0.06 A, respectivamente. São detentores de verniz isolante à base de poliuretano responsável por evitar curto-circuitos entre as espiras adjacentes e resistente a temperaturas até 155°C (classe F – IEC 60085). É utilizado na construção das sondas.



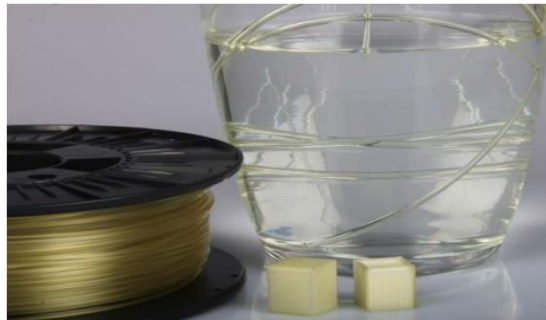
**Figura 51** - Rolo de fio de cobre *Block-trafo* CUL 100/0.15.

**Ácido Polilático (PLA)** - polímero biodegradável com diâmetro de 2.85 mm e é utilizado nas impressões 3D. A sua temperatura de impressão possui valores típicos entre 180 e 210 °C. Este material possui permeabilidade magnética relativa  $\mu_r$  equivalente a 1 e por isso é utilizado na estrutura interna da sonda que, por sua vez, fica revestida de isolante térmico cerâmico.



**Figura 52** - Ácido polilático para impressão 3D.

**Álcool Polivinílico (PVA)** - polímero biodegradável de 2.85 mm de diâmetro utilizado na construção dos suportes das peças enquanto são produzidas na impressora 3D. A sua temperatura de impressão possui valores típicos de 180 a 205 °C.



**Figura 53** - Álcool polivinílico para o suporte de peças durante as impressões 3D.

**Sensores de temperatura** - termopar tipo K com dois cabos condutores de secção  $0.07\text{mm}^2$ . São isolados por fibra de vidro banhada em verniz e com ponta soldada para evitar a oxidação. Possui um sinal de saída FEM (força eletromotriz gerada pelo termopar) expresso em milivolts [mV] conforme a norma IEC 60584. A gama de temperatura do isolamento situa-se entre  $-50\text{ °C}$  e  $400\text{ °C}$ , contudo o termopar possui um alcance até  $1000\text{ °C}$ . A tolerância padrão dos termopares tipo K classe 1 são:  $-40\text{ °C} < T < 375\text{ °C} = \pm 1,5\text{ °C}$  e  $375\text{ °C} < T < 1000\text{ °C} = \pm 0,004\text{ °C}$ . Estes sensores são utilizados para monitorizar a temperatura interna das sondas.



Figura 54 - Sensor de temperatura termopar tipo K.

**Ímanes** - materiais magnéticos utilizados para saturação da liga de aço. Possuem um volume de  $12 \times 12 \times 12 \text{ mm}^3$ , são constituídos por NdFeB (*neodymium magnet*) e revestidos por níquel galvanizado (Ni-Cu-Ni). Apresenta uma qualidade de magnetização igual a N48, força de 61.8 N, temperatura máxima de operação igual a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  e temperatura de Curie  $T_C$  de  $310 \text{ }^\circ\text{C}$ . Apresenta também uma magnetização residual  $B_r$  nos intervalos 13700-14200 Gauss/1.31-1.42T, uma força de campo coercivo  $H_c$  nos intervalos 10.8 - 12.5 kOe/860-995 kA/m, e um produto energético ( $B \times H$ ) máximo nos intervalos 45-48 MGaussOersted/358-382 kJ/m<sup>3</sup>.

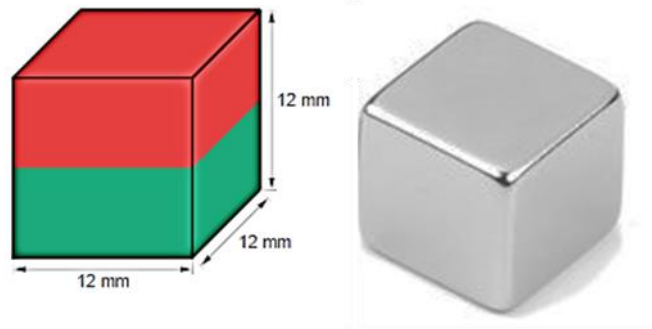


Figura 55 - Íman e respetivas dimensões.

**Conectores** - componentes multipolares polarizados de interconexão (*push-pull*) entre a sonda e o equipamento medidor de impedâncias. Suportam a passagem de corrente até 230 A, possuem uma vida útil de mais 5000 ciclos de contacto e grau de proteção IP 50 (IEC 60529) quando conectado. Além disso, possui resistência às vibrações do tipo 10 - 2000 Hz, 15g (IEC 60512-4). A temperatura de operação pode variar entre  $- 55$  e  $250 \text{ }^\circ\text{C}$

e pode operar com humidade até 95% @60 °C. Nas sondas produzidas foram utilizados conectores de 3 e 4 contactos, do modelo exemplificado na Figura 56.



**Figura 56** - Família dos conectores multipolares para conexão das sondas ao equipamento medido.

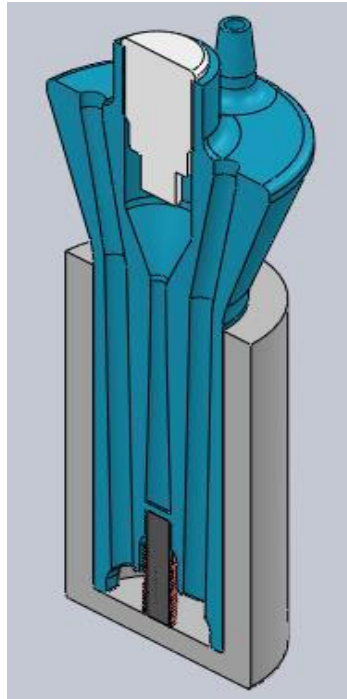
### **3.2.2. Processo de Construção do Módulo para Inspeção do Material de Base**

#### **3.2.2.1. Construção das Sondas**

A partir dos materiais descritos anteriormente, foram produzidas duas sondas de diferentes arquiteturas, com o objetivo de inspecionar o material de base da liga de aço. Neste tipo de inspeção, a sonda é posicionada num ponto inicial da liga e movimenta-se ao longo do seu perímetro, varrendo uma área do tipo anelar.

**Sonda Absoluta** – esta solução utiliza somente uma bobina de dupla função, ou seja, induz as correntes necessárias durante a inspeção e é sensível às variações magnéticas provenientes dos possíveis defeitos a serem encontrados no material em avaliação. Esta bobina possui 200 espiras, produzidas com fio de cobre de 0.10 mm de diâmetro e enroladas no núcleo cilíndrico de ferrite de 3 mm de diâmetro (*Fair-Rite 3078990871*). O corpo da sonda com altura de 77 mm consiste numa estrutura de PLA onde são se encontram condutas de acesso à bobina para passagem de água ( $\mu_r = 1$ ) necessária à refrigeração e as condutas do termopar (que vão até o ponto mais crítico de medição da temperatura, ou seja, próximo da bobina). As conexões da bobina estão acessíveis através de um conector multipolar de 3 contactos, posicionado na face superior da sonda por forma a facilitar o acesso ao cabo do equipamento de medição de impedâncias e providenciar robustez mecânica à esta interconexão, visto que os fios de cobre da bobina são extremamente sensíveis à rutura. Para obter a isolamento térmica requisitada pela aplicação foi utilizado um copo cerâmico cilíndrico de diâmetro 25 mm, que envolve a

estrutura interna da sonda, possuindo uma parede de 3.5 mm e 45 mm de altura. A abertura interna do copo foi realizada com torno mecânico.



**Figura 57** - Vista em corte da sonda absoluta projetada.

A partir do projeto apresentado na Figura 57, iniciou-se o processo de produção da sonda abaixo descrito:

*1º - impressão 3D da estrutura interna da sonda que servirá de base de apoio e alinhamento da sonda;*

*2º - enrolamento das 200 espiras no núcleo de ferrite, fazendo uso de um sistema automático de produção de bobinas que conta com a utilização de um motor e software controlador/de interface com utilizador;*

*3º - passagem dos fios da bobina pela respetiva conduta até a face superior da sonda e fixação da bobina na estrutura interna de PLA, através de cianoacrilato, que atua como vedante à passagem de água por eventuais frestas entre o PLA e a bobina;*

*4º - soldadura dos fios da bobina nos terminais do conector e fixação do conector ao PLA através do uso de cianoacrilato;*

5º - passagem dos fios do termopar pelas respectivas condutas até à face lateral da sonda, conexão das mangueiras de entrada e saída de água para a refrigeração e fixação do cabo de interconexão ao equipamento de medição de impedâncias;

6º - inserção e fixação da estrutura interna da sonda no copo cilíndrico cerâmico isolante, através do uso de cianoacrilato.

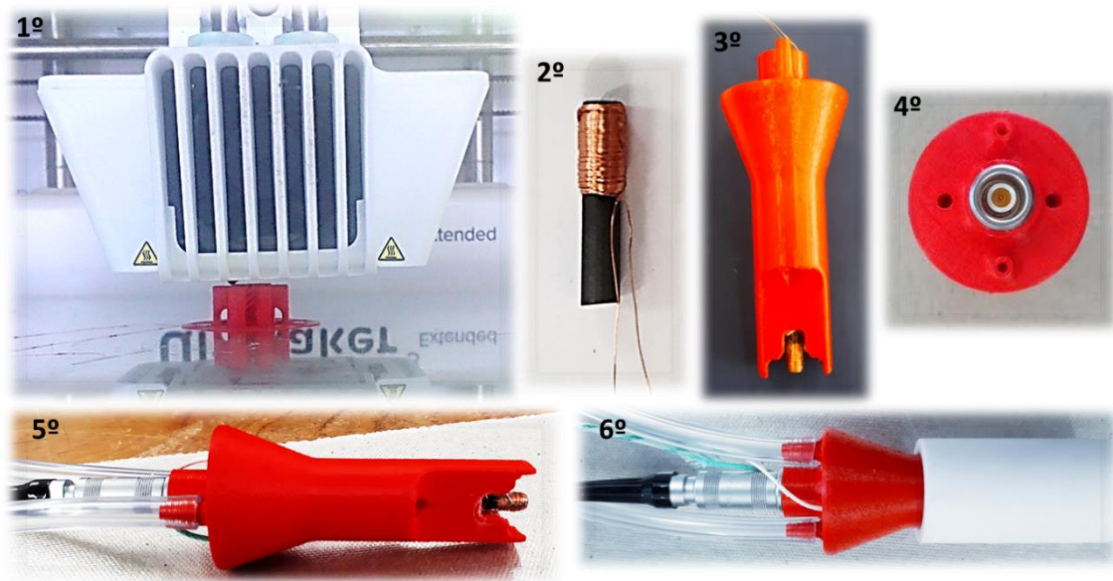
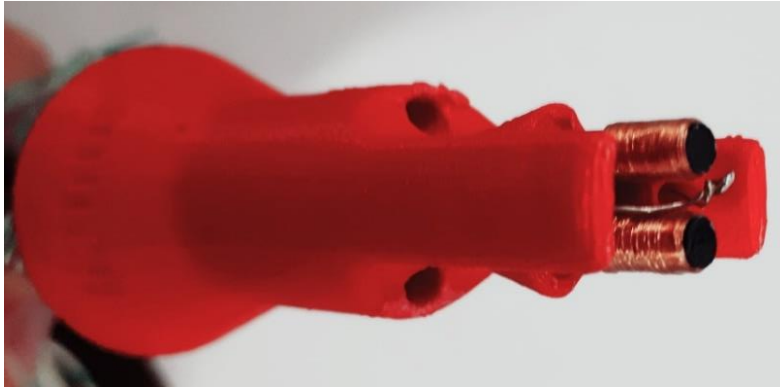


Figura 58 - Processo de construção da sonda absoluta.

**Sonda Diferencial *Bridge*** – esta solução também possui a abordagem de bobinas com dupla função, contudo são utilizadas duas bobinas que operam em modo diferencial. Esta característica pode trazer vantagens na relação sinal ruído da medição e, conseqüentemente, na visualização do sinal indicador de defeito no material em inspeção. Cada uma das bobinas possui 200 espiras, produzidas também com fio de cobre de 0.10 mm de diâmetro, enroladas sobre o mesmo núcleo cilíndrico de ferrite descrito para a sonda absoluta. A estrutura interna de PLA é bastante semelhante à utilizada para a sonda absoluta, com exceção das cavidades de apoio e alinhamento para as duas bobinas, conforme a Figura 59. O processo de fabrico segue os mesmos passos descritos para a sonda absoluta, com exceção da necessidade de produção das duas bobinas, fixação das mesmas à estrutura interna da sonda e as ligações destas ao conector da face superior.

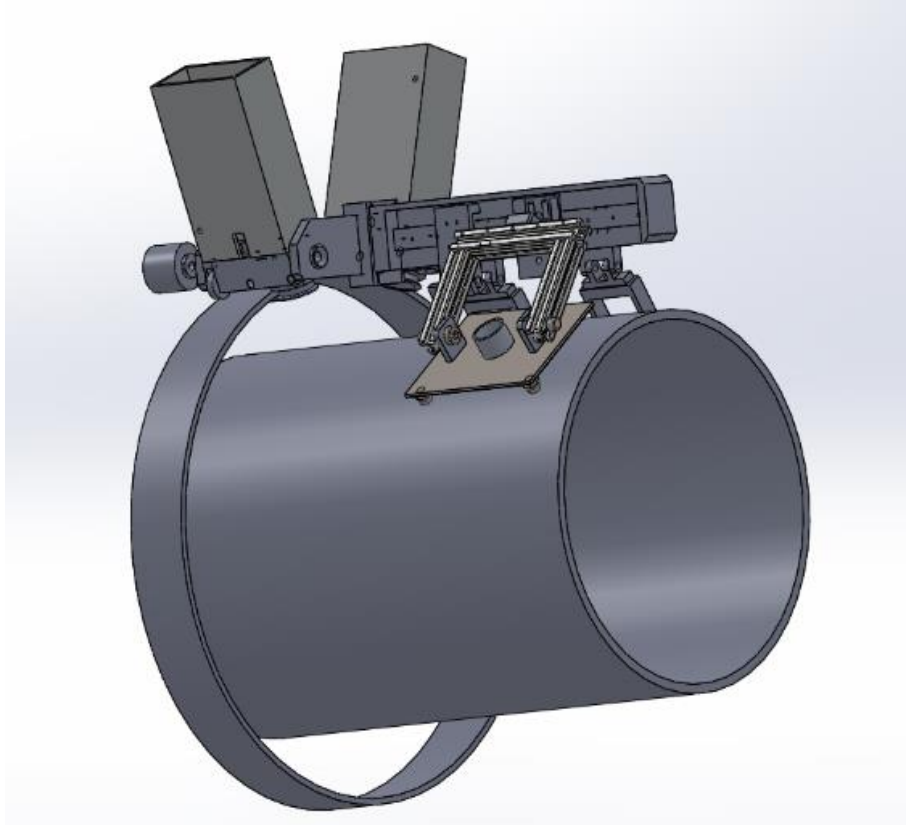


**Figura 59** - Sonda diferencial *bridge*.

### **3.2.2.2. Construção do *Chassi***

Inicialmente, idealizou-se um *chassi* que satisfizesse simultaneamente as exigências dimensionais impostas pela geometria do tubo de aço, pela mesa de ensaios existente no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos da FCT e pelo suporte fornecido pelo ISQ. Além disso, deveria preencher os requisitos de temperatura elevada, permitindo alcances até 400 °C. Posto isto, recorreu-se à ferramenta *Solidworks* onde foi dimensionado todo o *chassi* para ser maquinado. O *chassi* produzido permite ser utilizado em conjunto com ambas as sondas construídas (absoluta e diferencial). Nas Figuras 60, 61 e 62 apresenta-se o desenho técnico e as vistas tridimensionais resultantes.

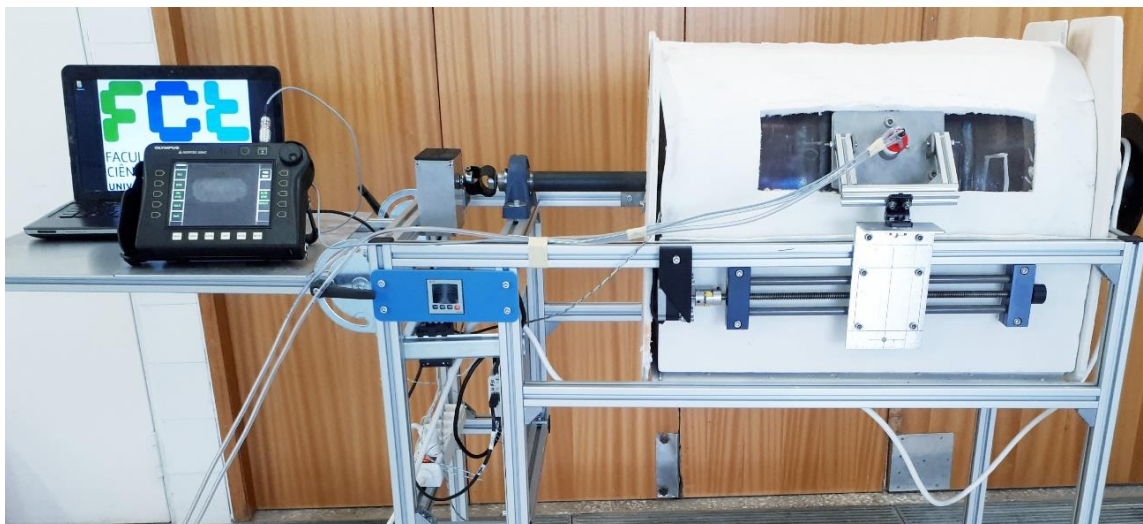




**Figura 62** - Perspetiva tridimensional do *chassi* da sonda integrado no suporte fornecido pelo ISQ.

### **3.2.2.3. Vista Geral do Módulo**

O módulo de sondas de Correntes Induzidas foi acoplado ao protótipo laboratorial existente no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos da Faculdade de Ciências e Tecnologias (FCT). Esta validação permite que o módulo para inspeção do material de base possa ser utilizado em conjunto com o suporte fornecido pelo ISQ. As Figuras 63 e 64 ilustram a integração ao protótipo laboratorial.



**Figura 63** -Vista geral do módulo da sonda para inspeção do material de base e mesa de ensaio prontos a serem utilizados.



**Figura 64** - Detalhe do módulo da sonda para inspeção do material de base integrado no protótipo.

### **3.2.3. Processo de Construção do Módulo para Inspecção do Cordão de Soldadura**

#### **3.2.3.1. Construção da Sonda**

A sonda para a soldadura foi desenvolvida para avaliar ambos os lados do cordão de soldadura simultaneamente, com movimentação ao longo do perímetro da liga de aço. Deste modo, utilizou-se uma geometria retangular para o isolante cerâmico, com a abertura de um arco na face voltada para a soldadura e com uma cavidade interna para inserção da sonda.

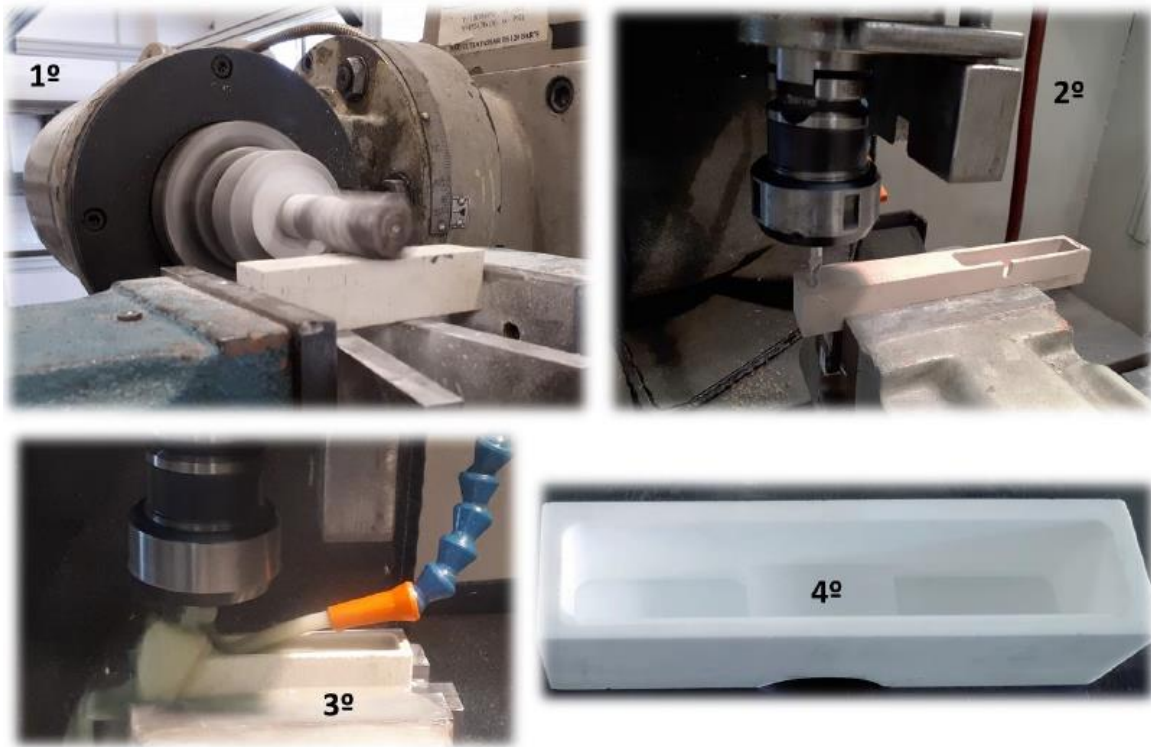
O processo de maquinagem do isolante cerâmico é detalhado abaixo:

*1º - abertura do arco de 26 mm na face voltada para a soldadura utilizando uma fresa manual;*

*2º - escrita do código G no centro de maquinagem Leadwell para realizar a cavidade interna onde assenta a sonda e teste do código em madeira;*

*3º - maquinagem da cavidade interna do isolante cerâmico no centro de maquinagem Leadwell;*

*4º - isolante cerâmico maquinado e pronto para receber a estrutura interna da sonda.*



**Figura 65** - Maquinagem do isolante térmico cerâmico retangular.

Relativamente às bobinas, utilizou-se o sistema de transmissão/reflexão com as bobinas sensíveis em modo diferencial. A excitação é realizada por uma bobina com 1000 espiras, produzida com fio de cobre de 0.15 mm de diâmetro, enroladas num núcleo ferromagnético obtido por impressão 3D em formato toroidal. Cada uma das bobinas sensíveis possuem 200 espiras, produzidas também com fio de cobre de 0.15 mm de diâmetro e envolvidas em núcleos de ferrite de 3 mm de diâmetro (*Fair-Rite* 3078990871).

Seguidamente, apresenta-se a sequência de construção da sonda para a soldadura:

- 1º - realizou-se a impressão tridimensional da estrutura interna da sonda em PLA;*
- 2º - impressão da estrutura interna finalizada;*
- 3º - enrolou-se as 200 espiras nas duas bobinas sensíveis, unindo-as num de seus contactos;*
- 4º - imprimiu-se o núcleo ferromagnético toroidal e enrolou-se as 1000 espiras ao longo do mesmo;*

5º - posicionou-se e fixou-se os ímanes e as bobinas (sensíveis e de excitação) na estrutura interna da sonda, utilizando-se cianoacrilato para o efeito;

6º - inseriu-se a estrutura interna da sonda no isolante térmico cerâmico maquinado;

7º - posicionou-se e fixou-se a tampa da sonda no isolante térmico cerâmico, utilizando-se cianoacrilato para o efeito.

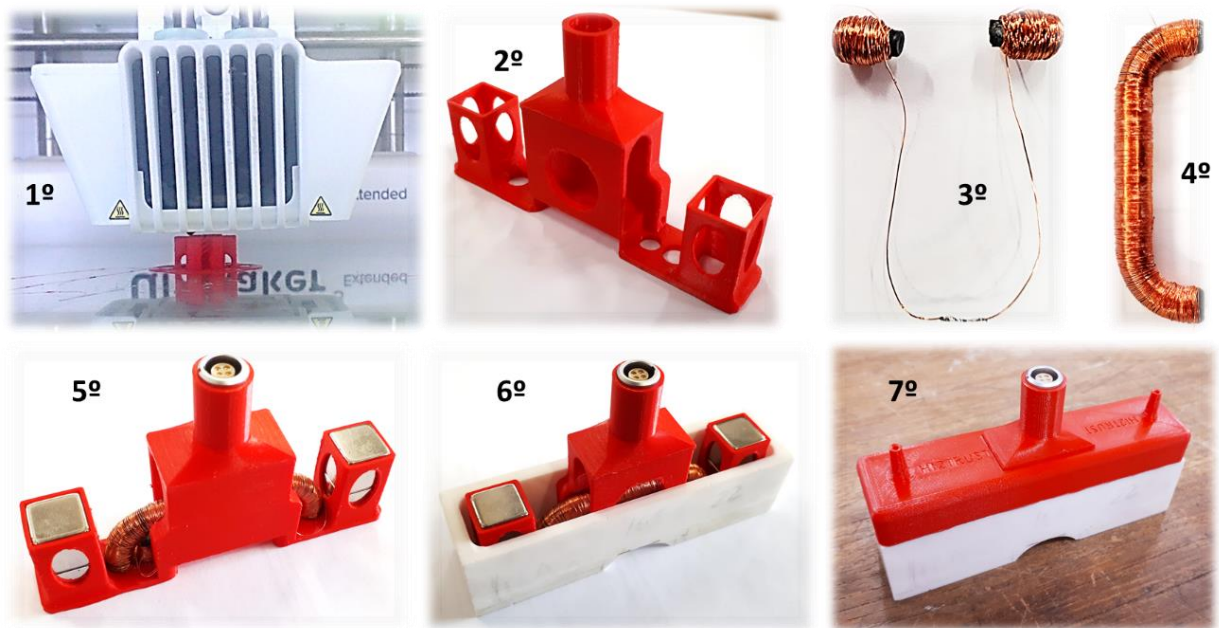


Figura 66 - Processo de construção da sonda para inspecionar o cordão de soldadura.

### 3.2.3.2. Construção do Chassi

Para a construção do *chassi* da sonda para inspeção do cordão de soldadura recorreu-se aos mesmos materiais utilizados para a construção do *chassi* da sonda para inspeção do material de base, por forma a satisfazer as mesmas exigências térmicas e dimensionais. Nas Figuras 67 e 68 apresentam-se o desenho técnico e a perspetiva tridimensional deste *chassi*.

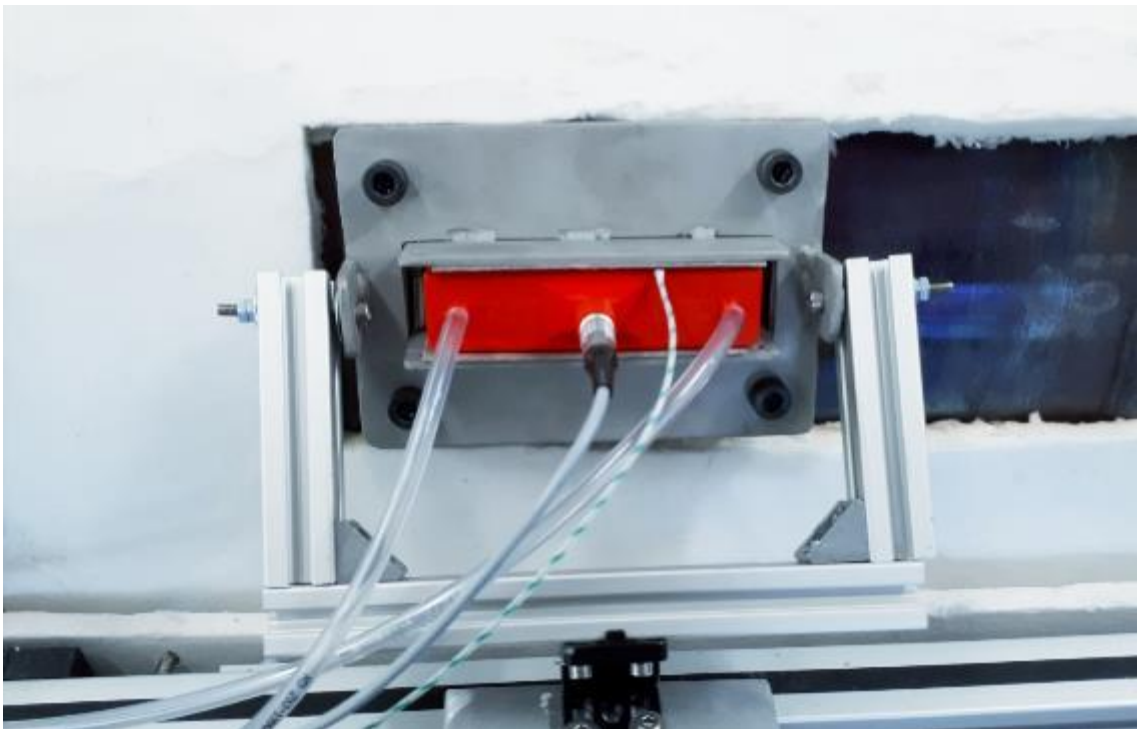


### 3.2.3.3. Vista Geral do Módulo

Após a produção da sonda e de seu *chassi*, conforme descrito nos itens anteriores, este módulo de inspeção por Correntes Induzidas foi validado em montagem no protótipo laboratorial, o que permite a sua integração com o suporte fornecido pelo ISQ. A figura 69 e 70 mostram esta integração ao protótipo laboratorial.



**Figura 69** - Vista geral do módulo da sonda para inspeção do cordão de soldadura e mesa de ensaios prontos a serem utilizados.



**Figura 70** - Detalhe do módulo da sonda para inspeção do cordão de soldadura integrado no protótipo.



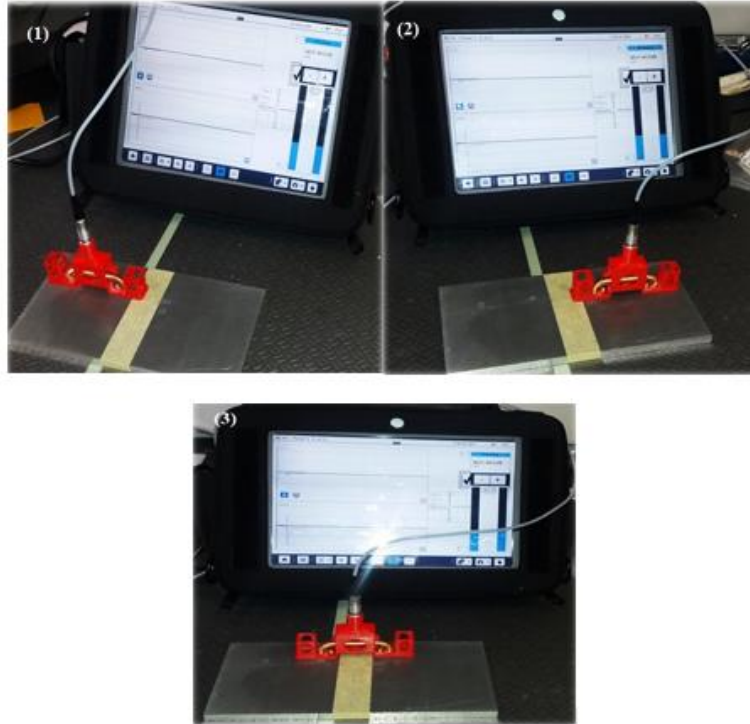
## **4. Simulações Numéricas**

O presente capítulo é destinado às simulações numéricas efetuadas nas sondas concebidas e detalhadas no capítulo 3. Inicialmente, descrevem-se as simulações eletromagnéticas que permitem analisar os fenómenos elétricos e magnéticos decorrentes do funcionamento das sondas, ajustando vários parâmetros de inspeção tais como a frequência de excitação e posição do defeito em relação às bobinas sensíveis. Na segunda metade do capítulo, apresentam-se as simulações térmicas que possibilitam analisar os efeitos térmicos resultantes da sujeição das sondas a um elevado gradiente de temperatura.

### **4.1. Ensaio Preliminares**

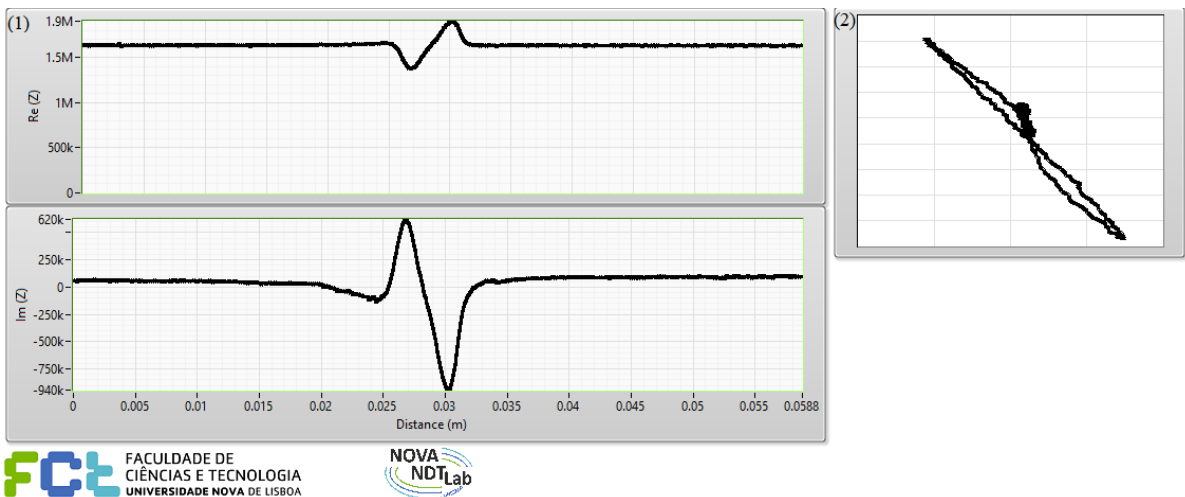
Foram realizados ensaios que precederam as simulações numéricas apenas com o objetivo de verificar se as sondas concebidas e detalhadas no capítulo 3 funcionavam. As sondas desenvolvidas para inspeção do material de base apresentavam variação no plano de impedância  $Z$  à passagem por um defeito típico anteriormente detetado por outras versões de sondas CI, o que nos permitiu avançar para as simulações numéricas e respetivas validações experimentais na liga de aço 16Mo3, uma vez que estavam funcionais. Contudo, a sonda desenvolvida para inspeção do cordão de soldadura não apresentou qualquer resposta à passagem por esse defeito de acordo com o varrimento para o qual foi desenvolvida. Conforme a Figura 71, a sonda foi testada numa placa de aço com recurso ao *Mentor EM Portable Eddy Current Tester* fornecido pela *General Electric*, que é um equipamento para a deteção de defeitos no material através da captura de dados eletromagnéticos (*Eddy Current*), permitindo a obtenção de dados de inspeção em tempo real. Foram realizados três tipos de varrimento, tendo sido aplicada uma tensão de 8 V, uma frequência de excitação de 50 kHz, um ganho de 40 dB e ainda um filtro passa-banda que consiste num componente que permite a passagem das frequências de uma certa faixa e atenua as frequências fora dessa faixa. Pelos gráficos presentes nas Figuras 72 a 74, podemos concluir que a sonda não respondeu quando efetuado um varrimento de acordo com a posição para o qual foi concebida, contudo as duas bobinas de receção (sensíveis) apresentaram um sinal de resposta, variando os valores de impedância  $Z$  [ $\mu\text{Ohm}$ ] à passagem pelo defeito, mas somente quando atuaram separadamente. Uma das possíveis causas para este resultado deve-se ao facto de a bobina de excitação toroidal

possuir um núcleo composto de ferro e ácido polilático (PLA), impresso em 3D. Para além disso, apresentava uma distância (*lift-off*) muito grande em relação ao defeito.



**Figura 71** - Ensaio realizados para verificação da operacionalidade da sonda concebida para inspeção do cordão de soldadura.

- 1) Ensaio com início do varrimento à esquerda do defeito.
- 2) Ensaio com início do varrimento à direita do defeito.
- 3) Ensaio realizado com varrimento para o qual foi desenvolvida a sonda.



**Figura 72** - Resultado do ensaio com início do varrimento à esquerda do defeito.

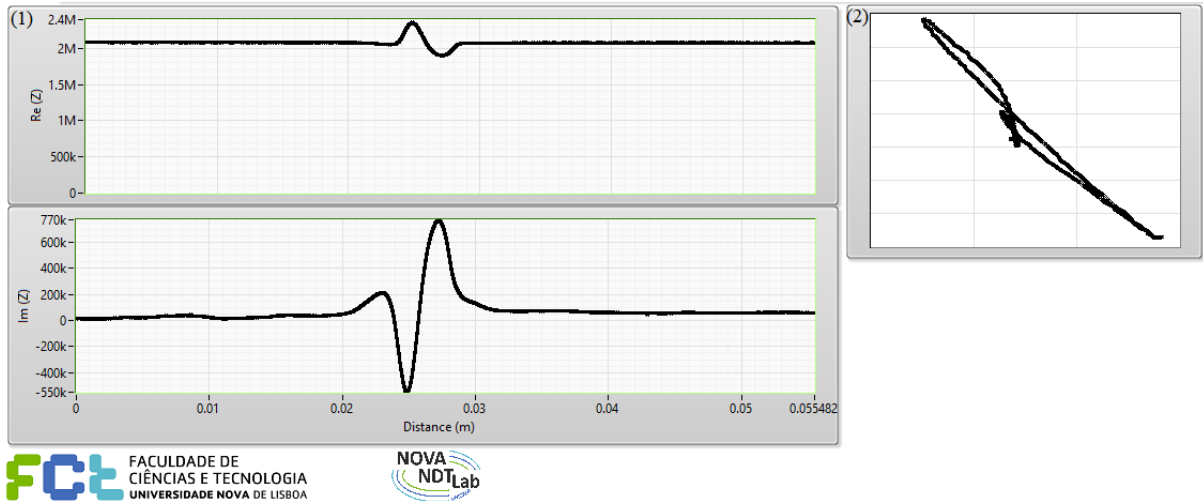


Figura 73 - Resultado do ensaio com início do varrimento à direita do defeito.

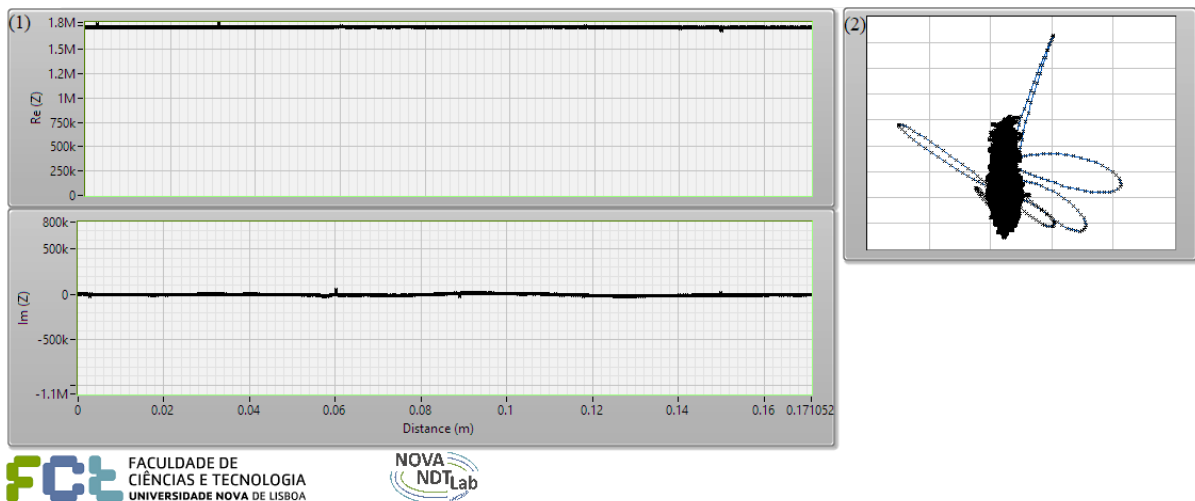


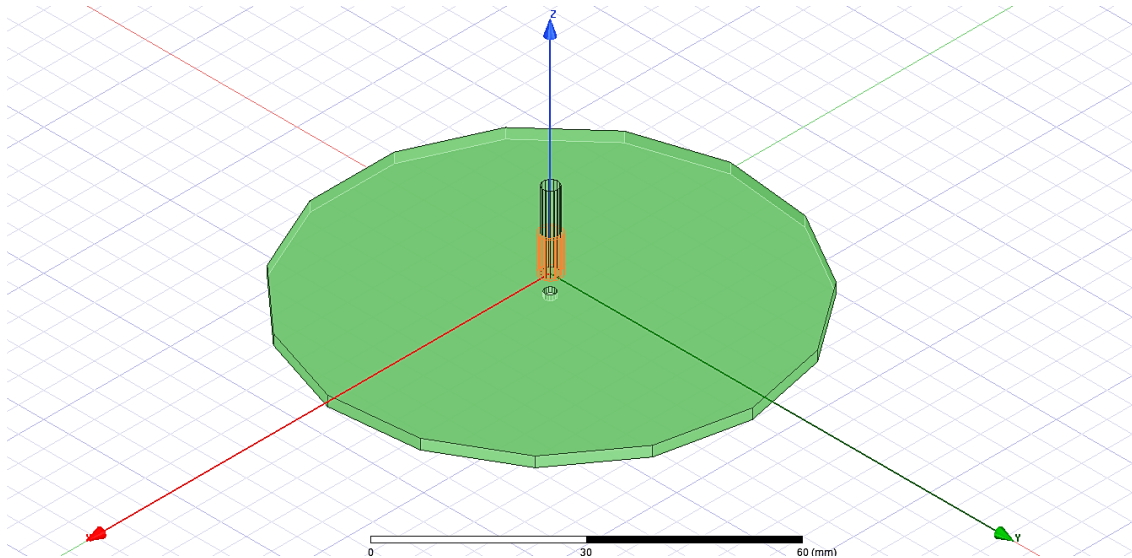
Figura 74 - Resultado do ensaio realizado com o varrimento para o qual foi desenvolvida a sonda.

## 4.2. Simulações Eletromagnéticas

### 4.2.1. Sonda Absoluta

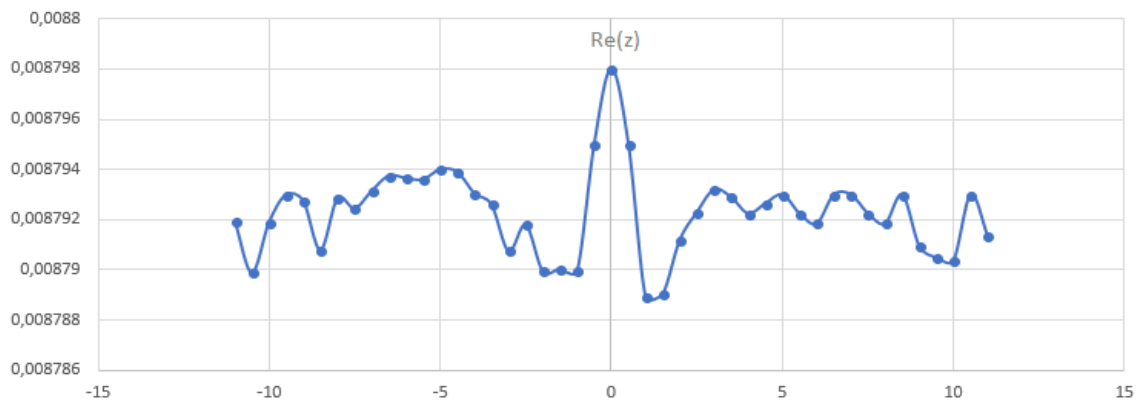
Foram realizadas simulações numéricas com recurso ao *software* comercial *Ansys*. Modelou-se bobina helicoidal levando em consideração cada detalhe da sonda já concebida: *lift-off* de 3 mm e enrolamentos de excitação de 0.15 mm com 1 A por espira dos quais resultam 200 A por bobina, já que esta possui 200 espiras. Considerou-se também o defeito circular de diâmetro 2 mm e profundidade 0.5 mm, numa placa com o mesmo material do tubo a inspecionar. Foi modelada uma placa na vez da curvatura do

tubo de aço, dado que é uma forma simplificada de o representar, fazendo a ressalva de que a curvatura pode ser planificada desde que as CI fechem o perímetro pelo tubo.



**Figura 75** - Desenho esquemático da sonda absoluta e do aço detentor do defeito circular realizado no *software Ansys*.

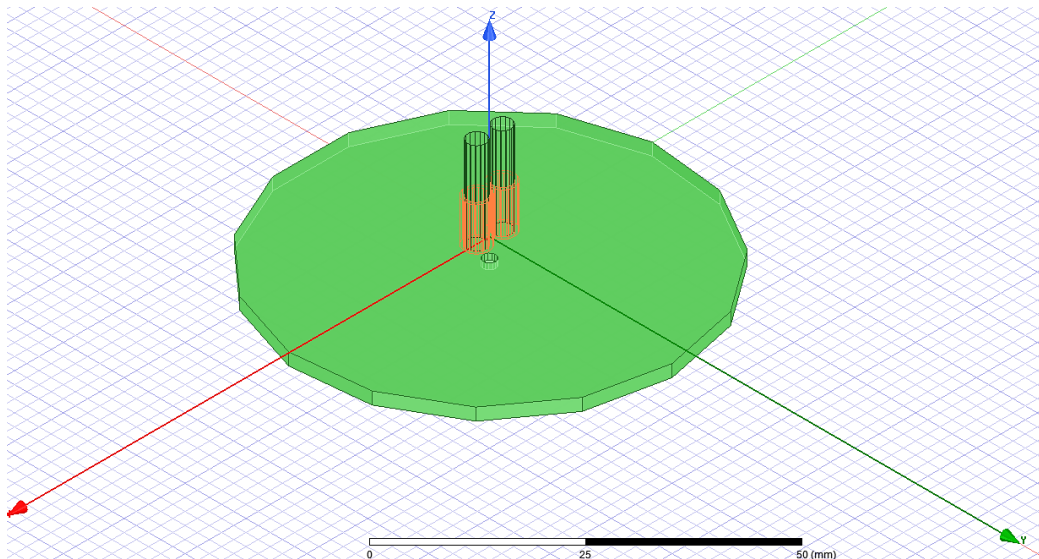
A simulação numérica realizou-se por elementos finitos ( $2.6 \times 10^5$  elementos) e pretendeu simular um ensaio na liga de aço à temperatura ambiente. A simulação de uma inspeção necessita de tantas simulações quanto o número de pontos necessários para construção do gráfico da impedância  $Z$ . Foi configurado um varrimento linear dos -15 mm aos 15 mm, com incrementos de movimento da sonda de 0.5 mm. O centro do defeito localiza-se a meio do varrimento. Após terem sido testas várias frequências de excitação, foi aplicada uma excitação equivalente a 100 kHz, uma vez que permite uma melhor visualização do gráfico de evolução da impedância  $Z$ .



**Figura 76** - Simulação a 100 kHz com defeito circular de diâmetro 2 mm.

#### 4.2.2. Sonda Diferencial

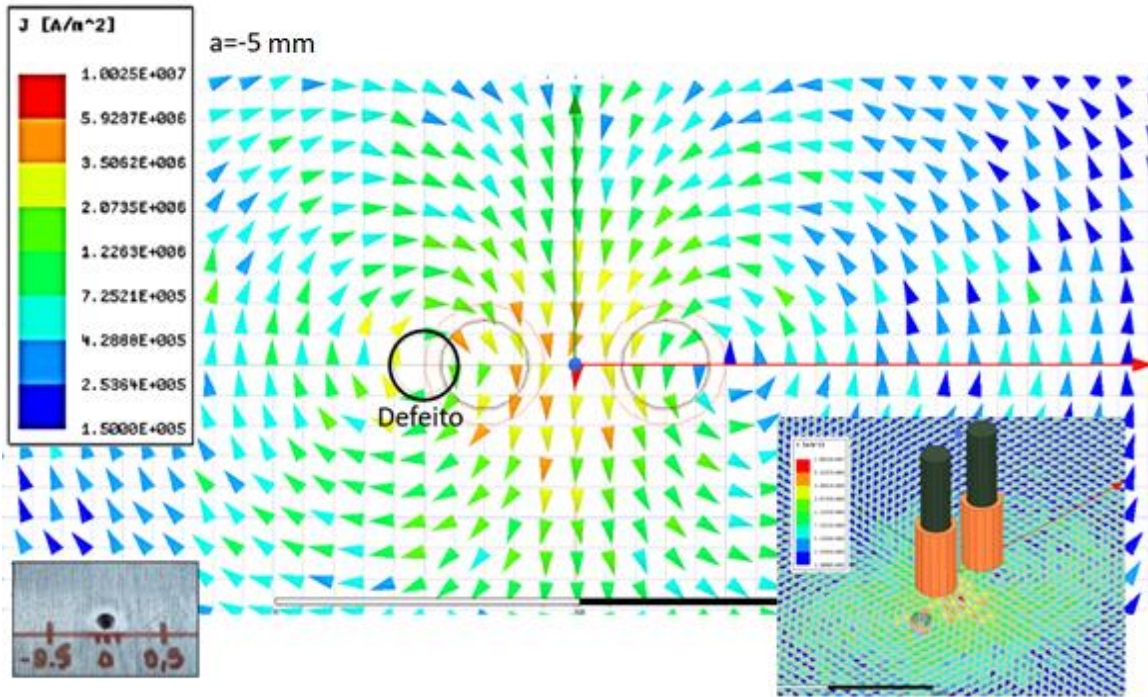
De forma semelhante às sondas absolutas, foram realizadas simulações numéricas com recurso ao *software* comercial *Ansys*. Inicialmente, modelaram-se as duas bobinas helicoidais levando em consideração cada detalhe da sonda já concebida: *lift-off* de 3 mm, espaçamento entre bobinas de 2 mm e enrolamentos de excitação de 0.15 mm com 1 A por espira, dos quais resultam 200 A por bobina já que esta possui 200 espiras. Considerou-se também o defeito circular de diâmetro 2 mm e profundidade 0.5 mm, numa placa com o mesmo material do tubo a inspecionar. Da mesma forma que na situação da sonda absoluta, foi modelada uma placa na vez da curvatura do tubo de aço, dado que é uma forma simplificada de o representar, fazendo a ressalva de que a curvatura pode ser planificada desde que as CI fechem o perímetro pelo tubo.



**Figura 77** - Desenho esquemático da sonda diferencial e do aço detentor do defeito circular realizado no *software Ansys*.

A simulação numérica realizou-se por elementos finitos ( $2.6 \times 10^5$  elementos) e pretendeu simular um ensaio na liga de aço à temperatura ambiente. A simulação de uma inspeção necessita de tantas simulações quanto o número de pontos necessários para construção do gráfico da impedância  $Z$  no decorrer da posição  $a$ . Foi configurado um varrimento linear dos -25 mm aos 25 mm, com incrementos de movimento da sonda de 0.5 mm. O centro do defeito localiza-se a meio do varrimento, ou seja, na posição  $a = 0$ . Após terem sido testas várias frequências de excitação, foi aplicada uma excitação

equivalente a 100 kHz, uma vez que permite uma melhor visualização do gráfico de evolução da impedância  $Z$ .



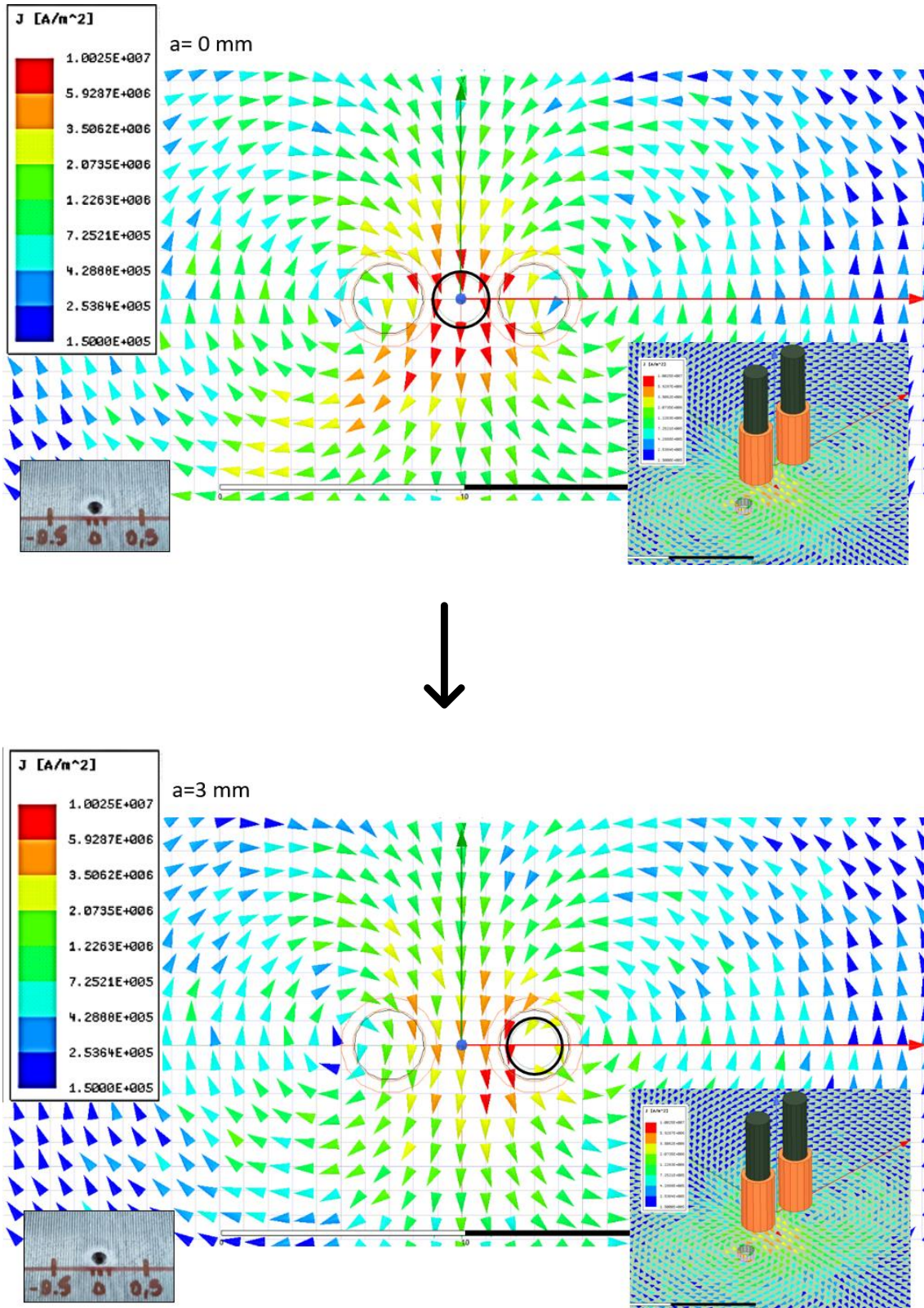


Figura 78 - Representação esquemática do varrimento linear efetuado pela sonda diferencial ao longo do defeito.

A Figura 78 é uma sucessão de três imagens da representação esquemática do varrimento linear efetuado pela sonda diferencial ao longo do defeito, permitindo verificar as variações da densidade de corrente elétrica  $J$  [ $A/m^2$ ], vetor de magnitude igual à quantidade de carga elétrica por unidade de tempo e que atinge o seu máximo na região do defeito. Ora, sendo a impedância elétrica  $Z$ , a oposição à passagem da corrente, pode dizer-se que quanto maior for  $J$ , maior será a variação de  $Z$ . Essa maior variação pode verificar-se no gráfico da Figura 79.

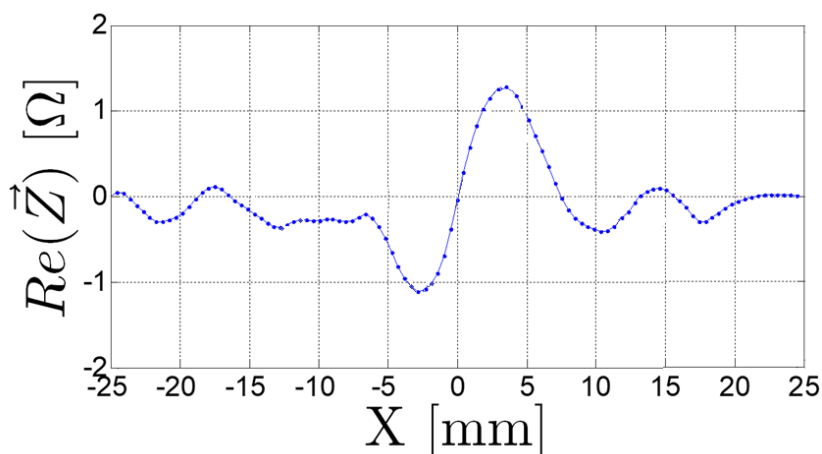
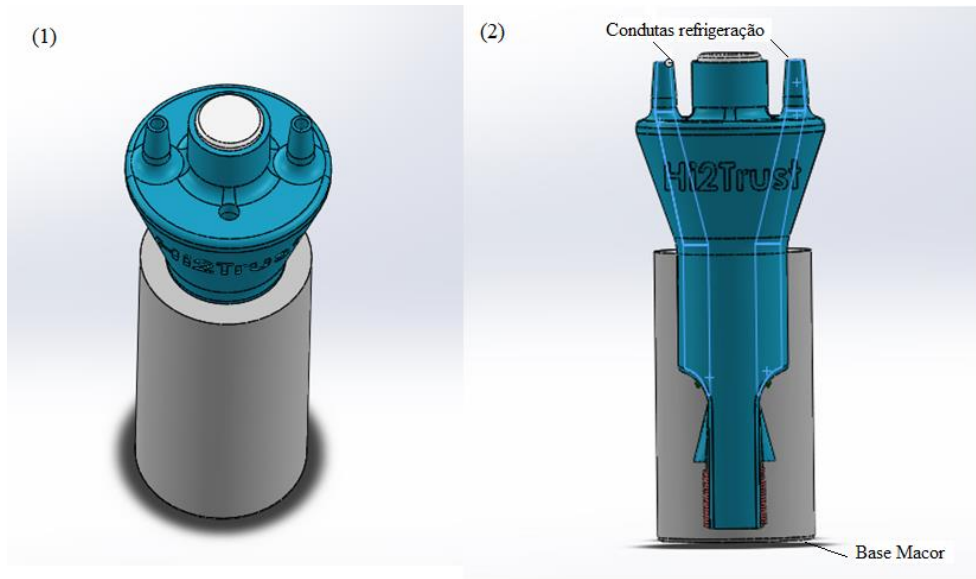


Figura 79 - Simulação a 100 kHz com defeito circular de diâmetro 2 mm.

### 4.3. Simulações Térmicas

Foi realizada uma simulação térmica nas sondas concebidas para inspeção do material de base, com recurso ao *simulation* por elementos finitos disponível na ferramenta computacional *Solidworks*. Após terem sido definidos os materiais que compõem a sonda e o seu revestimento, considerou-se a base de Macor® exposta a 340 °C e a passagem de água pelas condutas de refrigeração da sonda, a uma temperatura de 25 °C, coeficiente de convecção de 25 W/m<sup>2</sup>K, calor específico de 4200 J/kg°C, condutividade térmica de 0.6 W/m.K e densidade de 1.



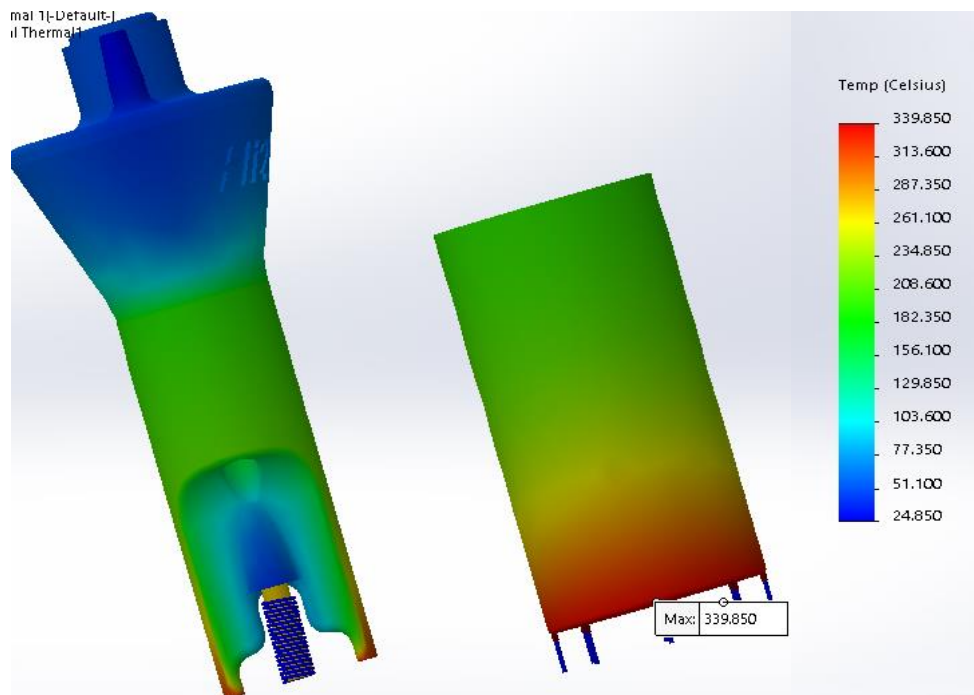
**Figura 80** - Protótipo das sondas concebidas para inspeção do material de base.

1) Vista exterior do protótipo 2) Vista interior do protótipo

Segundo a lei zero da termodinâmica<sup>10</sup>, a energia térmica pode ser transmitida através de corpos a temperaturas diferentes, ou seja, quando um corpo se encontra a uma temperatura diferente de um outro ou da sua envolvente, ocorre transferência de calor até que estes atinjam um equilíbrio entre si. A transferência de calor da liga de aço 16Mo3 para as sondas pode ocorrer através de convecção, radiação e condução. A convecção ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento com variação de temperatura, que é o caso da passagem de água a 25 °C pelas condutas de refrigeração. Por sua vez, na transferência de calor por radiação ocorre a emissão de calor sob a forma de ondas eletromagnéticas entre dois meios separados e com diferença de temperaturas. A transmissão de calor ocorre quando existe uma diferença de temperatura entre um sólido ou um fluido em contato físico direto. À escala molecular, na condução em gases e líquidos, há transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas. As moléculas com maior energia molecular face às temperaturas superiores, colidem entre elas, transferindo energia por contacto para as moléculas de menor

<sup>10</sup>A lei zero da termodinâmica possui esta designação graças ao físico inglês Ralph Fowler, que no século XX a considerou como a lei básica da termodinâmica, já que sem ela, o conceito de temperatura não poderia ser definido. Segundo postulado nessa lei, “se dois corpos estiverem em equilíbrio térmico com um terceiro, estarão em equilíbrio térmico entre si”.

temperatura. Assim sendo, o corpo que recebe calor aumenta a sua temperatura até atingir um novo estado de equilíbrio termodinâmico, ocorrendo a transferência no sentido das temperaturas inferiores. A transmissão de calor por condução pode processar-se de duas formas: por vibração da rede cristalina ou por transporte de elétrons livres. A transferência de calor por vibração da rede cristalina é a menos eficiente ocorrendo geralmente nos isolantes, que é o caso do revestimento de cerâmica Macor®.



**Figura 81** - Resultado da simulação térmica elaborada na ferramenta *Solidworks*.

## 5. Validação Experimental

Ao longo deste capítulo retratam-se os resultados dos ensaios laboratoriais efetuados com as sondas de CI para inspeção do material de base da liga de aço 16Mo3, bem como todo o aparato laboratorial envolvente para a realização dos mesmos. No final do capítulo, expõem-se os resultados de um tipo de sondas planares desenvolvidas em paralelo com as sondas descritas ao longo da dissertação, as *Printed Circuit Board* (PCB).

### 5.1. Dispositivo Experimental

Para se realizar a inspeção da liga de aço 16Mo3, houve a necessidade de a adaptar a uma mesa de ensaios desenvolvida no âmbito da Dissertação de Mestrado “Conceção, Simulação e Validação Experimental de Sondas de Correntes Induzidas para Ensaios Não Destrutivos de Geometrias Tubulares”. [3] Esta mesa de ensaios, construída em perfis *Bosch* 40x40 mm e automatizada através da ferramenta computacional *LabVIEW*, permite a rotação do tubo de aço num ângulo de 360° e a movimentação da sonda segundo o eixo horizontal, permitindo um varrimento matricial da mesma sobre o material. Posteriormente, houve a fixação do *chassi* das sondas à mesa de ensaios através de 4 furos roscados, de modo a que a sonda ficasse fixa ao tubo de aço em rotação e não houvessem variações no *lift-off* que, por sua vez, poderia deturpar os dados de inspeção.

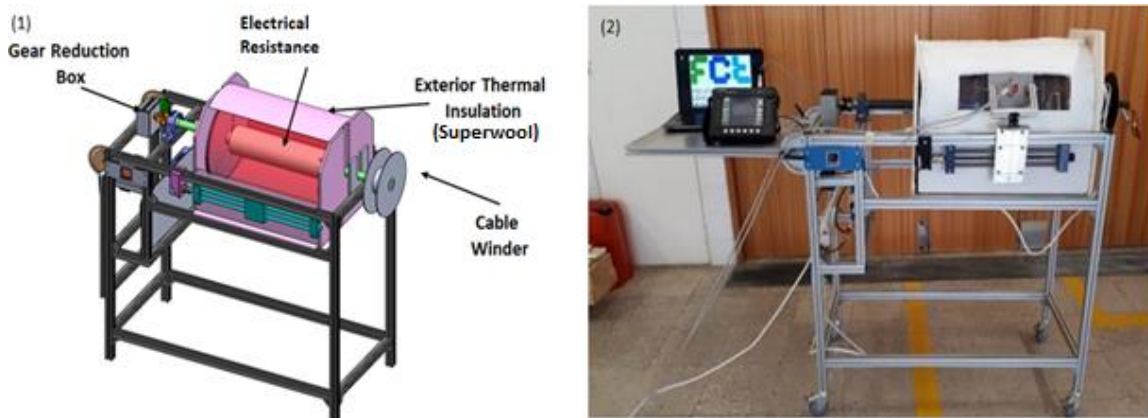
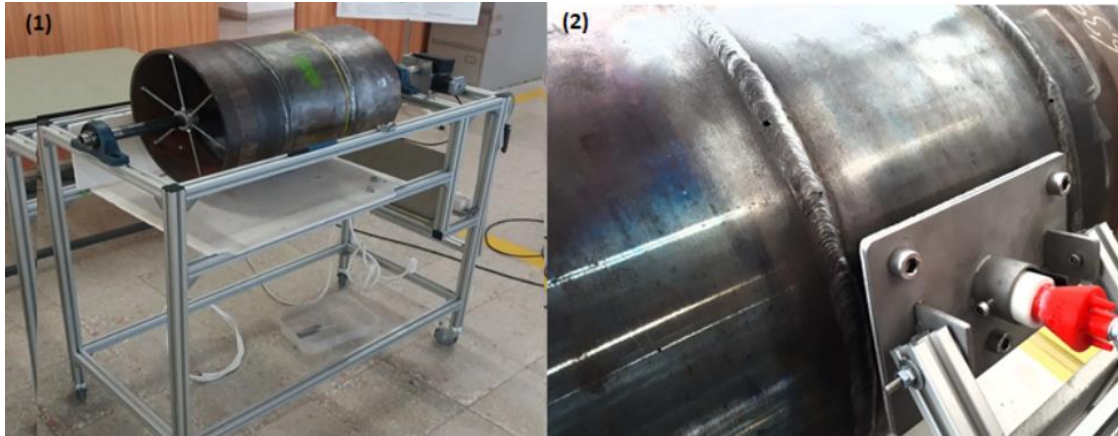


Figura 82 - Dispositivo Experimental.

1) Representação esquemática da mesa de ensaios. 2) Dispositivo experimental pronto a realizar inspeções.



**Figura 83** - Dispositivo Experimental.

- 1) Fixação do tubo de aço à mesa de ensaios através do eixo da mesa que se torna solidário com tubo através de 6 varões colocados em cada extremidade do tubo. 2) Fixação da sonda ao material de base.

Para a inspeção da liga de aço é necessário, primeiramente, que o deslocamento das sondas ao longo do tubo se realize através de um motor passo a passo, cuja potência elétrica provém de uma placa ASTROSYN P808A ligada ao computador e, em segundo lugar, a aquisição de dados. Ambos os requisitos foram conseguidos através da ferramenta computacional *LabVIEW*, embora no segundo caso os dados fossem obtidos através do equipamento NORTEC500, medidor de impedâncias fornecido pela OLYMPUS e que está diretamente ligado à sonda de inspeção através do conector LEMO, componente multipolar polarizados de interconexão. Os dados foram transmitidos do NORTEC 500 para o computador de modo a serem lidos em *LabVIEW*. A aquisição de dados também pode ser efetuada pelo *Mentor EM Portable Eddy Current Tester*.

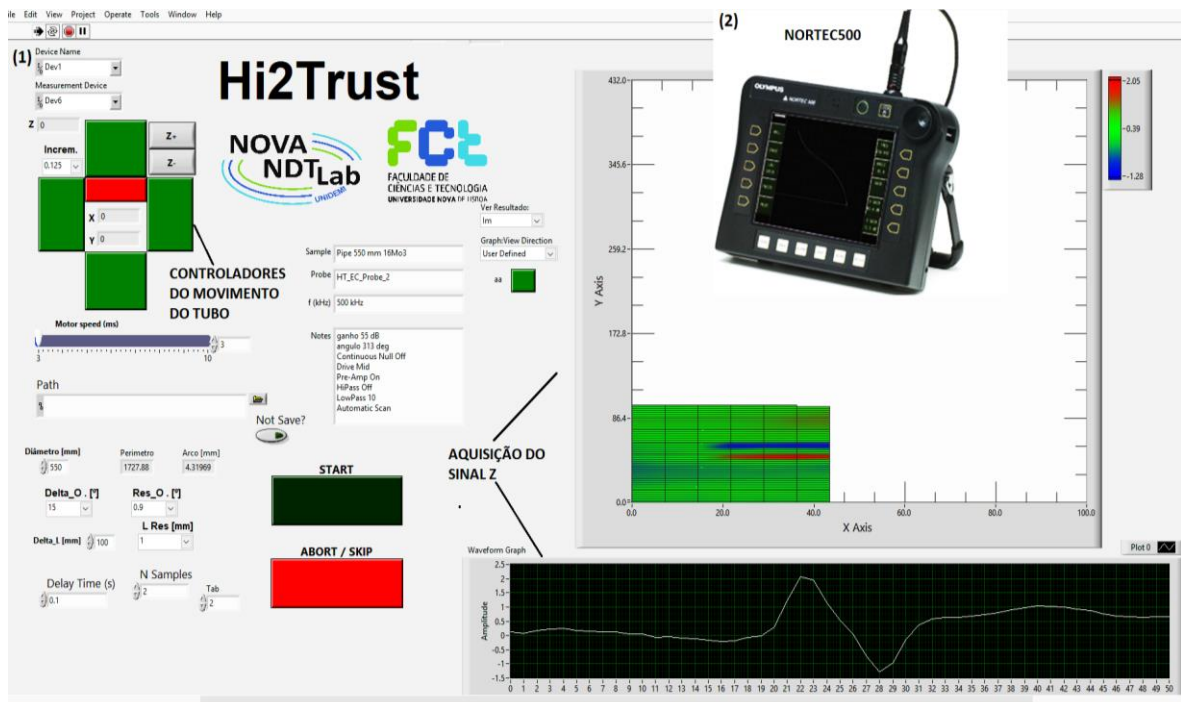
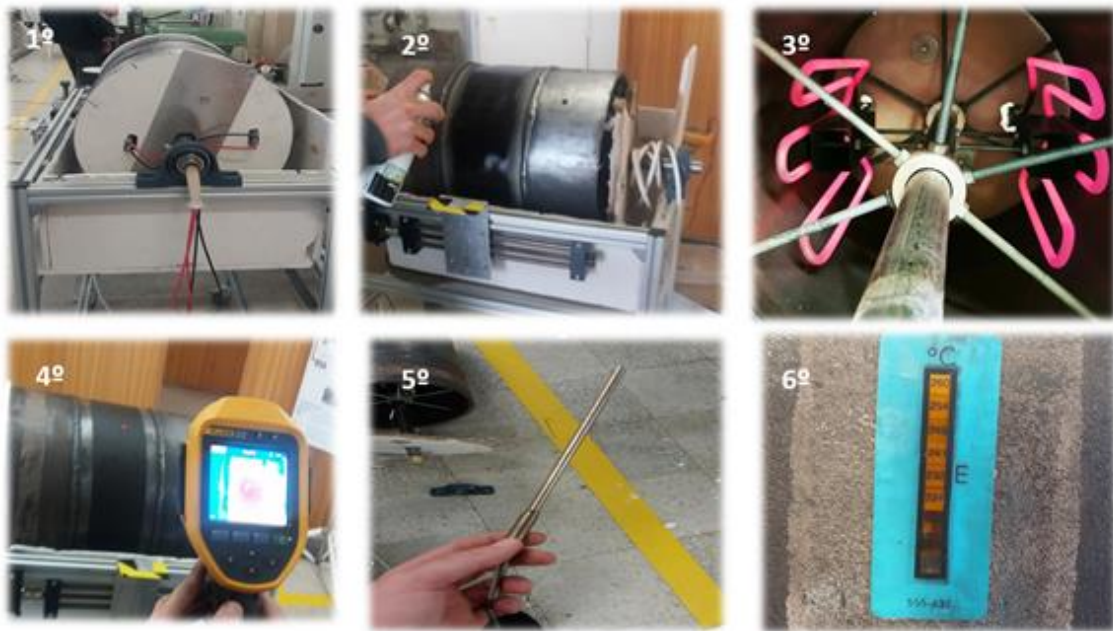


Figura 84 - Aquisição de sinal.

- 1) Interface com o utilizador do programa LabVIEW, que controla o movimento do tubo e faz aquisição do sinal Z.
- 2) Equipamento Nortec500 de aquisição do sinal Z.

Para validação das sondas a altas temperaturas, foram adicionadas duas resistências elétricas ao eixo interno onde está apoiado o tubo de aço. Cada resistência possui uma potência de 2000 W e tensão de 230V~50Hz, transmitindo calor através do efeito de Joule, uma vez que a resistência se opõe à passagem de corrente elétrica e transforma a energia elétrica em energia térmica. Com o intuito de avaliar a capacidade de aquecimento do tubo com as resistências, efetuou-se uma análise termográfica sem as isolações térmicas aplicadas à volta do tubo. O sistema de aquecimento foi ainda verificado com um termopar do tipo K colocado no interior do tubo. Posteriormente, isolou-se o tubo de aço com o revestimento térmico *Superwool*® que é um material à base de fibra de silicato alcalinoterroso com condutividade térmica muito baixa (0.08 W/m.K a 400 °C), temperaturas de operação até 1300 °C e um encolhimento linear menor que 2 % a 1260 °C. Além das propriedades acima descritas, o *Superwool*® é uma alternativa segura ao uso de materiais tradicionalmente mais perigosos, uma vez que quaisquer fibras que possam ser respiradas pelo organismo são naturalmente removidas pelo mesmo.



**Figura 85** - Preparação e análise térmica do ensaio laboratorial.

A Figura 85 ilustra a sucessão de etapas no aquecimento do tubo de aço:

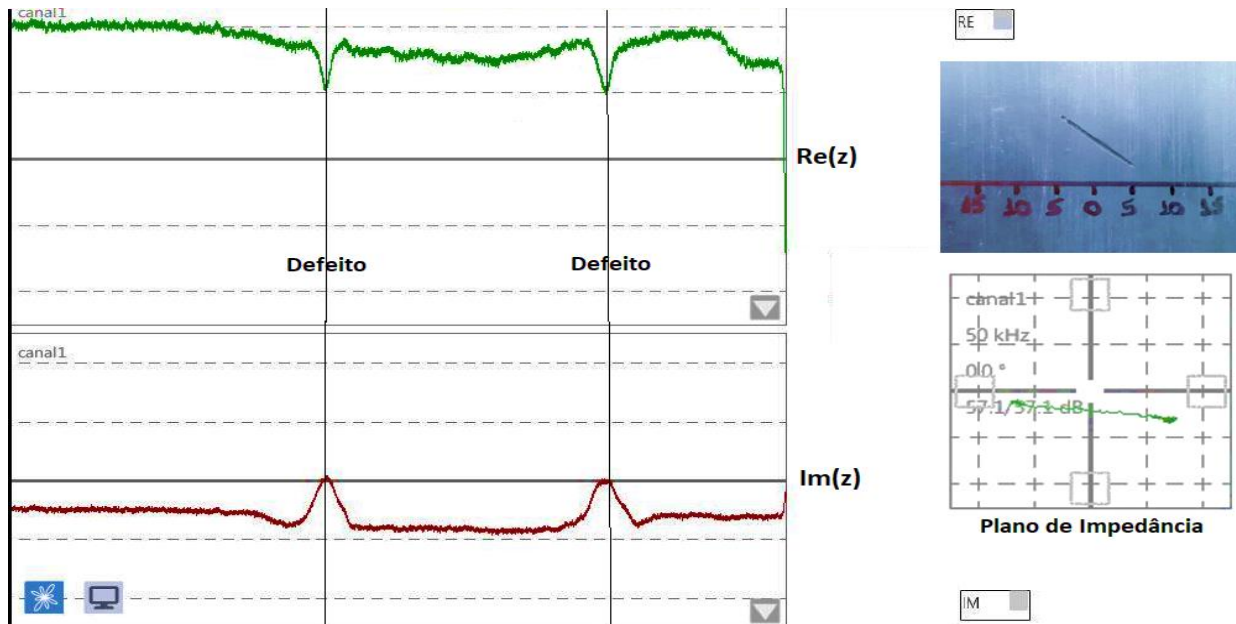
- 1º - colocação das ligações das resistências elétricas no eixo onde ficam apoiadas;*
- 2º - aplicação de tinta spray preta para facilitar a análise termográfica com coeficiente de emissividade de 0.9, o que facilita a inspeção;*
- 3º - resistências elétricas em operação;*
- 4º - medição de temperaturas com câmara termográfica Fluke Ti400;*
- 5º - medição de temperaturas com termopar do tipo K;*
- 6º - medição de temperatura com tiras adesivas termosensíveis.*

## **5.2. Resultados Experimentais**

### **5.2.1. Sonda Absoluta**

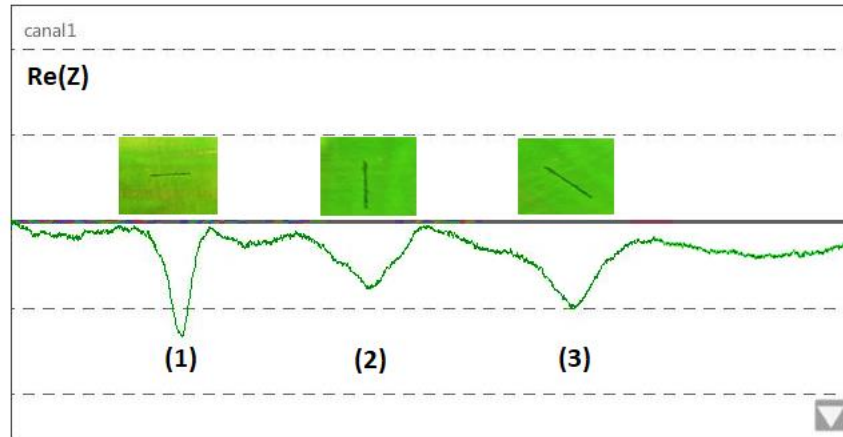
A sonda absoluta não permitiu a obtenção de resultados para o defeito circular padrão de 1 mm de raio e 0.5 mm de profundidade. Posto isto, testou-se a sonda absoluta para o defeito retangular realizado por eletroerosão com 10 mm de comprimento, 0.4 mm de profundidade e 0.5 mm de largura, uma vez que os defeitos retangulares são mais fáceis de detetar que os defeitos circulares, por provocarem maior distorção das correntes

induzidas. Foi aplicada uma tensão de 8 V, uma frequência de excitação de 50 kHz (quanto mais baixa for a frequência de excitação, maior a profundidade de penetração, apesar do *lift-off* de 3 mm causado pelo isolante térmico), um ângulo de fase de 0° e um ganho no sinal de 57.1 dB. A Figura 86 exibe os resultados da componente real e imaginária da impedância  $Z$  ao passar pelo duas vezes pelo defeito com tubo a 300 °C. A aquisição de dados foi efetuada pelo *Mentor EM Portable Eddy Current Tester*.



**Figura 86** - Resultados obtidos para a sonda absoluta ao passar duas vezes pelo defeito retangular orientado 30° em relação à horizontal (*Mentor EM Portable Eddy Current Tester*).

A Figura 87 exibe uma passagem única ao longo três defeitos retangulares sucessivos, que foram realizados por eletroerosão. O defeito 1 apresenta-se horizontalmente em relação à passagem da sonda absoluta, o defeito 2 verticalmente e o defeito 3 com um ângulo de 30°. Para esta passagem única ao longo dos três defeitos foi aplicada uma tensão de 8 V, uma frequência de excitação de 50°, um angulo de fase de 324°, um ganho no sinal de 56 dB e o tubo de aço encontrava-se, também, a 300 °C. O objetivo desta passagem era verificar a amplitude da impedância  $Z$  das sondas ao passar por defeitos orientados de formas diferentes em relação à sonda. Os defeitos posicionados perpendicularmente a estas são mais fáceis de detetar em relação aos posicionados paralelamente, pois têm um maior efeito de perturbação das correntes.



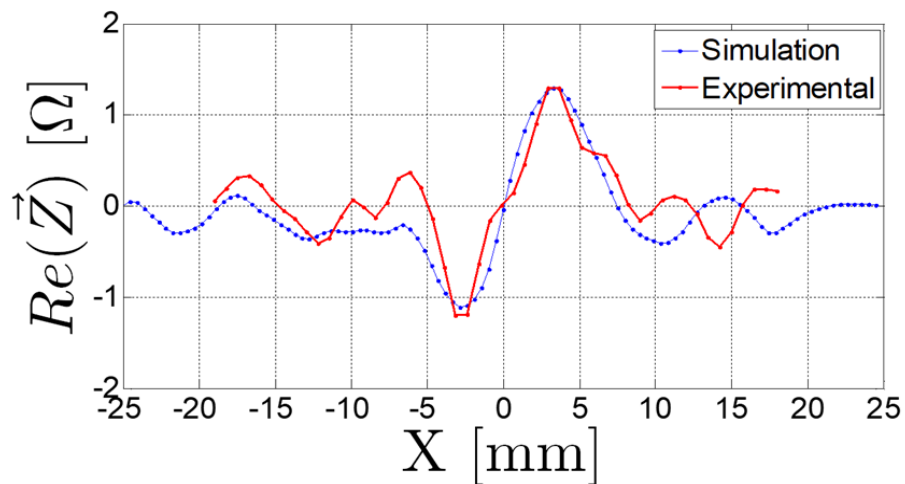
**Figura 87** - Passagem única por três defeitos sucessivos.

1) Defeito horizontal. 2) Defeito vertical. 3) Defeito com ângulo de 30°.

Pode dizer-se que a sonda absoluta em operação a 300 °C não foi validada para o defeito circular padrão, embora tenham sido obtidos resultados para defeitos circulares.

### 5.2.2. Sonda Diferencial

Os resultados obtidos para a inspeção da sonda diferencial na passagem pelo defeito circular padrão de 1 mm de raio e 0.5 mm de profundidade simulada no capítulo 4, encontram-se na Figura 88. O defeito circular possui o seu centro em ( $X=0$ ) e o aço encontrava-se a 300 °C. Foi aplicada uma frequência de excitação de 100 kHz. Quanto mais baixa for a frequência de excitação, maior a profundidade de penetração, apesar do *lift-off* causado pelo isolante térmico (3 mm). O ruído apresentado no gráfico da Figura 88 apenas se deve às vibrações mecânicas provocadas pelo movimento relativo entre o *chassi* da sonda e o tubo, que vai alterando o *lift-off* entre os mesmos. Como foi já referido, o efeito do *lift-off* é a variação da posição da sonda em relação à amostra a inspecionar que, por sua vez, origina variação de impedância.



**Figura 88** - Resultados obtidos para o defeito circular de 1 mm de raio e 0.5 mm de profundidade a 300°C.

Pode dizer-se que a sonda diferencial em operação a 300 °C foi validada, mostrando que a variação da condutividade elétrica e da permeabilidade magnética não afeta significativamente a inspeção com Correntes Induzidas.

Consoante ilustrado na Figura 89, foi realizado uma *scanned surface* no tubo com o defeito padrão circular artificial. Foi inspecionada uma área total de 6300 mm<sup>2</sup>, tendo sido identificada com rigor a posição do defeito, no centro do pico negativo e do pico positivo.

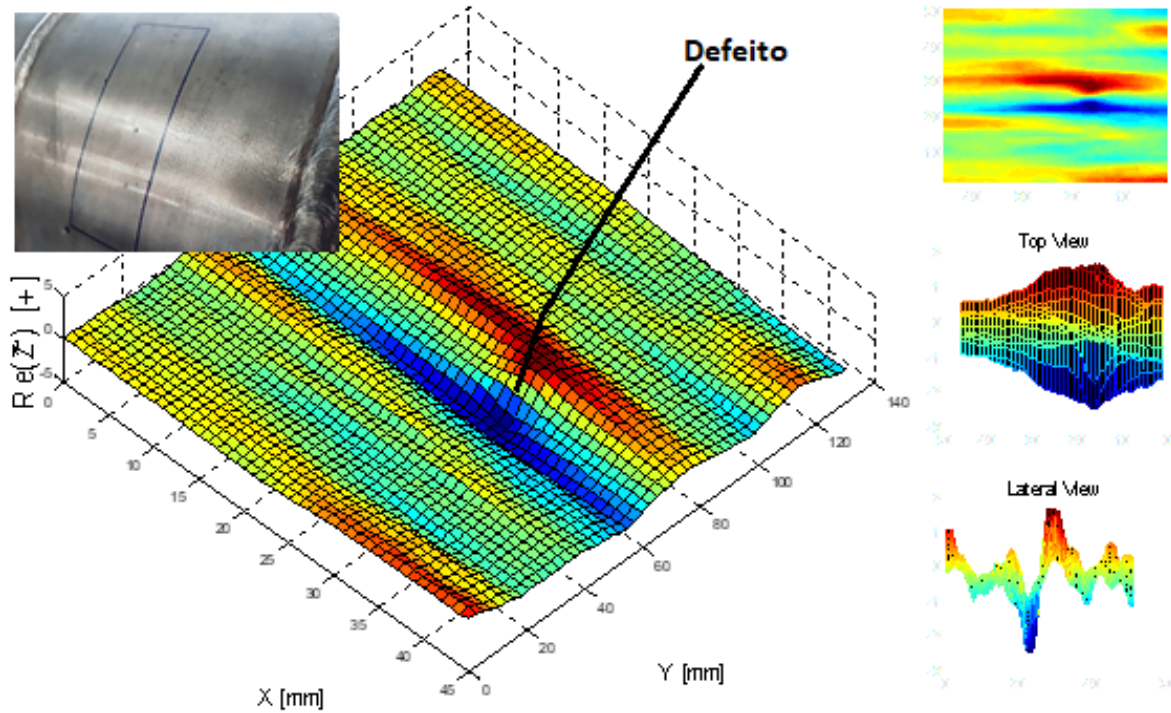


Figura 89 - Scanned surface do tubo com o defeito circular padrão.

### 5.2.3. Sondas Planares de Circuito Impresso

Para além das sondas para inspeção do material de base, foram desenvolvidas sondas *Printed Circuit Board* (PCB) ainda no âmbito do projeto HI2TRUST. Estas sondas consistem em placas de circuito impresso planas com bobinas retangulares ambas em configuração *bridge*. As sondas estão localizadas dentro de copos específicos desenvolvidos com Teflon<sup>TM</sup>, material de isolamento térmico.



Figura 90 - Três formatos das *Print Circuit Board*.

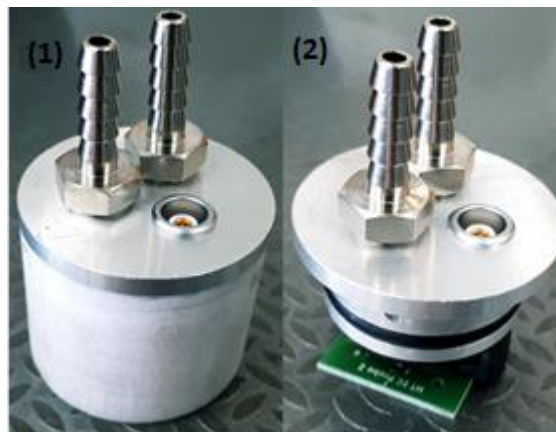
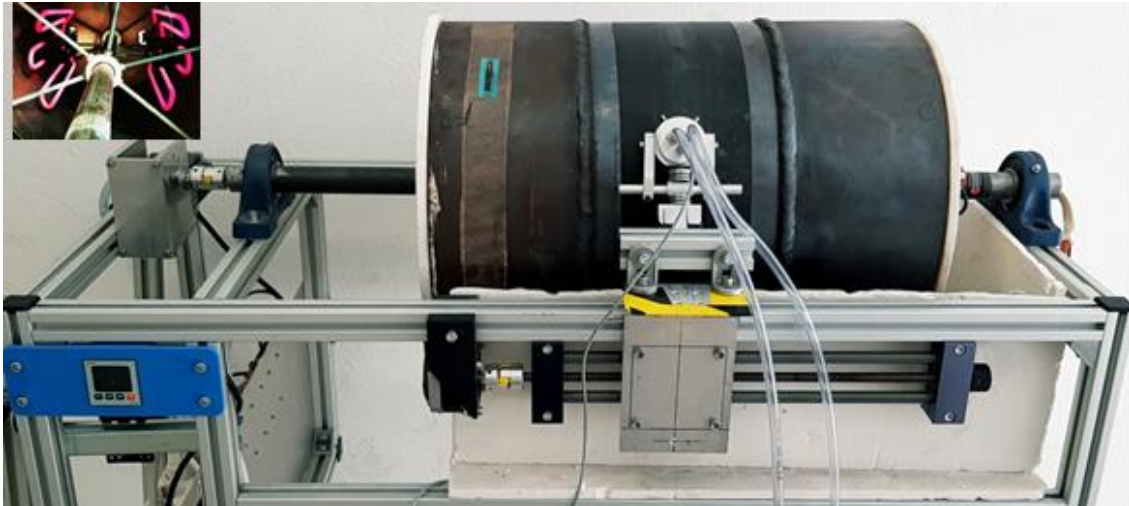


Figura 91 - Sonda PCB com configuração *bridge*.

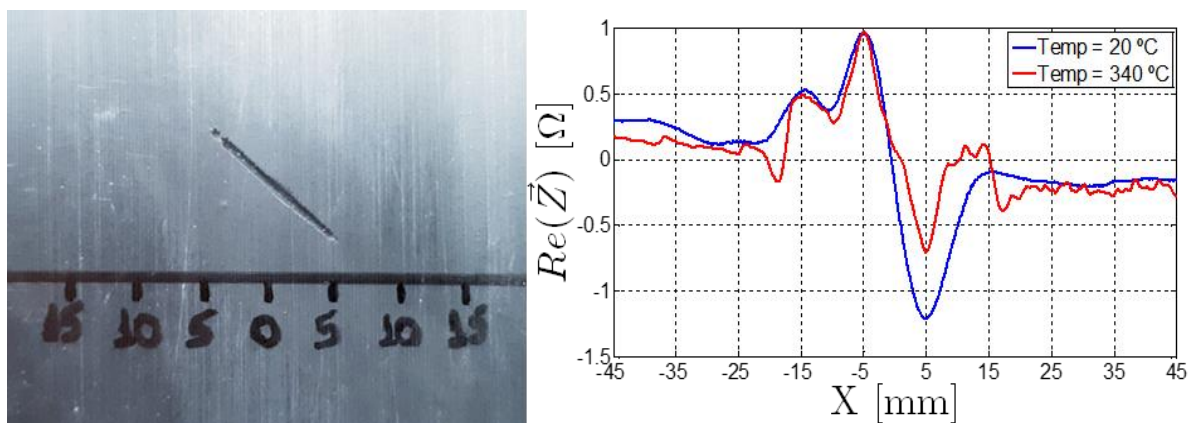
1) Vista Interna. 2) Vista Externa.

As sondas PCB usam uma tampa de alumínio e um suporte de PLA para posicionar o PCB na parte inferior do copo. A refrigeração é com água através de conectores posicionados no topo das sondas, que mantêm o lado interno do copo sempre a uma temperatura próxima à entrada de água. Na Figura 92 visível o sistema completo montado com a sonda PCB.

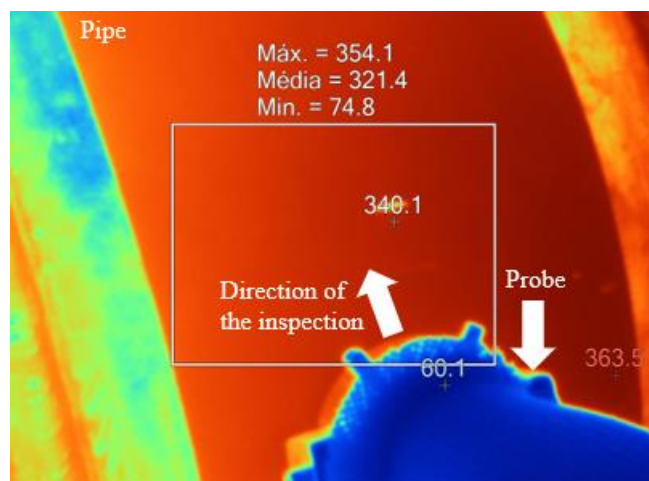


**Figura 92** - Sistema laboratorial completo para inspeção do tubo a altas temperaturas.

A inspeção a altas temperaturas com as sondas PCB foi validada com uma temperatura de 340 °C num defeito retangular realizado por eletroerosão com 0.5 mm de largura, 0.4 mm de profundidade, 10 mm de comprimento e ângulo de 45°. Na Figura 93, os resultados obtidos para inspeção as altas temperaturas reproduzem as características dos resultados para 20 °C. As ligeiras diferenças entre as duas curvas podem ser atribuídas às variações de *lift off* resultantes das folgas mecânicas do suporte de inspeção, que também foram responsáveis pelo uso de duas frequências de inspeção diferentes: 2 MHz para 20 °C e 500 kHz para 340 °C. O controlo da temperatura na liga de aço durante a inspeção foi realizado com recurso a uma câmara termográfica *Fluke Ti400* com um índice de emissividade de 0.95. A Figura 94 mostra a temperatura da área de inspeção obtida durante o ensaio.



**Figura 93** - Resultados dos ensaios realizados a frio e a quente.



**Figura 94** - Monitorização da temperatura por infravermelho a 340 °C.



## 6. Conclusão e Propostas para Investigações Futuras

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões resultantes da presente investigação, bem como as propostas para desenvolvimentos futuros. Como já foi referido, existem diversas soluções para inspeção de tubagens, mas poucas recorrendo às Correntes Induzidas em altas temperaturas. Posto isto, conceberam-se modelos de sondas que pudessem operar a temperaturas superiores a 300 °C, através da aplicação de sistemas de refrigeração e de revestimentos térmicos nas mesmas que, por sua vez, podem dificultar a deteção do sinal de impedância  $Z$  ao passar pelos defeitos, já que originam um maior *lift-off* entre a sonda propriamente dita e o tubo de aço 16Mo3.

### 6.1. Conclusão

A sonda absoluta para inspeção do material de base do tubo possui uma única bobina de dupla função que funciona como elemento de excitação e receção, simultaneamente. Tipicamente, este tipo de sondas apresenta grande sensibilidade à permeabilidade magnética e ao *lift-off*, contudo a sonda desenvolvida não permite a obtenção de resultados para o defeito circular padrão de 1 mm de raio e 0.5 mm de profundidade. Por outro lado, a sonda apresenta resultados plausíveis na passagem pelos defeitos retangulares realizados por eletroerosão, dado que são facilmente detetáveis em relação aos defeitos circulares por provocarem maior distorção das correntes induzidas. Conclui-se que para o *lift-off* considerado, a sonda não deteta os defeitos circulares menores que 2 mm de diâmetro e 0.5 mm de profundidade.

A sonda *bridge* diferencial possui a abordagem de bobinas com dupla função, contudo são utilizadas duas bobinas que operam em modo diferencial. Ambas as bobinas apresentam polaridade invertida em relação à outra, já que possuem o mesmo número de enrolamentos, mas em sentidos opostos. Assim sendo, os campos gerados por ambas as bobinas possuem o mesmo valor em módulo, mas apresentam sentidos contrários. Os dois enrolamentos são construídos lado a lado, permitindo comparar a região “limpa” e outra imediatamente adjacente, detentora do defeito. Os resultados experimentais para o defeito circular considerado são satisfatórios, já que o sinal obtido na sequência da passagem pelo defeito é o sinal “*Lissajou*”, característico das sondas diferenciais. Apesar do maior *lift-off* provocado pelo revestimento térmico, pode dizer-se que a sonda diferencial em

operação a 300 °C foi validada, mostrando que a variação da condutividade elétrica e da permeabilidade magnética não afeta significativamente a inspeção com Correntes Induzidas. O ruído presente no resultado apenas se deve às vibrações mecânicas provocadas pelo movimento do tubo sobre o *chassi* da sonda, que por sua vez, vai alterando o *lift-off* entre os mesmos.

A sonda para inspeção do cordão de soldadura foi desenvolvida para analisar ambos os lados do cordão de soldadura em simultâneo, com movimentação ao longo do perímetro do tubo de aço. As bobinas apresentam um sistema de transmissão/reflexão com as bobinas sensíveis em modo diferencial, sendo que excitação é realizada por uma bobina toroidal. Os ensaios preliminares realizados em 4.1, permitem concluir que a sonda não responde quando efetuado um varrimento de acordo com a posição para o qual foi concebida, contudo as duas bobinas sensíveis apresentam um sinal de resposta à passagem pelo defeito, variando os valores de impedância  $Z$  quando atuam separadamente. Uma das possíveis causas para este resultado deve-se ao facto de a bobina de excitação toroidal possuir um núcleo composto de ferro e ácido polilático (PLA), impresso em 3D. Além disso, o *lift-off* entre a bobina toroidal e o tubo de aço é muito grande.

As sondas PCB foram validadas num defeito retangular com 0.5 mm de largura, 0.4 mm de profundidade, 10 mm de comprimento e ângulo de 45° para temperatura de 340 °C, possuindo um gráfico de leitura de impedância  $Z$  tipicamente diferencial. As ligeiras diferenças entre as duas curvas de ensaios a frio e a quente, podem ser atribuídas às variações de *lift off* resultantes das folgas mecânicas do suporte de inspeção. O ruído presente em ambas deve-se se às vibrações mecânicas provocadas pelo movimento do tubo sobre o *chassi* da sonda.

## **6.2. Propostas para Investigações Futuras**

Em investigações futuras seria útil conceber e testar novos protótipos de sondas que suportem temperaturas superiores às consideradas neste projeto, bem como a inspeção em outro tipo de defeitos com diferentes geometrias e orientações. Além do mais, ainda é possível reduzir o ruído do sinal, sendo necessário adaptar novos *chassis*, por forma a diminuir as vibrações mecânicas oriundas da rotação do tubo e das folgas

mecânicas verificadas. Por outro lado, a análise de defeitos em superfícies a altas temperaturas pode ter utilidade na gestão da manutenção dos navios da esquadra da Marinha de Portuguesa, pelo que seria interessante a implementação de módulos de Correntes Induzidas em equipamentos de bordo.



## **Bibliografia**

- [1] Inspectioneering, “Overview of Nondestructive Testing (NDT)”, [Online]. Disponível em: <http://inspectioneering.com/tag/nondestructive+testing>. [Acedido em 05 09 2017].
- [2] Leite, J., “Técnica Não Destrutiva Para Análise da Interação de Linhas de Campo Magnético Material”, UFP, Tese de Doutoramento, Paraíba, 2014.
- [3] Machado, M., “Conceção, Simulação e Validação Experimental de Sondas de Correntes Induzidas para Ensaios Não Destrutivos de Geometrias Tubulares”, FCT, Dissertação de Mestrado, Lisboa, 2014.
- [4] Santos, T., “END,” *Apontamentos das aulas de PAFEND*, 2013.
- [5] Santos, T., “Ensaios Não Destrutivos por Correntes Induzidas: Desenvolvimento e Aplicação à Soldadura por Fricção Linear”, IST, Tese de Doutoramento, Lisboa, 2009.
- [6] Novo Infosolda 4.0, “Ensaios Não Destrutivos - Ultrassom”, [Online]. Disponível em: [www.infosoldaultrassom.html.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/214-ensaio-nao-destrutivo-](http://www.infosoldaultrassom.html.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/214-ensaio-nao-destrutivo-). [Acedido em 11 09 2017].
- [7] HOLOCENTER, “What is Holography”, [Online]. Disponível em: <http://holocenter.org/what-is-holography>. [Acedido em 12 09 2017].
- [8] “Eddy Current”, [Online]. Disponível em: [https://www.princeton.edu/ssp/joseph-henry-project/eddy-currents/eddy\\_wiki.pdf](https://www.princeton.edu/ssp/joseph-henry-project/eddy-currents/eddy_wiki.pdf). [Acedido em 16 09 2017].
- [9] Pasadas, D., “Sistema para detecção de defeitos em placas de material condutor usando uma sonda planar”, IST, Dissertação de Mestrado, Lisboa, 2010.
- [10] Kontroll Technik, “Eddy Current Principle”, [Online]. Disponível em: <http://www.kontrolltechnik.com/methods/eddy-current-principle>. [Acedido em 16 09 2017].
- [11] “Force on a current in a magnetic field”, [Online]. Disponível em: <http://orca.phys.uvic.ca/~tatum/elmag/em07.pdf>. [Acedido em 16 09 2017].
- [12] Encyclopedia Britannica, “Magnetization”, [Online]. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/magnetization>. [Acedido em 17 09 2017].

- [13] Ciência Hoje, “Histerese Magnética: perdas e ganhos”, [Online]. Disponível em: [http://www.cienciahoje.org.br/noticia/v/ler/id/3015/n/histerese\\_magnetica:\\_perdas\\_e\\_ganhos](http://www.cienciahoje.org.br/noticia/v/ler/id/3015/n/histerese_magnetica:_perdas_e_ganhos). [Acedido em 17 09 2017].
- [14] Radio-Electronics.com, “Electrical Conductivity Basics”, [Online]. Disponível em: <http://www.radio-electronics.com/info/formulae/resistance/electrical-conductivity.php>. [Acedido em 18 09 2017].
- [15] Lima, A., “Detecção de Falhas em Revestimentos Anticorrosivos através da Técnica de Correntes Parasitas”, UFRJ, Projeto de Graduação, Rio de Janeiro, 2014.
- [16] BCEND, “Introdução à técnica das Correntes Parasitas”, [Online]. Disponível em: <http://bcend.com.br/introducao-a-tecnica-das-correntes-parasitas/>. [Acedido em 20 09 2017].
- [17] Eddies and Currents, “Back to basics- Skin Depth”, [Online]. Disponível em: <http://www.eddyfi.com/ndt/basics-skin-depth/>. [Acedido em 20 09 2017].
- [18] NDT Resource Center, “Display- Complex Impedance Plane (eddy scope)”, [Online]. Disponível em: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Instrumentation/impedanceplane.htm>. [Acedido em 21 09 2017].
- [19] M. Twomey, “Inspection Techniques For Detecting Corrosion Under Insulation,” Gregory C. Alvarado, 1998.
- [20] I.Silva, A.Neto, M. Neves<sup>1</sup>, Y.Santos, E. Simas, C.Farias “Simulação de Ensaios de Correntes Parasitas Pulsadas Utilizando Elementos Finitos”, *Coteq 13<sup>a</sup> Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*, 2015.
- [21] BCEND, “Correntes Parasitas Pulsadas(PEC): Tudo sobre a técnica”, [Online]. Disponível em: <http://bcend.com.br/correntes-parasitas-pulsadas-pec/>. [Acedido em 24 09 2017].
- [22] M.Araujo, A.Silva “Exame Não Destrutivo de Tubos de Condensadores de Turbinas”, *Coteq 13<sup>a</sup> Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*, 2015.
- [23] M. Martins, F.Marques, R.Carneval, C.Sousa “ Aplicação da Técnica ACFM na Inspeção de Equipamentos Industriais”, *Coteq 6<sup>a</sup> Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos* 2002.

- [24] NDT.net, “Quantitative In-Service Inspection using the Alternating Current Field Measurement (ACFM) Method”, [Online]. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/v05n03/topp/topp.htm>. [Acedido em 27 09 2017].
- [25] ET-NDT.org, “Alternating Current Field Measurement”, [Online]. Disponível em: <http://www.et-ndt.org/eddy-current-technologies/alternating-current-field-measurement/>. [Acedido em 28 09 2017].
- [26] Rosen, “Magnetic Flux Leakage Measurement Technology”, [Online]. Disponível em: <http://www.rosen-group.com/global/company/explore/we-can/technologies/measurement/mfl.htm>. [Acedido em 01 10 2017].
- [27] NASA, “Non-Destructive Testing (NDT) of Metal Cracks Using a High Tc If-SQUID and Eddy Current Method”, [Online]. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19960000294.pdf>. [Acedido em 02 10 2017].
- [28] Camerini, C., “Desenvolvimento de Sondas de Correntes Parasitas para Detecção e Quantificação de Fase Sigma em Aço Inoxidável Duplex”, UFRJ, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2012.
- [29] Pereira, P., “Estudo Preliminar da Aplicação da Técnica de Correntes Parasitas Visando a Inspeção Submersa de Elementos Combustíveis”, UFRJ, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2007.
- [30] Gonzalez, J., “Desenvolvimento e Aplicação de Sondas Inovadoras de Correntes Induzidas Para Ensaio Não Destrutivos”, FCT, Dissertação de Mestrado, Lisboa, 2011.
- [31] OLYMPUS, “Eddy Current Probe Selection Information”, [Online]. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/en/ec-probes/selection/>. [Acedido em 06 10 2017].
- [32] “The eddy current inspection method”, [Online]. Disponível em: <http://www.acutech.gr/media/pdf/The%20impedance%20plane%20and%20probes.pdf>. [Acedido em 07 10 2017].

- [33] NDT Resource Center, “Hybrid Probes”, [Online]. Disponível em: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/ProbesCoilDesign/ProbesModeOp.htm>. [Acedido em 07 10 2010]
- [34] T.Santos, P.Vilaça, L.Quintino, “Sondas de Correntes de Eddy para END: Funcionalidade e Aplicação à SFL”, *Workshop Ensaios Não Destrutivos – Inovação e Qualidade*, 2015.
- [35] NASA, “Development of Meandering Winding Magnetometer (MWM®) Eddy Current Sensors for the Health Monitoring} Modeling and Damage Detection of High Temperature Composite Materials”, [Online]. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/>. [Acedido em 11 10 2017].
- [36] Patente de Invenção Nacional PT Nº 103854, New NDT eddy current Probe, Inventores: Telmo Santos e Pedro Vilaça, 2007.
- [37] R. Souza “Balança Curie e Correntes de Foucault “, *F 809 - Instrumentação para o Ensino*, pp 2-5, 2005.
- [38] Ferreira, L., “Desenvolvimento de uma Prensa Quente de Escala Laboratorial para Fabricação de Ligas de Titânio”, ETEP Faculdades, Relatório Parcial de Projeto de Iniciação Científica, São José dos Campos, 2014.
- [39] R. Andreucci, “Temperatura da Superfície e do Líquido Penetrante”, *Líquidos Penetrantes*, pp 17-18, 2003
- [40] GIIS, “Radiography Inspection including x-radiography and Gamma radiography”, [Online]. Disponível em: <http://gammamaxuk.co.uk/radiography.asp>. [Acedido em 02 10 2017].
- [41] R.Kažys, A.Voleišis, B. Voleišienė, “High temperature ultrasonic transducers: review”, *Institutional Repository of Kaunas University of Technology*, pp 1-11, 2008.
- [42] Olympus, “Teste por ultrassom em altas temperaturas”, [Online]. Disponível em <https://www.olympus-ims.com/pt/applications/high-temperature-ultrasonic-testing/>. [Acedido em 16 10 2017].

- [43] “Sistema de Termografia para altas temperaturas PCE-TC 4”, [Online]. Disponível em: <http://www.pce-medidores.com.pt/folha-dados/folha-dados-pce-tc4.pdf>. [Acedido em 17 10 2017]
- [44] *In-line quality control of hot wire steel — Towards innovative contactless solutions and data fusion ( Incosteel )*. European Research Area, 2008.
- [45] M. Rahman e R. Marklein, “Advanced Techniques for Modelling and Detection of Cracks in Hot Wire Steel”, *ECNDT 2006*, pp. 1–8, 2006. ??
- [46] RS Components, [Online]. Disponível em: <https://pt.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=aboutRS>, [Acedido em 23 10 2017]
- [47] S. Kling, “Advanced Process and Quality Control in Hot Rolling Mills Using Eddy Current Inspection”, *IV Conferencia Panamericana de END*, pp. 1–9, 2007.
- [48] Pruftechnik, “Eddy Current testing systems”, [Online]. Disponível em: <https://www.pruftechnik.com/products/nondestructive-testing-systems/eddy-current-testing-systems.html>. [Acedido em 24 10 2017].
- [49] Isend, “HOTDISCOVER”, [Online]. Disponível em: <http://www.isend.es/en/solutions/hotdiscover>. [Acedido em 26 10 2017].
- [50] IOS Press, “In-situ eddy current monitoring under high temperature environment”, [Online]. Disponível em: <https://content.iospress.com/articles/international-journal-of-applied-electromagnetics-and-mechanics/jae00661>. [Acedido em 27 10 2017].
- [51] T. Kasuya, T. Okuyama, N. Sakurai, H. Huang, T. Uchimoto, T. Takagi, Yonggang Lu, T. Shoji, “In-situ eddy current monitoring under high temperature environment”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, pp 1-9, 2004.
- [52] H. Klümper-westkamp, H. Zoch, W. Reimche, and F. W. Bach, “High temperature resistant eddy current sensor for ‘ in situ ’ monitoring the material microstructure development of steel alloys during heat treatment – bainite sensor”, *Procedia Eng.*, vol. 25, pp. 1605–1608, 2011.
- [53] S. J. Dickinson, R. Binns, W. Yin, S. Member, C. Davis, and A. J. Peyton, “The Development of a Multifrequency Electromagnetic Instrument for Monitoring the Phase Transformation of Hot Strip Steel”, *IEEE Transactions on Instrumentation*

*ans Measurement*, vol. 56, no. 3, pp. 879–886, 2007.

## Anexo A – Construção do *Chassi* para Inspeção do Material de Base

Seguidamente, descreve-se a sequência dos processos de maquinagem do *chassi* da sonda para inspeção do material de base:

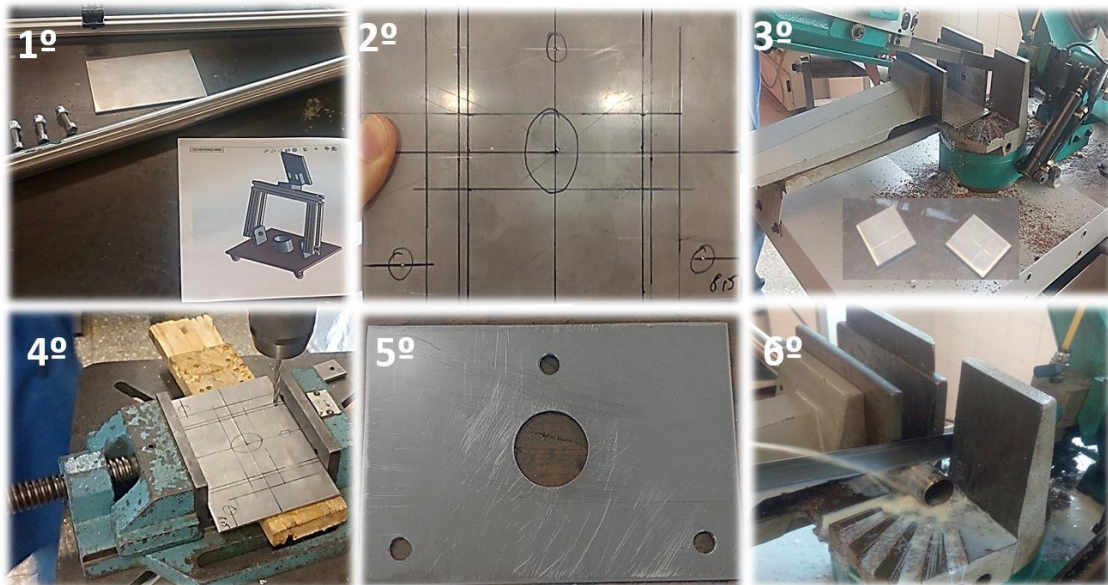
1º Recolha dos materiais necessários para construção do *chassi*;

2º Marcação das dimensões idealizadas no *Solidworks* no suporte de aço 316L 149x110x3 mm;

3º Marcação e corte dos apoios onde assentam os perfis *Bosch* 20x20x90 mm com recurso à serra mecânica *GBS 218 Eco Autocut*;

4º/5º Realização e representação de 3 furos de 8 mm e furo central de 30 mm no aço 316L 149x110x3 mm;

6º Corte da superfície cilíndrica de diâmetro interno de 25 mm com recurso à serra mecânica *GBS 218 Eco Autocut*;



Sequência dos processos de maquinagem do *chassi* da sonda.

7º Torneamento da superfície cilíndrica para obter uma espessura de 2 mm com recurso a torno mecânico *OPTIMUM Maschinen-Germany*;

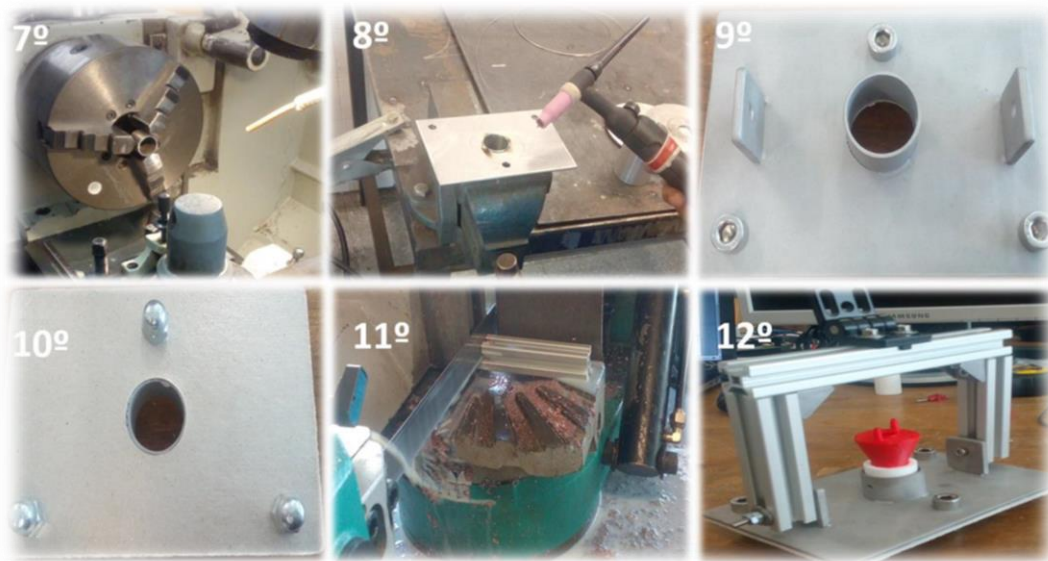
8º Processo de Soldadura TIG (*tungsten inert gas*) com intensidade 58 A e tensão 66,8 V. Utilizado para união dos apoios do perfil *Bosch* e da superfície cilíndrica com altura de 20 mm à base de aço 316L 149x110x3 mm;

9º Superfície soldada após ter sido sujeita a um processo de limpeza e granalhagem;

10º Colocação dos 2 dois filmes de mica de revestimento RS Pro;

11º Corte de 2 perfis *Bosch* 20x20x90 mm verticais e 1 perfil 20x20x149 mm horizontal;

12º Contagem total do *chassi*: base - perfis *Bosch* - dobradiça.



Seqüência dos processos de maquinagem do *chassi* da sonda (continuação).

## **Anexo B – Construção do *Chassi* para Inspeção do Cordão de Soldadura**

Seguidamente, descreve-se a sequência dos processos de maquinagem do *chassi* da sonda para inspeção do cordão de soldadura (os três primeiros processos de maquinagem são semelhantes aos realizados no *chassi* da sonda para inspeção do material de base):

- 1º Recolha dos materiais necessários para construção do *chassi*;
- 2º Marcação das dimensões idealizadas no *Solidworks* no suporte de aço 316L 149x110x3 mm;
- 3º Marcação e corte dos apoios onde assentam os perfis Bosch 20x20x90 mm com recurso a serra mecânica GBS 218 *Eco Autocut*;
- 4º Realização e representação de 4 furos de 8mm no aço 316L 149x110x3 mm;
- 5º Realização do corte da área retangular central 116x35x3 mm;
- 6º Processo de Soldadura TIG (*tungsten inert gas*) com intensidade de 58 A e tensão de 66,8 V. Utilizado para união dos apoios do perfil *Bosch* e da superfície retangular fixa;
- 7º Superfície soldada após ter sido sujeita a um processo de limpeza e granalhagem;
- 8º Colocação de dois filmes de mica de revestimento RS Pro no aço 316L 149x110x3 mm e um filme de mica em cada superfície retangular (uma das superfícies retangulares encontra-se soldada ao *chassi*, enquanto que a outra possui mobilidade regulada por dois parafusos M4 que permitem o seu ajuste à sonda);
- 9º Corte de 2 perfis *Bosch* 20x20x90 mm verticais e 1 perfil 20x20x189 mm horizontal;
- 10º Montagem total do *chassi* (exceto dobradiça): base - perfis *Bosch*.



Seqüência dos processos de maquinagem do *chassi* da sonda do cordão de soldadura.